



Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

RANCANG BANGUN TEKNIK JEMBATAN

JILID 4



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK



Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

RANCANG BANGUN TEKNIK JEMBATAN

JILID 4



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7227-81-2 (no. jil. lengkap
PDF)



9 786347 227812

ISBN 978-634-7227-81-2 (no. jil. lengkap)
ISBN 978-634-7227-88-1 (jil. 4 PDF)



9 786347 227881

RANCANG BANGUN TEKNIK JEMBATAN jilid 4

Penulis :

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

ISBN : 978-634-7227-81-2 (no.jil.lengkap PDF)
978-634-7227-88-1 (jil.4 PDF)

Editor :

Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom., M.Kom.

Penyunting :

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

Desain Sampul dan Tata Letak :

Irdha Yuniarto, S.Ds., M.Kom

Penebit :

Yayasan Prima Agus Teknik Bekerja sama dengan
Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM)

Anggota IKAPI No: 279 / ALB / JTE / 2023

Redaksi :

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :

Universitas STEKOM

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : info@stekom.ac.id

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara
apapun tanpa ijin dari penulis

KATA PENGANTAR

Kami panjatkan puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas karunia dan rahmat-Nya yang melimpah, sehingga buku ***Rancang Bangun Teknik Jembatan Jilid 4*** ini akhirnya dapat terwujud dan rampung. Buku *Rancang Bangun Teknik Jembatan Jilid 4* hadir sebagai kelanjutan komprehensif dari seri sebelumnya, yang menggali lebih dalam prinsip desain dan inovasi struktur jembatan dalam konteks global dan nasional. Jilid ini menyoroti adaptasi standar SNI terhadap tantangan seismik Indonesia, sambil membandingkan praktik terbaik dari Tiongkok, Eropa, Jepang, Rusia, hingga Amerika Serikat.

Isi buku mencakup fondasi desain Indonesia di Bab 1—termasuk pembebanan kombinasi, konsep tahan gempa, dan studi Jembatan Selat Sunda—diikuti eksplorasi praktik internasional di Bab 2-6. Bab 2 mengeksplorasi praktik Tiongkok seperti jembatan lengkung Zhaozhou, truss kontinu, baja high-strength, dan cable-stayed Hutong Bridge; Bab 3 mengulas Eurocode untuk bentang pendek-menengah-panjang seperti Millau Viaduct.

Bab 4 menelusuri evolusi Jepang dari batu-kayu-baja-beton hingga hibrida Akashi Kaikyō dengan base isolation; Bab 5 menyajikan Rusia dari Tsar Bridge hingga Russky cable-stayed adaptif Arktik; serta Bab 6 merangkum evolusi AS dari kayu kolonial, truss Eads, suspension Golden Gate, hingga AASHTO LRFD interstate. Bagi mahasiswa teknik sipil, insinyur, dan pembuat kebijakan, buku ini menjadi panduan praktis untuk rancang bangun berkelanjutan. Terima kasih kepada reviewer dan pembaca setia. Semoga berkontribusi pada infrastruktur jembatan Indonesia yang tangguh.

Bagi mahasiswa teknik sipil, insinyur, dan pembuat kebijakan, buku ini menjadi panduan praktis untuk rancang bangun berkelanjutan. Terima kasih kepada para reviewer dan pembaca setia seri ini. Semoga berkontribusi pada kemajuan infrastruktur jembatan Indonesia yang tangguh.

Semarang, Februari 2026

Penulis

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
BAB 1 DESAIN DAN TEKNIK RANCANG JEMBATAN DI INDONESIA.....	1
1.1 Standar Nasional Indonesia Untuk Jembatan	1
1.2 Struktur Dan Komponen SNI Jembatan.....	4
1.3 Kombinasi Pembebanan Pada Struktur Jembatan	35
1.4 Konsep Desain Tahan Gempa Pada Struktur Jembatan.....	41
1.5 Struktur Tahan Gempa Dan Strategi Mitigasi Berbasis Mekanisme.....	46
1.6 Detailing Daktilitas Untuk Mikromekanika	49
1.7 Mengenal Rancang Bangun Dan Tipologi Jembatan Di Indonesia	51
1.8 Jembatan-Jembatan Ikonik Di Indonesia.....	66
1.9 Analisis Jembatan Selat Sunda (JSS) Visi Megaproyek Prof. Sedyatmo.....	107
BAB 2 PRAKTIK DESAIN JEMBATAN DI TIONGKOK.....	117
2.1 Pendahuluan.....	117
2.2 Jembatan Balok	129
2.3 Jembatan Lengkung.....	136
2.4 Jembatan Rangka Kaku Tipe T Dan Kontinu	142
2.5 Jembatan Baja	147
2.6 Jembatan Kabel Gantung.....	149
2.7 Jembatan Gantung	154
BAB 3 PRAKTIK DESAIN DI EROPA	159
3.1 Pendahuluan.....	159
3.2. Desain Jembatan	165
3.3 Jembatan Bentang Pendek Dan Menengah	168
3.4. Jembatan Bentang Panjang	177
3.5. Proyek Besar	188
3.6 Jembatan Eropa Masa Depan.....	196
BAB 4 PRAKTIK DESAIN DI JEPANG.....	200
4.1 Desain Jembatan	200
4.2 Jembatan Batu	203
4.3 Jembatan Kayu.....	205
4.4 Jembatan Baja	208
4.5 Jembatan Beton.....	213
4.6 Jembatan Hibrida	216
4.7 Jembatan Bentang Panjang (Proyek Jembatan Honshu–Shikoku)	219
4.8 Teknologi Jembatan Baru Berkaitan Dengan Proyek Jembatan Khusus.....	227
BAB 5 PRAKTIK DESAIN DI RUSIA	234

5.1	Pendahuluan.....	234
5.2	Evolusi Sejarah.....	234
5.3	Perkembangan Modern.....	237
5.4	Teori Dan Metode Desain	241
5.5	Teknik Inspeksi Dan Pengujian.....	244
5.6	Jembatan Baja Dan Komposit.....	247
5.7	Jembatan Beton.....	253
5.8	Jembatan Kabel Gantung.....	262
BAB 6	EVOLUSI JEMBATAN DI AMERIKA SERIKAT	268
6.1	Pendahuluan.....	268
6.2	Jembatan Awal Di Amerika Serikat.....	268
6.3	Era Kanal	269
6.4	Era Kereta Api	272
6.5	Era Mobil	277
6.6	Era Jalan Raya Antar Negara Bagian	289
6.7	Era Jembatan Ikonik.....	294
DAFTAR PUSTAKA		298

BAB 1

DESAIN DAN TEKNIK RANCANG JEMBATAN DI INDONESIA

1.1 STANDAR NASIONAL INDONESIA UNTUK JEMBATAN

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan lebih dari 17.000 pulau dan kondisi geografis yang sangat beragam membutuhkan infrastruktur jembatan yang andal dan aman. Untuk memastikan setiap jembatan yang dibangun memenuhi standar keamanan, kualitas, dan daya tahan yang tinggi, pemerintah Indonesia melalui Badan Standardisasi Nasional (BSN) telah mengembangkan serangkaian Standar Nasional Indonesia (SNI) khusus untuk jembatan.

Standar-standar ini bukan sekadar dokumen teknis yang kaku, melainkan panduan komprehensif yang terus diperbarui mengikuti perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi konstruksi, data lalu lintas terkini, dan yang sangat penting adalah data kegempaan Indonesia yang terus diperbaharui seiring dengan bertambahnya pengetahuan tentang karakteristik gempa di Indonesia.

Mengapa SNI Jembatan Sangat Penting?

1. Keselamatan Publik

Bayangkan setiap hari jutaan kendaraan dari sepeda motor, mobil pribadi, truk pengangkut barang, hingga bus penumpang melintasi ribuan jembatan di seluruh Indonesia. Jika sebuah jembatan tidak didesain dan dibangun dengan standar yang tepat, konsekuensinya bisa sangat fatal. Kita masih mengingat tragedi runtuhnya Jembatan Kutai Kartanegara di Kalimantan Timur pada tahun 2011 yang menewaskan puluhan orang. Atau Jembatan Widang di Tuban, Jawa Timur yang ambruk pada tahun 2018. Kejadian-kejadian ini menunjukkan betapa pentingnya standar yang ketat dalam perencanaan dan konstruksi jembatan. SNI Jembatan hadir untuk memastikan bahwa setiap jembatan yang dibangun di Indonesia telah melalui perhitungan yang sangat teliti, menggunakan material yang berkualitas, dan dibangun dengan metode yang benar sehingga dapat melindungi keselamatan penggunaannya.

2. Kondisi Geografis Indonesia yang Unik

Indonesia memiliki tantangan geografis yang sangat kompleks dan berbeda dengan negara-negara lain. Pertama, Indonesia terletak di Cincin Api Pasifik (Ring of Fire) yang merupakan zona dengan aktivitas seismik atau gempa bumi yang sangat tinggi. Hampir setiap hari terjadi gempa di berbagai wilayah Indonesia, meskipun sebagian besar tidak terasa. Namun gempa-gempa besar seperti Gempa Aceh 2004, Gempa Yogyakarta 2006, Gempa Padang 2009, atau Gempa Palu 2018 menunjukkan bahwa Indonesia harus memiliki standar khusus untuk memastikan jembatan dapat bertahan saat terjadi gempa.

Kedua, Indonesia memiliki iklim tropis dengan curah hujan sangat tinggi. Banjir, tanah longsor, dan erosi adalah ancaman nyata bagi infrastruktur jembatan. Aliran sungai yang deras saat musim hujan dapat menggerus pondasi jembatan. Oleh karena itu, standar jembatan di Indonesia harus mempertimbangkan beban hidrolik dan gerusan yang jauh lebih besar dibandingkan negara dengan iklim sedang. Ketiga, Indonesia memiliki kondisi tanah yang



sangat beragam mulai dari tanah keras di daerah perbukitan, tanah lunak di daerah rawa-rawa, tanah gambut di Kalimantan dan Sumatera, hingga tanah vulkanik di sekitar gunung berapi. Setiap jenis tanah memerlukan pendekatan desain pondasi yang berbeda-beda.

Keempat, Indonesia memiliki jalur pelayaran yang sangat padat. Selat-selat seperti Selat Sunda, Selat Bali, atau Selat Madura dilalui ribuan kapal setiap harinya. Jembatan yang melintasi perairan ini harus memiliki clearance atau jarak bebas yang cukup tinggi agar tidak mengganggu jalur pelayaran. Dengan kondisi-kondisi unik ini, Indonesia tidak bisa begitu saja mengadopsi standar jembatan dari negara lain. Standar harus disesuaikan dengan kondisi lokal Indonesia, dan itulah mengapa SNI Jembatan terus dikembangkan dan diperbarui berdasarkan penelitian dan data terkini tentang kondisi Indonesia.

3. Perkembangan Teknologi dan Material

Perkembangan Teknologi dan Transformasi Material dalam Konstruksi Jembatan Modern, dinamika industri konstruksi jembatan saat ini tengah mengalami transformasi signifikan yang dipicu oleh akselerasi inovasi material dan metodologi pelaksanaan. Dalam aspek material, pergeseran dari penggunaan material konvensional menuju material berperforma tinggi menjadi fokus utama untuk mencapai efisiensi struktural. Implementasi beton mutu tinggi (*High-Performance Concrete*) dan baja berkekuatan tinggi memungkinkan perancangan struktur yang lebih langsing namun memiliki kapasitas dukung beban yang lebih besar. Selain itu, eksplorasi terhadap material inovatif seperti komposit serat (*Fiber Reinforced Polymer*) menawarkan solusi atas permasalahan degradasi struktural akibat korosi, yang sangat relevan dengan karakteristik lingkungan tropis dan pesisir di Indonesia.

Sejalan dengan evolusi material, kecanggihan metode konstruksi juga menjadi kunci dalam mengatasi tantangan geografis yang kompleks. Penggunaan metode balanced cantilever dan precast segmental construction telah merevolusi kecepatan dan presisi pembangunan jembatan, terutama di area dengan aksesibilitas terbatas atau pada proyek yang menuntut gangguan minimal terhadap lalu lintas di bawahnya. Lebih jauh lagi, pengembangan sistem cable-stayed memberikan fleksibilitas dalam mengakomodasi pembangunan jembatan bentang panjang yang efisien secara struktural sekaligus estetik secara arsitektural.

Namun, integrasi teknologi mutakhir ini menuntut kerangka regulasi yang adaptif namun tetap rigid dalam aspek keselamatan. Standar Nasional Indonesia (SNI) memegang peranan krusial sebagai instrumen filtrasi dan validasi terhadap teknologi baru. Sinkronisasi antara standar domestik dengan perkembangan global sangat diperlukan agar industri konstruksi nasional tetap kompetitif. Kendati demikian, aplikasi teknologi dan material baru tersebut wajib melalui proses pengujian laboratorium dan kajian teknis yang mendalam guna memastikan kompatibilitasnya terhadap kondisi geologis serta aktivitas seismik di Indonesia. Dengan demikian, moderasi antara inovasi teknologi dan kepatuhan terhadap standar keamanan struktural menjadi fundamen utama dalam mewujudkan infrastruktur jembatan yang tangguh dan berkelanjutan.

Metodologi Analisis Respons Struktur terhadap Beban Seismik

Dalam perencanaan jembatan yang tahan gempa, SNI 2833:2016 menetapkan kerangka kerja komprehensif mengenai prosedur analisis untuk mengevaluasi respons struktur terhadap getaran tanah. Pemilihan metode analisis sangat bergantung pada tingkat kompleksitas geometri, kepentingan fungsi jembatan, serta zona seismisitas lokasi pembangunan. Salah satu pendekatan fundamental yang diatur dalam standar tersebut adalah Metode Gaya Lateral Ekuivalen (*Equivalent Static Method*).

Metode Gaya Lateral Ekuivalen merupakan pendekatan analisis linier yang paling sederhana, di mana beban gempa dinamis dimodelkan sebagai gaya horizontal statis yang bekerja pada pusat massa struktur. Prinsip utama metode ini adalah menyederhanakan perilaku dinamik jembatan menjadi satu pola gaya lateral yang dianggap mewakili respons puncak struktur saat terjadi gempa. Besar gaya geser dasar (*base shear*) ditentukan berdasarkan perkalian antara koefisien respons seismik dengan berat total struktur.

Meskipun menawarkan efisiensi dalam perhitungan, penggunaan metode ini memiliki batasan ketat. Metode ini umumnya hanya diizinkan untuk jembatan dengan konfigurasi yang reguler atau simetris, di mana distribusi massa dan kekakuan strukturnya cukup seragam sehingga tidak menimbulkan efek torsi yang kompleks. Pada struktur jembatan yang memiliki bentang yang sangat panjang, pilar dengan ketinggian yang bervariasi secara ekstrem, atau berada di wilayah dengan risiko kegempaan sangat tinggi, metode ini dianggap kurang memadai. Dalam kondisi tersebut, perencana diwajibkan menggunakan metode yang lebih canggih, seperti Analisis Spektrum Respons (*Response Spectrum Analysis*) atau Analisis Riwayat Waktu (*Time History Analysis*), guna menangkap karakteristik dinamis struktur secara lebih akurat dan menyeluruh.

4. Beban Lalu Lintas yang Terus Meningkat

Adaptasi Struktural Terhadap Eskalasi Beban Lalu Lintas dan Dinamika Transportasi Modern. Eskalasi beban lalu lintas di Indonesia merupakan konsekuensi logis dari pertumbuhan ekonomi nasional yang berimplikasi pada peningkatan volume distribusi logistik dan kapasitas kendaraan. Secara historis, infrastruktur jembatan yang dibangun pada dekade 1980-an didesain dengan asumsi beban gandar standar yang jauh lebih rendah, yakni di kisaran 10 ton. Namun, realitas transportasi kontemporer yang didominasi oleh kendaraan berat jenis heavy-duty truck, trailer, dan peti kemas telah meningkatkan beban gandar secara signifikan hingga mencapai 20 ton atau lebih. Kesenjangan antara kapasitas desain lama dengan beban aktual ini menciptakan risiko kelelahan struktur (*structural fatigue*) dan degradasi dini, yang pada tingkat ekstrem dapat memicu kegagalan sistem jembatan secara katastrofik.

Sebagai langkah mitigasi, Standar Nasional Indonesia (SNI) terbaru melakukan recalibrasi parameter pembebanan dengan mengintegrasikan data lapangan yang bersifat aktual dan empiris. Pengumpulan data tidak lagi hanya mengandalkan survei manual, melainkan telah memanfaatkan teknologi *Weigh In Motion* (WIM). Sistem ini memungkinkan pengukuran berat kendaraan secara real-time tanpa mengganggu arus lalu lintas, sehingga diperoleh profil beban yang lebih akurat untuk pemodelan statistik dalam desain jembatan.

Implementasi standar pembebanan yang lebih progresif dalam SNI memastikan bahwa jembatan baru memiliki margin keamanan yang memadai terhadap fenomena overloading. Di sisi lain, terhadap aset jembatan eksisting, pemutakhiran data beban ini menjadi landasan krusial bagi otoritas terkait untuk melakukan evaluasi struktural, program perkuatan (*retrofitting*), hingga penggantian struktur jembatan yang sudah tidak memenuhi kriteria kelayakan layan (*serviceability*). Dengan demikian, sinkronisasi antara standar desain dan realitas beban lalu lintas menjadi pilar utama dalam menjamin konektivitas nasional yang aman dan berkelanjutan.

1.2 STRUKTUR DAN KOMPONEN SNI JEMBATAN

Standar Nasional Indonesia untuk Jembatan terdiri dari beberapa dokumen yang saling terkait dan melengkapi. Setiap dokumen mengatur aspek-aspek tertentu dari perencanaan, desain, dan konstruksi jembatan. Berikut adalah penjelasan tentang SNI utama untuk jembatan:

A. SNI 1725:2016 Tentang “Pembebanan untuk Jembatan: Apa yang Diatur?

SNI 1725:2016 adalah standar yang mengatur tentang berbagai jenis beban yang harus diperhitungkan dalam merencanakan sebuah jembatan. Bayangkan sebuah jembatan seperti seorang atlet yang harus siap menghadapi berbagai tantangan. SNI ini memastikan bahwa "atlet" kita (jembatan) dilatih untuk menghadapi semua "tantangan" (beban) yang mungkin dihadapinya selama masa pakainya.

Karakteristik dan Aplikasi Beban Rencana pada Jembatan

Dalam metodologi perancangan jembatan, parameter beban lalu lintas dikategorikan menjadi dua model utama, yaitu beban lajur "D" dan beban truk "T". Keduanya memiliki fungsi simulasi yang berbeda dalam merepresentasikan interaksi kendaraan terhadap struktur:

- **Beban Lajur "D":** Model ini berfungsi mensimulasikan pengaruh iring-iringan kendaraan secara kontinu yang menempati seluruh lebar jalur lalu lintas. Besarannya bersifat variabel karena sangat bergantung pada dimensi lebar jalur kendaraan yang direncanakan.
- **Bebas Truk "T":** Model ini merepresentasikan beban terpusat dari kendaraan berat tunggal dengan konfigurasi tiga gandar. Secara teknis, setiap gandar terdiri atas dua bidang kontak yang mensimulasikan distribusi tekanan roda kendaraan berat. Dalam analisisnya, hanya satu unit truk "T" yang diaplikasikan per lajur rencana pada posisi paling kritis.

Aplikasi Strategis dalam Perencanaan, pemilihan jenis beban sangat bergantung pada karakteristik bentang struktur. Secara umum, beban "D" menjadi parameter kritis (penentu) dalam kalkulasi jembatan dengan bentang menengah hingga panjang. Sebaliknya, beban "T" digunakan secara spesifik untuk mengevaluasi kekuatan bentang pendek serta analisis kekuatan pelat lantai kendaraan. Selain itu, nilai nominal beban "D" bersifat fleksibel, di mana regulasi memungkinkan adanya penyesuaian (peningkatan atau penurunan nilai) berdasarkan kondisi batas tertentu dalam perencanaan.

Penentuan Lajur Lalu Lintas Rencana

Dalam perancangan struktur jembatan, penentuan jumlah lajur lalu lintas merupakan tahapan krusial yang mendasari distribusi beban rencana. Secara teknis, jumlah lajur lalu lintas rencana diperoleh melalui pembagian lebar bersih jembatan (w) dengan standar lebar lajur rencana sebesar 2750 mm. Nilai yang diambil adalah angka bulat terkecil (integer) dari hasil pembagian tersebut. Pertimbangan geometri dan groyeksi masa depan. Penyusunan lajur rencana harus dilakukan secara paralel terhadap sumbu memanjang jembatan. Namun, perencana tidak hanya terpaku pada kondisi eksisting; analisis harus mempertimbangkan fleksibilitas desain terhadap potensi perubahan fungsi bagian jembatan di masa depan yang dapat memengaruhi lebar bersih efektif.

Standar Jumlah Lajur Maksimum

Untuk memastikan konsistensi dalam perhitungan, jumlah maksimum lajur lalu lintas yang diizinkan untuk berbagai variasi lebar jembatan telah distandarisasi dan dapat dirujuk pada Tabel 1.1 di bawah ini.

Tabel 1.1 jumlah lajur lalu lintas rencana

Tipe Jembatan (1)	Lebar Bersih Jembatan (2) (mm)	Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana (n)
Satu Lajur	$3000 \leq w < 5250$	1
Dua Arah, tanpa Median	$5250 \leq w < 7500$	2
	$7500 \leq w < 10,000$	3
	$10,000 \leq w < 12,500$	4
	$12,500 \leq w < 15,250$	5
	$w \geq 15,250$	6
Dua Arah, dengan Median	$5500 \leq w \leq 8000$	2
	$8250 \leq w \leq 10,750$	3
	$11,000 \leq w \leq 13,500$	4
	$13,750 \leq w \leq 16,250$	5
	$w \geq 16,500$	6
Catatan (1): Untuk jembatan tipe lain, jumlah lajur lalu lintas rencana harus ditentukan oleh instansi yang berwenang.		
Catatan (2): Lebar jalur kendaraan adalah jarak minimum antara kerb atau rintangan untuk satu arah atau jarak antara kerb/rintangan/median dan median untuk banyak arah.		

Penentuan jumlah dan lebar lajur rencana sangat bergantung pada interval lebar bersih jembatan sebagaimana diatur dalam Tabel 1.1. Untuk jembatan dengan lebar bersih antara 3000 mm hingga 5000 mm, struktur diklasifikasikan memiliki satu lajur rencana dengan lebar jalur yang disesuaikan sepenuhnya terhadap lebar bersih yang tersedia.

Pada kondisi di mana jembatan memiliki lebar bersih antara 5250 mm sampai 7500 mm, perencanaan harus mengakomodasi dua lajur rencana, di mana lebar masing-masing lajur diperoleh dari hasil pembagian rata lebar bersih jembatan. Sementara itu, untuk bentang lebar bersih antara 7750 mm hingga 10000 mm, jembatan diproyeksikan memiliki tiga lajur rencana dengan lebar tiap lajur yang ditentukan secara proporsional melalui pembagian tiga dari total lebar bersih. Prinsip pembagian ini memastikan bahwa setiap lajur memiliki dimensi

yang simetris dan mampu menampung beban lalu lintas secara optimal sesuai dengan klasifikasi geometri jembatan.

Jenis-Jenis Beban yang Diatur

1. Beban Mati (Dead Load)

Beban mati adalah berat dari struktur jembatan itu sendiri yang bersifat permanen. Ini termasuk:

- ☑ Berat struktur utama jembatan (balok, pelat, kolom, pondasi)
- ☑ Berat aspal atau perkerasan jalan di atas jembatan
- ☑ Berat trotoar dan pagar pengaman
- ☑ Berat sistem utilitas seperti pipa air, kabel listrik, atau penerangan jembatan

Beban mati ini konstan dan tidak berubah sepanjang umur jembatan. Perhitungan beban mati relatif sederhana karena kita bisa menghitung volume setiap komponen dan mengalikannya dengan berat jenis material. Misalnya berat jenis beton bertulang adalah sekitar 2.500 kg/m^3 , berat jenis aspal sekitar 2.200 kg/m^3 , dan seterusnya.

2. Beban Hidup (Live Load)

Beban hidup adalah beban yang berubah-ubah dan bersifat sementara, terutama beban dari kendaraan yang melintas. SNI 1725:2016 menggunakan beberapa model beban hidup:

A. Beban Lajur "D"

Beban lajur "D" adalah beban standar yang diasumsikan merata di sepanjang lajur kendaraan. Beban ini dirancang untuk mewakili kondisi lalu lintas yang padat di mana banyak kendaraan dengan berbagai ukuran berjejer di sepanjang jembatan. Beban lajur "D" terdiri dari dua komponen:

- ✓ Beban Terbagi Rata (BTR): Beban yang disebarkan secara merata sepanjang lajur, nilainya adalah 9 kPa atau 9.000 N/m^2 atau setara dengan sekitar 900 kg/m^2
- ✓ Beban Garis Terpusat (BGT): Beban yang terkonsentrasi pada satu garis melintang jembatan, nilainya adalah 49 kN/m atau 49.000 N per meter lebar lajur

Kombinasi BTR dan BGT ini dimaksudkan untuk mensimulasikan efek dari kendaraan-kendaraan yang berat seperti truk dan bus yang berjejer di sepanjang jembatan. Faktor beban yang digunakan untuk beban lajur "D" seperti pada tabel 1.2.

Tabel 1.2 faktor beban untuk beban lajur "D"

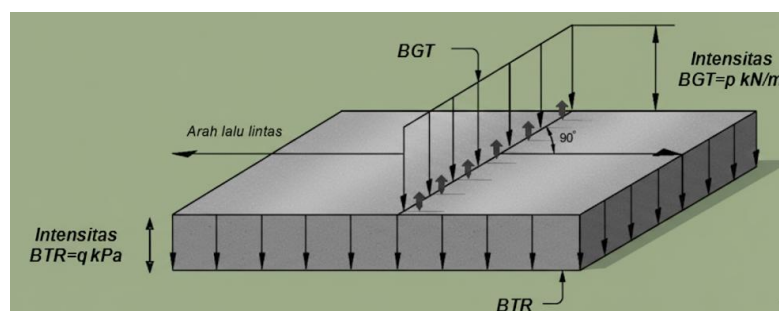
Tipe beban	Jembatan	Faktor beban (γ_{TD})	
		Keadaan Batas Layan γ_{TD}^S	Keadaan Batas Ultimit γ_{TD}^U
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

Intensitas Beban Terbagi Rata (BTR)

Komponen pertama dari beban lajur "D" adalah Beban Terbagi Rata (BTR), yang memiliki intensitas sebesar q dalam satuan kilopascal (kPa). Besaran intensitas q ini tidak bernilai konstan, melainkan bersifat fungsi terhadap panjang total bentang yang

dibebani (L). Penentuan nilai q yang bervariasi berdasarkan panjang bentang bertujuan untuk memodelkan distribusi beban kendaraan secara lebih realistis, di mana kepadatan kendaraan pada bentang yang lebih panjang cenderung berbeda dibandingkan dengan bentang yang lebih pendek. Oleh karena itu, akurasi dalam menetapkan panjang total yang dibebani (L) menjadi faktor krusial dalam menghitung besarnya tekanan merata yang bekerja pada struktur jembatan.

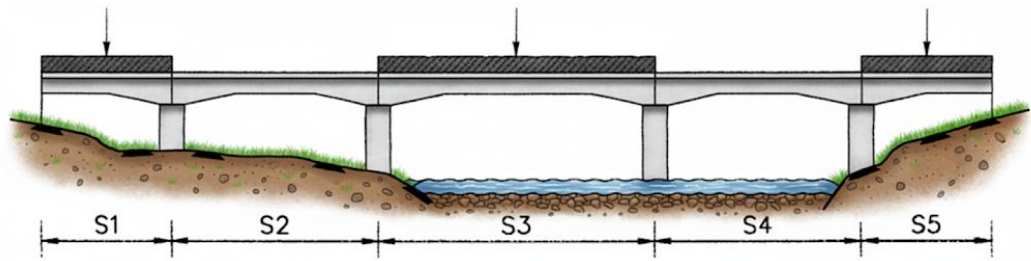
Selain Beban Terbagi Rata (BTR), komponen beban lajur "D" lainnya adalah Beban Garis Terpusat (BGT) yang memiliki intensitas konstan sebesar p adalah 49,0 Kn/m. Dalam pemodelan struktur, BGT diaplikasikan secara tegak lurus terhadap garis sumbu memanjang jembatan guna mensimulasikan beban gandar kendaraan yang lebih terkonsentrasi. Khusus pada analisis jembatan dengan sistem bentang menerus (*continuous bridge*), diperlukan penempatan BGT kedua yang memiliki intensitas identik untuk mengevaluasi kondisi kritis berupa momen lentur negatif maksimum. Penempatan beban kedua ini dikonfigurasi secara melintang pada bentang yang berbeda, sehingga memberikan pengaruh ekuivalen terhadap efek beban hidup paling ekstrem yang mungkin terjadi pada tumpuan interior jembatan.



Gambar 1.1 beban lajur "D"

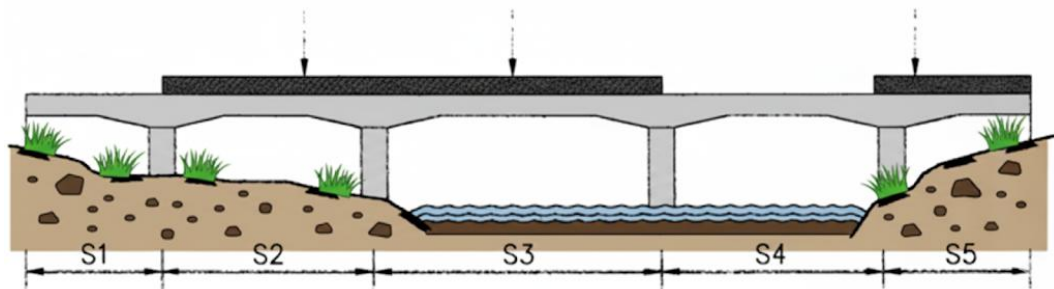
Distribusi dan Konfigurasi Pembebanan Lajur "D"

Implementasi beban "D" dalam analisis struktur harus dikonfigurasi sedemikian rupa pada arah melintang jembatan guna menghasilkan respons momen maksimum yang paling kritis. Pengaturan posisi komponen Beban Terbagi Rata (BTR) dan Beban Garis Terpusat (BGT) secara simultan bertujuan untuk mensimulasi kondisi pembebanan terburuk yang mungkin diterima oleh elemen gelagar maupun sistem lantai jembatan. Ilustrasi mengenai tata letak komponen-komponen tersebut dalam arah melintang dapat dipelajari lebih lanjut melalui Gambar 1.1. Selain aspek melintang, perencana juga harus mengevaluasi variasi penempatan beban dalam arah memanjang jembatan guna menentukan garis pengaruh yang paling menentukan, sebagaimana ditunjukkan secara mendetail pada skema pemodelan di Gambar 1.2.



a. Momen Lentur Positif; Bentang 1,3,5

untuk momen lentur maksimum di bentang 1: tempatkan BGT di bentang 1 (bentang 5 serupa) ambil L = Pengaruh terburuk dari S_1 ; $S_1 + S_3$ atau $S_1 + S_3 + S_5$ untuk momen lentur maksimum di bentang 3 tempatkan BGT di bentang 3 ambil L = pengaruh terburuk dari S_3 ; $S_1 + S_3$ atau $S_3 + S_5$



b. Momen Lentur Positif; Bentang 2,4

untuk momen lentur maksimum di pilar 2; tempatkan BGT di bentang 2 dan 3; ambil L = pengaruh terburuk dari $S_2 + S_3$ atau $S_3 + S_3 + S_5$



c. Momen Lentur Negatif pada Pilar.

Gambar 1.2 Alternatif Penempatan Beban "D" dalam arah memanjang

Respons Struktur terhadap Beban Lajur "D"

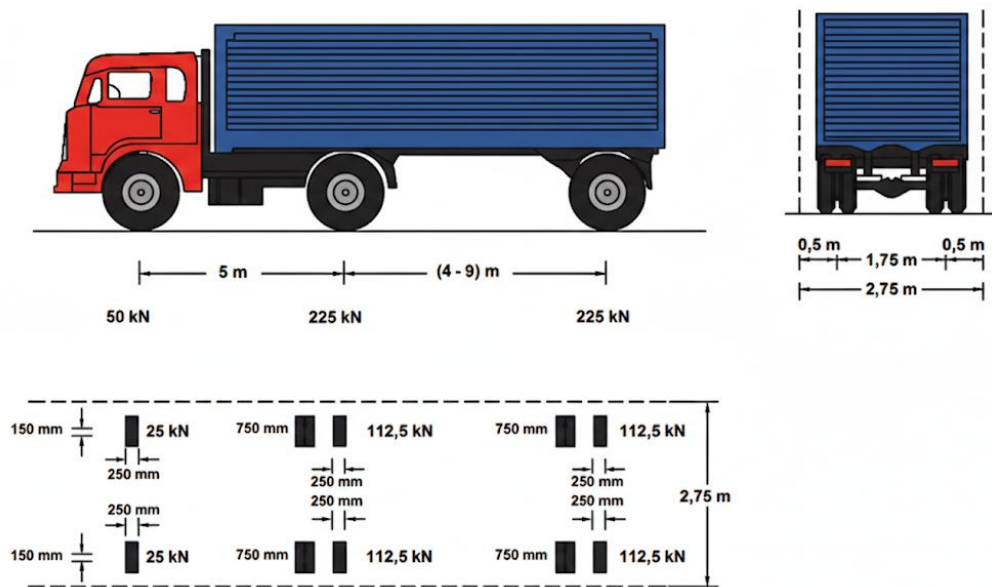
Analisis distribusi beban hidup dalam arah melintang merupakan tahapan esensial untuk memproyeksikan besaran gaya dalam, khususnya momen lentur dan gaya geser, yang bekerja secara longitudinal pada gelagar utama jembatan. Dalam pemodelan ini, beban lajur "D" diaplikasikan dengan intensitas penuh (100%) sesuai dengan panjang bentang terbebani yang relevan. Implementasi beban tersebut harus mencakup seluruh lebar efektif jalur kendaraan, yang secara teknis didefinisikan sebagai lebar bersih di antara elemen pembatas struktur. Dengan demikian, area non-struktural bagi kendaraan seperti parapet, kerb, dan trotoar harus dieksklusi dari luasan distribusi beban "D" guna memastikan akurasi perhitungan kapasitas dukung gelagar jembatan.

B. Beban Truk "T"

Selain beban "D", terdapat beban lalu lintas lainnya yaitu beban truk "T". Beban truk "T" tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban "D". Beban truk dapat digunakan untuk perhitungan struktur lantai. Adapun faktor beban untuk beban "T" seperti terlihat pada Tabel

Tabel 1.3 Faktor beban untuk beban "T"

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban	
		Keadaan Batas Layan γ_{TT}^S	Keadaan Batas Ultimit γ_{TT}^U
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00



Gambar 1.3 Pembebanan Truk "T" (500kN)

Model pembebanan truk "T" dalam perencanaan struktur jembatan direpresentasikan oleh satu unit kendaraan truk semi-trailer dengan konfigurasi berat gandar spesifik, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.3 Secara teknis, beban dari setiap gandar tidak bekerja sebagai beban titik tunggal, melainkan didistribusikan menjadi dua bidang kontak beban merata dengan intensitas yang sama besar. Simulasi ini bertujuan untuk merepresentasikan interaksi nyata antara roda kendaraan berat dengan permukaan lantai jembatan. Guna menangkap kondisi pembebanan yang paling kritis terhadap respons struktur, jarak antara kedua gandar belakang didesain bersifat variabel (dapat disesuaikan) dalam rentang 4,0 meter hingga 9,0 meter. Fleksibilitas pengaturan jarak gandar ini memungkinkan perencana untuk menentukan posisi yang menghasilkan pengaruh gaya dalam atau momen maksimum dalam arah memanjang jembatan. Beban Truk "T" adalah beban dari satu atau beberapa truk berat yang diasumsikan melintas di jembatan. SNI mendefinisikan konfigurasi truk standar dengan spesifikasi:

- Berat total: 500 kN atau sekitar 50 ton
- Konfigurasi gandar: Truk dengan 3 gandar (gandar depan dan 2 gandar belakang)
- Beban gandar depan: 50 kN (5 ton)
- Beban masing-masing gandar belakang: 225 kN (22,5 ton)
- Jarak antar gandar: 4 meter antara gandar depan dengan gandar belakang pertama, dan 9 meter antara kedua gandar belakang
- Lebar jejak roda: Setiap gandar memiliki 2 roda dengan lebar kontak 50 cm dan jarak antar roda 1,8 meter

Beban truk ini harus ditempatkan pada posisi yang menghasilkan momen dan gaya geser maksimum pada struktur jembatan.

Konfigurasi Transversal dan Distribusi Beban Truk "T"

Dalam analisis pembebanan, penempatan truk "T" dalam arah melintang diatur berdasarkan ketentuan jumlah lajur rencana tanpa dipengaruhi oleh total panjang jembatan maupun konfigurasi bentangnya. Secara standar, satu lajur lalu lintas rencana hanya diokupasi oleh satu unit truk "T". Namun, pada kasus jembatan dengan bentang yang sangat panjang, regulasi mengizinkan penempatan lebih dari satu unit truk dalam satu lajur guna mensimulasikan kondisi beban yang lebih ekstrem.

Posisi truk tersebut harus dikonfigurasi tepat berada di sumbu tengah lajur lalu lintas rencana, sesuai dengan representasi teknis pada Gambar 1.3. Meskipun jumlah lajur lalu lintas maksimum telah ditetapkan dalam Tabel 1.1, perencana diberikan diskresi untuk menggunakan jumlah lajur yang lebih sedikit apabila skenario tersebut menghasilkan respons struktur atau pengaruh gaya dalam yang lebih signifikan. Penting untuk dicatat bahwa perhitungan harus selalu menggunakan nilai bulat dalam menentukan jumlah lajur lalu lintas rencana. Selain itu, guna mencapai kondisi pembebanan paling kritis, lajur rencana tersebut bersifat fleksibel dan dapat diposisikan di titik mana pun secara melintang di sepanjang lebar jalur kendaraan jembatan.

Ketentuan Faktor Kepadatan Lajur (Multiple Presence Factors)

Penerapan faktor kepadatan lajur bertujuan untuk merepresentasikan probabilitas statistik terisinya beberapa lajur jembatan secara simultan oleh beban kendaraan. Namun, terdapat pengecualian krusial di mana ketentuan ini tidak berlaku pada analisis keadaan batas fatik dan fraktur. Pada evaluasi tersebut, perhitungan hanya didasarkan pada satu lajur rencana tanpa mempertimbangkan jumlah total lajur yang tersedia.

Prosedur Reduksi dan Metodologi Analisis: Dalam proses perhitungan, perencana harus memperhatikan korelasi antara metode analisis yang dipilih dengan faktor pengali beban:

- Jika menggunakan faktor distribusi beban kendaraan untuk satu lajur tunggal, maka pengaruh beban truk wajib direduksi dengan faktor 1,3.
- Sebaliknya, apabila perencana menggunakan metode *lever rule* atau prinsip statika lainnya untuk menentukan distribusi beban, maka reduksi beban truk tersebut tidak perlu diaplikasikan.

Tabel 1.4 Faktor Kepadatan Lajur (m)

Jumlah lajur yang dibebani	faktor kepadatan lajur
1	1,2
≥ 2	1

Kombinasi Pembebanan dan Kepadatan Lajur: Respons beban hidup harus dievaluasi berdasarkan setiap kombinasi kemungkinan jumlah lajur yang terisi. Pengaruh total diperoleh dengan mengalikan beban hidup dengan faktor kepadatan lajur yang sesuai (sebagaimana tercantum dalam Tabel 1.4). Standar ini digunakan untuk menganalisis kondisi kritis, baik saat hanya satu lajur yang terisi maupun saat tiga atau lebih lajur terbebani secara bersamaan.

Integrasi Beban Pejalan Kaki dan Balok Eksterior: Dalam skenario kombinasi pembebanan yang melibatkan beban pejalan kaki (berdasarkan Pasal 8.9) bersamaan dengan beban kendaraan, beban pejalan kaki tersebut harus dianggap menempati salah satu lajur rencana. Perlu ditegaskan bahwa faktor-faktor dalam Tabel 1.4 tidak diperkenankan untuk menetapkan faktor distribusi beban kendaraan secara langsung. Khusus untuk menentukan distribusi beban yang bekerja pada balok eksterior (gelagar pinggir), perencana diinstruksikan untuk menggunakan metode *lever rule* guna memastikan akurasi transfer beban lateral.

Pemodelan Bidang Kontak Roda Kendaraan

Dalam analisis pembebanan jembatan dan struktur terkait, interaksi antara roda kendaraan dengan permukaan lantai dimodelkan melalui bidang kontak berbentuk persegi panjang. Dimensi standar yang ditetapkan untuk bidang kontak ini memiliki panjang 750 mm dan lebar 250 mm. Dalam pemodelan numerik, tekanan ban diasumsikan terdistribusi secara seragam (*uniformly distributed load*) di seluruh luasan bidang kontak tersebut guna menyederhanakan perhitungan intensitas beban yang ditransfer ke elemen struktur di bawahnya.

Mekanisme Distribusi Beban Roda pada Lapisan Timbunan

Penyaluran beban roda menuju struktur gorong-gorong sangat dipengaruhi oleh ketebalan lapisan tanah timbunan (*fill*) di atasnya. Mekanisme distribusi ini diklasifikasikan menjadi dua kondisi utama:

1. Timbunan Dangkal (< 600 mm): Beban roda dianggap langsung didistribusikan pada pelat atap gorong-gorong tanpa reduksi signifikan dari lapisan tanah.
2. Timbunan Dalam (≥ 600 mm): Beban roda diasumsikan menyebar secara merata seiring bertambahnya kedalaman. Luas bidang kontak bertambah besar mengikuti kemiringan distribusi sebesar 1,15 kali kedalaman timbunan ($1.15 \times H$). Dalam kondisi ini, faktor kepadatan lajur tetap harus diperhitungkan sebagai parameter pengali.



Interaksi Beban Tumpang Tindih (*Overlap*)

Apabila pengaruh dari beberapa roda menghasilkan area distribusi yang saling tumpang tindih, besarnya beban terdistribusi dihitung berdasarkan total beban gandar dibagi dengan total luas area yang terdampak overlap tersebut.

Ketentuan Pengabaian Beban Hidup

Beban hidup pada gorong-gorong dapat diabaikan apabila memenuhi kriteria kedalaman timbunan tertentu, yaitu:

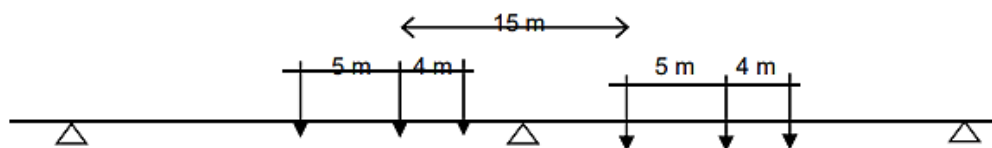
- **Bentang Tunggal:** Ketebalan timbunan melampaui 2400 mm dan lebih besar dari panjang bentang gorong-gorong.
- **Bentang Menerus:** Ketebalan timbunan lebih besar daripada jarak bersih antara dinding terluar struktur.

Perencana wajib membandingkan hasil perhitungan momen akibat beban hidup dan beban kejut (impak). Jika analisis melalui metode distribusi tanah menghasilkan momen yang lebih besar dibandingkan dengan metode lebar strip ekuivalen, maka nilai momen terbesar tersebut yang harus digunakan sebagai dasar perancangan struktur. Tentu, mari kita susun materi mengenai aplikasi beban hidup tersebut dalam format paragraf yang mengalir secara naratif. Format ini akan memudahkan mahasiswa memahami alur berpikir seorang perencana jembatan tanpa terputus oleh daftar poin.

Penerapan Beban Hidup Kendaraan dalam Analisis Struktur

Dalam menetapkan parameter desain jembatan, perencana harus menentukan respons struktur yang paling kritis dengan membandingkan beberapa skenario pembebanan. Untuk perhitungan momen positif, nilai desain diambil dari hasil terbesar antara pengaruh beban truk tunggal "T" atau kombinasi beban lajur "D" (yang terdiri atas BTR dan BGT). Kedua skenario tersebut wajib dikalikan dengan Faktor Beban Dinamis (FBD) untuk mengakomodasi efek getaran dan tumbukan kendaraan saat melintasi jembatan. Pengambilan nilai maksimum ini memastikan bahwa struktur tetap aman meskipun terjadi variasi jenis kendaraan yang melintas, baik itu kendaraan berat tunggal maupun iring-iringan kendaraan yang padat.

Sementara itu, untuk analisis momen negatif yang umumnya terjadi pada sistem jembatan bentang menerus, prosedur pembebanan menjadi lebih kompleks. Dalam kondisi ini, perencana harus menyimulasikan dua unit truk "T" yang diletakkan pada dua bentang yang berdampingan guna menghasilkan efek tekan dan tarik yang paling ekstrem pada tumpuan. Konfigurasi jarak yang digunakan adalah 15 meter antara gandar tengah truk terdepan dengan gandar depan truk yang berada di belakangnya, dengan jarak internal antar gandar belakang tetap sebesar 4 meter. Pengaturan spesifik ini, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 1.4, bertujuan untuk menguji ketahanan struktur terhadap titik lelah dan tegangan puncak pada area di atas pilar jembatan.



Gambar 1.4 Penempatan Beban Truk untuk Kondisi Momen Negatif Maksimum

Optimalisasi Posisi Beban Kendaraan untuk Respons Maksimum

Dalam perencanaan struktur jembatan, perencana harus bersifat selektif dalam menerapkan beban; gandar-gandar yang secara analitis tidak memberikan kontribusi terhadap peningkatan gaya total atau tidak memperburuk kondisi struktur harus diabaikan. Beban kendaraan diaplikasikan pada masing-masing lajur rencana dengan penempatan posisi yang strategis guna mengevaluasi pengaruh gaya dalam yang paling ekstrem. Secara spesifik, dalam arah melintang, sumbu roda truk harus diposisikan dengan batasan jarak tertentu guna menjamin keamanan elemen struktur. Untuk analisis pelat kantilever, sumbu roda ditempatkan sedekat mungkin dengan tepi luar, yaitu dengan jarak minimum 250 mm dari garis parapet atau pagar pengaman (*railing*). Sebaliknya, untuk perencanaan komponen struktur lainnya, sumbu roda truk diposisikan dengan jarak aman minimal 1000 mm dari masing-masing sumbu terluar roda untuk memastikan distribusi beban yang realistis pada sistem gelagar.

Lebih lanjut, dalam memodelkan beban hidup di sepanjang bentang jembatan, perencana harus memastikan bahwa seluruh panjang lajur rencana atau bagian-bagian tertentu dari panjang lajur tersebut yang dianggap kritis terisi oleh beban terdistribusi "D". Prinsip ini menuntut ketelitian dalam menentukan "panjang terbebani" guna menghasilkan momen atau geser maksimum pada titik-titik tinjauan tertentu. Kecuali terdapat ketentuan khusus yang mengatur pengecualian, penggunaan beban "D" ini menjadi standar utama dalam mensimulasikan kepadatan lalu lintas kontinu yang akan berinteraksi dengan beban terpusat dari kendaraan berat.

Lendutan dan Perancangan Pelat Lantai Jembatan

Dalam menjamin kenyamanan pengguna dan kekakuan struktur, jembatan harus memenuhi kriteria lendutan izin yang ditetapkan oleh pemilik pekerjaan. Penentuan lendutan maksimum akibat beban hidup dilakukan dengan membandingkan dua kondisi pembebanan, yaitu lendutan yang dihasilkan oleh satu unit truk rencana atau lendutan akibat Beban Terbagi Rata (BTR). Perencana wajib mengambil nilai lendutan terbesar di antara kedua skenario tersebut sebagai dasar evaluasi kekuatan dan layanan jembatan.

Khusus untuk perancangan pelat lantai kendaraan, sistem lantai, serta pelat atas gorong-gorong, terdapat ketentuan pembebanan spesifik yang bergantung pada metode analisis yang digunakan. Apabila perencana menggunakan metode strip, konfigurasi beban ditentukan oleh arah bentang pelat terhadap arus lalu lintas. Pada pelat yang membentang arah melintang (tegak lurus arus lalu lintas), hanya satu gandar truk yang diperhitungkan untuk menghitung momen dan geser. Namun, jika pelat

membentang arah memanjang (searah arus lalu lintas), ketentuannya terbagi berdasarkan dimensi bentang: jembatan beton tipe pelat atau gorong-gorong dengan bentang di bawah 4500 mm cukup menggunakan satu gandar truk, sedangkan untuk bentang yang lebih besar, seluruh komponen beban hidup harus ditinjau secara komprehensif.

Bagi perencana yang menerapkan metode analisis yang lebih rinci (*refined methods*), prinsip serupa tetap berlaku di mana arah bentang menentukan jumlah gandar yang ditinjau. Dalam seluruh pemodelan ini, beban roda pada setiap gandar diasumsikan terdistribusi secara merata dan sama besar. Penting untuk dicatat bahwa untuk perencanaan pelat lantai, gaya tambahan akibat efek sentrifugal maupun gaya pengereman tidak perlu dipertimbangkan dalam perhitungan beban gandar.

Terakhir, terdapat ketentuan khusus untuk pelat kantilever dengan bentang kurang dari 1800 mm (diukur dari sumbu gelagar eksterior ke tepi dalam parapet). Pada kondisi ini, beban roda tunggal dapat disederhanakan menjadi beban garis longitudinal dengan intensitas sebesar 17 kN/m yang diposisikan 250 mm dari tepi dalam parapet. Selain beban vertikal tersebut, perencana juga harus mengintegrasikan beban horizontal yang timbul akibat potensi tumbukan kendaraan pada sistem pagar pengaman atau parapet sesuai dengan regulasi yang berlaku.

C. Beban Pejalan Kaki

Jika jembatan dilengkapi dengan trotoar, maka harus diperhitungkan beban dari pejalan kaki. SNI menetapkan beban pejalan kaki sebesar 5 kPa atau 500 kg/m² untuk trotoar yang lebarnya kurang dari 0,6 meter, dan 4 kPa atau 400 kg/m² untuk trotoar yang lebih lebar. Beban ini diasumsikan merata di seluruh permukaan trotoar dan mewakili kondisi trotoar yang dipenuhi pejalan kaki yang berdesak-desakan.

3. Beban Lingkungan

A. Beban Gempa

Indonesia terletak di zona seismik yang sangat aktif, sehingga beban gempa adalah salah satu beban paling kritis yang harus diperhitungkan. SNI 1725:2016 bekerja sama dengan SNI 2833:2016 yang khusus mengatur tentang desain jembatan terhadap beban gempa.

Beban gempa pada jembatan diperhitungkan berdasarkan beberapa faktor:

- **Lokasi Geografis:** Indonesia dibagi menjadi zona-zona gempa berdasarkan tingkat aktivitas seismiknya. Wilayah seperti Sumatera bagian barat, Jawa bagian selatan, Nusa Tenggara, dan Papua memiliki tingkat kegempaan yang sangat tinggi, sementara wilayah seperti Kalimantan memiliki tingkat kegempaan yang relatif rendah.
- **Percepatan Tanah:** Peta gempa Indonesia terbaru (2017) menyediakan data tentang percepatan tanah maksimum yang mungkin terjadi di setiap wilayah dengan periode ulang tertentu (biasanya 500 atau 1000 tahun).



- **Jenis Tanah:** Respons struktur terhadap gempa sangat dipengaruhi oleh jenis tanah di lokasi jembatan. Tanah lunak akan memperbesar getaran gempa (amplifikasi), sementara tanah keras relatif lebih stabil.
- **Karakteristik Struktur:** Berat struktur, kekakuan, dan periode getar alami struktur mempengaruhi besarnya gaya gempa yang dialami.

Perhitungan beban gempa modern tidak lagi menggunakan pendekatan statik sederhana, melainkan analisis dinamik yang memperhitungkan respons struktur terhadap getaran gempa. Untuk jembatan-jembatan penting, bahkan dilakukan analisis time-history yang mensimulasikan respons struktur detik demi detik selama gempa berlangsung.

B. Beban Angin

Angin dapat memberikan beban horizontal yang signifikan terutama pada jembatan dengan bentang panjang atau jembatan yang sangat tinggi. SNI menetapkan bahwa beban angin harus diperhitungkan berdasarkan:

- Kecepatan angin rencana: Bervariasi tergantung lokasi, umumnya berkisar antara 25-35 m/detik (90-126 km/jam)
- Bentuk struktur: Struktur yang ramping dan aerodinamis menerima beban angin yang lebih kecil dibanding struktur yang lebar dan tidak aerodinamis
- Tinggi dari permukaan tanah: Kecepatan angin meningkat dengan ketinggian

Beban angin diperhitungkan bekerja pada permukaan struktur yang terekspos angin, termasuk rangka jembatan, pelat lantai, dan kendaraan yang melintas.

C. Beban Arus Air dan Hanyutan

Untuk jembatan yang melintasi sungai atau laut, beban dari arus air dan benda-benda hanyutan (debris) harus diperhitungkan:

- **Tekanan Arus:** Arus air yang mengalir memberikan tekanan horizontal pada pilar jembatan. Semakin deras arus, semakin besar tekanannya. Perhitungan mempertimbangkan kecepatan arus maksimum yang mungkin terjadi saat banjir besar.
- **Hanyutan:** Saat banjir, sungai membawa berbagai benda seperti batang pohon, perahu yang lepas, atau bahkan kontainer. Benturan benda-benda hanyutan ini dapat memberikan beban impak yang sangat besar pada pilar jembatan. SNI mengatur bahwa harus diasumsikan benturan dari benda hanyutan dengan massa dan kecepatan tertentu.
- **Gerusan (Scour):** Arus yang kuat dapat mengikis tanah di sekitar pondasi jembatan. Gerusan adalah salah satu penyebab utama kegagalan jembatan. Perhitungan harus mempertimbangkan kedalaman gerusan maksimum yang mungkin terjadi dan memastikan pondasi masih aman meskipun terjadi gerusan.

4. Beban Khusus Lainnya

A. Beban Temperatur

Beban temperatur merupakan salah satu beban penting yang harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur jembatan. Berbeda dengan beban



mekanis yang bersifat eksternal seperti beban lalu lintas atau beban angin, beban temperatur timbul akibat perubahan kondisi lingkungan yang menyebabkan terjadinya deformasi termal pada material struktur. Pemahaman yang komprehensif mengenai fenomena ini menjadi krusial mengingat dampaknya yang signifikan terhadap integritas struktural jembatan, terutama untuk konstruksi dengan bentang panjang. Dalam konteks iklim tropis Indonesia, fluktuasi temperatur harian dan musiman menciptakan kondisi pembebanan yang unik dan harus diantisipasi secara cermat dalam tahap perencanaan.

Fenomena Pemuaian Dan Penyusutan Termal

Setiap material memiliki sifat termal yang menyebabkannya mengalami perubahan dimensi ketika terjadi perubahan temperatur. Fenomena ini dikenal sebagai pemuaian termal (thermal expansion) ketika temperatur meningkat, dan penyusutan termal (thermal contraction) ketika temperatur menurun. Secara mikroskopis, perubahan temperatur menyebabkan peningkatan atau penurunan energi kinetik atom-atom penyusun material, yang kemudian mengakibatkan perubahan jarak antar atom. Pada skala makroskopis, hal ini termanifestasi sebagai perubahan dimensi linear, perubahan luas, dan perubahan volume material.

Perubahan panjang akibat temperatur dapat dirumuskan secara matematis melalui persamaan fundamental pemuaian linear. Untuk material yang homogen dan isotropik, perubahan panjang (ΔL) berbanding lurus dengan panjang awal (L), perubahan temperatur (ΔT), dan konstanta material yang disebut koefisien muai panjang (α). Hubungan ini dinyatakan dalam persamaan $\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$, dimana α memiliki satuan per derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Koefisien muai panjang merupakan karakteristik intrinsik material yang menunjukkan seberapa besar perubahan panjang relatif material tersebut untuk setiap kenaikan temperatur satu derajat. Untuk material konstruksi jembatan yang umum digunakan, nilai koefisien muai panjang beton berkisar antara 10×10^{-6} hingga 12×10^{-6} per $^{\circ}\text{C}$, sementara baja struktural memiliki nilai sekitar 12×10^{-6} per $^{\circ}\text{C}$.

Untuk memberikan perspektif kuantitatif, mari kita tinjau sebuah jembatan beton dengan bentang sederhana sepanjang 100 meter. Dengan menggunakan koefisien muai panjang beton sebesar 12×10^{-6} per $^{\circ}\text{C}$ dan perubahan temperatur sebesar 25°C (yang merupakan rentang temperatur rencana standar di Indonesia), maka perubahan panjang yang terjadi adalah $\Delta L = 12 \times 10^{-6} \times 100 \times 25 = 0,03$ meter atau 3 sentimeter. Untuk jembatan dengan bentang yang lebih panjang, misalnya 300 meter, perubahan panjang akan mencapai 9 sentimeter. Pada jembatan-jembatan dengan bentang sangat panjang seperti jembatan penghubung antar pulau yang dapat mencapai panjang beberapa kilometer, perubahan panjang akibat temperatur dapat mencapai beberapa puluh sentimeter bahkan mendekati satu meter. Angka-angka ini menunjukkan bahwa pemuaian termal bukanlah fenomena yang dapat diabaikan dalam perencanaan struktur jembatan.

Standar Temperatur Rencana Untuk Jembatan Di Indonesia

Standar Nasional Indonesia (SNI) telah menetapkan parameter temperatur rencana yang harus digunakan dalam perencanaan jembatan dengan mempertimbangkan kondisi iklim Indonesia. Berdasarkan data klimatologi jangka panjang, rentang temperatur yang relevan untuk struktur jembatan di Indonesia ditetapkan antara 15°C sebagai temperatur minimum dan 40°C sebagai temperatur maksimum. Dengan demikian, perbedaan temperatur rencana (ΔT) yang harus diperhitungkan dalam analisis adalah 25°C. Penetapan nilai ini bukan semata-mata berdasarkan temperatur udara ambien, melainkan juga mempertimbangkan temperatur permukaan struktur yang dapat berbeda signifikan dari temperatur udara, terutama untuk elemen-elemen yang terpapar langsung oleh radiasi matahari.

Kondisi iklim tropis Indonesia memiliki karakteristik khusus yang mempengaruhi pembebanan termal pada jembatan. Meskipun variasi temperatur musiman relatif kecil dibandingkan dengan negara-negara beriklim subtropis atau kontinental, variasi temperatur harian dapat cukup signifikan. Temperatur minimum umumnya terjadi pada dini hari menjelang matahari terbit, sementara temperatur maksimum terjadi pada siang hari ketika radiasi matahari mencapai puncaknya. Untuk permukaan struktur yang berwarna gelap atau dilapisi aspal, temperatur permukaan dapat mencapai 15-20°C lebih tinggi dari temperatur udara ambien. Fenomena ini dikenal sebagai efek panas radiasi dan harus diperhitungkan dalam analisis distribusi temperatur pada penampang struktur.

Selain variasi temperatur uniform pada seluruh penampang, terdapat pula fenomena gradient temperatur yang terjadi pada arah vertikal penampang gelagar. Pada siang hari yang terik, permukaan atas deck jembatan yang terpapar langsung oleh matahari akan memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan bagian bawah gelagar yang terlindung. Perbedaan temperatur ini dapat mencapai 10-15°C untuk penampang beton dan bahkan lebih besar untuk penampang baja. Gradient temperatur vertikal ini akan mengakibatkan deformasi lengkung (*curvature*) pada gelagar, yang harus diperhitungkan dalam analisis defleksi dan tegangan struktur.

Konsep Tegangan Termal Dan Mekanisme Pembentukannya

Ketika suatu struktur mengalami perubahan temperatur, respon strukturnya sangat bergantung pada kondisi batas atau kekangan yang ada. Jika struktur diberi kebebasan untuk berdeformasi tanpa hambatan, maka perubahan dimensi akibat temperatur akan terjadi secara bebas tanpa menimbulkan tegangan internal. Kondisi ini disebut sebagai deformasi termal bebas (*free thermal deformation*). Namun, dalam praktik rekayasa struktur jembatan, kondisi deformasi bebas sempurna jarang terjadi karena adanya berbagai bentuk kekangan struktural, baik yang disengaja dalam desain maupun yang tidak dapat dihindari.

Kekangan struktural dapat berasal dari berbagai sumber. Pertama, kekangan eksternal yang timbul dari kondisi batas struktur, seperti perletakan yang tidak memungkinkan pergerakan translasi atau rotasi pada arah tertentu. Kedua, kekangan

internal yang timbul dari kontinuitas struktur, seperti pada jembatan menerus (*continuous bridge*) dimana sambungan antar bentang mencegah pergerakan bebas. Ketiga, kekangan yang timbul dari interaksi dengan elemen struktur lain atau dengan tanah, seperti pada abutment integral dimana struktur atas menyatu dengan struktur bawah. Keempat, kekangan yang timbul dari gradient temperatur dalam penampang yang menyebabkan bagian-bagian berbeda dari penampang ingin berdeformasi dengan besaran yang berbeda.

Ketika deformasi termal dikekang, maka timbul gaya-gaya internal dalam struktur untuk mempertahankan kompatibilitas deformasi dengan kondisi batas yang ada. Gaya-gaya internal ini kemudian menimbulkan tegangan yang disebut tegangan termal (*thermal stress*). Untuk memahami mekanisme pembentukan tegangan termal, mari kita tinjau kasus sederhana berupa batang lurus yang kedua ujungnya dikekang sempurna sehingga tidak dapat bergerak. Ketika temperatur batang meningkat, material akan cenderung memuai, namun kekangan pada kedua ujung mencegah terjadinya pertambahan panjang. Akibatnya, timbul gaya tekan internal yang mendistribusikan dirinya sebagai tegangan tekan uniform sepanjang batang.

Besarnya tegangan termal untuk kasus batang yang dikekang sempurna dapat diturunkan dari hubungan antara regangan termal dan tegangan yang ditimbulkannya. Regangan termal bebas yang seharusnya terjadi adalah $\varepsilon_t = \alpha \times \Delta T$. Namun karena adanya kekangan, regangan ini tidak dapat terjadi, sehingga timbul regangan elastis dengan arah berlawanan untuk mempertahankan panjang batang tetap konstan. Berdasarkan hukum Hooke, tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan regangan elastis ini adalah $\sigma = E \times \varepsilon$, dimana E adalah modulus elastisitas material. Dengan mensubstitusikan $\varepsilon_t = \alpha \times \Delta T$, diperoleh rumus tegangan termal $\sigma = E \times \alpha \times \Delta T$. Persamaan ini menunjukkan bahwa tegangan termal berbanding lurus dengan modulus elastisitas, koefisien muai panjang, dan perubahan temperatur.

Untuk memberikan gambaran kuantitatif, mari kita hitung tegangan termal yang timbul pada struktur beton yang dikekang sempurna. Dengan menggunakan nilai modulus elastisitas beton normal $E = 25.000 \text{ MPa}$, koefisien muai panjang $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}$, dan perubahan temperatur $\Delta T = 25^\circ\text{C}$, maka tegangan termal yang timbul adalah $\sigma = 25.000 \times 12 \times 10^{-6} \times 25 = 7,5 \text{ MPa}$. Nilai tegangan sebesar 7,5 MPa ini cukup signifikan jika dibandingkan dengan kuat tarik beton yang umumnya hanya berkisar 2-4 MPa untuk beton normal. Hal ini menunjukkan bahwa jika struktur beton dikekang sempurna dan mengalami penurunan temperatur, maka tegangan tarik yang timbul dapat melebihi kuat tarik beton dan menyebabkan retak-retak termal.

Dalam praktik, kondisi kekangan sempurna jarang terjadi karena umumnya sistem perletakan dan sambungan didesain untuk mengakomodasi sebagian pergerakan termal. Namun, tegangan termal tetap perlu diperhitungkan karena beberapa alasan. Pertama, pada struktur jembatan menerus atau struktur dengan abutment integral, tingkat kekangan dapat cukup tinggi. Kedua, gradient temperatur pada penampang akan tetap menimbulkan tegangan bahkan jika struktur bebas



bergerak, karena bagian-bagian berbeda dari penampang dikekang oleh kompatibilitas penampang itu sendiri. Ketiga, pergerakan termal yang berulang-ulang setiap hari dapat menyebabkan degradasi material dan fatigue pada elemen-elemen sambungan dan perletakan.

Strategi Desain Untuk Mengatasi Efek Beban Temperatur

Mengingat dampak signifikan dari beban temperatur terhadap struktur jembatan, perancang struktur harus mengimplementasikan berbagai strategi desain untuk mengatasi atau mengakomodasi efek-efek termal. Terdapat tiga pendekatan utama yang dapat ditempuh, yaitu: (1) mengakomodasi pergerakan termal dengan menyediakan sambungan dilatasi dan sistem perletakan yang tepat, (2) menahan tegangan termal dengan merancang struktur yang cukup kuat, atau (3) kombinasi dari kedua pendekatan tersebut. Pemilihan strategi yang tepat sangat bergantung pada panjang bentang jembatan, jenis struktur, material yang digunakan, dan pertimbangan ekonomis serta pemeliharaan jangka panjang.

a. Sambungan Dilatasi (*Expansion Joint*)

Sambungan dilatasi merupakan elemen struktural yang dirancang khusus untuk mengakomodasi pergerakan relatif antara dua bagian struktur yang berdekatan. Dalam konteks jembatan, expansion joint umumnya dipasang pada sambungan antara dua bentang yang terpisah, atau antara struktur atas dan struktur pendekatan (*approach slab*). Fungsi utama expansion joint adalah memberikan ruang atau celah yang memungkinkan struktur untuk memuai dan menyusut secara bebas tanpa menimbulkan tegangan berlebihan, sambil tetap mempertahankan kontinuitas permukaan jalan dan kenyamanan lalu lintas.

Desain expansion joint harus mempertimbangkan besaran total pergerakan yang harus diakomodasi. Pergerakan total merupakan akumulasi dari berbagai sumber, termasuk:

- (1) pergerakan akibat temperatur yang merupakan komponen terbesar,
- (2) pergerakan akibat susut dan rangkai beton yang terjadi dalam jangka panjang,
- (3) pergerakan akibat deformasi elastis struktur di bawah beban lalu lintas, dan
- (4) untuk daerah seismik, pergerakan akibat gempa bumi. Sebagai contoh, untuk jembatan dengan panjang 100 meter, pergerakan akibat temperatur saja sudah mencapai $\pm 1,5$ cm (asumsi pergerakan terjadi dari temperatur tengah ke temperatur ekstrem). Jika ditambah dengan faktor-faktor lain, total pergerakan rencana dapat mencapai $\pm 3-5$ cm atau bahkan lebih.

Terdapat berbagai jenis expansion joint yang tersedia, masing-masing cocok untuk rentang pergerakan tertentu. Untuk pergerakan kecil hingga sedang (sampai 50 mm), dapat digunakan expansion joint sederhana berupa strip joint atau compression seal joint yang terdiri dari profil elastomer yang dikompresi di antara dua tepi beton. Untuk pergerakan sedang hingga besar (50-200 mm), digunakan modular expansion joint yang terdiri dari beberapa elemen tengah



(center beam) yang didukung oleh sistem per atau elastomer, sehingga dapat mengakomodasi pergerakan yang lebih besar dengan tetap mempertahankan permukaan yang relatif halus. Untuk pergerakan sangat besar (lebih dari 200 mm) seperti pada jembatan bentang sangat panjang atau jembatan di daerah seismik tinggi, digunakan finger expansion joint yang terdiri dari pelat-pelat baja berbentuk jari yang saling bertautan, atau sliding plate joint dengan sistem pelat luncur.

Pemilihan jenis expansion joint tidak hanya berdasarkan besaran pergerakan, tetapi juga harus mempertimbangkan faktor-faktor lain seperti volume lalu lintas, kecepatan kendaraan, beban roda, persyaratan kedap air, kemudahan pemeliharaan, biaya awal dan biaya operasional, serta ketersediaan material dan teknologi. Expansion joint merupakan salah satu elemen jembatan yang paling rentan terhadap kerusakan karena menerima beban dampak langsung dari lalu lintas, terpapar air dan bahan kimia, dan mengalami pergerakan siklik yang terus-menerus. Oleh karena itu, desain yang baik harus mempertimbangkan aspek durabilitas dan pemeliharaan, termasuk kemudahan untuk inspeksi dan penggantian.

b. Sistem Perletakan (*Bearing System*)

Sistem perletakan merupakan elemen krusial yang berfungsi sebagai interface antara struktur atas (*superstructure*) dan struktur bawah (*substructure*) jembatan. Bearing system memiliki beberapa fungsi simultan yang harus dipenuhi:

- (1) mentransfer beban vertikal dari struktur atas ke struktur bawah,
- (2) mengakomodasi atau menahan pergerakan horizontal tergantung pada jenis perletakan,
- (3) mengakomodasi rotasi akibat deformasi lentur gelagar, dan
- (4) dalam kasus tertentu, menyediakan kemampuan disipasi energi untuk beban seismik. Dalam konteks beban temperatur, fungsi kedua menjadi sangat penting karena perletakan harus dirancang untuk mengakomodasi pergerakan termal dengan tahanan geser yang minimal, atau sebaliknya, untuk menahan pergerakan dan mentransfer gaya termal ke struktur bawah.

Berdasarkan kemampuannya mengakomodasi pergerakan horizontal, perletakan dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama. Pertama, perletakan tetap (*fixed bearing*) yang tidak memungkinkan pergerakan translasi horizontal pada arah manapun, namun masih memungkinkan rotasi. Perletakan tetap berfungsi sebagai titik referensi atau titik jepit untuk keseluruhan struktur atas, dan menahan seluruh gaya horizontal yang bekerja pada arah tersebut. Kedua, perletakan bergerak (*expansion bearing* atau *movable bearing*) yang memungkinkan pergerakan translasi pada satu atau dua arah horizontal. Perletakan bergerak dirancang untuk mengakomodasi pergerakan termal,



susut, rangkai, dan deformasi elastis dengan tahanan gesekan yang seminimal mungkin.

Berbagai tipe perletakan tersedia untuk memenuhi kebutuhan yang berbeda-beda. Perletakan elastomer (elastomeric bearing) yang terbuat dari lapisan karet yang diperkuat dengan plat baja, merupakan jenis yang paling umum digunakan untuk jembatan dengan bentang pendek hingga sedang. Perletakan ini dapat mengakomodasi pergerakan horizontal melalui deformasi geser karet dan rotasi melalui deformasi lentur karet. Untuk beban yang lebih besar, digunakan pot bearing yang terdiri dari piston yang dapat berputar dalam silinder, dengan bantalan elastomer di dalamnya. Pot bearing dapat dikombinasikan dengan sliding plate untuk mengakomodasi pergerakan translasi. Untuk beban dan pergerakan yang sangat besar, digunakan spherical bearing yang memiliki permukaan kontak berbentuk bola, memungkinkan rotasi multi-arah dan dapat dilengkapi dengan sistem luncur PTFE (polytetrafluoroethylene) untuk pergerakan translasi dengan koefisien gesek sangat rendah.

Konfigurasi perletakan pada jembatan harus dirancang dengan cermat untuk mengakomodasi pola pergerakan yang diinginkan. Pada jembatan sederhana satu bentang, konfigurasi yang paling umum adalah satu perletakan tetap pada salah satu ujung dan satu perletakan bergerak pada ujung lainnya. Perletakan tetap akan menahan semua gaya horizontal longitudinal (gaya rem, gaya gempa, dll), sementara perletakan bergerak mengakomodasi perubahan panjang bentang. Pada jembatan menerus multi-bentang, konfigurasi yang umum adalah menempatkan perletakan tetap pada salah satu pilar tengah, dengan perletakan bergerak pada semua pilar dan abutment lainnya. Hal ini memungkinkan struktur atas untuk memuai dan menyusut simetris dari titik tetap tersebut, meminimalkan total pergerakan yang harus diakomodasi oleh setiap expansion joint.

c. Pendekatan untuk Struktur yang Dikekang

Dalam beberapa situasi, pertimbangan struktural atau ekonomis mengarah pada pemilihan desain dimana pergerakan termal secara sengaja dikekang, sehingga struktur harus dirancang untuk menahan tegangan termal yang timbul. Pendekatan ini sering diterapkan pada jembatan dengan abutment integral (integral abutment bridge) dimana struktur atas disambung monolit dengan abutment, atau pada jembatan menerus dengan panjang total yang relatif pendek. Keuntungan utama dari pendekatan ini adalah eliminasi expansion joint yang merupakan elemen yang paling memerlukan pemeliharaan dan sering menjadi sumber masalah pada jembatan. Dengan menghilangkan expansion joint, durabilitas jangka panjang jembatan dapat ditingkatkan dan biaya pemeliharaan dapat dikurangi secara signifikan.



Untuk struktur yang dikekang, beberapa aspek desain memerlukan perhatian khusus. Pertama, analisis tegangan harus memperhitungkan kombinasi tegangan akibat beban gravitasi, beban lalu lintas, dan tegangan termal. Tegangan tekan akibat temperatur tinggi akan bersuperposisi dengan tegangan tekan akibat beban gravitasi, sehingga penampang harus dirancang dengan kapasitas tekan yang lebih besar. Sebaliknya, tegangan tarik akibat temperatur rendah akan bersuperposisi dengan tegangan tarik akibat beban lentur, sehingga kebutuhan tulangan tarik akan meningkat. Kedua, deformasi struktur bawah akibat pergerakan siklik temperatur harus dievaluasi. Abutment integral akan mengalami rotasi siklik akibat pergerakan termal struktur atas, dan pile yang mendukung abutment akan mengalami lentur siklik. Analisis kelelahan (fatigue) menjadi penting untuk elemen-elemen yang mengalami pembebanan siklik ini.

Ketiga, interaksi tanah-struktur (soil-structure interaction) menjadi faktor penting yang harus dimodelkan dengan cermat. Pada integral abutment bridge, pergerakan siklik abutment akan memobilisasi tekanan tanah pasif di belakang abutment saat pemuaian dan akan melepaskan kontak saat penyusutan. Tekanan tanah pasif dapat mencapai nilai yang sangat besar dan harus diperhitungkan dalam desain dinding abutment dan fondasi. Untuk mengurangi tekanan tanah, sering digunakan sistem pendekatan (approach) dengan backfill yang kompresibel atau dengan menyediakan celah di belakang abutment yang diisi dengan material kompresibel seperti expanded polystyrene (EPS). Keempat, detailing sambungan antara struktur atas dan abutment harus dirancang dengan hati-hati untuk mentransfer momen, gaya geser, dan gaya aksial dengan baik, serta untuk mengakomodasi kongesti tulangan yang tinggi di daerah sambungan.

Pertimbangan Tambahan Dalam Analisis Beban Temperatur

Selain aspek-aspek fundamental yang telah dibahas, terdapat beberapa pertimbangan tambahan yang perlu diperhatikan dalam analisis beban temperatur untuk memperoleh desain yang optimal. Pertama, efek gradient temperatur vertikal pada penampang harus diperhitungkan secara eksplisit, terutama untuk gelagar dengan tinggi yang besar. Gradient temperatur akan menyebabkan distribusi regangan non-linear pada penampang, yang mengakibatkan lengkungan (curvature) dan tegangan lentur tambahan bahkan jika struktur bebas untuk bergerak secara longitudinal. SNI memberikan profil distribusi temperatur rencana untuk berbagai jenis penampang, yang harus digunakan dalam analisis. Untuk penampang komposit baja-beton, perbedaan koefisien muai panjang antara baja dan beton akan menambah kompleksitas masalah dan memerlukan analisis yang lebih teliti.

Kedua, dalam pemodelan analisis struktur, pemilihan temperatur referensi (*stress-free temperature*) harus dilakukan dengan hati-hati. Temperatur referensi adalah temperatur pada saat struktur dalam kondisi bebas tegangan termal. Untuk



struktur beton yang dicor di tempat (*cast-in-place*), temperatur referensi umumnya diambil sama dengan temperatur pada saat beton mencapai kekuatan yang cukup untuk mulai menahan beban. Untuk struktur yang dipasang (*erected*), temperatur referensi dapat diambil sama dengan temperatur rata-rata tahunan atau temperatur pada saat struktur dipasang, tergantung pada prosedur konstruksi dan sistem pengekangan yang digunakan selama pemasangan. Pemilihan temperatur referensi yang tidak tepat dapat mengakibatkan estimasi tegangan termal yang tidak akurat.

Ketiga, untuk jembatan di lokasi dengan kondisi khusus seperti di daerah pegunungan tinggi atau di daerah yang sangat terbuka terhadap radiasi matahari, nilai temperatur rencana standar mungkin perlu disesuaikan berdasarkan data iklim lokal. Pemantauan temperatur struktur jembatan yang sudah ada di lokasi yang sama dapat memberikan informasi berharga untuk kalibrasi parameter temperatur rencana. Keempat, kombinasi pembebanan yang melibatkan beban temperatur harus mengikuti ketentuan dalam SNI mengenai faktor beban dan kombinasi pembebanan untuk desain metode LRFD (*Load and Resistance Factor Design*). Beban temperatur umumnya dikombinasikan dengan beban mati dan beban hidup dengan faktor beban yang telah ditentukan.

Kesimpulan Dan Implikasi Praktis

Beban temperatur merupakan fenomena fisik yang tidak dapat dihindari dan harus diperhitungkan secara serius dalam perencanaan struktur jembatan. Perubahan temperatur yang relatif kecil dapat menyebabkan pergerakan yang signifikan pada struktur bentang panjang, dan jika pergerakan ini dikekang, akan timbul tegangan internal yang besar. Pemahaman yang mendalam tentang mekanisme pembentukan tegangan termal, parameter material yang relevan, dan kondisi lingkungan lokal merupakan prasyarat untuk menghasilkan desain yang aman dan ekonomis.

Strategi desain untuk mengatasi efek beban temperatur harus dipilih berdasarkan pertimbangan yang komprehensif mencakup aspek struktural, ekonomi, konstruksi, dan pemeliharaan jangka panjang. Untuk jembatan bentang panjang, penggunaan expansion joint dan sistem perletakan yang mengakomodasi pergerakan termal umumnya merupakan solusi yang paling efektif. Namun, untuk jembatan bentang pendek hingga sedang, pendekatan integral abutment yang mengeliminasi expansion joint dapat menawarkan keunggulan dalam hal durabilitas dan pemeliharaan, meskipun memerlukan analisis yang lebih kompleks dan detailing yang lebih hati-hati.

Dalam praktik rekayasa, keberhasilan desain tidak hanya ditentukan oleh ketepatan analisis dan perhitungan, tetapi juga oleh kualitas detailing, pelaksanaan konstruksi yang baik, dan program pemeliharaan yang efektif. Expansion joint dan bearing system memerlukan inspeksi dan pemeliharaan berkala untuk memastikan fungsinya tetap optimal sepanjang umur layanan jembatan. Untuk struktur yang dikekang, monitoring tegangan dan deformasi selama masa konstruksi dan operasional dapat memberikan informasi penting untuk verifikasi asumsi desain dan deteksi dini

potensi masalah. Dengan pendekatan yang holistik dan berbasis pada pemahaman fundamental yang kuat, insinyur struktur dapat menghasilkan desain jembatan yang tidak hanya memenuhi persyaratan keamanan struktural, tetapi juga optimal dalam hal biaya siklus hidup dan keberlanjutan.

Beban Pengereman Dan Traksi Pada Struktur Jembatan

Dalam operasional lalu lintas normal, kendaraan yang melintasi jembatan tidak hanya memberikan beban vertikal akibat berat sendiri, tetapi juga menghasilkan gaya-gaya horizontal yang signifikan akibat manuver pengereman dan akselerasi. Beban pengereman (braking force) dan beban traksi (traction force) merupakan beban horizontal longitudinal yang bekerja pada permukaan jembatan dan harus ditransfer melalui struktur atas ke perletakan dan akhirnya ke fondasi. Berbeda dengan beban vertikal yang relatif mudah diprediksi berdasarkan berat kendaraan, beban horizontal ini sangat bergantung pada perilaku pengemudi, kondisi permukaan jalan, karakteristik sistem pengereman kendaraan, dan situasi lalu lintas. Pemahaman yang komprehensif tentang mekanisme transfer dan distribusi beban horizontal ini menjadi esensial untuk menghasilkan desain struktur jembatan yang aman dan efisien, terutama untuk elemen-elemen kritis seperti perletakan, pilar, dan fondasi yang harus menahan gaya-gaya horizontal tersebut.

Mekanisme Pembentukan Beban Pengereman

Beban pengereman timbul sebagai konsekuensi dari hukum Newton tentang gerak, khususnya hukum kedua Newton yang menyatakan bahwa gaya adalah hasil kali massa dengan percepatan. Ketika kendaraan yang bergerak dengan kecepatan tertentu mengalami perlambatan (*deselerasi*), timbul gaya inersia yang bekerja pada massa kendaraan. Berdasarkan hukum Newton ketiga tentang aksi-reaksi, gaya inersia ini harus diimbangi oleh gaya pengereman yang bekerja berlawanan arah.

Gaya pengereman ini dihasilkan oleh gesekan antara ban kendaraan dengan permukaan jalan jembatan, dan kemudian ditransfer ke struktur jembatan melalui interface permukaan kontak tersebut. Untuk memahami mekanisme ini secara lebih mendalam, mari kita tinjau dinamika pengereman kendaraan. Ketika pengemudi menginjak pedal rem, sistem pengereman (baik rem cakram maupun rem tromol) menghasilkan gaya gesek yang memperlambat putaran roda. Perlambatan putaran roda ini kemudian ditransfer menjadi perlambatan kendaraan melalui gaya gesek antara ban dengan permukaan jalan. Besarnya gaya gesek maksimum yang dapat dimobilisasi bergantung pada koefisien gesek antara ban dan permukaan jalan, serta beban normal (gaya vertikal) yang bekerja pada roda tersebut. Untuk permukaan aspal dalam kondisi kering, koefisien gesek statis dapat mencapai 0,8-1,0, sementara untuk permukaan basah turun menjadi sekitar 0,5-0,7.

Dalam kondisi pengereman normal, perlambatan kendaraan umumnya berkisar antara $0,2g$ hingga $0,4g$ (dimana g adalah percepatan gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$). Namun, dalam situasi pengereman darurat, perlambatan dapat mencapai $0,6g$ hingga $0,8g$ atau bahkan mendekati $1,0g$ untuk kendaraan modern yang dilengkapi dengan sistem pengereman anti-lock (ABS). Sebagai ilustrasi kuantitatif, untuk truk dengan berat total 40 ton yang mengalami perlambatan $0,3g$, gaya pengereman yang timbul adalah $F = m \times a = 40.000 \text{ kg} \times (0,3 \times 9,81 \text{ m/}$

$s^2) = 117.720 \text{ Newton}$ atau sekitar 118 kN. Gaya sebesar ini harus ditahan oleh struktur jembatan dan ditransfer ke fondasi.

Distribusi beban pengereman pada struktur jembatan tidak merata sepanjang bentang. Pada umumnya, pengereman cenderung terjadi lebih intens pada bagian tertentu dari jembatan, misalnya menjelang persimpangan, sebelum tikungan, atau pada bagian dengan kelandaian menurun. Namun, untuk keperluan desain, peraturan umumnya mensyaratkan bahwa beban pengereman dirancang dapat terjadi di mana saja sepanjang jembatan untuk memberikan kondisi pembebanan yang paling kritis. Beban pengereman bekerja searah dengan sumbu memanjang jembatan (longitudinal) dan dianggap bekerja pada permukaan lantai jembatan, yang kemudian harus ditransfer melalui sistem pelat lantai, gelagar memanjang, gelagar melintang, ke perletakan dan akhirnya ke pilar atau abutment.

Mekanisme Pembentukan Beban Traksi

Beban traksi merupakan gaya horizontal yang timbul ketika kendaraan melakukan akselerasi atau percepatan. Secara fisika, prinsip pembentukan beban traksi serupa dengan beban pengereman, hanya dengan arah yang berlawanan. Ketika kendaraan melakukan akselerasi, mesin kendaraan menghasilkan torsi yang diaplikasikan pada roda-roda penggerak. Torsi ini kemudian dikonversi menjadi gaya dorong melalui gesekan antara ban dengan permukaan jalan. Berdasarkan hukum Newton ketiga, gaya dorong yang menggerakkan kendaraan ke depan akan menimbulkan reaksi gaya yang bekerja ke arah belakang pada permukaan jembatan, dan inilah yang disebut sebagai beban traksi.

Karakteristik beban traksi berbeda dengan beban pengereman dalam beberapa aspek penting. Pertama, besaran akselerasi kendaraan umumnya lebih kecil dibandingkan dengan deselerasi maksimum yang dapat dicapai saat pengereman. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan daya mesin kendaraan, terutama untuk kendaraan berat seperti truk dan bus yang memiliki rasio daya terhadap berat yang relatif rendah. Untuk kendaraan komersial berat, akselerasi normal umumnya hanya berkisar antara $0,05g$ hingga $0,15g$, jauh lebih kecil dibandingkan dengan perlambatan saat pengereman yang dapat mencapai $0,6 - 0,8g$. Kedua, situasi dimana beban traksi mencapai nilai maksimum relatif lebih jarang terjadi dibandingkan dengan pengereman intensif. Akselerasi maksimum umumnya hanya terjadi saat kendaraan mulai bergerak dari kondisi diam atau saat menyalip kendaraan lain.

Namun demikian, beban traksi tetap harus diperhitungkan dalam desain jembatan karena beberapa alasan. Pertama, meskipun besarnya lebih kecil dari beban pengereman, beban traksi dapat menghasilkan kondisi kombinasi pembebanan yang kritis ketika dikombinasikan dengan beban lain. Kedua, untuk jembatan pada jalan dengan kelandaian tanjakan yang curam, kendaraan harus melakukan akselerasi kontinyu untuk mempertahankan kecepatan, sehingga beban traksi dapat bekerja dalam durasi yang lebih panjang. Ketiga, arah beban traksi yang berlawanan dengan beban pengereman dapat menghasilkan kondisi pembebanan bolak-balik (reversal) yang penting untuk analisis kelelahan dan untuk desain sambungan dan perletakan yang harus mampu menahan gaya dua arah.

Ketentuan SNI Untuk Beban Pengereman Dan Traksi

Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk perencanaan jembatan telah menetapkan parameter dan formula untuk menghitung beban pengereman dan traksi yang harus digunakan dalam desain. Ketentuan ini dirancang berdasarkan studi empiris, pengalaman desain internasional, dan kalibrasi dengan kondisi lalu lintas Indonesia. Untuk beban pengereman, SNI menetapkan bahwa besarnya gaya pengereman rencana adalah 25% dari beban gandar kendaraan rencana yang bekerja dalam arah memanjang jembatan. Ketentuan ini berlaku untuk semua jenis kendaraan rencana yang didefinisikan dalam SNI, baik kendaraan tunggal maupun kendaraan truk gandengan.

Untuk memahami aplikasi ketentuan ini, mari kita tinjau beberapa skenario perhitungan. Pertama, untuk kendaraan truk "T" yang merupakan kendaraan rencana standar dengan beban gandar belakang sebesar 125 kN, beban pengereman yang harus diperhitungkan adalah $0,25 \times 125 \text{ kN} = 31,25 \text{ kN}$. Kedua, untuk kendaraan truk gandengan dengan konfigurasi beban gandar yang lebih kompleks, beban pengereman dihitung sebagai 25% dari total beban gandar yang berada pada jalur pengereman. Ketiga, untuk beban lajur terdistribusi yang merepresentasikan kondisi lalu lintas penuh, beban pengereman juga harus diperhitungkan berdasarkan beban ekuivalen lajur.

Untuk beban traksi, SNI menetapkan nilai yang lebih konservatif yaitu 5% dari beban lajur yang bekerja dalam arah memanjang jembatan. Perbedaan persentase yang signifikan antara beban pengereman (25%) dan beban traksi (5%) mencerminkan perbedaan karakteristik fisik kedua fenomena tersebut. Beban traksi dihitung berdasarkan beban lajur (distributed lane load) karena akselerasi umumnya terjadi ketika kendaraan berada dalam kondisi lalu lintas yang mengalir, bukan dari kendaraan tunggal yang terisolasi. Untuk beban lajur standar "D" dengan intensitas 9 kN/m^2 (untuk bentang sampai 30 meter), beban traksi per meter panjang jembatan dengan lebar lajur 3,5 meter adalah $0,05 \times 9 \text{ kN/m}^2 \times 3,5 \text{ m} = 1,575 \text{ kN/m}$.

Beban pengereman dan traksi harus ditempatkan sedemikian rupa untuk menghasilkan efek yang paling tidak menguntungkan pada elemen struktur yang ditinjau. Untuk desain perletakan dan pilar, beban pengereman umumnya ditempatkan pada posisi yang menghasilkan gaya horizontal maksimum pada elemen tersebut. Untuk desain gelagar, distribusi beban pengereman sepanjang bentang harus diperhitungkan untuk menghasilkan kombinasi momen dan geser yang kritis. SNI juga memberikan ketentuan tentang tingkat aplikasi beban, yaitu bahwa beban pengereman dan traksi dianggap bekerja pada permukaan lantai jembatan (pada elevasi perkerasan), dan harus diperhitungkan eksentrisitas vertikalnya terhadap pusat gravitasi perletakan untuk menghasilkan momen tambahan.

Transfer Dan Distribusi Beban Horizontal Pada Struktur

Pemahaman tentang mekanisme transfer beban horizontal dari permukaan jembatan hingga ke fondasi merupakan aspek krusial dalam analisis dan desain struktur jembatan. Jalur transfer beban dimulai dari interface ban kendaraan dengan permukaan perkerasan, kemudian melalui pelat lantai jembatan (*deck slab*), dilanjutkan ke gelagar memanjang dan gelagar melintang, kemudian ke perletakan, dan akhirnya ke pilar atau abutment yang meneruskannya



ke fondasi. Setiap elemen dalam jalur transfer ini harus dirancang dengan kapasitas yang memadai untuk menahan dan meneruskan beban horizontal tersebut.

Pada pelat lantai jembatan, beban horizontal bekerja sebagai gaya geser in-plane yang harus ditransfer ke gelagar pendukung. Pelat lantai umumnya dirancang sebagai pelat satu arah atau dua arah tergantung pada konfigurasi gelagar pendukung. Untuk pelat beton bertulang konvensional, kapasitas geser in-plane sangat besar sehingga jarang menjadi faktor pengontrol desain. Namun, untuk pelat lantai dengan sistem pracetak atau pelat orthotropic steel, detailing sambungan untuk transfer gaya geser harus diperhatikan dengan seksama. Pelat lantai juga harus memiliki kekakuan yang cukup untuk mendistribusikan beban terpusat dari roda kendaraan ke area yang lebih luas sebelum ditransfer ke gelagar.

Gelagar memanjang (longitudinal girder) menerima beban horizontal dari pelat lantai melalui aksi diafragma. Untuk sistem gelagar-pelat komposit dimana pelat lantai dan gelagar bekerja secara komposit melalui shear connector, transfer beban horizontal terjadi melalui aksi komposit tersebut. Gelagar memanjang kemudian meneruskan beban horizontal ke gelagar melintang atau diafragma, yang berfungsi mendistribusikan beban ke semua gelagar dalam penampang melintang jembatan. Untuk jembatan dengan multiple girder, distribusi beban horizontal ke semua gelagar adalah penting untuk mencegah konsentrasi tegangan pada gelagar individual dan untuk memaksimalkan efisiensi struktural.

Perletakan merupakan elemen kritis dalam transfer beban horizontal karena berfungsi sebagai interface antara struktur atas yang bergerak dan struktur bawah yang relatif tetap. Seperti yang telah dibahas dalam konteks beban temperatur, sistem perletakan dapat berupa perletakan tetap (fixed bearing) yang menahan semua gaya horizontal, atau perletakan bergerak (expansion bearing) yang idealnya tidak menahan gaya horizontal longitudinal. Dalam praktik, perletakan bergerak tetap memiliki tahanan gesek yang menimbulkan gaya horizontal kecil yang harus diperhitungkan. Untuk beban pengereman dan traksi, gaya horizontal akan ditransfer sepenuhnya ke perletakan tetap, sementara perletakan bergerak hanya menerima gaya gesek akibat pergerakan yang dipaksakan.

Konfigurasi perletakan pada jembatan memiliki implikasi signifikan terhadap distribusi beban horizontal. Untuk jembatan sederhana satu bentang dengan perletakan tetap di satu ujung dan perletakan bergerak di ujung lain, seluruh beban pengereman/traksi akan ditransfer ke perletakan tetap. Untuk jembatan menerus multi-bentang dengan perletakan tetap pada salah satu pilar tengah, distribusi beban horizontal ke berbagai pilar akan bergantung pada kekakuan relatif pilar-pilar tersebut. Pilar yang lebih kaku akan menarik proporsi beban yang lebih besar. Analisis distribusi ini umumnya dilakukan dengan menggunakan model komputer yang memperhitungkan kekakuan semua elemen struktur.

Dampak Pada Desain Elemen Struktur

Beban pengereman dan traksi memiliki dampak signifikan pada desain berbagai elemen struktur jembatan. Untuk perletakan, beban horizontal ini merupakan salah satu beban pengontrol desain, terutama untuk perletakan tetap. Perletakan harus dirancang dengan kapasitas geser yang memadai untuk menahan kombinasi beban horizontal dari pengereman, angin, gempa, dan gesekan perletakan bergerak. Untuk perletakan elastomer,



beban horizontal akan menyebabkan deformasi geser pada karet elastomer yang harus dibatasi untuk mencegah delaminasi antara lapisan karet dan plat baja penguat. Untuk pot bearing atau spherical bearing, sistem pengunci (locking mechanism) harus dirancang dengan kapasitas yang memadai untuk menahan beban horizontal.

Untuk pilar jembatan, beban horizontal pengereman dan traksi akan menghasilkan momen lentur dan gaya geser yang harus dikombinasikan dengan beban vertikal dari berat sendiri dan beban lalu lintas. Untuk pilar yang relatif tinggi dan langsing, momen lentur akibat beban horizontal dapat menjadi faktor pengontrol desain. Analisis harus memperhitungkan efek P-Delta yaitu momen tambahan yang timbul akibat eksentrisitas beban vertikal terhadap sumbu pilar yang terdeformasi. Untuk pilar yang sangat langsing, stabilitas (buckling) di bawah kombinasi beban aksial dan lateral harus diperiksa. Detailing tulangan pada pilar harus mempertimbangkan kebutuhan untuk menahan momen dua arah dan gaya geser, dengan zona sendi plastis pada pangkal pilar yang dirancang untuk daktilitas seismik.

Untuk abutment, beban horizontal pengereman dan traksi akan bersuperposisi dengan tekanan tanah aktif dan gaya-gaya lain yang bekerja pada dinding abutment. Kombinasi beban ini dapat menghasilkan kondisi kritis untuk stabilitas guling (overturning) dan stabilitas geser (sliding) dari sistem abutment-fondasi. Analisis stabilitas harus memperhitungkan berbagai kombinasi pembebanan, termasuk kondisi dimana beban pengereman dan tekanan tanah aktif bekerja bersamaan dalam arah yang sama. Untuk mencegah pergerakan berlebihan, abutment umumnya didukung oleh fondasi dalam seperti tiang pancang atau tiang bor yang dapat memberikan tahanan lateral yang besar. Desain fondasi dalam harus memperhitungkan gaya lateral dan momen yang ditransfer dari abutment.

Untuk gelagar jembatan, beban horizontal pengereman umumnya tidak menimbulkan tegangan signifikan pada gelagar itu sendiri, karena gelagar dirancang untuk menahan lentur vertikal yang jauh lebih besar. Namun, untuk gelagar dengan perletakan pada salah satu ujung yang memungkinkan rotasi tetapi menahan translasi (seperti pada bearing pot dengan pin), beban horizontal dapat menimbulkan momen torsi pada gelagar yang harus diperhitungkan. Untuk jembatan lengkung atau jembatan dengan geometri melengkung dalam plan, beban horizontal dapat menghasilkan efek torsi yang signifikan dan harus dianalisis dengan model tiga dimensi.

Kombinasi Pembebanan Dan Faktor Beban

Dalam metode desain LRFD (Load and Resistance Factor Design) yang dianut oleh SNI, beban pengereman dan traksi harus dikombinasikan dengan beban-beban lain sesuai dengan kombinasi pembebanan yang relevan. Beban pengereman umumnya tidak terjadi bersamaan dengan beban hidup maksimum, karena dalam kondisi lalu lintas padat kendaraan bergerak dengan kecepatan rendah sehingga intensitas pengereman berkurang. SNI memperhitungkan korelasi ini dengan memberikan faktor beban dan kombinasi yang telah dikalibrasi berdasarkan probabilitas kejadian simultan.

Untuk kondisi batas kekuatan (strength limit state), beban pengereman harus dikombinasikan dengan beban mati, beban hidup dengan faktor kehadiran yang sesuai, dan beban lain yang relevan seperti beban angin. Kombinasi tipikal adalah: $1,25 DC + 1,5 DW +$

1,75 (LL + IM) + 1,75 BR, dimana DC adalah beban mati komponen struktural, DW adalah beban mati perkerasan dan utilitas, LL adalah beban hidup, IM adalah faktor dampak dinamis, dan BR adalah beban pengereman. Faktor beban 1,75 untuk beban pengereman mencerminkan ketidakpastian dalam magnitudo dan distribusi beban ini. Untuk kondisi batas layan (service limit state) yang digunakan untuk memeriksa tegangan, lendutan, dan retak, faktor beban umumnya diambil 1,0.

Untuk desain perletakan dan pilar, kombinasi yang melibatkan beban pengereman, beban angin, dan beban gempa harus dievaluasi untuk menentukan kombinasi yang paling kritis. Umumnya, beban pengereman tidak dikombinasikan dengan beban gempa pada intensitas penuh karena probabilitas kejadian simultan sangat kecil. Namun, untuk daerah dengan seismisitas tinggi, kombinasi dengan gempa pada tingkat reduksi tertentu mungkin diperlukan. Beban angin dan pengereman dapat terjadi bersamaan, terutama dalam kondisi cuaca buruk yang menyebabkan pengemudi melakukan pengereman untuk mengurangi kecepatan.

Pertimbangan Khusus Dan Kasus-Kasus Spesifik

Untuk jembatan dengan kelandaian longitudinal yang curam, baik tanjakan maupun turunan, beban pengereman dan traksi memerlukan perhatian khusus. Pada jembatan dengan kelandaian menurun, kendaraan cenderung melakukan pengereman lebih intens untuk mengendalikan kecepatan, sehingga beban pengereman aktual dapat lebih besar dari nilai nominal. Sebaliknya, pada kelandaian menanjak, beban traksi menjadi lebih dominan karena kendaraan harus melakukan akselerasi kontinyu. Untuk kelandaian yang sangat curam (lebih dari 5-6%), pertimbangan dapat diberikan untuk meningkatkan koefisien beban pengereman atau traksi di atas nilai standar 25% dan 5%.

Untuk jembatan dengan tikungan horizontal, terutama tikungan tajam, kombinasi beban lateral akibat gaya sentrifugal dengan beban pengereman dapat menghasilkan kondisi pembebanan yang kompleks. Kendaraan yang melewati tikungan sambil melakukan pengereman akan menghasilkan vektor gaya yang merupakan resultante dari gaya sentrifugal lateral dan gaya pengereman longitudinal. Analisis harus memperhitungkan vektor gaya ini dengan arah yang tepat untuk menghasilkan kondisi pembebanan yang paling kritis pada elemen-elemen struktur. Untuk perletakan, kemampuan untuk menahan gaya multi-arah harus diverifikasi.

Untuk jembatan di area urban dengan kemungkinan kemacetan tinggi, pola pembebanan dapat berbeda dengan jembatan di jalan bebas hambatan. Dalam kondisi lalu lintas stop-and-go, kendaraan melakukan siklus akselerasi dan deselerasi yang berulang-ulang dengan frekuensi tinggi. Meskipun intensitas individual setiap kejadian mungkin lebih kecil, akumulasi siklus pembebanan dapat menjadi signifikan untuk analisis kelelahan elemen-elemen yang rentan seperti sambungan las pada jembatan baja. Untuk jembatan di dekat persimpangan dengan lampu lalu lintas, probabilitas pengereman simultan dari banyak kendaraan menjadi lebih tinggi dan perlu diperhitungkan dalam desain.

Untuk jembatan dengan sistem penahan kejut kendaraan (vehicle restraint system) atau barrier, interaksi antara beban pengereman dengan barrier dapat terjadi dalam skenario



kecelakaan dimana kendaraan menabrak barrier sambil melakukan pengereman. Dalam kondisi ini, barrier harus mampu menahan kombinasi beban impak lateral dengan beban pengereman tanpa mengalami kegagalan. Desain barrier dan sambungannya dengan deck harus memperhitungkan mekanisme transfer beban yang kompleks ini.

Verifikasi Dan Validasi Desain

Verifikasi desain untuk beban pengereman dan traksi harus dilakukan secara sistematis untuk semua elemen kritis dalam jalur transfer beban. Untuk perletakan, perhitungan harus menunjukkan bahwa kapasitas geser perletakan melebihi kombinasi semua beban horizontal dengan faktor keamanan yang memadai. Untuk perletakan elastomer, deformasi geser maksimum harus diperiksa tidak melebihi batas yang diijinkan (umumnya 50% dari ketebalan total karet) untuk mencegah kegagalan delaminasi atau robek. Untuk pot bearing atau spherical bearing, tegangan kontak pada permukaan luncur harus dibatasi untuk mencegah aus berlebihan.

Untuk pilar dan abutment, analisis stabilitas harus menunjukkan bahwa faktor keamanan terhadap guling dan geser memenuhi persyaratan minimum SNI. Faktor keamanan minimum terhadap guling umumnya adalah 2,0 untuk kombinasi pembebanan normal dan 1,5 untuk kombinasi yang melibatkan beban ekstrem seperti gempa. Untuk stabilitas geser, faktor keamanan minimum adalah 1,5 dengan resistensi geser dihitung dari kombinasi gesekan antara dasar struktur dengan tanah dan resistensi pasif dari tanah di depan struktur. Analisis harus memperhitungkan kemungkinan penurunan kekuatan geser tanah akibat saturasi air atau degradasi jangka panjang.

Untuk fondasi, kapasitas lateral tiang harus diverifikasi melalui analisis interaksi tanah-tiang dengan memperhitungkan karakteristik tanah pada berbagai kedalaman. Untuk grup tiang, efek grup yang mengurangi kapasitas lateral individual tiang harus diperhitungkan. Lendutan lateral kepala tiang di bawah beban horizontal rencana harus diperiksa tidak melebihi batas yang dapat ditoleransi oleh struktur atas. Untuk tiang di tanah lunak, analisis harus memperhitungkan kemungkinan pembentukan celah (gap) di sekitar tiang akibat defleksi lateral yang dapat mengurangi resistensi tanah.

Kesimpulan Dan Sintesis

Beban pengereman dan traksi merupakan komponen penting dalam sistem pembebanan jembatan yang mencerminkan interaksi dinamis antara kendaraan dan struktur. Meskipun besarnya umumnya lebih kecil dibandingkan dengan beban vertikal, beban horizontal ini memiliki dampak signifikan pada desain elemen-elemen kritis seperti perletakan, pilar, dan fondasi. Ketentuan SNI yang menetapkan beban pengereman sebesar 25% dari beban gandar dan beban traksi sebesar 5% dari beban lajur telah dikalibrasi berdasarkan pengalaman internasional dan disesuaikan dengan kondisi lalu lintas Indonesia.

Pemahaman yang mendalam tentang mekanisme fisik pembentukan beban horizontal, jalur transfer beban melalui struktur, dan interaksi dengan beban-beban lain merupakan prasyarat untuk menghasilkan desain yang optimal. Analisis struktur harus menggunakan model yang memperhitungkan kekakuan relatif semua elemen untuk mendapatkan distribusi



beban yang realistis. Kombinasi pembebanan harus mengikuti ketentuan SNI dengan mempertimbangkan probabilitas kejadian simultan berbagai beban.

Aspek-aspek khusus seperti geometri jembatan (kelandaian dan tikungan), kondisi lalu lintas (kecepatan dan kepadatan), dan interaksi dengan sistem lain (barrier dan expansion joint) harus dipertimbangkan dalam konteks spesifik setiap proyek. Verifikasi desain harus dilakukan secara komprehensif untuk memastikan bahwa semua elemen memiliki kapasitas yang memadai dengan faktor keamanan yang sesuai. Dengan pendekatan yang sistematis dan berbasis pada prinsip-prinsip fundamental mekanika struktur, insinyur dapat menghasilkan desain jembatan yang aman, ekonomis, dan handal dalam menahan beban pengereman dan traksi sepanjang umur layannya.

Beban Tumbukan Kendaraan pada Struktur Jembatan

Dalam perencanaan struktur jembatan, khususnya yang memiliki pilar terletak di dekat atau di tengah jalan lalu lintas, aspek keselamatan terhadap kemungkinan tumbukan kendaraan menjadi pertimbangan kritis yang tak dapat diabaikan. Standar Nasional Indonesia (SNI) mensyaratkan bahwa elemen-elemen struktural seperti pilar, kolom, dan abutment yang berada dalam zona risiko tumbukan harus dirancang dengan mempertimbangkan beban lateral akibat benturan kendaraan yang kehilangan kendali. Ketentuan ini didasarkan pada analisis probabilistik kecelakaan lalu lintas serta pertimbangan konsekuensi kegagalan struktur yang dapat mengakibatkan keruntuhan progresif jembatan.

Menurut SNI, beban tumbukan kendaraan yang harus dihitung dalam desain adalah sebidang 1.000 kN atau setara dengan 100 ton, yang bekerja dalam arah horizontal. Beban ini merepresentasikan gaya impak maksimum yang dapat dihasilkan oleh kendaraan berat, seperti truk atau bus, yang melaju dengan kepenuhan tertentu dan mengalami tabrakan langsung dengan elemen struktur. Titik aplikasi beban tumbukan ditetapkan pada ketinggian 1,2 meter dari permukaan perkerasan jalan, yang merepresentasikan tinggi rata-rata bumper atau bagian depan kendaraan berat yang paling mungkin berkontak dengan pilar. Penentuan ketinggian ini berdasarkan studi empiris mengenai geometri kendaraan komersial yang dominan di Indonesia serta pola kerusakan yang teramati pada kejadian tumbukan aktual.

Dalam pelaksanaan desain, beban tumbukan ini harus dikombinasikan dengan beban-beban lain sesuai dengan ketentuan kombinasi pembebanan yang berlaku, meskipun umumnya beban tumbukan diperlakukan sebagai beban luar biasa (beban luar biasa) yang tidak perlu dikombinasikan secara penuh dengan beban hidup maksimal. Elemen struktur yang menerima beban tumbukan harus didesain agar mampu menyerap energi kinetik melalui deformasi terkontrol tanpa mengalami kegagalan getas, dengan mempertimbangkan aspek daktilitas dan redundansi struktural. Selain penguatan struktural, penggunaan sistem perlindungan pasif seperti pagar pembatas yang diperkuat, bollard beton, atau penghalang energi-penyerap juga dapat menjadi alternatif mitigasi untuk mengurangi gaya tumbukan yang diterima langsung oleh elemen struktural utama.

Beban Gempa Bumi Pada Struktur Jembatan

1. Karakteristik Umum dan Signifikansi Beban Gempa



Beban gempa bumi merupakan salah satu beban kritis yang harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur jembatan di Indonesia. Kritikalitas beban gempa ini tidak terlepas dari kondisi geografi Indonesia yang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik, sehingga menjadikan wilayah Indonesia sebagai satu zona seismik paling aktif di dunia. Berbeda dengan beban statis seperti berat sendiri atau beban mati yang bekerja secara konstan, beban gempa bersifat dinamis dengan karakteristik yang sangat kompleks, menghasilkan getaran dalam berbagai arah yang dapat mengancam integritas struktural jembatan.

Fenomena gempa bumi menghasilkan gelombang seismik yang merambat melalui lapisan tanah dan mencapai fondasi struktur jembatan. Gelombang ini menyebabkan percepatan mendadak pada massa struktur, yang kemudian memicu gaya inersia sesuai dengan Hukum Newton kedua ($F = m \times a$). Gaya inersia inilah yang menjadi beban gempa yang harus ditahan oleh elemen-elemen struktural jembatan. Karakteristik unik dari beban gempa adalah sifatnya yang siklik dan bolak-balik, berbeda dengan beban gravitasi yang searah, sehingga menimbulkan tantangan tersendiri dalam desain struktur, khususnya terkait dengan kelebatan material dan kemampuan disipasi energi.

2. Komponen Getaran Gempa dan Pengaruhnya

Gempa bumi menghasilkan getaran dalam tiga dimensi yang dapat didekomposisi menjadi komponen horizontal dan vertikal. Komponen horizontal, yang terdiri dari dua arah ortogonal (umumnya diberi notasi arah X dan Y dalam sistem koordinat struktur), biasanya memiliki amplitudo yang lebih besar dan menjadi pertimbangan dominan dalam desain. Getaran horizontal ini menyebabkan perpindahan lateral pada struktur atas jembatan (superstruktur), yang kemudian menghasilkan momen guling dan gaya geser pada kolom pilar serta fondasi. Untuk struktur jembatan yang memiliki bentang panjang atau konfigurasi yang tidak beraturan, efek torsi akibat getaran horizontal juga harus diperhitungkan.

Komponen vertikal gempa, meskipun umumnya lebih kecil dibandingkan komponen horizontal (biasanya diasumsikan sekitar 2/3 dari komponen horizontal), tetap memiliki signifikansi penting, terutama untuk jembatan bentang panjang, jembatan busur, atau jembatan gantung di mana gaya gravitasi menjadi dalam mekanisme penahan beban. Getaran vertikal dapat menyebabkan variasi tegangan aksial yang drastis pada elemen-elemen seperti kabel, gantungan, atau busur, yang dalam kondisi ekstrem dapat menyebabkan fenomena pengangkatan (terangkatnya struktur) atau bahkan kehilangan kontak antara struktur atas dengan perletakan.

Parameter-Parameter yang Mempengaruhi Beban Gempa

a. Massa Struktur

Massa struktur merupakan parameter fundamental dalam perhitungan gaya gempa karena hubungan linear antara massa dan gaya inersia. Dalam konteks jembatan, massa yang diperhitungkan mencakup seluruh massa struktur atas (pelat lantai, gelagar utama, gelagar melintang, diafragma), struktur bawah (kolom

pilar, kepala jembatan, abutment), serta sebagian dari beban mati tambahan seperti lapisan aspal dan utilitas yang terpasang permanen pada jembatan. Untuk perhitungan beban gempa, beban hidup kendaraan umumnya tidak dihitung secara penuh, melainkan hanya sebagian kecil (biasanya 0-50% tergantung pada jenis dan probabilitas keberadaan kendaraan saat gempa terjadi). Distribusi massa pada struktur jembatan juga memiliki pengaruh signifikan terhadap respon dinamis. Jembatan dengan distribusi massa yang tak merata atau memiliki konsentrasi massa pada titik-titik tertentu (misalnya pada kepala dermaga yang masif) akan mengalami pola getaran yang lebih kompleks dan berpotensi menghasilkan tegangan lokal yang lebih tinggi. Oleh karena itu, dalam tahap desain konseptual, insinyur perlu mempertimbangkan distribusi massa yang seoptimal mungkin untuk meminimalkan respon gempa.

b. Percepatan Gempa di Lokasi

Percepatan gempa di suatu lokasi merupakan representasi dari intensitas getaran tanah yang dapat terjadi akibat aktivitas seismik. Parameter ini biasanya dinyatakan dalam bentuk percepatan gravitasi (g) atau dalam satu gal ($1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$). Di Indonesia, percepatan gempa untuk berbagai periode ulang telah dipetakan dalam bentuk peta hazard gempa yang diterbitkan oleh Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN) dan diadopsi dalam standar perencanaan seperti SNI 2833:2016 untuk jembatan.

Percepatan gempa yang digunakan dalam desain umumnya adalah percepatan spektral yang telah disesuaikan dengan periodee getar struktur, bukan percepatan puncak tanah (Puncak Akselerasi Tanah/PGA) semata. Hal ini karena respon struktur sangat tergantung pada frekuensi getaran gempa relatif terhadap frekuensi struktur alami. Fenomena resonansi dapat terjadi ketika frekuensi getaran gempa mendekati frekuensi struktur alam, yang mengakibatkan amplifikasi respon yang signifikan. Untuk Indonesia, percepatan gempa bervariasi secara geografi, dengan nilai tertinggi umumnya terdapat di zona subduksi seperti Sumatera Barat, Bengkulu, Nusa Tenggara, dan Papua.

c. Karakteristik Dinamis Struktur

Karakteristik dinamis struktur mencakup parameter beberapa penting yang menentukan bagaimana struktur akan merespon eksitasi gempa:

- **Periode Getar Natural:** Periode getar natural adalah waktu yang diperlukan struktur untuk menyelesaikan satu siklus getaran bebas, dan merupakan fungsi dari kekakuan dan massa struktur ($T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$). Jembatan dengan periode getar yang panjang (struktur yang lebih fleksibel) umumnya akan menarik gaya gempa yang lebih kecil tetapi mengalami deformasi yang lebih besar. Sebaliknya, jembatan dengan periode getar pendek (struktur yang lebih kaku) akan mengalami percepatan yang lebih besar dan gaya gempa yang lebih tinggi. Untuk jembatan multi bentang, terdapat multiple mode shapes

dengan periode getar yang berbeda, dan kontribusi dari mode masing-masing harus dihitung dalam analisis.

- **Damping (Redaman):** Damping adalah kemampuan struktur untuk mendisipasi energi getaran. Dalam struktur jembatan, mekanisme redaman terjadi melalui berbagai cara: gesekan internal pada material (viscous damping), gesekan pada sambungan dan bearing, serta radiasi energi ke tanah melalui fondasi. Nilai redaman dinyatakan dalam rasio redaman kritis (ξ), dan untuk struktur beton bertulang umumnya diasumsikan berkisar 5%, sedangkan untuk struktur baja sekitar 2-3%. Struktur dengan redaman yang lebih tinggi akan mengalami penurunan amplitudo getaran yang lebih cepat, sehingga mengurangi respon puncak akibat gempa. Untuk meningkatkan kapasitas disipasi energi, dapat digunakan perangkat khusus seperti peredam kental, peredam gesekan, atau bantalan karet timah pada sistem perletakan.
- **Mode Shape dan Partisipasi Massa Modal:** Setiap struktur memiliki pola deformasi karakteristik (bentuk mode) yang bersesuaian dengan periode getar naturalnya. Mode pertama (fundamental mode) umumnya memiliki kontribusi terbesar terhadap respon total struktur. Namun, untuk struktur jembatan yang kompleks atau irregular, modus-modus yang lebih tinggi juga dapat memberikan kontribusi signifikan dan tak boleh diabaikan. Analisis modal harus dilakukan hingga partisipasi massa kumulatif mencapai minimal 90% dari total massa struktur untuk setiap arah yang ditinjau.

d. Kondisi Tanah

Kondisi tanah di lokasi jembatan memiliki pengaruh yang sangat berarti terhadap karakteristik getaran yang diterima oleh struktur. Tanah berperan sebagai medium propagasi gelombang seismik dari sumber gempa (fokus gempa) menuju fondasi struktur. Parameter yang paling penting adalah klasifikasi situs berdasarkan kepenuhan gelombang geser rata-rata (V_{s30}), yang menggambarkan kekakuan tanah hingga kedalaman 30 meter.

SNI mengklasifikasikan tanah ke dalam beberapa kaca situs (Kelas Situs), dari tanah keras (batuan) hingga tanah lunak. Tanah lunak memiliki kecenderungan untuk mengamplifikasi getaran gempa, terutama pada frekuensi rendah (periode panjang), yang dapat meningkatkan respon struktur secara signifikan. Fenomena ini dikenal sebagai site amplification. Sebaliknya, tanah yang sangat lunak atau jenuh udara juga dapat mengalami fenomena likuefaksi saat gempa, di mana tanah kehilangan kekuatannya dan berperilaku seperti fluida, yang dapat menyebabkan kegagalan fondasi.

Selain amplifikasi, kondisi tanah juga mempengaruhi interaksi tanah-struktur (soil-structure interaction/SSI). Pada tanah lunak, fleksibilitas tanah dapat menyebabkan pemanjangan periode getar efektif struktur dan peningkatan redaman akibat radiasi energi ke tanah. Efek SSI dapat menguntungkan atau merugikan tergantung pada karakteristik struktur dan tanah, sehingga perlu



dievaluasi secara hati-hati, terutama untuk jembatan dengan fondasi dalam atau masif.

Metode Analisis dan Implementasi dalam Desain

Dalam praktik perencanaan jembatan, beban gempa dapat dianalisis menggunakan berbagai metode dengan tingkat kompleksitas yang berbeda. Metode analisis statik ekuivalen cocok untuk jembatan reguler dengan tingkat keteraturan tinggi, di mana gaya gempa dihitung sebagai gaya lateral ekuivalen yang distribusinya mengikuti distribusi massa dan mode getar fundamental. Untuk jembatan yang lebih kompleks atau irregular, analisis respon spektrum atau analisis riwayat waktu (analisis sejarah waktu) diperlukan untuk menangkap respon dinamis yang lebih akurat.

Desain jembatan tahan gempa modern tak hanya fokus pada kekuatan, tetapi juga pada daktilitas dan mekanisme disipasi energi. Konsep capacity design diterapkan dengan mengidentifikasi "engsel plastik" yang direncanakan pada lokasi tertentu (biasanya pada kolom pilar), sementara elemen lainnya didesain dengan kekuatan lebih (kekuatan berlebih) untuk memastikan mekanisme keruntungan yang terkontrol dan mencegah kegagalan getas.

1.3 KOMBINASI PEMBEBANAN PADA STRUKTUR JEMBATAN

1. Konsep Dasar dan Filosofi Kombinasi Pembebanan

Dalam perencanaan struktur jembatan, pendekatan realistis mengharuskan engineer untuk mempertimbangkan bahwa struktur akan mengalami beberapa jenis beban secara bersamaan sepanjang masa layannya. Tidak ada struktur yang hanya dibebani oleh satu jenis beban secara eksklusif; sebaliknya, kombinasi dari berbagai beban akan bekerja secara simultan pada waktu tertentu. Sebagai ilustrasi, pada saat jembatan dilalui oleh kendaraan berat (beban hidup), struktur tersebut juga menahan berat sendirinya (beban mati), dan mungkin juga mengalami tekanan angin (beban angin) atau perbedaan suhu (beban temperatur).

Namun demikian, terdapat pertimbangan probabilistik yang mendasari bahwa tidak semua beban akan mencapai intensitas maksimumnya secara bersamaan pada waktu yang sama. Sebagai contoh, probabilitas terjadinya gempa bumi berkekuatan besar bersamaan dengan kondisi jembatan yang penuh dengan kendaraan beban maksimum dan angin berkecepatan ekstrem adalah sangat kecil. Oleh karena itu, konsep kombinasi pembebanan dikembangkan untuk mengakomodasi realitas bahwa beban-beban tertentu dapat terjadi secara bersamaan, namun dengan tingkat intensitas yang bervariasi dan disesuaikan dengan probabilitas kejadiannya.

Standar Nasional Indonesia (SNI) mengadopsi pendekatan desain berbasis probabilitas yang mengintegrasikan teori reliabilitas struktural untuk menetapkan kombinasi pembebanan yang rasional. Pendekatan ini mempertimbangkan bahwa setiap jenis beban memiliki karakteristik statistik yang berbeda dalam hal variabilitas, ketidakpastian, dan probabilitas kejadiannya. Beban-beban yang memiliki ketidakpastian tinggi atau variabilitas besar akan diberi faktor pengali (load factor) yang lebih besar untuk memberikan margin keamanan yang memadai.

2. Kategori Kombinasi Pembebanan dan Tujuannya

Sistem kombinasi pembebanan dalam SNI dibagi menjadi beberapa kategori utama yang masing-masing memiliki tujuan verifikasi yang berbeda. Pembagian ini penting karena kriteria kinerja struktur berbeda tergantung pada kondisi pembebanan yang ditinjau. Secara umum, terdapat dua kategori besar: kombinasi layanan (*service load combination*) dan kombinasi kekuatan (*strength load combination*).

a. Kombinasi Layanan (*Service Load Combination*)

Kombinasi layanan dirancang untuk mengevaluasi kinerja struktur dalam kondisi operasional normal sehari-hari, di mana struktur diharapkan berfungsi tanpa mengalami kerusakan atau deformasi permanen yang signifikan. Tujuan utama dari kombinasi layanan adalah untuk memastikan bahwa struktur memenuhi persyaratan-persyaratan fungsional dan kenyamanan yang telah ditetapkan, yang mencakup:

- i. Batasan Lendutan (Deflection Limit): Lendutan berlebih pada struktur jembatan dapat menyebabkan ketidaknyamanan bagi pengguna, kerusakan pada elemen non-struktural seperti lapisan aspal atau utilitas, serta memberikan kesan psikologis yang negatif mengenai keamanan jembatan. SNI menetapkan batasan lendutan maksimum yang diizinkan, umumnya dinyatakan sebagai rasio terhadap bentang (misalnya $L/800$ untuk lendutan akibat beban hidup pada kondisi layanan). Verifikasi terhadap batasan lendutan ini dilakukan dengan menggunakan kombinasi beban layanan tanpa faktor pengali atau dengan faktor pengali yang mendekati unity.
- ii. Kontrol Retak (Crack Control): Untuk struktur beton bertulang, pembentukan retak adalah fenomena yang tidak dapat dihindari sepenuhnya karena beton memiliki kuat tarik yang rendah. Namun, lebar dan pola retak harus dikontrol untuk mencegah korosi tulangan, penetrasi air atau bahan agresif, serta untuk menjaga estetika dan durabilitas struktur. Kombinasi layanan digunakan untuk menghitung lebar retak yang terjadi pada kondisi operasional normal, dan memastikan bahwa lebar retak tersebut tidak melebihi batasan yang diizinkan (umumnya 0,3-0,4 mm untuk struktur yang terekspos lingkungan agresif).
- iii. Tegangan Kerja (Working Stress): Meskipun desain modern umumnya menggunakan metode kekuatan batas (*ultimate strength design*), verifikasi tegangan kerja tetap relevan untuk beberapa kondisi khusus, seperti pada struktur prategang di mana tegangan pada tendon dan beton harus dikontrol ketat untuk mencegah kehilangan gaya prategang atau kegagalan akibat fatigue. Kombinasi layanan memastikan bahwa tegangan yang terjadi pada material berada dalam rentang elastis dan tidak menyebabkan deformasi permanen.

Rumus umum untuk kombinasi layanan adalah:

$$\text{Kombinasi Layanan} = \text{Beban Mati} + \text{Beban Hidup} + \text{Beban Angin (jika relevan)}$$

Dalam kombinasi ini, beban-beban dijumlahkan tanpa faktor pengali (atau dengan faktor pengali = 1,0), karena tujuannya adalah untuk memodelkan kondisi aktual yang paling mungkin terjadi selama masa layan normal struktur. Beban angin dimasukkan dengan intensitas yang sesuai untuk kondisi operasional normal (bukan angin ekstrem), dan dalam beberapa kasus, hanya sebagian dari beban hidup yang diperhitungkan jika kombinasi dengan beban angin dianggap terlalu konservatif.

b. Kombinasi Kekuatan (*Strength Load Combination*)

Kombinasi kekuatan dirancang untuk memverifikasi bahwa struktur memiliki kapasitas yang memadai untuk menahan beban-beban ekstrem atau kombinasi beban yang tidak menguntungkan tanpa mengalami kegagalan struktural. Fokus utama dari kombinasi kekuatan adalah keamanan struktur terhadap keruntuhan atau kerusakan berat yang dapat membahayakan nyawa manusia atau menyebabkan kerugian ekonomi yang besar. Dalam kombinasi ini, beban-beban dikalikan dengan faktor pengali yang lebih besar dari satu untuk memberikan margin keamanan yang memadai terhadap ketidakpastian dalam estimasi beban, variabilitas kekuatan material, dan ketidaksempurnaan dalam konstruksi.

◦ **Kombinasi Kekuatan Tipe 1: Beban Gravitasi Dominan**

Kombinasi ini digunakan untuk kondisi di mana beban gravitasi (beban mati dan beban hidup) merupakan beban dominan, dan pengaruh beban lingkungan seperti angin diperhitungkan sebagai beban sekunder:

$$1,2 \times \text{Beban Mati} + 1,6 \times \text{Beban Hidup} + \text{Faktor} \times \text{Beban Angin}$$

Dalam kombinasi ini, faktor pengali 1,2 pada beban mati mencerminkan bahwa meskipun beban mati dapat diestimasi dengan akurasi yang relatif tinggi (karena didasarkan pada dimensi dan berat jenis material yang diketahui), tetap terdapat ketidakpastian yang harus diantisipasi. Ketidakpastian ini dapat bersumber dari variasi berat jenis material aktual dibandingkan dengan nilai nominal, perbedaan dimensi aktual hasil konstruksi dengan dimensi desain, serta tambahan beban dari utilitas atau elemen non-struktural yang mungkin ditambahkan di masa depan.

Faktor pengali 1,6 pada beban hidup mencerminkan tingkat ketidakpastian yang lebih tinggi dibandingkan beban mati. Beban hidup kendaraan bersifat sangat variabel dan sulit diprediksi dengan akurat, baik dalam hal besaran beban, distribusi spasial pada jembatan, maupun dinamika pembebanan. Faktor 1,6 ini juga mengakomodasi kemungkinan terjadinya kelebihan muatan (*overloading*) yang sering terjadi di lapangan, meskipun telah ada regulasi batas muatan kendaraan. Selain itu, faktor ini juga memberikan margin terhadap kemungkinan perubahan pola lalu lintas atau peningkatan beban kendaraan di masa depan akibat perkembangan teknologi otomotif atau kebutuhan transportasi.

Beban angin dalam kombinasi ini umumnya diberi faktor yang lebih kecil atau bahkan diabaikan dalam beberapa standar, dengan pertimbangan bahwa probabilitas

terjadinya angin kencang bersamaan dengan kondisi beban hidup maksimum adalah relatif kecil. Namun, untuk jembatan yang terletak di daerah intensitas angin tinggi atau untuk jembatan dengan geometri yang sensitif terhadap beban angin, komponen ini tetap harus dihitung dengan faktor yang sesuai.

- **Kombinasi Kekuatan Tipe 2: Beban Gempa Dominan**

Kombinasi ini digunakan untuk kondisi di mana beban gempa merupakan beban dominan, yang merepresentasikan kondisi ekstrem dengan probabilitas kejadian yang rendah namun konsekuensi yang sangat serius:

$$1,2 \times \text{Beban Mati} + 1,0 \times \text{Beban Gempa} + 0,5 \times \text{Beban Hidup}$$

Dalam kombinasi gempa, beban mati tetap dikalikan dengan faktor 1,2 dengan alasan yang sama seperti pada kombinasi sebelumnya. Beban gempa diberi faktor pengali 1,0 karena intensitas gempa yang digunakan dalam desain (gempa desain) telah dipilih berdasarkan analisis hazard seismik dengan periode ulang tertentu (umumnya 1000-2500 tahun untuk jembatan penting), sehingga sudah mencakup probabilitas kejadian yang sesuai dengan target tingkat keamanan. Pemberian faktor pengali lebih dari 1,0 pada beban gempa akan menghasilkan desain yang terlalu konservatif dan tidak ekonomis.

Aspek yang sangat penting dalam kombinasi gempa adalah penggunaan faktor 0,5 pada beban hidup kendaraan. Faktor reduksi ini didasarkan pada pertimbangan probabilistik bahwa kemungkinan jembatan mengalami gempa pada saat yang sama dengan kondisi beban hidup maksimal (jembatan penuh dengan kendaraan beban berat) adalah sangat kecil. Dalam realitas operasional, kondisi beban hidup pada jembatan bervariasi secara temporal, dan kondisi beban hidup maksimal hanya terjadi dalam persentase waktu yang sangat kecil dari total masa layan jembatan. Oleh karena itu, untuk analisis gempa, diasumsikan bahwa hanya sebagian dari beban hidup (umumnya 25-50% tergantung pada jenis Jembatan dan pola lalu lintas) yang hadir pada saat gempa kejadian.

Perlu dicatat bahwa untuk jembatan dengan lalu lintas padat dan konstan (seperti jembatan perkotaan utama dengan volume lalu lintas tinggi), faktor reduksi beban hidup mungkin perlu disesuaikan menjadi lebih tinggi, karena probabilitas keberadaan kendaraan pada saat gempa menjadi lebih besar. Sebaliknya, untuk jembatan dengan lalu lintas rendah atau sporadis, faktor yang lebih kecil dapat digunakan.

c. Filosofi Faktor Pengali (Faktor Beban)

Faktor pengali yang digunakan dalam kombinasi pembebanan bangun merupakan angka arbiter, melainkan hasil dari kalibrasi berbasis reliabilitas yang mempertimbangkan beberapa aspek fundamental:

Variabilitas dan Ketidakpastian Beban



Setiap jenis beban memiliki tingkat variabilitas dan ketidakpastian yang berbeda. Beban mati memiliki variabilitas yang paling rendah karena dapat diestimasi dengan cukup akurat berdasarkan dimensi dan properti material yang diketahui. Koefisien variasi (rasio standar deviasi terhadap nilai rata-rata) untuk beban mati umumnya berkisar 8-10%. Sebaliknya, beban hidup memiliki variabilitas yang jauh lebih tinggi (koefisien variasi bisa mencapai 20-40%), sehingga memerlukan faktor pengali yang lebih besar untuk menakomodasi ketidakpastian ini.

Beban lingkungan seperti gempa dan angin memiliki karakteristik ketidakpastian yang berbeda. Untuk gempa, intensi yang digunakan dalam desain sudah dipilih berdasarkan analisis probabilistik hazard dengan periode ulang yang panjang, sehingga ketidakpastian utama terletak pada respon struktur dan mekanisme disipasi energi, bukan pada beban itu sendiri. Untuk angin, terdapat ketidakpastian dalam estimasi kepenuhan angin desain, koefisien aerodinamis, serta efek buffeting dan pusaran shedding untuk struktur tertentu.

d. Konsekuensi Kegagalan

Faktor pengali juga mencerminkan tingkat keparahan konsekuensi jika terjadi kegagalan akibat meremehkan beban. Untuk struktur jembatan yang merupakan infrastruktur kritis dengan konsekuensi kegagalan yang sangat serius (baik dalam hal korban jiwa maupun dampak ekonomi dan sosial), faktor pengali yang lebih tinggi digunakan untuk memberikan margin keamanan yang lebih besar. Ini adalah implementasi dari prinsip consequence-based design dalam reliability theory.

Tingkat Kepercayaan dan Reliabilitas Sasaran

Standar modern seperti SNI dan AASHTO LRFD menggunakan pendekatan Load and Resistance Factor Design (LRFD) yang dikalibrasi untuk mencapai indeks reliabilitas target (β) yang seragam untuk berbagai kombinasi pembebanan. Indeks reliabilitas adalah ukuran probabilitas struktur kegagalan, dengan nilai $\beta = 3,5$ (yang berkorespondensi dengan probabilitas kegagalan sekitar 1 dalam 4.300) umumnya digunakan sebagai target untuk jembatan dengan tingkat kepentingan normal. Faktor-faktor pengali beban dikalibrasi sedemikian rupa sehingga kombinasi pembebanan yang berbeda akan menghasilkan tingkat reliabilitas yang konsisten.

Probabilitas Kejadian Simultan

Faktor reduksi pada beban tertentu dalam kombinasi (seperti faktor 0,5 pada beban hidup dalam kombinasi gempa) mencerminkan probabilitas rendah terjadinya dua atau lebih peristiwa ekstrem secara simultan. Pendekatan ini didasarkan pada teori statistik tentang nilai ekstrem (teori nilai ekstrim) dan prinsip bahwa probabilitas gabungan dari beberapa kejadian independen adalah perkalian probabilitas masing-masing kejadian.

e. Kombinasi Pembebanan Khusus dan Pertimbangan Tambahan

Selain kombinasi dasar yang telah disebutkan, terdapat beberapa kombinasi pembebanan khusus yang mungkin perlu ditinjau untuk kondisi tertentu:



- Kombinasi dengan Beban Temperatur: Untuk Jembatan Dengan Bentang Panjang Atau Struktur Yang Dikekang Terhadap Deformasi Temperatur, Efek Temperatur Dapat Menghasilkan Tegangan Yang Signifikan Dan Harus Dikombinasikan Dengan Beban Lainnya. Kombinasi ini menjadi kritis terutama untuk jembatan dengan perletakan yang tidak menakomodasi pergerakan bebas atau untuk struktur integral (tanpa sambungan ekspansi).
- Kombinasi dengan Beban Pengereman dan Traksi: Beban horisontal akibat pengaman atau akselerasi kendaraan harus dikombinasikan dengan beban vertikal kendaraan untuk menghasilkan kondisi pembebanan yang komprehensif pada struktur bawah Jembatan dan fondasi.
- Kombinasi dengan Beban Tumbukan: Untuk pilar yang terletak di tengah atau dekat jalan lalu lintas, kombinasi beban tumbukan dengan beban gravitasi perlu ditinjau, meskipun umumnya beban tumbukan diperlakukan sebagai beban luar biasa (beban luar biasa) yang tidak perlu dikombinasi dengan beban hidup maksimal.
- Kombinasi Konstruksi: Selama tahap konstruksi, struktur mungkin mengalami kombinasi pembebanan yang berbeda dari kondisi operasi normal. Kombinasi konstruksi harus mempertimbangkan beban dari peralatan konstruksi, beban dari elemen struktural yang belum terpasang lengkap, serta metode konstruksi yang dapat menghasilkan distribusi gaya yang tidak biasa.

f. Implementasi dalam Praktik Desain

Dalam praktik perencanaan jembatan, insinyur harus mengevaluasi semua kombinasi pembebanan yang relevan dan memastikan bahwa struktur memenuhi persyaratan untuk setiap kombinasi. Proses ini melibatkan:

- Identifikasi beban-beban yang relevan untuk lokasi dan jenis jembatan yang direncanakan
- Pemilihan kombinasi pembebanan yang kritis berdasarkan karakteristik struktur dan kondisi lingkungan
- Analisis struktural untuk menghitung gaya dalam dan tegangan yang dihasilkan oleh setiap kombinasi
- Verifikasi kapasitas dengan membandingkan permintaan (gaya yang terjadi) kapasitas terhadap (kekuatan elemen) untuk setiap kombinasi
- Iterasi desain jika diperlukan untuk memastikan semua persyarat terpenuhi

Software analisis struktur modern umumnya telah mengintegrasikan kombinasi pembebanan standar sesuai dengan kode yang berlaku, sehingga memudahkan insinyur dalam melakukan evaluasi komprehensif terhadap berbagai skenario pembebanan.

Kesimpulan dan Implikasi

Sistem kombinasi pembebanan merupakan jantung dari filosofi desain struktural modern yang usaha mencapai keseimbangan optimal antara keamanan, ekonomi, dan kinerja. Pemahaman mendalam terhadap rasional di balik faktor-faktor pengali dan

logika kombinasi pembebanan memungkinkan insinyur untuk membuat keputusan desain yang diinformasikan dan dapat mempertanggungjawabkan keamanan struktur yang dirancangnya. Penting untuk dipahami bahwa kombinasi pembebanan yang tercantum dalam standar adalah persyaratan minimal, dan insinyur memiliki tanggung jawab profesional untuk mengevaluasi apakah kombinasi tambahan atau faktor pengali yang lebih konservatif diperlukan berdasarkan kondisi khusus proyek, tingkat kepentingan struktur, atau ketidakpastian yang tidak tertangkap sepenuhnya oleh standar.

1.4 KONSEP DESAIN TAHAN GEMPA PADA STRUKTUR JEMBRANGAN

1. Peta Hazard Gempa Indonesia: Fondasi Perencanaan Berbasis Risiko Seismik

Peta hazard gempa Indonesia yang diadopsi dalam SNI 2833:2016 merupakan hasil kerja komprehensif Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN) tahun 2017, yang menandai evolusi signifikan dalam rumahaman risiko seismik di Indonesia. Peta ini dikembangkan melalui pendekatan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) yang mengintegrasikan berbagai sumber data dan metodologi analisis seismotektonik modern. Keunggulan peta terbaru ini dibandingkan generasi sebelumnya terletak pada resolusi spasial yang lebih tinggi, basis data gempa yang lebih lengkap, dan pemahaman yang lebih baik mengenai karakteristik sumber-sumber gempa di Indonesia.

Pengembangan peta melibatkan empat komponen fundamental yang saling terintegrasi:

- **Analisis Data Gempa Historis:** Database gempa historis Indonesia dikompilasi dari berbagai sumber, mencakup periode sejak tahun 1900 hingga saat peta dikembangkan. Data ini tidak hanya mencakup gempa-gempa besar yang tercatat dengan baik, tetapi juga gempa-gempa kecil hingga tengah yang penting untuk memahami pola seismisitas regional. Katalog gempa ini kemudian dibersihkan dari duplikasi, dikoreksi untuk inhomogenitas magnitudo (karena perubahan skala magnitudo yang digunakan dari waktu ke waktu), dan dilakukan decluster untuk memisahkan mainshock dari aftershock. Proses ini penting karena analisis hazard seismik mensyaratkan data gempa yang independen secara statistik. Dari analisis data historis ini, dapat diidentifikasi zona-zona seismisitas tinggi yang berkorelasi dengan batas-batas lempeng tektonik aktif. Zona subduksi di sepanjang pantai barat Sumatera, selatan Jawa, dan utara Papua menunjukkan tingkat aktivitas seismik yang sangat tinggi dengan potensi gempa megathrust berkekuatan $M > 8,0$. Sementara itu, zona sesar aktif di daratan seperti Sesar Sumatera (Sesar Besar Sumatera), Sesar Palu-Koro, dan Sesar Sorong menunjukkan karakteristik gempa yang berbeda dengan kedalaman yang lebih dangkal namun frekuensi kejadian yang cukup tinggi.
- **Pemetaan Sesar Aktif:** Identifikasi dan karakterisasi sesar-sesar aktif dilakukan menggunakan kombinasi teknologi geodesi GPS, pencitraan satelit, survei geologi lapangan, dan analisis paleoseismologi. Teknologi GPS geodetik memungkinkan pengukuran laju pergerakan lempeng dengan presisi milimeter per tahun, yang



kemudian digunakan untuk memperkirakan akumulasi strain tektonik pada zona-zona sesar. Data ini dikombinasikan dengan analisis morfotektonik dari citra satelit resolusi tinggi (seperti SRTM dan ALOS PALSAR) untuk mengidentifikasi jejak-jejak sesar aktif di permukaan.

Paleoseismologi, yang melibatkan parit penggalian melantasi jejak sesar (trenching) untuk mengidentifikasi jejak gempa purba, memberikan informasi krusial tentang slip rate (laju pergerakan sesar) dan interval perulangan (interval pengulangan gempa) untuk sesar-sesar utama. Informasi ini sangat penting untuk mengestimasi potensi besarnya maksimum yang dapat dihasilkan oleh sesar tersebut serta probabilitas kejadiannya. Sebagai contoh, studi paleoseismologi pada segmen Mentawai dari zona subduksi Sumatra mengungkapkan bahwa gempa megathrust dengan magnitude $> 8,5$ memiliki recurrence interval sekitar 200-400 tahun, informasi yang sangat penting untuk perencanaan infrastruktur kritis di wilayah tersebut.

- **Model Seismotektonik:** Pengembangan model seismotektonik melibatkan sintesis pemahaman geologi, geofisika, dan geodesi untuk menjelaskan mekanisme pembangkitan gempa di Indonesia. Indonesia terletak pada konfigurasi tektonik yang sangat kompleks, di mana interaksi antara tiga lempeng utama (Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik) serta lempeng mikro beberapa (seperti Lempeng Filipina, Lempeng Caroline, dan Lempeng Sunda) menciptakan berbagai jenis batas lempeng: zona subduksi (konvergen), sesar transformasi (strike-slip), dan menyebar punggung bukit (divergen).

Model seismotektonik mengidentifikasi berbagai sumber gempa berdasarkan karakteristik geometri dan mekanisme deformasinya. Zona subduksi dimodelkan antarmuka sebagai lempeng dengan geometri yang didefinisikan oleh kedalaman, sudut kemiringan (dip), dan segmentasi berdasarkan koefisien kopling variasi. Sesar-sesar transform di daratan dimodelkan sebagai line source dengan panjang, orientasi, kedalaman seismogenik, dan kinematika yang spesifik. Area-area dengan seismisitas tersebar yang tidak dapat diatribusikan ke sesar spesifik (distributed seismisity atau background seismisity) dimodelkan sumber area sebagai dengan karakteristik statistik yang diturunkan dari seismisitas historis.

- **Perhitungan Probabilistik:** Komponen terakhir adalah implementasi metodologi PSHA yang mengintegrasikan semua informasi sumber gempa untuk menghitung bahaya pada setiap titik di Indonesia. PSHA memperhitungkan ketidakpastian dalam lokasi, magnitude, dan timing gempa masa depan melalui pendekatan statistik. Untuk setiap sumber gempa, digunakan model rekurensi magnitudo (biasanya hubungan Gutenberg-Richter) yang menghubungkan frekuensi kejadian dengan magnitudo gempa.

Persamaan prediksi gerak tanah (GMPEs) hubungan atenuasi atau kemudian digunakan untuk memprediksi intensi getaran tanah (dalam bentuk percepatan spektral untuk berbagai periode) pada suatu lokasi sebagai fungsi dari magnitudo, jarak, mekanisme gempa, dan situs kondisi. Untuk Indonesia, digunakan beberapa GMPE yang

dikembangkan untuk zona subduksi (seperti Zhao et al., Atkinson & Boore) dan crustal earthquakes (seperti Boore & Atkinson, Chiou & Youngs) dengan skema pembobotan berdasarkan relevansinya terhadap kondisi tektonik Indonesia.

Output akhir dari PSHA adalah kurva hazard yang menunjukkan probabilitas exceedance untuk berbagai tingkat intensi getaran pada periode ulang tertentu. Dari kurva ini, dapat ditentukan nilai percepatan tanah atau percepatan spektral yang bersesuaian dengan periode ulang yang dikehendaki untuk desain (misalnya 500, 1000, atau 2500 tahun).

2. Interpretasi Dan Aplikasi Peta Hazard

Peta hazard gempa menyajikan distribusi spasial dari beberapa parameter seismik penting:

- **Akselerasi Tanah Puncak (PGA):** PGA merepresentasikan percepatan horizontal maksimum yang diharapkan terjadi pada batu dasar (bedrock) untuk periode ulang tertentu. Nilai PGA memberikan indikasi umum tentang intensitas getaran, namun untuk desain struktur yang lebih sofisticated, spektrum respon percepatan lebih relevan karena mempertimbangkan karakteristik dinamis struktur.

Distribusi PGA di Indonesia menunjukkan gradien yang sangat besar, mencerminkan heterogenitas risiko seismik. Wilayah dengan PGA tinggi ($> 0,6g$ untuk periode ulang 1000 tahun) meliputi pantai barat Sumatera (khususnya Aceh, Sumatera Barat, Bengkulu), Nusa Tenggara Barat, dan Papua. Wilayah dengan PGA moderat ($0,3-0,5g$) meliputi Jawa bagian selatan, Sulawesi, dan Maluku. Sementara wilayah dengan PGA relatif rendah ($< 0,3g$) meliputi Kalimantan dan sebagian Sumatra bagian timur yang jauh dari batas lempeng aktif.

Sebagai contoh konkret, untuk Jakarta yang terletak di pesisir utara Jawa, nilai PGA untuk periode ulang 1000 tahun berkisar $0,3-0,4g$. Meskipun nilai ini tidak terlalu tinggi dibandingkan daerah dekat subduksi, tetap signifikan dan harus diperhitungkan dalam desain. Perlu dicatat bahwa Jakarta, meskipun relatif jauh dari episentrum gempa megathrust (sekitar 200-300 km dari zona subduksi selatan Jawa), tetap dapat mengalami getaran yang signifikan akibat amplifikasi oleh lapisan sedimen lunak yang sangat di cekungan Jakarta (hingga beberapa kilometer).

Sebaliknya, Padang yang terletak sangat dekat dengan zona subduksi Mentawai menunjukkan nilai PGA yang jauh lebih tinggi, mencapai $0,6-0,8g$ untuk periode ulang yang sama. Nilai ini mengindikasikan bahwa struktur di Padang harus dirancang untuk menahan getaran yang hampir dua kali lipat dibandingkan Jakarta, yang memiliki implikasi signifikan terhadap biaya konstruksi dan pemilihan sistem struktur.

- **Spektrum Response Percepatan:** Selain PGA, peta hazard juga menyediakan percepatan spektral untuk berbagai periode struktur alami (biasanya $T = 0,2s; 0,5s; 1,0s; 2,0s$). Parameter ini lebih relevan untuk desain karena respon struktur sangat tergantung pada periode strukturnya alami. Struktur dengan periode pendek (bangunan kaku atau jembatan bentang pendek) akan mengalami percepatan yang lebih besar pada periode pendek, sementara struktur dengan periode panjang

(bangunan tinggi fleksibel atau jembatan bentang panjang) akan mengalami percepatan maksimum pada periode yang lebih panjang.

3. Kategori Risiko Jembatan: Stratifikasi Berdasarkan Konsekuensi Kegagalan

a. Filosofi Kategori Risiko

Konsep kategori risiko dalam SNI 2833:2016 mencerminkan pengakuan bahwa tak semua jembatan memiliki tingkat kepentingan yang sama dari perspektif sosial, ekonomi, dan keselamatan publik. Pendekatan ini sejalan dengan filosofi performance-based design yang mengakui bahwa level kinerja yang ditargetkan harus sebanding dengan konsekuensi kegagalan struktur. Jembatan yang merupakan lifeline critical facility atau yang memiliki fungsi strategis dalam jaringan transportasi nasional harus memiliki tingkat reliabilitas dan ketahanan yang lebih tinggi dibandingkan jembatan lokal dengan fungsi terbatas.

Konsep ini juga mengintegrasikan pertimbangan resiliensi infrastruktur, yaitu kemampuan sistem transportasi untuk cepat pulih setelah kejadian ekstrem seperti gempa besar. Jembatan kategori kritis tidak hanya harus tetap berdiri setelah gempa, tetapi juga harus tetap fungsional untuk mendukung operasi tanggap darurat, evakuasi, dan pemulihan pascabencana. Sebaliknya, jembatan kategori standar mungkin dapat mentolerir kerusakan yang memerlukan waktu perbaikan, asalkan tidak runtuh total yang dapat menyebabkan korban jiwa.

b. Klasifikasi Kategori dan Kriteria

Kategori Kritis (Critical Category): Jembatan kategori kritis adalah jembatan yang keberadaannya sangat penting bagi keselamatan publik dan kontinuitas operasi wilayah, khususnya dalam kondisi pasca-bencana. Kriteria untuk kategori ini meliputi:

- *Fungsi Evakuasi dan Tanggap Darurat:* Jembatan yang merupakan jalan evakuasi primer untuk tanah rawan tsunami, banjir bandang, atau bahaya lainnya. Contohnya adalah jembatan yang menghubungkan zona merah tsunami di pesisir dengan wilayah aman di dataran tinggi, atau jembatan yang merupakan satu-satunya akses ke shelter evakuasi. Kegagalan jembatan ini dapat mengakibatkan terjebaknya populasi besar dalam zona bahaya.
- *Akses ke Fasilitas Vital:* Jembatan yang menjadi akses utama atau satu-satunya akses ke rumah sakit, fasilitas kesehatan darurat, pusat komando bencana, atau instalasi vital lainnya. Sebagai contoh, jembatan yang menghubungkan rumah sakit rujukan utama dengan jaringan jalan utama harus tetap berfungsi untuk aliran pasien darurat dan pasokan medis tidak terputus.
- *Rute Logistik Strategis:* Jembatan di jalan koridor logistik nasional atau daerah yang kegagalannya akan menyebabkan isolasi wilayah yang luas atau gangguan pasokan yang signifikan. Ini termasuk jembatan di jalan tol trans-Jawa, jembatan penyeberangan selat atau sungai besar yang menghubungkan wilayah ekonomi utama.

Target kinerja untuk jembatan kategori kritis adalah operational atau immediate occupancy setelah gempa desain. Ini berarti struktur boleh mengalami kerusakan

minor yang tidak mempengaruhi fungsi (seperti retak rambut pada beton), tetapi tidak boleh mengalami kerusakan yang mengganggu operasi atau memerlukan penutupan untuk perbaikan. Untuk mencapai target ini, jembatan kategori kritis umumnya memerlukan sistem struktur khusus seperti isolasi seismik atau disipasi energi yang canggih.

Kategori Penting (Kategori Esensial):

Jembatan kategori penting adalah jembatan di jaringan jalan utama yang memiliki peran signifikan untuk mobilitas daerah namun bukan merupakan fasilitas garis hidup dengan konsekuensi keselamatan kritis. Kategori ini meliputi:

- *Jembatan di Jalan Arteri Primer:* Jembatan yang menghubungkan kota-kota besar atau pusat-pusat kegiatan ekonomi. Meskipun kegagalannya tidak langsung mengancam keselamatan dalam konteks evakuasi, tetapi akan menyebabkan gangguan ekonomi yang signifikan dan kesulitan mobilitas jangka tengah.
- *Jembatan dengan Lalu Lintas Tinggi:* Jembatan dengan volume lalu lintas harian yang sangat tinggi (Rata-rata Lalu Lintas Harian > 10.000 kendaraan/hari) di mana kecelakaan akan menyebabkan kemacetan masif dan ekonomi kerugian dari kehilangan produktivitas.

Target kinerja untuk jembatan penting adalah life safety dengan kemungkinan repairable damage. Ini berarti struktur boleh mengalami kerusakan moderat yang memerlukan perbaikan tetapi tidak boleh runtuh. Jembatan mungkin perlu ditutup sementara untuk inspeksi dan perbaikan, tetapi harus dapat dipulihkan dalam waktu relatif singkat (beberapa minggu hingga bulan) tanpa perlu rekonstruksi total.

Kategori Standar (Ordinary Category):

Jembatan kategori standar mencakup jembatan lokal atau jembatan di jalan-jalan sekunder dengan volume lalu lintas rendah hingga sedang. Konsekuensi kegagalan jembatan ini terbatas pada gangguan lokal yang dapat diatasi melalui rute alternatif. Target kinerja untuk kategori ini adalah pencegahan keruntuhan, yaitu mencegah keruntuhan total yang dapat menyebabkan korban jiwa, tetapi kerusakan berat yang memerlukan rekonstruksi dapat ditolerir. Pendekatan ini mengenali bahwa untuk jembatan dengan fungsi terbatas, investasi untuk mencapai tingkat kinerja yang lebih tinggi mungkin tidak hemat biaya.

Faktor Kepentingan Dan Implikasi Desain

Setiap kategori risiko berkaitan dengan faktor kepentingan (faktor penting, I) yang diaplikasikan dalam perhitungan gaya gempa desain. Konsep ini berarti bahwa jembatan kategori lebih tinggi akan didesain untuk menahan gempa dengan periode ulang lebih panjang (probabilitas kejadian lebih rendah tetapi intensifikasi lebih tinggi):

- Kategori Kritis: $I \approx 1,5$ (ekivalen dengan gempa periode ulang ~2500 tahun)
- Kategori Penting: $I \approx 1,25$ (ekivalen dengan gempa periode ulang ~1500 tahun)
- Kategori Standar: $I = 1,0$ (gempa periode ulang ~1000 tahun)

Faktor kepentingan ini secara efektif permintaan meningkatkan (gaya gempa desain) untuk kategori yang lebih tinggi, yang kemudian menuntut kapasitas struktur yang

lebih besar, yang dapat dicapai melalui elemen struktur yang lebih besar, materi dengan kualitas lebih tinggi, atau sistem struktur yang lebih canggih.

1.5 STRUKTUR TAHAN GEMPA DAN STRATEGI MITIGASI BERBASIS MEKANISME

1. Desain Kapasitas (Desain Kapasitas)

Desain kapasitas merupakan paradigma fundamental dalam earthquake engineering yang berangkat dari pemahaman bahwa untuk sebagian besar struktur, tidak ekonomi untuk mendesain struktur tetap elastis (tidak ada kerusakan) saat gempa besar. Sebaliknya, pendekatan yang lebih rasional adalah memperbolehkan kerusakan terkontrol pada elemen-elemen tertentu yang telah direncanakan, sambil memastikan elemen-elemen kritis lainnya tetap dalam kondisi elastis.

Prinsip Fundamental Desain Kapasitas:

Hirarki kekuatan (hierarki kekuatan) dibangun dengan mengidentifikasi mekanisme keruntungan yang diinginkan dan yang harus dihindari. Mekanisme yang diinginkan umumnya adalah pembentuk sendi plastis (engsel plastik) pada lokasi-lokasi yang telah dipilih di mana deformasi inelastis dapat terjadi dengan daktilitas yang memadai dan dapat menyerap energi signifikan. Mekanisme yang harus dihindari adalah kegagalan getas seperti kegagalan geser, tekuk, atau kegagalan sambungan.

Implementasi desain kapasitas melibatkan dua tahap perhitungan:

- a. **Desain elemen daktil (unsur disipatif):** Elemen-elemen ini didesain untuk mencapai kapasitas lentur yang cukup untuk menahan gaya gempa desain dengan mempertimbangkan daktilitas yang tersedia. Untuk jembatan, elemen daktil yang umum adalah kolom pilar pada lokasi tertentu (biasanya di dasar kolom).
- b. **Desain elemen non-daktil dengan kapasitas terlindungi:** Setelah kapasitas plastis elemen daktil ditentukan, kapasitas overstrength dari elemen-elemen ini dihitung (bahan pengerasan regangan memperhitungkan, bahan overstrength aktual dibanding nominal, dan efek kurungan). Gaya maksimum yang dapat dikembangkan oleh elemen daktil saat mencapai kapasitas overstrength-nya kemudian digunakan untuk mendesain elemen-elemen lain yang harus tetap elastis (seperti balok, fondasi, sambungan).

Implementasi pada Jembatan Beton Bertulang:

Untuk jembatan beton bertulang tipikal, strategi umum adalah membentuk plastic hinge di dasar kolom pilar (column base). Lokasi ini dipilih karena:

- Mudah diakses untuk inspeksi visual pasca-gempa tanpa memerlukan peralatan khusus
- Perbaikan dapat dilakukan dengan relatif mudah, misalnya melalui jacketing beton atau FRP wrapping tanpa perlu membongkar struktur atas
- Kerusakan di lokasi ini tidak langsung menyebabkan keruntuhan struktur atas

Mekanisme ini dikenal sebagai "weak column - strong beam - stronger foundation" yang bertujuan mengonsentrasikan deformasi inelastis di kolom, sementara struktur atas (girder) dan fondasi tetap elastis. Untuk mencapai ini:

- Kolom didesain dengan kapasitas lentur yang cukup berdasarkan gaya gempa desain yang telah direduksi dengan faktor daktilitas (R factor)
- Girder dan connection didesain berdasarkan kapasitas overstrength kolom, yaitu momen maksimum yang dapat dikembangkan kolom saat tulangan mencapai strain hardening
- Fondasi didesain dengan faktor amplifikasi tambahan untuk memberikan margin keamanan ekstra, mengingat perbaikan fondasi sangat sulit dan mahal

Kunci dari kesuksesan desain kapasitas adalah memastikan bahwa elemen-elemen yang direncanakan untuk meleleh memiliki kapasitas deformasi (daktilitas) yang memadai. Untuk kolom beton bertulang, ini dicapai melalui detailing yang ketat pada plastic hinge zone, yang akan dibahas lebih detail di bagian Detailing untuk Daktilitas.

2. Isolasi Seismik: Paradigma Dekopling

Isolasi seismik merepresentasikan pendekatan yang fundamental berbeda dari desain konvensional. Alih-alih mengandalkan pada kekuatan dan daktilitas elemen struktural untuk menahan gaya gempa, isolasi seismik berusaha untuk "memisahkan" struktur dari getaran tanah sehingga energi gempa tidak atau hanya sebagian kecil yang ditransmisikan ke struktur atas.

Prinsip Kerja Isolasi Seismik:

Konsep dasar isolasi seismik adalah mengintroduksi fleksibilitas horizontal pada interface antara struktur atas dan struktur bawah melalui bearing khusus. Fleksibilitas ini menyebabkan pemanjangan periode natural struktur secara signifikan, sehingga menggeser respons struktur ke range periode di mana spectral acceleration sudah menurun (bagian descending dari spektrum respons).

Sebagai ilustrasi kuantitatif, struktur jembatan konvensional fixed-base mungkin memiliki periode natural $T_1 = 0,5$ detik yang berkoresponden dengan spectral acceleration yang tinggi (misalnya $S_a = 1,2g$). Dengan memasang isolator yang sangat fleksibel, periode efektif sistem dapat diperpanjang menjadi $T_{eff} = 2,5 - 3,0$ detik di mana spectral acceleration sudah turun menjadi $S_a = 0,3 - 0,4g$, menghasilkan reduksi gaya gempa hingga 60-70%.

Namun, fleksibilitas saja tidak cukup karena struktur yang sangat fleksibel akan mengalami displacement yang sangat besar. Oleh karena itu, sistem isolasi juga harus memiliki mekanisme disipasi energi untuk membatasi displacement. Ini dicapai melalui histeresis dari material isolator atau melalui mekanisme friction.

Jenis-Jenis Sistem Isolasi:

a. Lead Rubber Bearing (LRB):

LRB terdiri dari layer karet alami dan layer pelat baja yang dilaminasi secara bergantian, dengan inti timbal (inti timbal) berdiameter besar (biasanya $1/4$ hingga $1/3$ dari diameter bearing) di tengahnya. Konstruksi layer ini memberikan properti yang unik:

- Karet dan pelat baja yang dilaminasi anggotakan fleksibilitas tinggi untuk deformasi horizontal (deformasi geser) karena karet dapat mengalami strain



geser yang sangat besar (hingga 200-250%), sementara tetap kaku untuk beban vertikal karena lapisan pelat baja mencegah mengembang

- Lead core memberikan mekanisme disipasi energi melalui yielding plastis yang stabil. Timbal dipilih karena memiliki tegangan luluh yang relatif rendah (~10 MPa), dapat mengalami luluh siklik tanpa degradasi signifikan, dan memiliki kemampuan self-recentering karena efek strain hardening

Perilaku LRB dapat dikarakterisasi melalui kurva histeresis bilinear. Pada displacement kecil, lead core masih elastis dan bearing relatif kaku. Setelah lead core yield, kekakuan efektif menurun drastis, dan sistem bergerak pada "post-yield stiffness" yang ditentukan terutama oleh karet. Luas area histeresis loop merepresentasikan energi yang didisipasi per siklus.

Keunggulan LRB:

- Kombinasi built-in antara fleksibilitas dan redaman dalam satu unit
- Reliable dan memiliki track record yang baik dari implementasi di banyak negara
- Dapat diproduksi dengan berbagai ukuran dan kapasitas untuk aplikasi yang beragam
- Tidak memerlukan pemeliharaan khusus selama masa layan

Keterbatasan:

- Sifat karet dapat terdegradasi dalam jangka panjang akibat penuaan, ozon, dan temperatur, meskipun hal ini dapat diminimalisir dengan senyawa karet yang baik dan penutup pelindung
- Displacement capacity terbatas oleh geometry bearing (umumnya maksimal 0,5-0,6 kali tinggi total karet)

b. Bantalan Pendulum Gesekan (FPB):

FPB menggunakan prinsip pendulum untuk memberikan restoring force dan friction untuk disipasi energi. Sistem ini terdiri dari slider artikulasi yang meluncur pada permukaan konkaf (permukaan bola) dengan lapisan material gesekan rendah.

Karakteristik unik FPB:

- Periode natural sistem ditentukan oleh radius kurvatur permukaan ($T = 2\pi\sqrt{R/g}$) dan independen terhadap massa struktur, yang memudahkan desain
- Restoring force proporsional terhadap displacement (perilaku pendulum), yang memberikan self-centering capability
- Friction coefficient dari interface sliding memberikan damping yang konsisten
- Dapat mengakomodasi displacement yang sangat besar (hingga beberapa meter untuk radius kurvatur yang besar)

Variasi lanjutan dari FPB adalah triple atau quadruple friction pendulum yang memiliki multiple sliding surface dengan radius kurvatur berbeda, memberikan perilaku adaptive di mana kekakuan dan redaman berubah tergantung pada level eksitasi.

c. Sistem Disipasi Energi: Mekanisme Tambahan untuk Kontrol Respons

Sistem disipasi energi (perangkat disipasi energi atau peredam) dapat digunakan mandiri atau dikombinasikan dengan sistem isolasi untuk meningkatkan kapasitas disipasi energi struktur. Berbagai jenis damper memiliki mekanisme disipasi yang berbeda:

- (1) Peredam Kental: Viscous damper bekerja berdasarkan prinsip hydraulic resistance, di mana piston bergerak dalam silinder berisi fluida viscous (biasanya silicone). Gaya yang dikembangkan damper proporsional terhadap velocity piston: $F = C \cdot V^\alpha$, di mana C adalah damping coefficient dan α adalah exponent ($\alpha = 1$ untuk *linear viscous*, $\alpha < 1$ untuk *nonlinear viscous* yang lebih umum digunakan).

Keunggulan viscous damper:

- Memberikan redaman murni tanpa menambah kekakuan signifikan, sehingga tidak merubah periode struktur
 - Efektif pada range frekuensi luas
 - Dapat disesuaikan untuk berbagai level displacement dan velocity
- (2) Peredam Gesekan: Friction damper mendisipasi energi melalui gesekan antara permukaan-permukaan kontak yang ditekan dengan gaya normal tertentu. Perilakunya *rectangular hysteresis* (coulomb friction), yang memberikan disipasi energi yang konsisten independent terhadap velocity atau frekuensi.
 - (3) Peredam Menghasilkan Logam: Menggunakan deformasi plastis dari material logam (biasanya mild steel, lead, atau shape memory alloy) untuk menyerap energi. Contoh klasik adalah ADAS (Added Damping and Stiffness) device yang menggunakan X-shaped steel plates yang yield dalam flexure.

1.6 DETAILING DAKTILITAS UNTUK MIKROMEKANIKA

Konsep Daktilitas dan Perannya dalam Desain Seismik

Daktilitas (ketangkasan) didefinisikan sebagai rasio antara deformasi ultimate (pada saat kegagalan) terhadap deformasi pada saat yielding pertama: $\mu = \Delta u / \Delta y$. Untuk struktur tahan gempa, daktilitas adalah parameter yang sangat kritis karena memungkinkan struktur untuk menyerap energi gempa yang jauh melebihi kapasitas elastisnya melalui deformasi plastik siklik tanpa kehilangan kekuatan signifikan.

Hubungan antara daktilitas dengan reduksi gaya gempa dapat dipahami melalui konsep prinsip perpindahan sama (untuk struktur dengan periode menengah hingga panjang) di mana struktur daktil dengan kekuatan lebih rendah akan mengalami perpindahan yang sama dengan struktur elastis dengan kekuatan penuh. Energi gempa yang sama diserap: struktur elastis menyerap semua energi dalam bentuk strain energi elastis (area di bawah kurva elastis), sementara struktur daktil menyerap sebagian sebagai elastis strain energi dan sisanya sebagai energi deformasi plastik (energi histeretik).

Detailing Kolom Beton Bertulang untuk Daktilitas Tinggi

1. **Tulangan Longitudinal:** Tulangan longitudinal harus proporsioned untuk memberikan kapasitas momen yang cukup sambil memastikan perilaku yang daktil:



- Rasio tulangan longitudinal ρ_l harus berada dalam range tertentu: minimum untuk memastikan kapasitas cukup (biasanya $\rho_{l,min} \approx 0,01$), maksimum untuk daktilitas ($\rho_{l,max} \approx 0,04 - 0,06$)
- Tulangan harus didistribusikan merata di sekeliling perimeter untuk memberikan kekuatan yang seragam untuk berbagai arah pembebanan
- Diameter tulangan tidak boleh terlalu besar untuk memfasilitasi penempatan yang baik dan mencegah membelah retakan

2. Tulangan Transversal - Filosofi Confinement: Tulangan transversal (senggang spiral atau hoop dengan crossties) memiliki fungsi yang sangat kritis untuk daktilitas:

- *Efek Pengurungan:* Ketika beton tertekan, terjadi ekspansi lateral (efek Poisson). Tulangan transversal yang rapat mencegah ekspansi ini, menciptakan tegangan tekan triaksial pada beton yang signifikan meningkatkan kuat tekan dan terutama strain kapasitas beton. Beton terkonfinasi dapat mencapai strain 2-3% (dibanding 0,002-0,003 untuk beton tak terkonfinasi) sebelum gagal, yang menghasilkan daktilitas kelengkungan yang jauh lebih besar.
- *Mencegah Buckling Tulangan Longitudinal:* Pada siklus kompresi, tulangan longitudinal cenderung tekuk keluar setelah tutup beton terkelupas (spalling). Senggang yang rapat dengan jarak pendek memberikan penopang lateral yang mencegah tekuk, mempertahankan kapasitas kompresi kolom.
- *Ketahanan Geser:* Tulangan transversal juga berkontribusi pada kapasitas geser, yang sangat penting karena kegagalan geser bersifat getas dan harus dihindari.

Persyaratan Detailing Ketat untuk Plastic Hinge Zone:

SNI menetapkan persyaratan sangat khusus untuk zona sendi plastis (biasanya didefinisikan sebagai panjang 1,5-2,0 kali dimensi kolom dari titik di mana momen maksimum terjadi):

- Spacing senggang maksimum: $s \leq \text{minimum dari } \{6d_b, \text{long}; 150 \text{ mm}; D_c/4\}$ di mana d_b, long adalah diameter tulangan longitudinal dan D_c adalah dimensi kolom
- Konfigurasi senggang harus overlapping spiral atau rectangular hoops dengan 135° hooks dan extension minimal $6d_b$ di ujung kait untuk mencegah senggang terlepas saat cover concrete spall
- Volumetric ratio tulangan transversal (ρ_s) dihitung berdasarkan formula yang memperhitungkan tingkat kurungan yang diperlukan untuk mencapai daktilitas target

Detailing Elemen Lain dan Sambungan

Balok juga harus didetail dengan prinsip serupa, dengan penekanan pada pencegahan shear failure (kuat geser, lemah lentur). Sambungan balok-kolom (sendi balok-kolom) merupakan zona kritis yang mengalami tegangan geser sangat tinggi akibat transfer gaya dari balok ke kolom. Kegagalan bersama dapat menyebabkan keruntuhan total struktur, sehingga merinci yang sangat hati-hati dengan tulangan khusus dalam wilayah bersama sangat penting.

1.7 MENGENAL RANCANG BANGUN DAN TIPOLOGI JEMBATAN DI INDONESIA

Keberadaan jembatan dalam konformasi geografis Indonesia yang bercorak kepulauan (*archipelagic state*) merupakan manifestasi vital dari integrasi spasial dan konektivitas teritorial. Jika pada bab sebelumnya kita telah mendalami secara komprehensif mengenai standar pembebanan jembatan mulai dari beban mati, beban hidup, hingga aksi lingkungan seperti gempa dan angin maka bab ini akan berfungsi sebagai implementasi fisik dari regulasi tersebut. Penetapan angka nominal beban dalam SNI (Standar Nasional Indonesia) tidak akan memiliki signifikansi teknis tanpa pemahaman mendalam mengenai sistem struktur yang akan memikulkannya. Di sinilah peran seorang perancang untuk memilih tipologi struktur yang paling efisien dalam mentransfer seluruh resultan gaya menuju fondasi dan lapisan tanah pendukung.

Dalam dunia rekayasa sipil, pemilihan jenis jembatan melampaui sekadar aspek fungsionalitas dan estetika visual. Ia merupakan hasil sintesis antara besaran beban rencana, karakteristik bentang bebas (*free span*), serta keterbatasan logistik di lapangan. Melalui materi ini, kita akan membedah berbagai tipologi jembatan yang umum diimplementasikan di Nusantara, mulai dari kemegahan jembatan kabel yang membelah selat hingga efisiensi rangka baja di daerah pelosok. Fokus utama kita adalah memahami jalur distribusi beban (*load path*) yang spesifik pada setiap model: bagaimana gaya tarik dominan bekerja pada sistem kabel, bagaimana gaya tekan aksial dikelola pada struktur pelengkung, serta bagaimana prinsip prategang pada beton mampu mengompensasi tegangan tarik yang melampaui kapasitas material.

Pembahasan ini akan disajikan secara deskriptif-analitis dengan mengevaluasi keunggulan dan limitasi dari setiap model jembatan. Analisis akan mencakup aspek durabilitas material terhadap korosi di iklim tropis yang ekstrem, kompleksitas pemeliharaan struktur jangka panjang, hingga tantangan metodologi pelaksanaan seperti teknik *balanced cantilever* atau sistem pracetak. Dengan mengintegrasikan pemahaman beban pada bab terdahulu dengan tipologi struktur pada bab ini, diharapkan mahasiswa memiliki kemampuan kognitif untuk melakukan sintesis desain yang tidak hanya kokoh secara struktural, tetapi juga kompetitif secara ekonomi dan adaptif terhadap perkembangan teknologi infrastruktur masa depan.

Jembatan Gantung (Suspension Bridge)

Jembatan gantung merupakan salah satu pencapaian tertinggi dalam dunia rekayasa struktur, dirancang khusus untuk melintasi bentang yang sangat panjang yang tidak mungkin dijangkau oleh jenis jembatan konvensional. Prinsip dasar jembatan gantung terletak pada kemampuannya mendistribusikan beban secara unik melalui sistem kabel yang kompleks. Ketika kendaraan melintasi lantai jembatan, beban tersebut tidak langsung ditopang oleh pilar seperti pada jembatan biasa. Sebaliknya, beban tersebut dipikul oleh kabel-kabel penggantung vertikal yang disebut *hanger*, yang kemudian menyalurkan gaya tersebut ke kabel baja utama yang berbentuk lengkungan parabolik indah di atas jembatan.

Kabel baja utama inilah yang menjadi tulang punggung seluruh struktur. Kabel ini terbuat dari ribuan helai kawat baja bermutu tinggi yang dipilin menjadi satu kesatuan dengan



diameter yang bisa mencapai satu meter. Kabel utama ini tidak melayang bebas, melainkan ditopang oleh menara-menara tinggi yang disebut pylon, yang bisa mencapai ketinggian ratusan meter. Fungsi pylon tidak hanya menopang kabel, tetapi juga menjadi titik transfer gaya vertikal dari kabel ke fondasi di bawah tanah. Yang menarik, ujung-ujung kabel utama tidak berhenti di pylon, melainkan terus memanjang ke daratan dan diikatkan pada blok angkur raksasa yang terkubur jauh di dalam tanah atau batuan keras. Blok angkur ini bisa seberat ribuan ton dan berfungsi menahan gaya tarik luar biasa besar dari kabel agar jembatan tidak roboh.

Dari segi teknik struktural, jembatan gantung mengandalkan sepenuhnya pada kekuatan tarik material. Berbeda dengan beton yang kuat menahan tekanan tetapi lemah terhadap tarikan, baja memiliki kekuatan tarik yang sangat tinggi, sehingga ideal untuk aplikasi ini. Karakteristik fleksibilitas struktur jembatan gantung sebenarnya merupakan keunggulan, bukan kelemahan. Ketika angin bertiup atau gempa terjadi, jembatan akan bergerak mengikuti gaya tersebut dan kemudian kembali ke posisi semula, seperti pegas yang meredam energi. Inilah mengapa jembatan gantung bisa bertahan dalam kondisi ekstrem yang akan menghancurkan struktur kaku.

Keunggulan utama jembatan gantung terletak pada kemampuannya menciptakan bentang bebas yang sangat panjang, bahkan bisa melebihi dua kilometer antara dua menara utama. Ini sangat penting untuk melintasi selat laut, sungai lebar, atau lembah dalam di mana menempatkan pilar di tengah akan mengganggu jalur pelayaran kapal besar atau secara teknis tidak memungkinkan karena kedalaman air. Jembatan Golden Gate di San Francisco, misalnya, memiliki bentang utama sepanjang 1.280 meter, memungkinkan kapal-kapal besar berlayar dengan leluasa di bawahnya. Di Indonesia, konsep ini sangat relevan untuk wilayah kepulauan di mana jalur pelayaran merupakan urat nadi ekonomi.

Namun, kecanggihan teknologi ini datang dengan tantangan yang tidak sederhana. Jembatan gantung sangat sensitif terhadap gaya angin. Fenomena yang paling ditakuti adalah aerodynamic flutter, yaitu getaran yang terjadi ketika aliran angin menciptakan gaya bolak-balik pada struktur jembatan. Jika frekuensi getaran angin ini bertepatan dengan frekuensi natural jembatan, terjadilah resonansi yang bisa memperbesar getaran hingga struktur hancur. Kejadian paling terkenal adalah keruntuhan Jembatan Tacoma Narrows di Amerika Serikat tahun 1940, yang roboh hanya empat bulan setelah dibuka karena angin dengan kecepatan sedang menciptakan getaran yang semakin besar hingga jembatan bergoyang seperti ombak dan akhirnya patah. Sejak kejadian tersebut, desain jembatan gantung modern selalu menyertakan uji terowongan angin dan perhitungan aerodinamika yang sangat detail.

Tantangan lain adalah pemeliharaan kabel terhadap korosi. Kabel baja yang terekspos langsung ke udara lembab, hujan, dan air laut akan mengalami pengkaratan dari waktu ke waktu. Di iklim tropis seperti Indonesia dengan kelembapan tinggi dan curah hujan melimpah, proses korosi bahkan lebih cepat. Untuk mengatasinya, kabel harus dilapisi dengan cat khusus anti karat dan sistem dehumidifikasi yang menyuntikkan udara kering ke dalam kabel untuk mencegah pengembunan. Teknologi pemantauan modern menggunakan sensor-sensor yang dipasang di berbagai titik kritis untuk mendeteksi keretakan, korosi, atau perubahan tegangan



pada kabel. Data dari sensor ini dianalisis secara real-time untuk memastikan keamanan jembatan. Semua teknologi canggih ini tentunya memerlukan investasi yang sangat besar, baik dalam pembangunan maupun pemeliharaan. Itulah mengapa jembatan gantung biasanya hanya dibangun untuk proyek-proyek strategis dengan justifikasi ekonomi yang kuat.

Jembatan Kabel (Cable-Stayed Bridge)

Jembatan kabel atau cable-stayed bridge sering kali dianggap serupa dengan jembatan gantung oleh orang awam karena sama-sama menggunakan kabel baja dan menara tinggi. Namun dari sudut pandang teknik struktur, keduanya sangat berbeda dalam cara kerja dan filosofi desainnya. Perbedaan mendasar terletak pada bagaimana kabel-kabel tersebut dipasang dan bagaimana mereka menyalurkan beban. Pada jembatan kabel, tidak ada kabel utama yang melengkung seperti pada jembatan gantung. Sebagai gantinya, kabel-kabel baja langsung menghubungkan puncak menara dengan berbagai titik di sepanjang lantai jembatan. Bayangkan sebuah tenda dengan tiang di tengah dan tali-tali yang menarik dari puncak tiang ke tepi kanvas—itulah prinsip dasarnya.

Sistem ini menciptakan apa yang disebut sebagai struktur segitiga kaku. Setiap kabel bertindak sebagai batang tarik yang menahan deck agar tidak melentur ke bawah, sementara menara menahan gaya tekan vertikal dan fondasi menahan kombinasi gaya vertikal dan horizontal. Beban dari kendaraan yang melintasi jembatan disalurkan secara aksial—yaitu searah dengan sumbu kabel—langsung ke menara. Ini berbeda dengan jembatan gantung di mana beban harus melalui hanger dulu ke kabel utama yang melengkung, baru kemudian ke menara. Karena jalur transfer beban yang lebih pendek dan langsung ini, jembatan kabel cenderung lebih kaku dan stabil.

Indonesia memiliki beberapa contoh jembatan kabel yang cukup ikonik. Jembatan Suramadu yang menghubungkan Surabaya dan Madura adalah salah satu yang paling terkenal, dengan bentang utama sepanjang 434 meter dan menara setinggi 140 meter. Jembatan ini menggunakan konfigurasi kabel semi-fan atau modified fan di mana kabel-kabel menyebar dari puncak menara seperti kipas terbuka. Ada juga Jembatan Bareleng di Kepulauan Riau yang sebenarnya terdiri dari enam jembatan, beberapa di antaranya menggunakan sistem cable-stayed. Keberadaan jembatan-jembatan ini tidak hanya mempersingkat waktu tempuh tetapi juga menjadi landmark yang mengubah wajah kota.

Salah satu keunggulan utama jembatan kabel adalah kekakuannya yang lebih tinggi dibandingkan jembatan gantung. Karena kabel-kabel dipasang secara tegang dan langsung ke deck, jembatan tidak banyak bergoyang ketika ada beban dinamis seperti angin kencang atau kendaraan berat yang melintasi. Ini memberikan rasa aman dan kenyamanan bagi pengguna, terutama untuk lalu lintas kecepatan tinggi. Dari segi konstruksi, jembatan kabel juga menawarkan fleksibilitas metode yang menarik. Salah satu teknik yang paling umum adalah balanced cantilever, di mana pembangunan deck dimulai dari menara dan berkembang ke arah luar secara simetris. Segmen-segmen beton atau baja dipasang bergantian di kedua sisi menara, dan setiap segmen baru langsung dikaitkan dengan kabel ke menara untuk menjaga keseimbangan. Metode ini tidak memerlukan perancah di bawah jembatan, yang sangat menguntungkan ketika jembatan dibangun di atas sungai dalam, laut, atau lembah.



Namun, keunggulan ini juga datang dengan tantangan teknis yang signifikan. Menara pada jembatan kabel menerima beban yang jauh lebih besar dan terkonsentrasi dibandingkan pada jembatan gantung. Semua gaya tarik dari puluhan kabel di kedua sisi menara bertemu di puncak dan diteruskan ke bawah melalui batang menara ke fondasi. Akibatnya, menara harus dirancang sangat kokoh, biasanya menggunakan struktur beton bertulang atau baja dengan dimensi yang masif. Fondasi pun harus mampu menahan beban vertikal yang sangat besar serta gaya horizontal akibat ketidakseimbangan beban di kedua sisi jembatan. Di tanah lunak atau area dengan lapisan tanah dalam yang lemah, ini berarti fondasi tiang pancang harus ditanamkan hingga kedalaman puluhan meter untuk mencapai lapisan batuan keras atau tanah padat. Proses ini memerlukan teknologi dan biaya yang tidak sedikit.

Keterbatasan lain dari jembatan kabel adalah rentang bentang maksimalnya yang tidak sepanjang jembatan gantung. Meskipun sudah ada jembatan kabel dengan bentang lebih dari 1.000 meter, angka ini masih kalah jauh dari jembatan gantung yang bisa mencapai lebih dari 2.000 meter. Hal ini terkait dengan mekanisme struktural di mana semakin panjang bentang, semakin besar gaya yang harus ditahan oleh kabel dan menara. Pada titik tertentu, struktur menjadi tidak ekonomis atau bahkan tidak praktis secara teknis. Namun untuk sebagian besar aplikasi, terutama di Indonesia di mana bentang 500-800 meter sudah sangat memadai untuk melintasi sebagian besar selat dan sungai, jembatan kabel merupakan pilihan yang sangat efisien dan estetik.

Jembatan Beton Prategang (Prestressed Concrete Bridge)

Jembatan beton prategang adalah jenis yang paling banyak ditemukan di Indonesia, dari jembatan layang di jalan tol hingga jembatan penyeberangan antar kota. Popularitasnya bukan tanpa alasan teknologi ini menggabungkan kelebihan dua material yang berbeda sifatnya: kekuatan tekan beton dan kekuatan tarik baja. Untuk memahami konsep prategang, kita perlu memahami kelemahan fundamental beton. Beton sangat kuat menahan gaya tekan tetapi sangat lemah terhadap gaya tarik. Ketika sebuah balok beton diletakkan horizontal dan dibebani, bagian atas balok akan tertekan sementara bagian bawah akan tertarik. Bagian bawah inilah yang rentan retak karena beton tidak kuat menahan tarikan.

Solusi tradisional adalah memasang tulangan baja di bagian bawah balok, menciptakan apa yang disebut beton bertulang. Namun beton prategang mengambil pendekatan yang lebih canggih. Sebelum balok beton diberi beban dari luar, balok tersebut sudah "ditekan" terlebih dahulu dari dalam menggunakan kabel baja atau tendon yang ditarik dengan gaya yang sangat besar. Bayangkan Anda memegang setumpuk buku dengan kedua telapak tangan menekan dari samping selama tekanan Anda cukup kuat, buku-buku tersebut bertindak seperti satu balok yang kaku. Begitu pula pada beton prategang: dengan menarik tendon baja di dalam beton, seluruh penampang beton diberikan gaya tekan awal. Ketika beban luar bekerja dan mencoba menarik bagian bawah balok, gaya tarik tersebut harus terlebih dahulu "mengalahkan" gaya tekan awal yang sudah ada. Hasilnya, beton tidak retak meskipun menerima beban yang jauh lebih besar.

Ada dua metode utama dalam pembuatan beton prategang, masing-masing dengan aplikasi yang berbeda. Pre-tensioning adalah metode di mana tendon baja ditarik terlebih



dahulu di pabrik, kemudian beton dicor di sekitar tendon yang sudah tegang tersebut. Setelah beton mengeras dan mencapai kekuatan yang cukup, tendon dilepas dari mesin penarik. Karena tendon ingin kembali ke panjang awalnya, ia menarik beton dan memberikan gaya tekan. Metode ini sangat efisien untuk produksi massal balok-balok dengan ukuran standar, seperti balok untuk jembatan layang tol atau girder untuk gedung. Komponen diproduksi di pabrik dengan kontrol kualitas yang ketat, kemudian dikirim ke lokasi proyek untuk dipasang. Inilah mengapa Anda sering melihat truk-truk besar mengangkut balok beton panjang di jalan raya.

Post-tensioning, di sisi lain, dilakukan di lokasi proyek setelah beton dicor dan mengeras. Tendon baja dimasukkan ke dalam selongsong yang tertanam di dalam beton. Setelah beton cukup kuat, tendon ditarik menggunakan dongkrak hidrolik khusus yang bisa memberikan gaya hingga ratusan ton. Ujung tendon kemudian dikunci dengan angkur agar tetap tegang. Metode ini sangat cocok untuk jembatan dengan bentang panjang atau bentuk yang tidak standar, di mana membawa komponen jadi dari pabrik tidak praktis. Post-tensioning juga memungkinkan pembangunan jembatan secara bertahap, di mana segmen-segmen beton dicor di lokasi dan kemudian "disatukan" dengan menarik tendon yang melewati semua segmen.

Keunggulan jembatan beton prategang sangat jelas dalam konteks Indonesia. Durabilitas atau ketahanan jangka panjangnya sangat tinggi, terutama dibandingkan dengan struktur baja. Beton melindungi tulangan dan tendon baja di dalamnya dari kontak langsung dengan udara dan air, sehingga sangat tahan terhadap korosi. Ini sangat penting di Indonesia yang memiliki kelembapan tinggi, curah hujan besar, dan banyak jembatan yang terekspos air laut. Sebuah jembatan beton prategang yang didesain dan dibangun dengan baik bisa bertahan 50-100 tahun dengan pemeliharaan minimal. Biaya perawatan yang rendah ini menjadikannya pilihan ekonomis dalam jangka panjang, meskipun biaya awal pembangunannya mungkin lebih tinggi dibandingkan struktur baja.

Namun, beton prategang juga memiliki kelemahan yang perlu diperhitungkan dengan serius. Struktur beton sangat berat densitas beton sekitar 2.400 kg per meter kubik, jauh lebih berat dari baja struktural. Berat ini membebani fondasi dan memerlukan struktur pendukung yang lebih kuat. Di tanah lunak atau area rawan gempa, fondasi yang berat bisa menjadi masalah tersendiri. Lebih mengkhawatirkan lagi adalah sifat kegagalan beton yang cenderung getas atau tiba-tiba. Baja struktural biasanya menunjukkan tanda-tanda sebelum gagal ia akan melendut atau berdeformasi secara visible, memberikan peringatan dini. Beton, sebaliknya, bisa terlihat baik-baik saja dari luar namun mengalami keretakan internal. Jika retak mencapai tendon prategang dan menyebabkan salah satu tendon putus, redistribusi beban bisa membebani tendon lain secara berlebihan, memicu kegagalan berantai yang cepat dan berbahaya. Inilah mengapa inspeksi rutin menggunakan teknologi non-destructive testing seperti ultrasonic atau ground-penetrating radar sangat penting untuk mendeteksi keretakan tersembunyi sebelum menjadi masalah serius.



Jembatan Rangka Baja (Truss Bridge)

Jembatan rangka baja adalah salah satu jenis jembatan yang paling mudah dikenali secara visual karena struktur segitiga-segitiga baja yang khas di sisi kanan dan kirinya. Dari kejauhan, jembatan ini terlihat seperti anyaman geometris yang kompleks namun sebenarnya mengikuti prinsip mekanika yang sangat mendasar dan elegan. Desain truss atau rangka batang didasarkan pada fakta bahwa segitiga adalah satu-satunya bentuk geometris yang secara inheren stabil. Anda tidak bisa mengubah bentuk segitiga tanpa mengubah panjang salah satu sisinya. Ketika batang-batang lurus disusun membentuk pola segitiga dan dihubungkan pada titik-titik simpul, struktur yang terbentuk sangat kuat namun menggunakan material secara sangat efisien.

Prinsip kerja struktural jembatan rangka sangat berbeda dari jembatan balok solid. Pada jembatan rangka, beban dari lantai jembatan disalurkan ke titik-titik simpul pada rangka, bukan sepanjang balok. Dari titik simpul inilah beban didistribusikan melalui batang-batang segitiga ke tumpuan. Yang menarik, setiap batang dalam struktur rangka yang ideal hanya menerima gaya aksial yaitu gaya tarik atau gaya tekan yang bekerja sepanjang sumbu batang tanpa ada momen lentur. Ini sangat menguntungkan karena batang yang hanya menerima gaya aksial bisa dibuat lebih langsing dan ringan dibandingkan balok yang harus menahan lenturan. Pada setiap segitiga, beban akan membuat beberapa batang tertarik (batang tarik) dan batang lainnya tertekan (batang tekan). Insinyur bisa menghitung dengan tepat batang mana yang menerima tarik dan mana yang tekan, kemudian mendesain setiap batang sesuai dengan gaya yang akan diterimanya.

Ada berbagai konfigurasi rangka yang telah dikembangkan selama lebih dari satu abad, masing-masing dengan karakteristik dan aplikasi khusus. Rangka Warren, misalnya, menggunakan segitiga sama sisi yang membentuk pola zig-zag, sangat efisien untuk bentang menengah. Rangka Pratt menggunakan diagonal yang miring ke tengah pada bagian atas dan vertikal di bagian bawah, sehingga diagonal umumnya menerima tarik dan vertikal menerima tekan karena baja lebih efisien menahan tarik, ini menjadi desain yang ekonomis. Rangka Howe adalah kebalikannya dengan diagonal menerima tekan. Untuk bentang yang sangat panjang, rangka Baltimore atau Pennsylvania menambahkan subdivisi pada panel-panel untuk mengurangi panjang bebas batang tekan, karena batang tekan panjang rentan terhadap tekuk (buckling).

Di Indonesia, jembatan rangka baja memiliki tempat khusus dalam sejarah infrastruktur. Banyak jembatan kereta api era kolonial Belanda menggunakan konstruksi rangka baja, dan beberapa masih berfungsi hingga sekarang setelah lebih dari satu abad. Alasan utamanya adalah kemudahan mobilisasi ke daerah terpencil. Komponen jembatan rangka bisa difabrikasi di pabrik, dipotong menjadi batang-batang dengan panjang yang bisa diangkut oleh truk atau bahkan perahu, kemudian dirakit di lokasi dengan baut atau las. Tidak seperti jembatan beton yang memerlukan bekisting, waktu pengerasan, dan peralatan berat, jembatan rangka bisa dirakit relatif cepat. Ini sangat penting untuk menghubungkan daerah-daerah terisolasi, membuka akses ke perkebunan, tambang, atau pemukiman di pedalaman.



Keunggulan efisiensi material jembatan rangka tidak bisa dilebih-lebihkan. Untuk bentang dan beban yang sama, jembatan rangka menggunakan jauh lebih sedikit baja dibandingkan jembatan balok solid. Bayangkan balok baja I-beam setinggi satu meter sebagian besar volumenya adalah udara kosong di antara flens atas dan bawah. Rangka batang pada dasarnya adalah ekstrem dari konsep ini: hanya menempatkan material di mana benar-benar dibutuhkan untuk menahan gaya. Hasilnya adalah struktur yang ringan namun sangat kuat. Berat yang ringan juga menguntungkan dalam hal fondasi, karena beban mati yang ditransfer ke tanah lebih kecil.

Namun, baja struktural yang terekspos langsung ke lingkungan luar memiliki musuh utama: korosi. Di iklim tropis Indonesia dengan kelembapan yang hampir selalu di atas 70% dan hujan yang turun sepanjang tahun, baja yang tidak dilindungi akan berkarat dengan cepat. Karat tidak hanya masalah estetika ia mengurangi luas penampang efektif batang, yang berarti kapasitas batang menurun. Untuk jembatan rangka tua yang sudah puluhan tahun, tidak jarang ditemukan batang-batang yang ketebalan plat-nya sudah berkurang hingga 30-50% akibat korosi. Ini sangat berbahaya karena bisa menyebabkan kegagalan struktur. Oleh karena itu, jembatan rangka baja memerlukan perawatan rutin berupa pengecatan ulang setiap 3-5 tahun tergantung kondisi lingkungan. Cat tidak hanya memberikan warna tetapi juga bertindak sebagai pelindung yang menghalangi oksigen dan air mencapai permukaan baja.

Proses pengecatan jembatan rangka bukanlah pekerjaan sederhana. Permukaan baja harus dibersihkan terlebih dahulu dari karat dan cat lama menggunakan sandblasting atau wire brushing, kemudian diaplikasikan cat dasar anti-karat (primer), cat pertengahan, dan cat akhir (top coat). Untuk jembatan dengan ratusan batang dan ribuan sambungan, ini bisa menjadi pekerjaan yang memakan waktu berbulan-bulan dan biaya yang signifikan. Beberapa jembatan modern menggunakan baja tahan karat (weathering steel) yang membentuk lapisan karat pelindung sendiri, tetapi material ini lebih mahal dan tidak cocok untuk semua lingkungan, terutama di dekat laut di mana garam bisa mempercepat korosi.

Dari segi estetika, jembatan rangka sering dianggap kurang modern atau kurang "menarik" dibandingkan jembatan kabel yang ramping dan futuristik. Struktur segitiga yang padat bisa menghalangi pemandangan dan terkesan industrial atau utilitarian. Namun ini sangat subjektif banyak juga yang menganggap jembatan rangka baja memiliki daya tarik tersendiri, memancarkan kejujuran struktural di mana setiap batang terlihat jelas melakukan fungsinya. Beberapa jembatan rangka bersejarah bahkan menjadi landmark dan dilindungi sebagai warisan budaya. Yang jelas, untuk aplikasi tertentu terutama jembatan kereta api, jembatan di daerah terpencil, atau jembatan sementara jembatan rangka baja tetap menjadi pilihan yang praktis dan ekonomis.

Jembatan Bascule (Jembatan Angkat)

Jembatan bascule atau jembatan angkat adalah salah satu jenis jembatan bergerak yang paling umum, meskipun tidak banyak ditemukan di Indonesia. Namanya berasal dari kata Perancis "bascule" yang berarti jungkat-jungkit atau timbangan, yang sangat menggambarkan cara kerjanya. Jembatan ini dirancang untuk mengatasi konflik antara dua kebutuhan transportasi yang berbeda: kebutuhan jalan darat untuk menyeberang dan kebutuhan jalur



pelayaran untuk dilalui kapal-kapal tinggi. Alih-alih membangun jembatan yang sangat tinggi dengan oprit atau tanjakan yang panjang, jembatan bascule memiliki deck yang bisa diangkat ke atas, membuka jalan bagi kapal yang lewat.

Prinsip mekanis jembatan bascule sangat mirip dengan timbangan tradisional atau jungkat-jungkit. Deck jembatan yang bisa diangkat dipasang pada engsel atau pin besar di salah satu ujungnya, biasanya di dekat pangkal jembatan. Di ujung berlawanan dari deck, tersembunyi di dalam pit atau ruang di bawah tanah, terdapat counterweight atau beban penyeimbang yang sangat berat. Counterweight ini dirancang sedemikian rupa sehingga berat deck dan berat counterweight hampir seimbang pada titik engsel. Hasilnya, meskipun deck sangat berat bisa ratusan ton gaya yang diperlukan untuk mengangkatnya relatif kecil karena prinsip tuas. Motor hidrolik atau elektrik yang menggerakkan jembatan hanya perlu mengatasi sedikit ketidakseimbangan dan friksi pada engsel.

Ada beberapa variasi desain bascule. Pada jembatan bascule single-leaf atau daun tunggal, hanya satu sisi yang terangkat sementara sisi lainnya tetap. Ini cocok untuk lokasi di mana satu sisi adalah daratan tetap sementara sisi lain perlu dibuka untuk pelayaran. Pada jembatan bascule double-leaf atau daun ganda, kedua sisi jembatan terangkat secara simetris ke atas hingga hampir bertemu di tengah, menciptakan pembukaan yang lebih lebar untuk kapal yang sangat besar. Variasi lain adalah rolling bascule di mana deck tidak hanya berputar tetapi juga bergeser sedikit ke belakang dengan bantuan roda, mengurangi kedalaman pit yang diperlukan untuk counterweight.

Salah satu contoh paling terkenal jembatan bascule di dunia adalah Tower Bridge di London, yang menjadi ikon kota tersebut. Di Indonesia, Jembatan Ampera di Palembang dulunya adalah jembatan bascule yang bisa diangkat untuk memberi jalan bagi kapal-kapal di Sungai Musi. Jembatan ini dibangun pada era 1960-an dan mekanisme angkatnya masih berfungsi hingga tahun 1970-an. Namun karena biaya operasional dan pemeliharaan yang tinggi, serta berkurangnya lalu lintas kapal besar di sungai tersebut, mekanisme angkat dinonaktifkan dan deck dipermanenkan pada posisi turun. Kini Jembatan Ampera hanya berfungsi sebagai jembatan tetap biasa, meskipun strukturnya masih mempertahankan bentuk asli yang ikonik.

Keunggulan jembatan bascule terletak pada solusinya yang cerdas untuk situasi geografis tertentu. Bayangkan sebuah kota pelabuhan di mana jalanan ada di ketinggian yang rendah dekat permukaan air, dan sungai atau kanalisasi dilalui oleh kapal-kapal dengan tiang tinggi. Untuk membangun jembatan tetap yang cukup tinggi agar kapal bisa lewat, diperlukan oprit yang sangat panjang dan landai, yang bisa memakan lahan berkilometer-kilometer di kota yang padat. Jembatan bascule memecahkan masalah ini: ia bisa rendah saat tidak ada kapal, memungkinkan kendaraan menyeberang tanpa menanjak tinggi, lalu diangkat saat kapal akan lewat. Ini sangat efisien dari segi penggunaan lahan dan biaya konstruksi, terutama di kota-kota tua Eropa di mana lahan sangat berharga.

Namun, kompleksitas mekanis jembatan bascule adalah pedang bermata dua. Sistem hidrolik atau elektrik yang menggerakkan jembatan adalah mesin presisi yang memerlukan pelumasan, pengecekan, dan perbaikan berkala. Pompa hidrolik, silinder, katup, motor listrik,



gear box, bearing pada engsel, kabel kontrol, sensor keselamatan semua komponen ini harus berfungsi sempurna. Jika salah satu komponen gagal saat deck sedang terangkat, jembatan bisa macet pada posisi terbuka, melumpuhkan lalu lintas darat. Sebaliknya, jika mekanisme gagal saat deck turun dan kapal sedang mendekat, bisa terjadi tabrakan yang merusak jembatan maupun kapal. Sistem keselamatan yang redundan termasuk sumber daya cadangan, mekanisme pembukaan manual, alarm, dan barikade lalu lintas otomatis adalah wajib tetapi menambah biaya.

Biaya operasional juga tidak bisa diabaikan. Setiap kali jembatan dibuka, dibutuhkan operator yang terlatih untuk mengawasi proses. Petugas jaga lalu lintas harus menghentikan kendaraan dan menaikkan barikade. Motor harus dinyalakan, pompa hidrolik bekerja, deck terangkat, kapal lewat, deck diturunkan kembali, barikade dibuka, lalu lintas dilanjutkan. Jika frekuensi lalu lintas kapal tinggi misalnya puluhan kapal per hari ini berarti gangguan konstan pada lalu lintas darat dan biaya operasional yang signifikan. Di banyak kota, dengan semakin jarang kapal besar yang lewat atau dengan adanya jalur alternatif, jembatan bascule menjadi tidak ekonomis dan akhirnya dinonaktifkan atau bahkan dibongkar dan diganti dengan jembatan tetap yang lebih tinggi.

Untuk konteks Indonesia modern, jembatan bascule mungkin relevan di lokasi-lokasi tertentu seperti pelabuhan atau dermaga militer di mana kapal besar perlu akses tetapi lalu lintas darat juga penting. Namun dengan perkembangan teknologi jembatan cable-stayed dan pelengkung yang bisa mencapai ketinggian cukup dengan oprit yang masuk akal, serta pertimbangan biaya siklus hidup, jembatan bascule menjadi pilihan yang jarang. Meskipun demikian, memahami prinsip kerjanya tetap penting dalam pendidikan teknik sipil, karena mengilustrasikan bagaimana mekanika, hidrolik, dan struktur bisa diintegrasikan untuk memecahkan tantangan teknis yang unik.

Jembatan Pelengkung (Arch Bridge)

Jembatan pelengkung atau arch bridge adalah salah satu bentuk jembatan tertua yang masih digunakan hingga hari ini, dengan sejarah yang bisa ditelusuri kembali hingga peradaban Romawi kuno lebih dari 2.000 tahun yang lalu. Namun jangan salah sangka meskipun konsepnya kuno, jembatan pelengkung modern menggunakan teknologi material dan analisis struktur yang sangat canggih. Karakteristik visual yang paling mencolok adalah bentuknya yang melengkung ke atas, yang bukan hanya untuk estetika tetapi adalah kunci dari cara jembatan ini bekerja secara struktural. Di Indonesia, jembatan pelengkung sering diberi nama "Jembatan Pelangi" karena keindahan visualnya, terutama ketika diberi pencahayaan warna-warni di malam hari seperti pada Jembatan Youtefa di Papua yang menghubungkan Kota Jayapura dengan Distrik Heram.

Prinsip dasar jembatan pelengkung adalah mengubah beban vertikal menjadi gaya tekan yang disalurkan sepanjang lengkungan ke kedua ujung jembatan. Ketika beban ditempatkan di atas lengkungan baik itu berat deck jembatan sendiri maupun kendaraan yang melintasi gaya gravitasi menarik beban tersebut ke bawah. Namun karena bentuknya yang melengkung, gaya vertikal ini terurai menjadi komponen yang mengikuti bentuk lengkungan, menciptakan gaya tekan yang mengalir sepanjang struktur lengkung ke arah pangkal.



Bayangkan Anda menempatkan sebuah bola berat di tengah lengkungan bola tidak hanya menekan ke bawah tetapi juga mendorong kedua sisi lengkungan ke luar. Lengkungan menahan dorongan ini dan menyalurkan gaya ke tumpuan di kedua ujungnya yang disebut abutment.

Yang membuat jembatan pelengkung sangat kuat adalah fakta bahwa beton dan batu material tradisional untuk jembatan pelengkung sangat kuat dalam menahan gaya tekan tetapi lemah terhadap gaya tarik. Dengan mengubah semua beban menjadi gaya tekan, jembatan pelengkung memanfaatkan kekuatan material secara optimal. Ini berbeda dari balok lurus di mana bagian atas tertekan dan bagian bawah tertarik, memaksa penggunaan material yang kuat baik terhadap tekan maupun tarik, atau kombinasi material seperti pada beton bertulang. Jembatan pelengkung bisa dibangun dari batu bata atau balok batu yang disusun tanpa semen (seperti jembatan Romawi kuno), dan selama bentuk lengkungannya tepat dan abutment cukup kuat, jembatan bisa berdiri selama berabad-abad.

Bentuk lengkungan yang optimal sebenarnya mengikuti kurva yang disebut catenary atau lebih tepatnya inverted catenary. Catenary adalah bentuk yang terbentuk ketika rantai atau tali digantung longgar di kedua ujungnya dan dibiarkan menggantung bebas bentuk ini secara alami mendistribusikan gaya tarik secara merata. Jika catenary dibalik, bentuknya mendistribusikan gaya tekan secara merata. Namun dalam praktik, jembatan pelengkung sering menggunakan bentuk parabola atau bahkan lingkaran karena lebih mudah dihitung dan dibangun, dan perbedaan dengan catenary tidak signifikan untuk sebagian besar aplikasi.

Ada beberapa variasi desain jembatan pelengkung berdasarkan posisi deck relatif terhadap lengkungan. Pada deck arch, deck ditempatkan di atas lengkungan, dan beban disalurkan ke lengkungan melalui tiang-tiang vertikal atau kolom. Ini adalah konfigurasi tradisional yang banyak ditemukan pada jembatan batu kuno. Pada through arch, deck ditempatkan di tengah-tengah ketinggian lengkungan, dan struktur lengkungan naik di kedua sisi deck. Pengendara yang melintasi jembatan ini akan melewati "di antara" lengkungan. Pada tied arch, ujung-ujung lengkungan tidak bertumpu di abutment terpisah tetapi "diikat" oleh deck itu sendiri yang berfungsi sebagai batang tarik horizontal. Konfigurasi ini sangat menguntungkan ketika kondisi tanah tidak cukup kuat untuk menahan gaya dorong horizontal dari lengkungan, karena gaya horizontal ditahan oleh deck sendiri dan yang diteruskan ke fondasi hanyalah gaya vertikal.

Keunggulan arsitektural jembatan pelengkung tidak perlu diperdebatkan. Bentuk lengkungan memiliki daya tarik visual yang universal dan timeless. Jembatan pelengkung sering menjadi landmark atau ikon kota seperti Sydney Harbour Bridge di Australia, Ponte Vecchio di Florence, atau Jembatan Youtefa di Jayapura. Dengan pencahayaan yang tepat, jembatan pelengkung bisa menjadi karya seni yang spektakuler di malam hari, memantulkan warna-warni di permukaan air di bawahnya. Selain itu, dari segi struktural, jembatan pelengkung sangat efisien untuk beban berat. Karena material utamanya beton atau batu bekerja dalam kondisi tekan yang merupakan kekuatan utamanya, struktur bisa sangat kuat dengan dimensi yang relatif ramping pada lengkungan itu sendiri.



Namun, pembangunan jembatan pelengkung memiliki tantangan yang tidak boleh dianggap remeh. Tantangan terbesar adalah persyaratan kondisi tanah di kedua pangkal jembatan. Abutment harus mampu menahan tidak hanya gaya vertikal yang besar tetapi juga gaya dorong horizontal yang signifikan. Jika tanah di lokasi abutment adalah tanah lunak seperti lempung atau pasir lepas, gaya horizontal bisa mendorong abutment bergeser atau mengalami settlement diferensial, yang akan merusak geometri lengkungan dan bisa menyebabkan kegagalan total. Oleh karena itu, jembatan pelengkung ideal untuk lokasi di mana kedua tebing atau pangkal jembatan adalah batuan keras atau tanah padat yang sangat stabil. Jika kondisi tanah tidak ideal, tied arch menjadi solusi tetapi dengan biaya tambahan karena deck harus dirancang tidak hanya untuk menahan beban lalu lintas tetapi juga gaya tarik horizontal yang besar.

Proses konstruksi jembatan pelengkung juga lebih kompleks dibandingkan jembatan balok lurus. Selama lengkungan belum terhubung di puncaknya dan membentuk struktur lengkap, lengkungan yang sedang dibangun tidak stabil dan memerlukan penyangga sementara atau scaffolding. Untuk jembatan di atas sungai atau lembah, ini berarti membangun perancah dari dasar lembah hingga setinggi lengkungan pekerjaan yang mahal dan memakan waktu. Metode konstruksi modern menggunakan teknik seperti cable-stayed cantilever di mana bagian lengkungan dibangun secara bertahap dari kedua pangkal ke arah tengah, dan setiap segmen baru ditahan oleh kabel sementara hingga lengkungan bertemu dan menutup di puncak. Setelah lengkungan tertutup, kabel sementara bisa dilepas karena struktur sudah stabil secara inheren.

Untuk mahasiswa teknik sipil, memahami jembatan pelengkung juga berarti memahami analisis garis tekan atau thrust line. Garis tekan adalah jalur imajiner yang merepresentasikan perjalanan gaya tekan melalui lengkungan. Untuk jembatan yang stabil, garis tekan harus tetap berada di dalam sepertiga tengah dari ketebalan lengkungan. Jika garis tekan keluar dari batasan ini, bagian lengkungan akan mengalami gaya tarik yang bisa menyebabkan retak pada material yang lemah terhadap tarik seperti batu atau beton tanpa tulangan. Analisis ini memerlukan pemahaman statika dan geometri yang baik, dan merupakan latihan yang sangat berguna untuk mengembangkan intuisi struktural.

Coverdam

Membuat tanggul cofferdam di tengah laut adalah teknik rekayasa sipil untuk menciptakan area kerja kering di perairan dalam, biasanya untuk membangun pilar jembatan, dermaga, atau struktur lepas pantai. Metode yang paling umum dan kuat adalah menggunakan tiang pancang lembaran baja (steel sheet piles) yang saling mengunci.

Berikut adalah tahapan cara membuat cofferdam di tengah laut:

1. *Tahap Persiapan dan Perencanaan*

Survei Dasar Laut: Menganalisis kedalaman air, arus, dan jenis tanah dasar laut.

Pre-dredging (Pengerukan Awal): Area kerja dibersihkan dan diratakan menggunakan kapal keruk atau ponton agar tiang pancang dapat berdiri tegak dan menancap dengan stabil.

Mobilisasi Alat: Mendatangkan ponton (barge) yang dilengkapi crane dan vibratory hammer (alat pancang getar).



Gambar 1.5 Perancangan Coverdam

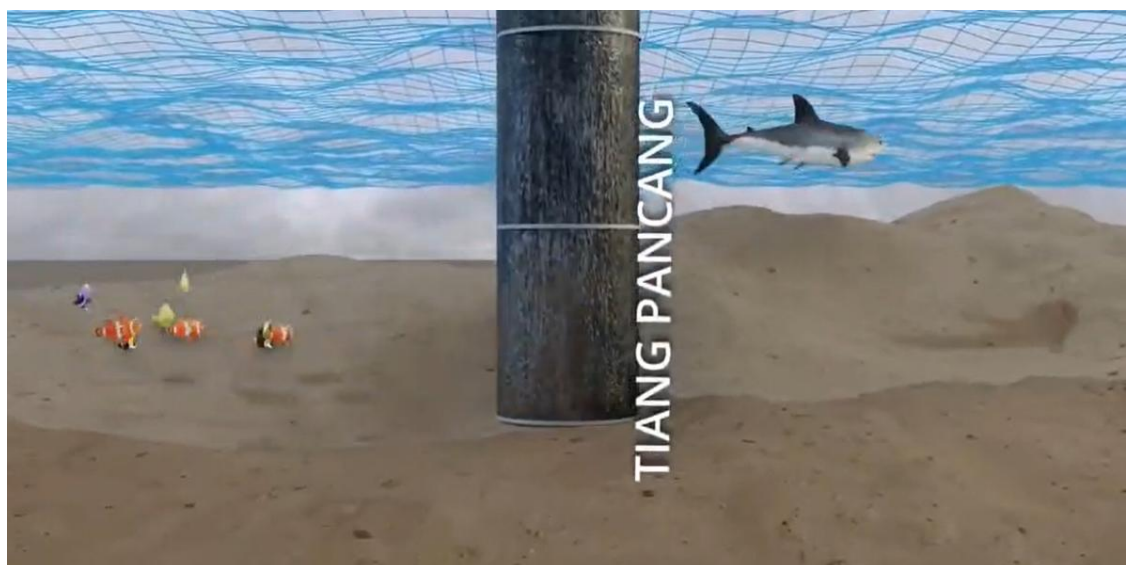
2. *Pemasangan Tiang Pancang (Sheet Piles)*

Pemasangan Rangka Panduan (Template): Rangka baja sementara dipasang di atas permukaan air sebagai panduan agar lembaran baja tersusun rapi.

Pemancangan: Tiang pancang lembaran baja (sheet piles) dimasukkan satu per satu dan ditancapkan ke dasar laut menggunakan vibratory hammer atau hydraulic press.

Pembentukan Kotak/Lingkar: Tiang pancang dipasang membentuk struktur tertutup (kotak, lingkaran, atau ganda) untuk menahan air dari segala arah.

Penyambungan (Interlocking): Lembaran baja memiliki sistem interlock (alur dan lidah) yang memastikan tidak ada celah air yang masuk.



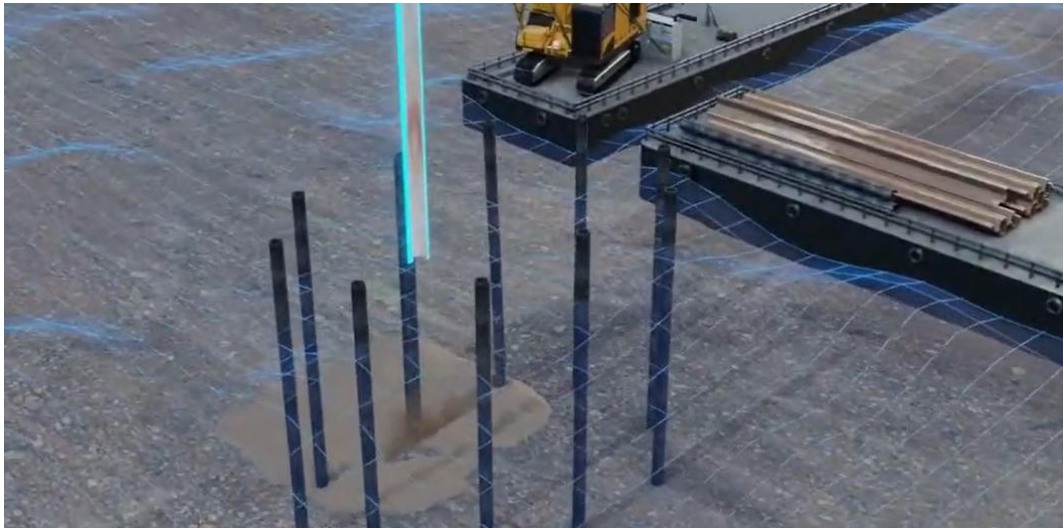
Gambar 1.6 Pemasangan Tiang Pancang

3. Penguatan dan Penyegelan (Sealing)

Pemasangan Bracing (Pengaku): Rangka penyangga horizontal dipasang di bagian dalam cofferdam untuk menahan tekanan air yang sangat besar dari luar.

Pengecoran Tremie Seal: Untuk mencegah air masuk dari bawah (kebocoran dasar), beton khusus dituang di bawah air menggunakan pipa tremie di dasar cofferdam.

Rock Fill (Isian Batu): Untuk cofferdam seluler (double wall), ruang antara dua dinding sheet pile diisi dengan pasir, kerikil, atau batu untuk menambah stabilitas.



Gambar 1.7 Pemasangan Turap / Sealing

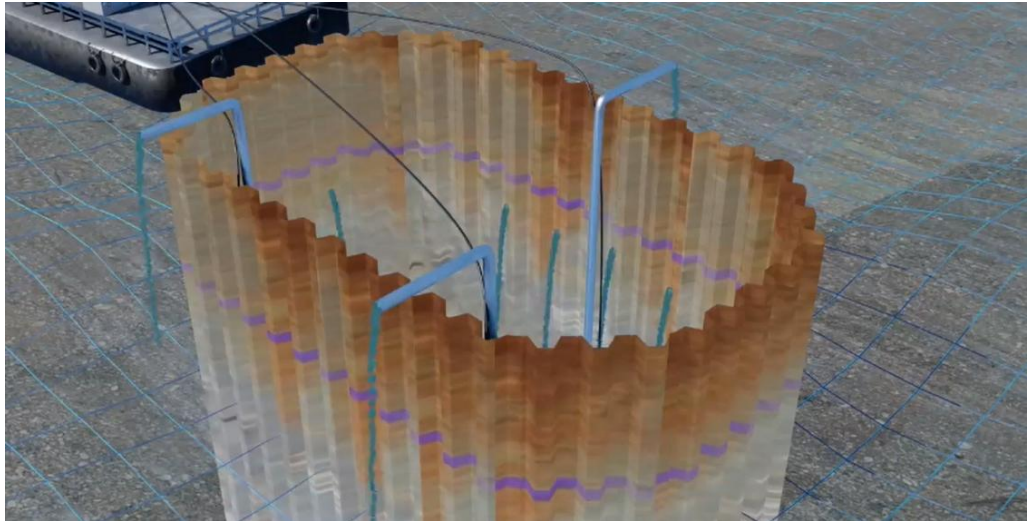


Gambar 1.8 Sambungan antar Sealing dan Pemasangan

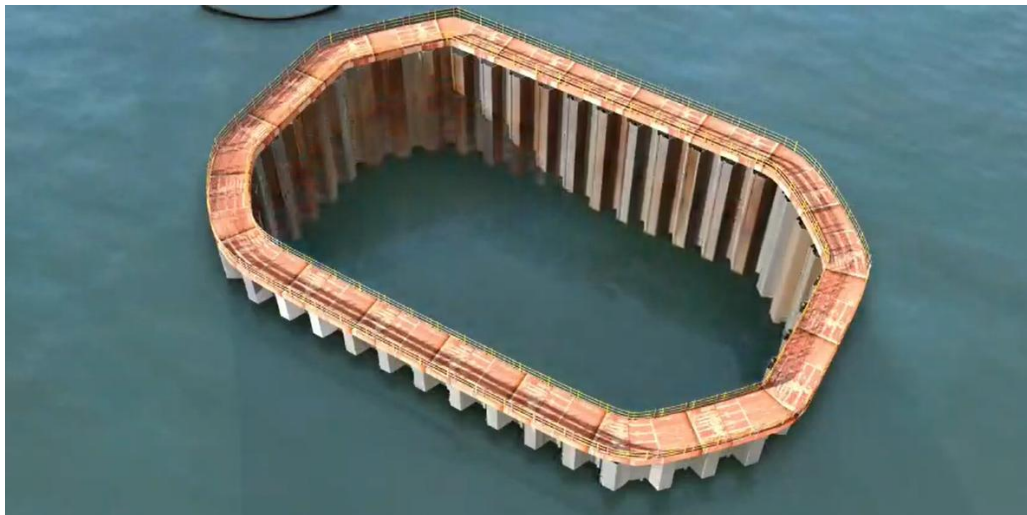
4. Pengeringan (Dewatering)

Pemompaan Air: Setelah beton seal kering dan struktur dipastikan kuat, air di dalam cofferdam dipompa keluar menggunakan pompa berkekuatan tinggi.

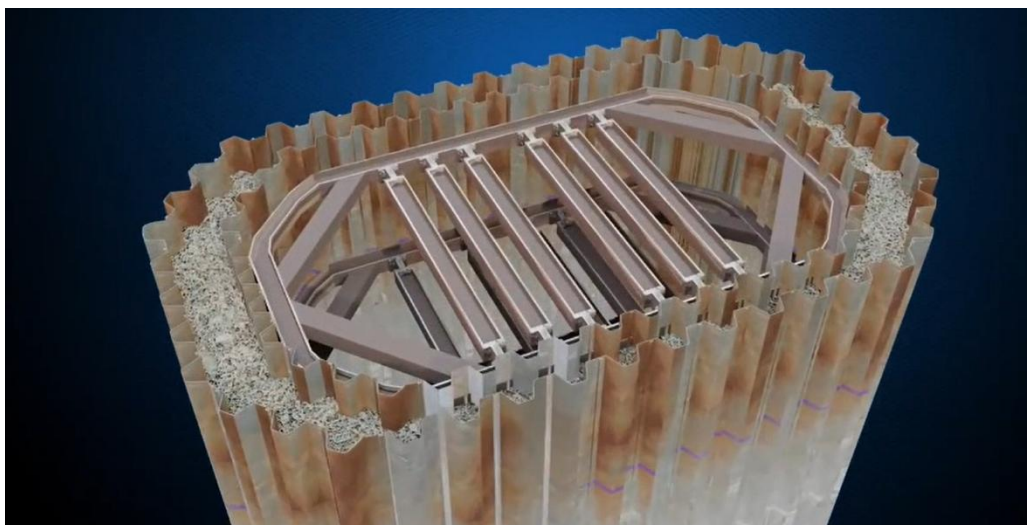
Pemeriksaan: Tim teknis memeriksa kebocoran. Jika ada, dilakukan penambalan segera.



Gambar 1.9 pemompaan dan pengecekan kebocoran pada Sealing



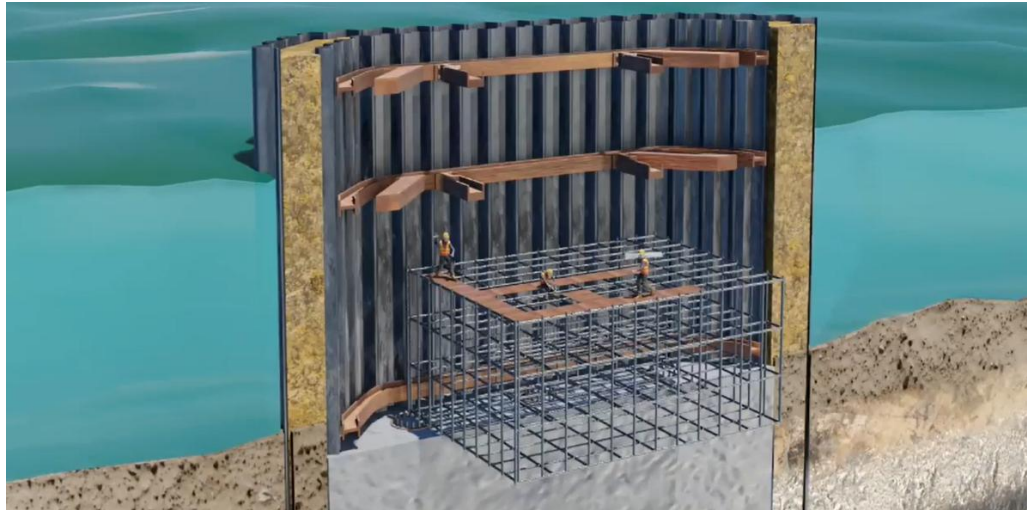
Gambar 1.10 penyedotan air keluar Covedam



Gambar 1.11 Pemberian tiang penyangga, untuk menahan tekanan air dari luar coverdam

5. Pelaksanaan Konstruksi Utama

Setelah area kering, pekerja dapat melakukan konstruksi (seperti pengecoran pilar jembatan) seolah-olah berada di daratan.



Gambar 1.12 Pelaksanaan Konstruksi Utama

6. Pembongkaran (Removal)

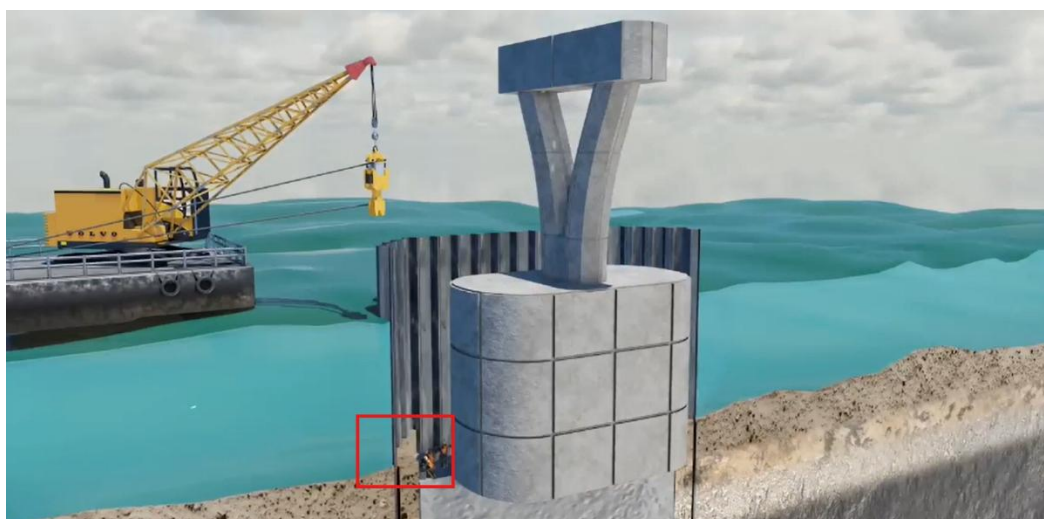
Setelah struktur permanen selesai dan kuat, cofferdam dilepas kembali dengan mencabut tiang pancang baja.

Jenis Cofferdam yang Sering Digunakan di Laut:

Braced Cofferdam: Dinding tunggal dengan pengaku internal (cocok untuk area terbatas).

Cellular Cofferdam: Struktur melingkar yang diisi tanah/batu (cocok untuk perairan dalam dan arus deras).

Double Wall Sheet Pile: Dua dinding paralel dengan isian tanah di antaranya



Gambar 1.13 Pembongkaran Coverdam dengan memotong Seal

1.8 JEMBATAN-JEMBATAN IKONIK DI INDONESIA

Transisi dari pemahaman teoretis mengenai standar pembebanan dan tipologi struktur menuju aplikasi riil di lapangan memerlukan sebuah jembatan kognitif berupa analisis studi kasus. Di Indonesia, pembangunan jembatan bukan sekadar upaya pemenuhan kebutuhan transportasi, melainkan sebuah laboratorium rekayasa sipil yang hidup. Mengingat kondisi geologis Indonesia yang berada pada zona seismik aktif, topografi yang ekstrem, serta tuntutan logistik kepulauan, setiap jembatan ikonik yang berdiri di Nusantara merupakan hasil dari penyelesaian tantangan keteknikan yang unik. Studi kasus ini dirancang untuk membedah bagaimana prinsip-prinsip mekanika struktur diintegrasikan dengan inovasi metode konstruksi guna menghasilkan infrastruktur yang tidak hanya kokoh secara teknis, tetapi juga efisien dan adaptif terhadap lingkungannya.

Melalui pembahasan jembatan-jembatan terpilih dalam bab ini, mahasiswa akan diajak untuk mengamati bagaimana "angka-angka beban" dalam regulasi diterjemahkan menjadi elemen fisik bangunan yang masif. Kita akan menelaah aplikasi konkret dari berbagai sistem struktur mulai dari kemegahan sistem *cable-stayed* pada Jembatan Suramadu yang membelah selat, hingga ketangguhan struktur *steel arch* pada Jembatan Kalikuto yang dirakit dengan presisi tinggi di jalur Trans-Jawa. Setiap kasus akan menyoroti aspek spesifik, seperti penggunaan teknologi peredam gempa modern, metode *launching gantry* pada lembah-lembah curam, hingga strategi perlindungan material terhadap korosi atmosferik di wilayah pesisir.

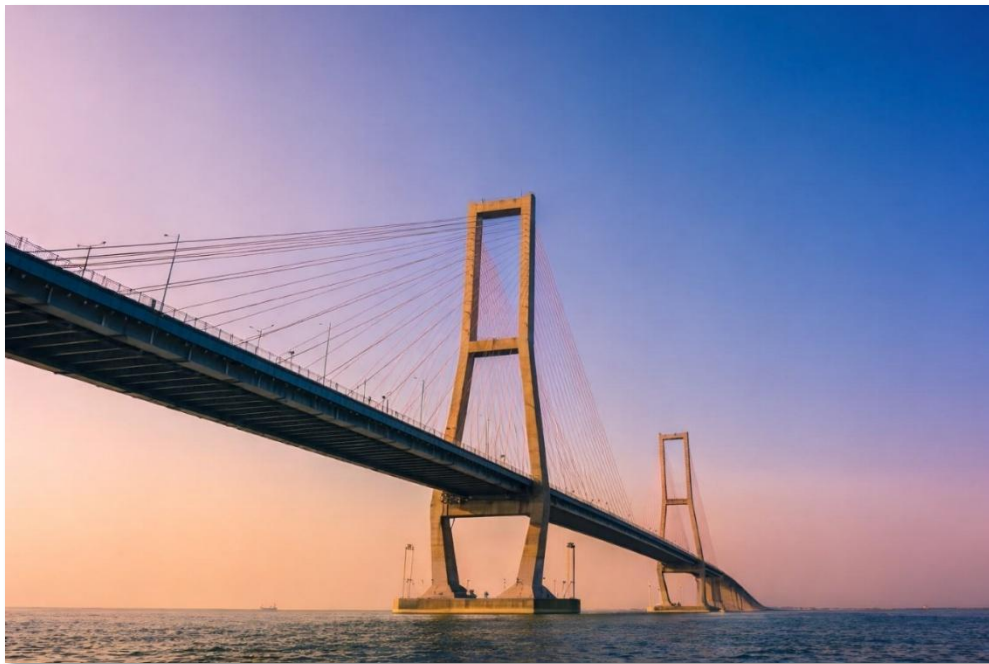
Tujuan utama dari sub-bab studi kasus ini adalah untuk mengasah kemampuan analitis mahasiswa dalam mengidentifikasi korelasi antara desain struktur dan kendala lapangan (*field constraints*). Dengan mempelajari kegagalan dan keberhasilan dari proyek-proyek strategis nasional, pembaca diharapkan tidak hanya memahami "apa" yang dibangun, tetapi yang lebih penting adalah memahami "mengapa" sebuah solusi teknik tertentu dipilih. Analisis mendalam terhadap jembatan-jembatan ikonik ini akan memberikan perspektif praktis bagi calon insinyur dalam menghadapi kompleksitas rancang bangun jembatan di masa depan, di mana keamanan struktur harus bersinergi dengan keberlanjutan ekonomi dan harmoni lingkungan.

1. Jembatan Suramadu (Jawa Timur)

Jembatan Suramadu adalah mahakarya teknik sipil Indonesia yang menghubungkan Surabaya di Pulau Jawa dengan Bangkalan di Pulau Madura. Diresmikan pada 12 Juni 2009, jembatan sepanjang 5,438 kilometer ini bukan hanya jembatan terpanjang di Indonesia, tetapi juga merupakan proyek yang sangat kompleks karena menggabungkan tiga sistem struktur yang berbeda dalam satu kesatuan infrastruktur. Nama "Suramadu" sendiri merupakan akronim dari *Surabaya-Madura*, dan keberadaannya telah mengubah dinamika ekonomi dan sosial kedua wilayah secara fundamental.

Secara teknis, Jembatan Suramadu terbagi menjadi tiga segmen utama dengan karakteristik struktural yang berbeda. Segmen pertama adalah causeway sepanjang sekitar 1,458 meter dari sisi Surabaya, yang merupakan jembatan layang rendah di atas laut dangkal dengan konstruksi beton prategang. Fungsi causeway adalah

menghubungkan daratan dengan zona laut yang lebih dalam secara bertahap tanpa memerlukan struktur yang terlalu tinggi atau kompleks. Segmen kedua adalah approach bridge sepanjang sekitar 3,546 meter yang menggunakan sistem beton prategang dengan pilar-pilar yang semakin tinggi seiring kedalaman laut yang bertambah. Approach bridge ini dirancang untuk menaikkan ketinggian jembatan secara gradual menuju segmen utama. Segmen ketiga, yang menjadi jantung dari keseluruhan struktur, adalah main bridge atau jembatan utama sepanjang 434 meter yang menggunakan teknologi cable-stayed dengan dua menara setinggi 140 meter.



Gambar 1.14 Jembatan Suramadu

Main bridge dengan sistem cable-stayed dipilih bukan tanpa alasan yang kuat. Selat Madura di lokasi jembatan memiliki kedalaman yang cukup signifikan dan merupakan jalur pelayaran penting bagi kapal-kapal besar yang menuju ke pelabuhan Tanjung Perak Surabaya maupun pelabuhan-pelabuhan di Madura. Membangun pilar di tengah selat pada jalur pelayaran akan sangat mengganggu navigasi dan berpotensi menyebabkan kecelakaan maritim. Oleh karena itu, diperlukan bentang bebas yang panjang 434 meter untuk memberikan ruang yang cukup bagi kapal-kapal tersebut. Sistem cable-stayed dengan kabel-kabel yang langsung menghubungkan menara ke deck memungkinkan pencapaian bentang ini tanpa pilar di tengah. Kabel-kabel tersebut disusun dalam konfigurasi modified fan atau semi-fan, di mana kabel-kabel menyebar dari puncak menara tetapi tidak sepenuhnya seperti kipas, melainkan dengan sedikit konvergensi di puncak untuk efisiensi struktural.

Tantangan teknis terbesar dalam pembangunan Jembatan Suramadu adalah kondisi lingkungan Selat Madura yang sangat agresif terhadap struktur. Air laut mengandung klorida dalam konsentrasi tinggi, yang merupakan agen korosi paling berbahaya bagi baja



tulangan dalam beton maupun kabel baja struktural. Korosi tidak hanya merusak permukaan tetapi merembet ke dalam struktur, mengurangi luas penampang efektif baja dan akhirnya mengurangi kapasitas beban struktur. Untuk mengatasi ini, seluruh komponen baja yang terekspos diberi perlindungan berlapis: pertama dengan hot-dip galvanizing yang melapisi baja dengan zinc, kemudian dengan cat epoxy yang tahan terhadap air laut, dan akhirnya dengan sistem inspeksi dan pemeliharaan yang ketat. Kabel-kabel utama pada main bridge dilengkapi dengan sistem dehumidifikasi yang menyuntikkan udara kering ke dalam selubung kabel untuk mencegah pengembunan dan korosi dari dalam.

Fondasi jembatan juga merupakan aspek yang sangat krusial. Kedua menara utama cable-stayed harus berdiri di dasar laut dengan kedalaman yang bervariasi dan kondisi tanah yang tidak seragam. Investigasi geoteknik yang intensif dilakukan sebelum konstruksi untuk memetakan lapisan-lapisan tanah di bawah dasar laut. Hasilnya menunjukkan bahwa lapisan tanah keras berada pada kedalaman puluhan meter di bawah dasar laut. Untuk mencapai lapisan ini, digunakan fondasi tiang pancang beton berdiameter besar yang ditanamkan hingga kedalaman yang cukup untuk memberikan daya dukung dan stabilitas. Proses pemancangan di laut memerlukan peralatan khusus termasuk jack-up barge yang bisa dinaikkan di atas permukaan air untuk memberikan platform kerja yang stabil meskipun ada ombak dan arus.

Aspek konstruksi yang menarik adalah metode erection atau pemasangan segmen-segmen deck cable-stayed. Karena bentang yang panjang dan tidak adanya pilar di tengah, metode konvensional menggunakan perancah dari bawah tidak memungkinkan. Sebagai gantinya, digunakan metode balanced cantilever di mana segmen-segmen deck beton prategang diproduksi di casting yard, diangkut dengan tongkang, kemudian diangkat dan dipasang secara simetris dari kedua sisi menara menggunakan crane khusus. Setiap segmen baru yang dipasang langsung dihubungkan dengan kabel ke menara untuk mempertahankan keseimbangan struktur. Proses ini berlanjut hingga kedua sisi bertemu di tengah bentang, di mana segmen penutup (*closure segment*) dipasang untuk menyatukan struktur. Metode ini sangat efisien dan meminimalkan gangguan terhadap lalu lintas pelayaran di bawah jembatan selama konstruksi.

Jembatan Suramadu juga dilengkapi dengan sistem instrumentasi dan monitoring yang canggih. Sensor-sensor dipasang di berbagai titik kritis untuk mengukur tegangan pada kabel, deformasi deck, pergerakan menara, getaran akibat angin dan lalu lintas, serta temperatur struktur. Data dari sensor-sensor ini dikumpulkan secara real-time dan dianalisis untuk mendeteksi anomali atau perubahan yang mungkin mengindikasikan masalah struktural. Sistem seperti ini disebut *Structural Health Monitoring* (SHM) dan merupakan standar untuk jembatan-jembatan besar modern. Dengan SHM, pemeliharaan bisa dilakukan secara proaktif perbaikan dilakukan sebelum kerusakan menjadi serius bukan reaktif yang menunggu hingga ada masalah nyata.

Dari segi dampak sosial-ekonomi, Jembatan Suramadu telah mengintegrasikan ekonomi Madura dengan Jawa secara lebih erat. Sebelum ada jembatan, satu-satunya

cara menyeberang adalah dengan feri yang memakan waktu dan sangat tergantung pada cuaca. Keterlambatan feri sering terjadi, menyebabkan kerugian ekonomi terutama untuk barang-barang yang mudah rusak. Dengan jembatan, waktu tempuh menjadi lebih cepat dan lebih dapat diprediksi. Ini membuka peluang bagi petani dan nelayan Madura untuk menjual produk mereka ke pasar yang lebih besar di Surabaya. Sebaliknya, investor dari Jawa lebih mudah mengakses peluang bisnis di Madura. Meskipun ada perdebatan tentang dampak jangka panjang terhadap budaya lokal Madura, dari perspektif infrastruktur, Suramadu adalah contoh sukses bagaimana sebuah jembatan bisa menjadi katalis pembangunan regional.

2. Jembatan Bareleng (Batam, Kepulauan Riau)

Jembatan Bareleng sebenarnya adalah sistem enam jembatan yang menghubungkan enam pulau di Kota Batam: Batam, Tonton, Nipah, Rempang, Galang, dan Galang Baru. Nama "Bareleng" sendiri adalah singkatan dari Batam-Rempang-Galang. Proyek ambisius ini dimulai pada era kepemimpinan BJ Habibie sebagai Menteri Riset dan Teknologi dan diselesaikan pada tahun 1998. Yang membuat proyek ini unik adalah setiap jembatan menggunakan desain dan teknologi yang berbeda, menjadikan kompleks Bareleng semacam museum hidup teknik jembatan di Indonesia.



Gambar 1.15 Jembatan Bareleng

Jembatan yang paling ikonik dalam sistem Bareleng adalah Jembatan I atau Jembatan Tengku Fisabilillah yang menghubungkan Pulau Batam dengan Pulau Tonton. Jembatan sepanjang 642 meter ini menggunakan sistem cable-stayed dengan dua menara kembar yang menjulang tinggi. Desain visualnya sangat striking dengan kabel-kabel yang tersusun



rapi dalam pola fan atau kipas yang sempurna. Kabel-kabel tersebut berwarna putih dan kontras dengan warna biru langit dan air laut, menciptakan siluet yang sangat fotogenik. Tidak mengherankan jika Jembatan Tengku Fisabilillah menjadi landmark Batam yang paling sering dipotret dan menjadi simbol kemajuan teknologi Indonesia.

Dari segi teknik struktural, kabel-kabel pada Jembatan Tengku Fisabilillah disusun dalam konfigurasi fan penuh, di mana semua kabel bertemu di satu titik di puncak menara. Konfigurasi ini memberikan efisiensi maksimal dalam transfer beban tetapi juga menciptakan konsentrasi tegangan yang sangat tinggi di puncak menara. Oleh karena itu, puncak menara harus dirancang dengan sangat kuat menggunakan struktur baja atau beton dengan tulangan yang sangat padat. Anchorage atau sistem pengait kabel di puncak menara menggunakan teknologi strand-by-strand anchorage di mana setiap helai kawat dalam kabel dikaitkan secara individual untuk distribusi tegangan yang merata. Deck jembatan menggunakan beton prategang dengan balok-balok box yang efisien dalam menahan beban lentur dan torsi, penting karena jembatan ini juga harus menahan beban angin yang cukup kuat di wilayah pesisir.

Jembatan II hingga VI dalam sistem Bareleng menggunakan berbagai teknologi lain. Jembatan II (Nara Singa) yang menghubungkan Tonton dengan Nipah menggunakan balok beton prategang konvensional dengan multiple spans. Jembatan III (Emas) menghubungkan Nipah dengan Rempang dengan kombinasi struktur beton dan baja. Jembatan IV (Raja Ali Haji) menghubungkan Rempang dengan Galang menggunakan sistem pelengkung baja, di mana lengkungan baja merah yang cantik menopang deck di bawahnya. Jembatan V (Tunggal Sakti) dan VI (Setia Nara) melengkapi koneksi dengan Galang Baru menggunakan variasi struktur beton dan baja sesuai dengan kondisi setempat. Variasi desain ini bukan hanya untuk estetika tetapi juga merupakan respons terhadap kondisi spesifik setiap lokasi: kedalaman air, jarak bentang, kondisi tanah, dan kebutuhan navigasi.

Tantangan utama dalam konstruksi Bareleng adalah koordinasi antar pulau dan logistik material. Batam pada saat itu masih dalam tahap pengembangan, infrastruktur pendukung konstruksi masih terbatas. Material konstruksi seperti beton, baja, dan peralatan berat harus didatangkan dari Singapura atau dari pulau Jawa melalui jalur laut. Kondisi laut yang sering bergelombang dan jarak antar pulau yang cukup jauh membuat transportasi material menjadi tantangan tersendiri. Untuk mengatasi ini, dibangun casting yard atau pabrik produksi komponen di beberapa lokasi strategis di pulau-pulau tersebut, sehingga sebagian komponen bisa diproduksi di tempat dan transportasi bisa diminimalkan.

Aspek geoteknik juga sangat penting dalam proyek Bareleng. Pulau-pulau di Kepulauan Riau umumnya memiliki lapisan tanah yang bervariasi dari pasir pantai hingga lempung lunak dengan lapisan batuan keras di kedalaman tertentu. Investigasi tanah dilakukan dengan pengeboran dan pengujian laboratorium untuk menentukan karakteristik bearing capacity atau daya dukung tanah. Berdasarkan hasil investigasi, fondasi dirancang menggunakan tiang pancang beton atau baja yang ditanamkan hingga mencapai lapisan



tanah keras atau batuan. Di beberapa lokasi dengan tanah sangat lunak, digunakan sistem perkuatan tanah seperti preloading di mana tanah dibebani terlebih dahulu dengan timbunan sementara untuk mempercepat konsolidasi dan meningkatkan daya dukung sebelum fondasi jembatan dibangun.

Dari perspektif konektivitas regional, Jembatan Bareleng memiliki peran strategis yang sangat besar. Sebelum jembatan ada, pulau-pulau tersebut hanya bisa diakses dengan perahu kecil dan transportasi logistik sangat terbatas. Dengan adanya jembatan, seluruh kawasan Bareleng menjadi satu kesatuan ekonomi. Pulau Galang yang dulunya terisolasi kini berkembang dengan industri galangan kapal, pariwisata, dan agrikultur. Akses yang mudah juga memfasilitasi pengembangan infrastruktur lain seperti jaringan listrik, air bersih, dan telekomunikasi yang mengikuti jalur jembatan. Bareleng juga menjadi destinasi wisata yang populer banyak wisatawan yang berkunjung khusus untuk menikmati pemandangan dari jembatan dan mengambil foto dengan latar belakang arsitektur jembatan yang indah.

Untuk mahasiswa teknik sipil, Jembatan Bareleng menawarkan pelajaran penting tentang sistem jaringan jembatan. Berbeda dengan jembatan tunggal yang berdiri sendiri, sistem multi-jembatan memerlukan perencanaan yang holistik. Setiap jembatan harus dirancang tidak hanya untuk fungsinya sendiri tetapi juga sebagai bagian dari sistem yang lebih besar. Alignment atau keselarasan horizontal dan vertikal antar jembatan harus direncanakan agar transisi antar jembatan nyaman bagi pengguna. Drainase juga harus direncanakan secara sistem agar air hujan dari jembatan dan pulau-pulau tidak menyebabkan genangan atau erosi. Pemeliharaan juga harus dikoordinasikan perbaikan pada satu jembatan harus mempertimbangkan dampaknya terhadap lalu lintas di jembatan lain dalam sistem.

3. Jembatan Ampera (Palembang, Sumatera Selatan)

Jembatan Ampera di Palembang adalah salah satu jembatan paling ikonik dan bersejarah di Indonesia. Nama "Ampera" adalah singkatan dari Amanat Penderitaan Rakyat, mencerminkan semangat revolusi Indonesia pada saat jembatan dibangun. Pembangunan jembatan dimulai pada tahun 1962 sebagai bantuan dari Uni Soviet dan selesai pada tahun 1965. Pada awalnya, Jembatan Ampera dirancang sebagai vertical lift bridge atau jembatan angkat vertikal, di mana bagian tengah deck sepanjang 72 meter bisa diangkat ke atas secara vertikal untuk memberi jalan bagi kapal-kapal besar yang melintasi Sungai Musi.

Sistem mekanik jembatan angkat pada Ampera adalah keajaiban teknik pada masanya. Berbeda dengan jembatan bascule yang mengayun seperti jungkat-jungkit, vertical lift bridge mengangkat seluruh segmen deck secara paralel ke atas. Ini dilakukan dengan sistem kabel baja yang dihubungkan ke counterweight atau beban penyeimbang yang tersembunyi di dalam menara-menara tinggi di kedua sisi segmen angkat. Motor listrik besar menggerakkan drum atau katrol raksasa yang menggulung kabel, mengangkat deck. Karena ada counterweight yang hampir menyeimbangkan berat deck, motor hanya perlu mengatasi friksi dan sedikit ketidakseimbangan, sehingga relatif efisien meskipun deck

sangat berat. Ketika deck terangkat penuh, clearance atau jarak vertikal di bawah jembatan mencapai sekitar 44,5 meter, cukup untuk kapal-kapal besar pada masa itu.



Gambar 1.16 Jembatan Ampera

Mekanisme angkat Jembatan Ampera aktif beroperasi hingga tahun 1970. Selama periode ini, jembatan diangkat sesuai jadwal untuk memberi jalan bagi kapal-kapal niaga yang mengangkut barang dari dan ke pelabuhan Boom Baru di hilir Sungai Musi. Proses pengangkatan memakan waktu sekitar 30 menit dan memerlukan koordinasi yang ketat antara operator jembatan dengan petugas lalu lintas darat dan pelayaran. Namun seiring waktu, biaya operasional dan pemeliharaan sistem mekanik menjadi sangat tinggi. Motor listrik, kabel baja, bearing pada katrol, sistem hidrolik, dan komponen mekanis lainnya memerlukan pelumasan, penggantian parts, dan inspeksi rutin. Lebih dari itu, frekuensi lalu lintas kapal besar mulai menurun karena perubahan pola perdagangan dan pengembangan pelabuhan di lokasi lain. Di sisi lain, lalu lintas kendaraan darat di Palembang terus meningkat, dan penutupan jembatan untuk pengangkatan menyebabkan kemacetan yang semakin parah.

Atas pertimbangan ekonomis dan praktis, pada tahun 1970 pemerintah memutuskan untuk menonaktifkan mekanisme angkat dan mempermanenkan deck pada posisi turun. Segmen tengah yang tadinya bisa bergerak kini dikunci dan disatukan dengan struktur permanen. Counterweight dibiarkan di dalam menara sebagai bagian dari sejarah, tetapi semua sistem mekanik dan elektrik dinonaktifkan. Sejak saat itu hingga sekarang, Jembatan Ampera berfungsi sebagai jembatan tetap biasa. Meskipun kehilangan fungsi mekanik aslinya, Jembatan Ampera tetap menjadi simbol kota Palembang dan landmark



yang sangat dikenali. Pada malam hari, jembatan dihiasi dengan lampu-lampu yang membuatnya bersinar di atas Sungai Musi, menjadi salah satu pemandangan paling indah di kota tersebut.

Dari perspektif struktural, Jembatan Ampera pasca-nonaktivasi tetap merupakan struktur yang kokoh. Total panjang jembatan adalah 1.177 meter dengan lebar 22 meter, mampu menampung empat lajur kendaraan ditambah trotoar pejalan kaki di kedua sisi. Struktur utamanya menggunakan rangka baja dengan balok-balok besar yang menopang deck beton. Menara-menara kembar yang dulunya menampung mekanisme angkat kini berfungsi sebagai landmark visual yang memberi identitas unik pada jembatan. Fondasi jembatan di dasar Sungai Musi menggunakan sistem caisson, di mana struktur beton besar diturunkan ke dasar sungai dan diisi dengan beton untuk menciptakan fondasi yang masif dan stabil. Caisson dipilih karena kondisi dasar sungai yang berlumpur dan kedalaman air yang signifikan membuat pemancangan tiang sulit dilakukan dengan teknologi yang tersedia pada tahun 1960-an.

Tantangan utama pemeliharaan Jembatan Ampera saat ini adalah korosi pada struktur baja. Sungai Musi membawa air dari hulu dengan kandungan mineral tertentu, dan kelembapan tinggi di Palembang mempercepat proses pengkaratan. Selain itu, polusi udara dari kendaraan bermotor yang padat juga berkontribusi pada degradasi cat pelindung. Program pengecatan ulang dilakukan secara berkala, tetapi dengan luasan jembatan yang besar, ini adalah proyek yang memakan waktu dan biaya. Selain cat, beberapa bagian struktur yang mengalami korosi parah harus diperbaiki atau bahkan diganti. Proses ini memerlukan penutupan sebagian lajur jembatan, yang harus dikelola dengan hati-hati untuk meminimalkan gangguan lalu lintas.

Jembatan Ampera juga memiliki nilai historis dan budaya yang sangat tinggi. Bagi masyarakat Palembang, jembatan ini bukan sekadar infrastruktur transportasi tetapi simbol perjuangan dan identitas kota. Banyak acara budaya dan perayaan yang diadakan di sekitar atau bahkan di atas jembatan. Pada perayaan kemerdekaan atau tahun baru, jembatan menjadi focal point dengan pertunjukan kembang api dan festival. Upaya pelestarian jembatan sebagai warisan budaya menjadi penting renovasi dan modernisasi harus dilakukan dengan tetap mempertahankan karakteristik arsitektural aslinya. Ini adalah tantangan tersendiri dalam engineering: bagaimana meningkatkan kapasitas dan keamanan struktur tanpa menghilangkan elemen-elemen bersejarah yang membuat jembatan unik.

Untuk mahasiswa, Jembatan Ampera memberikan pelajaran penting tentang evolusi dan adaptasi infrastruktur. Sebuah jembatan yang dirancang untuk satu fungsi (*movable bridge* untuk lalu lintas air) bisa beradaptasi menjadi fungsi lain (*fixed bridge* untuk lalu lintas darat) ketika kondisi berubah. Ini menunjukkan pentingnya fleksibilitas dalam desain dan kemampuan struktur untuk di-retrofit atau dimodifikasi. Studi kasus Ampera juga mengajarkan tentang life-cycle cost biaya total kepemilikan struktur sepanjang umur layanannya. Meskipun sistem mekanik jembatan angkat sangat canggih, biaya operasional dan pemeliharaannya terbukti tidak sustainable dalam jangka panjang, menjadi pelajaran

untuk proyek-proyek masa depan tentang pentingnya mempertimbangkan tidak hanya biaya konstruksi awal tetapi juga biaya jangka panjang.

4. Jembatan Youtefa / Jembatan Holtekamp (Jayapura, Papua)

Jembatan Youtefa yang juga dikenal sebagai Jembatan Holtekamp adalah jembatan pelengkung baja dengan warna merah yang sangat mencolok, menghubungkan wilayah Jayapura Utara dengan Jayapura Selatan melewati Teluk Youtefa. Diresmikan pada tahun 2019, jembatan sepanjang 732 meter ini terdiri dari dua lengkungan baja paralel yang indah dengan deck berada di bawah lengkungan. Warna merah cerah yang dipilih bukan hanya untuk estetika tetapi juga memiliki makna simbolis sebagai warna semangat dan keberanian, serta untuk visibilitas tinggi yang membantu navigasi pelayaran di teluk. Yang membuat Jembatan Youtefa sangat istimewa dari perspektif teknik adalah metode konstruksinya yang sangat menantang.

Papua adalah wilayah paling timur Indonesia dengan akses yang sulit, infrastruktur terbatas, dan jarak yang sangat jauh dari pusat-pusat industri di Jawa. Membawa material konstruksi, terutama komponen baja besar, ke Papua memerlukan logistik yang sangat kompleks. Untuk jembatan ini, diambil keputusan yang sangat berani: merakit seluruh struktur lengkungan baja utama di Surabaya, Jawa Timur, kemudian mengangkutnya dalam satu kesatuan utuh menggunakan kapal khusus ke Jayapura—perjalanan laut sejauh lebih dari 3.000 kilometer. Ini adalah prestasi luar biasa yang bahkan memecahkan rekor Museum Rekor Indonesia (MURI) sebagai pengiriman struktur jembatan utuh terjauh di Indonesia.



Gambar 1.16 Jembatan Youtefa / Jembatan Holtekamp



Proses fabrikasi lengkungan di Surabaya dilakukan di galangan kapal dengan fasilitas yang memadai. Struktur lengkungan terbuat dari baja box berukuran besar yang dibentuk mengikuti kurva lengkungan yang telah diperhitungkan secara presisi. Setiap segmen baja disambung dengan las berkualitas tinggi yang telah diuji menggunakan ultrasonic testing dan radiography untuk memastikan tidak ada cacat internal. Setelah seluruh lengkungan selesai dirakit dan cat pelindung diaplikasikan, struktur yang beratnya ratusan ton ini dimuat ke atas kapal tongkang (barge) khusus yang sangat besar dan stabil. Perjalanan dari Surabaya ke Jayapura melewati berbagai kondisi laut termasuk perairan yang bergelombang di sekitar Maluku dan Papua. Selama perjalanan, struktur harus diamankan dengan sangat kuat menggunakan sistem rigging dan lashing untuk mencegah pergeseran yang bisa merusak struktur atau bahkan menenggelamkan kapal.

Setibanya di Jayapura, tantangan berikutnya adalah memasang struktur lengkungan raksasa ini ke posisi akhirnya. Karena lengkungan sudah dirakit sebagai satu kesatuan, metode instalasi yang digunakan adalah lift-and-place atau heavy lifting di mana struktur diangkat dari tongkang menggunakan crane besar atau floating crane, kemudian dipindahkan dan ditempatkan pada abutment atau tumpuan yang telah disiapkan di kedua ujung teluk. Proses ini memerlukan koordinasi yang sangat presisi struktur seberat ratusan ton harus diturunkan dengan akurasi milimeter agar duduk sempurna pada bearing pads. Operasi ini dilakukan pada kondisi laut yang tenang untuk menghindari pergerakan tongkang dan crane yang bisa menyebabkan kecelakaan. Setelah lengkungan terpasang, tahap berikutnya adalah memasang deck di bawah lengkungan, menghubungkan lengkungan dengan deck menggunakan hanger atau batang penggantung vertikal, dan menyelesaikan pekerjaan finishing seperti pemasangan railing, lampu, dan sistem drainase.

Dari segi struktural, Jembatan Youtefa adalah tied arch bridge di mana ujung-ujung lengkungan tidak bertumpu pada abutment yang terpisah tetapi "diikat" oleh deck itu sendiri yang berfungsi sebagai batang tarik horizontal. Konfigurasi ini sangat menguntungkan di Papua yang memiliki kondisi geologis yang kompleks dengan aktivitas seismik tinggi karena berada di zona pertemuan lempeng tektonik. Dengan tied arch, gaya horizontal dari lengkungan ditahan oleh deck, sehingga yang diteruskan ke fondasi hanyalah gaya vertikal. Ini mengurangi beban dan kompleksitas desain fondasi, yang sangat penting mengingat kondisi tanah di Papua yang bervariasi dan seringkali kurang stabil.

Papua terletak di salah satu wilayah paling aktif secara seismik di Indonesia. Gempa bumi dengan magnitudo besar bisa terjadi sewaktu-waktu, dan jembatan harus dirancang untuk tetap berfungsi bahkan setelah gempa besar. Desain seismik Jembatan Youtefa mempertimbangkan beberapa aspek. Pertama, lengkungan baja memiliki sifat ductility atau kemampuan berdeformasi tanpa patah yang sangat baik, sehingga bisa menyerap energi gempa melalui deformasi elastis dan sedikit deformasi plastis. Kedua, sambungan antara lengkungan dengan deck menggunakan bearing yang fleksibel yang memungkinkan sedikit pergerakan relatif, berfungsi seperti isolator yang meredam gaya gempa. Ketiga,



fondasi dirancang dengan kapasitas yang cukup untuk menahan beban dinamis gempa di samping beban statis normal. Analisis gempa dilakukan menggunakan metode response spectrum dan time history analysis untuk mensimulasikan respons struktur terhadap berbagai skenario gempa.

Selain fungsi transportasi, Jembatan Youtefa juga memiliki dampak sosial dan ekonomi yang signifikan bagi masyarakat Papua. Sebelum jembatan ada, transportasi antara Jayapura Utara dan Selatan harus memutar jauh melalui jalan darat yang memakan waktu lebih dari satu jam. Dengan jembatan, waktu tempuh menjadi hanya beberapa menit. Ini membuka akses penduduk di wilayah selatan ke fasilitas pendidikan, kesehatan, dan ekonomi di utara, dan sebaliknya. Jembatan juga menjadi objek wisata baru yang menarik banyak wisatawan dan warga lokal yang datang untuk menikmati pemandangan teluk dari jembatan, berfoto dengan latar belakang lengkungan merah yang ikonik, atau sekadar bersepeda dan berjalan-jalan di trotoar jembatan. Pencahayaan LED yang dipasang di sepanjang lengkungan membuat jembatan menjadi pemandangan spektakuler di malam hari, dengan lampu yang bisa berubah-ubah warna sesuai dengan acara atau perayaan tertentu.

Untuk mahasiswa teknik sipil, Jembatan Youtefa menawarkan pelajaran penting tentang logistik konstruksi dan adaptasi teknologi untuk kondisi lokal yang challenging. Keputusan untuk merakit di Jawa dan mengirim dalam bentuk utuh adalah solusi kreatif terhadap keterbatasan infrastruktur konstruksi di Papua. Jika lengkungan dirakit di lokasi, akan diperlukan scaffolding besar, peralatan las dan quality control yang canggih, serta tenaga terampil yang mungkin tidak tersedia di Jayapura. Dengan merakit di Surabaya yang memiliki industri galangan kapal dan konstruksi baja yang maju, kualitas bisa dijamin dan waktu konstruksi di lokasi bisa dipercepat. Ini adalah contoh bagaimana engineering tidak hanya tentang perhitungan struktur tetapi juga tentang manajemen proyek, logistik, dan pemahaman konteks lokal.

5. Jembatan Pasupati (Bandung, Jawa Barat)

Jembatan Pasupati adalah jembatan cable-stayed yang menghubungkan Bandung Utara dengan Bandung Timur, melintasi lembah Cikapundung di tengah kota. Diresmikan pada tahun 2005, jembatan sepanjang 2,8 kilometer ini (termasuk jalan pendekat) dengan bentang utama 222 meter menjadi salah satu ikon kota Bandung dan merupakan jembatan layang urban pertama di Indonesia yang menggunakan teknologi cable-stayed. Nama "Pasupati" diambil dari nama salah satu jalan utama yang dilintasi jembatan, yang sendiri diambil dari tokoh pewayangan Prabu Pasupati.

Yang membuat Jembatan Pasupati sangat istimewa dari segi teknik adalah penggunaan teknologi Lock-Up Device (LUD) yang merupakan sistem peredam gempa canggih yang pertama kali diterapkan di Indonesia. Bandung terletak di wilayah yang cukup aktif secara seismik dengan beberapa sesar aktif di sekitarnya, termasuk Sesar Lembang yang berpotensi menghasilkan gempa besar. Jembatan cable-stayed dengan menara tinggi dan kabel-kabel yang tegang sangat sensitif terhadap getaran dan pergerakan seismik. Tanpa

sistem peredam yang tepat, gempa bisa menyebabkan getaran berlebihan atau bahkan kerusakan struktural.

Lock-Up Device bekerja berdasarkan prinsip visko-elastis dan sistem mekanik khusus. Pada kondisi normal, LUD berfungsi seperti bearing biasa yang memungkinkan sedikit pergerakan thermal expansion pergerakan struktur akibat perubahan suhu harian. Ketika suhu naik, struktur baja dan beton memuai; ketika suhu turun, struktur menyusut. Tanpa akomodasi untuk pergerakan ini, tegangan internal yang besar bisa terbentuk dan merusak struktur. LUD memungkinkan pergerakan lambat ini dengan resistensi minimal.

Namun ketika terjadi gerakan cepat dan tiba-tiba seperti saat gempa, LUD segera "mengunci" dan menjadi kaku, mencegah pergerakan berlebihan. Ini melindungi struktur utama dari deformasi berlebihan dan kerusakan. Setelah guncangan gempa berhenti, LUD kembali ke mode fleksibel. Teknologi ini dikembangkan di Perancis dan Jembatan Pasupati adalah proyek perdana implementasinya di Indonesia, menjadi pilot project yang kemudian diadopsi untuk jembatan-jembatan besar lainnya di wilayah seismik.



Gambar 1.17 Jembatan Pasupati (Bandung, Jawa Barat)

Desain Jembatan Pasupati juga unik karena hanya menggunakan satu menara pylon di tengah, berbeda dengan sebagian besar cable-stayed yang menggunakan dua menara. Konfigurasi single pylon ini menciptakan asimetri visual yang menarik dan juga merupakan solusi terhadap kondisi lahan yang terbatas di lembah Cikapundung. Pylon setinggi 70 meter berbentuk ramping dengan penampang yang mengecil ke atas, memberikan kesan ringan meskipun sebenarnya sangat masif. Kabel-kabel tersusun dalam pola semi-harp di mana kabel-kabel di satu sisi deck sejajar satu sama lain tetapi miring, menciptakan pola



yang geometris dan elegan. Deck jembatan menggunakan struktur baja komposit di mana balok baja bekerja bersama dengan slab beton melalui shear connectors, menggabungkan kekuatan tarik baja dengan kekuatan tekan beton.

Tantangan konstruksi Pasupati sangat unik karena jembatan dibangun di tengah kota yang padat dengan lalu lintas tinggi. Tidak seperti jembatan di area terbuka atau antar pulau, konstruksi di urban area memerlukan manajemen yang sangat ketat untuk meminimalkan gangguan terhadap aktivitas kota. Pengangkutan material besar harus dilakukan di malam hari ketika lalu lintas sepi. Pemasangan segmen-segmen deck menggunakan crane besar dilakukan dengan blocking sebagian jalan di bawahnya, yang harus dikoordinasikan dengan polisi lalu lintas untuk pengalihan rute. Pemancangan fondasi di lembah Cikapundung dilakukan dengan hati-hati karena area tersebut memiliki banyak utilitas bawah tanah pipa air, kabel listrik, telepon yang tidak boleh rusak. Survey geoteknik juga mengungkapkan bahwa lapisan tanah di lembah adalah kombinasi batuan andesit dan lapisan alluvial, memerlukan desain fondasi yang adaptif dengan kombinasi tiang bor (*bored pile*) di area batuan dan caisson di area alluvial.

Aspek urban integration atau integrasi dengan lingkungan kota adalah pertimbangan penting dalam desain Pasupati. Jembatan tidak hanya berfungsi sebagai infrastruktur transportasi tetapi juga sebagai elemen urban landscape yang membentuk karakter kota. Desain estetis diberikan perhatian khusus bentuk pylon yang ramping, kabel-kabel yang tersusun rapi, dan proporsi yang harmonis dengan lingkungan sekitar. Di malam hari, sistem pencahayaan LED yang canggih menyinari pylon dan kabel dengan berbagai warna, menciptakan landmark visual yang sangat striking. Pencahayaan bukan hanya untuk estetika tetapi juga untuk keselamatan, memastikan jembatan terlihat jelas oleh pilot pesawat yang terbang di sekitar Bandung karena elevasi jembatan cukup tinggi.

Ruang di bawah jembatan juga dimanfaatkan secara kreatif. Daripada membiarkannya kosong atau menjadi area terlantar, pemerintah kota mengembangkan area di bawah Jembatan Pasupati sebagai ruang publik dengan taman, plaza, dan area parkir. Konsep ini mengikuti best practice dari kota-kota lain di dunia di mana ruang bawah jembatan urban ditransformasi menjadi amenities yang berguna bagi warga. Ini menunjukkan bagaimana infrastruktur bisa multi-fungsi dan memberikan nilai tambah lebih dari sekadar fungsi primernya.

Dari segi dampak transportasi, Jembatan Pasupati sangat signifikan mengurangi kemacetan di pusat kota Bandung. Sebelum jembatan ada, lalu lintas dari Bandung Utara ke Timur harus melewati jalan-jalan sempit di pusat kota yang selalu macet, terutama di persimpangan Cicadas dan sekitar area Dago. Dengan adanya jembatan yang menawarkan rute alternatif elevated bypass, sebagian besar lalu lintas through traffic dialihkan dari jalan permukaan, mengurangi beban dan meningkatkan kecepatan perjalanan. Waktu tempuh antara Bandung Utara dan Timur berkurang dari sekitar 45 menit menjadi hanya 10-15 menit. Ini memiliki dampak ekonomi yang besar penghematan bahan bakar, waktu, dan pengurangan emisi karbon.



Untuk mahasiswa, Jembatan Pasupati adalah studi kasus yang sempurna tentang urban bridge engineering di mana aspek teknis harus diintegrasikan dengan pertimbangan sosial, estetis, dan konteks kota. Tidak cukup hanya mendesain jembatan yang kuat dan aman jembatan juga harus indah, tidak mengganggu kehidupan kota, dan bahkan meningkatkan kualitas urban environment. Penggunaan teknologi seismik seperti LUD juga menunjukkan pentingnya adaptasi teknologi internasional untuk kondisi lokal Indonesia yang rawan gempa, menjadi pembelajaran berharga tentang bagaimana engineering harus responsif terhadap konteks geologis dan iklim.

6. Jembatan Merah Putih (Ambon, Maluku)

Jembatan Merah Putih di Ambon adalah jembatan cable-stayed yang menghubungkan wilayah Poka dengan Galala melewati Teluk Ambon Dalam. Diresmikan pada tahun 2016, jembatan sepanjang 1.140 meter dengan bentang utama 180 meter ini merupakan jembatan terpanjang di Indonesia bagian timur dan menjadi ikon kebangkitan Maluku pasca-konflik horizontal yang melanda provinsi tersebut pada akhir 1990-an hingga awal 2000-an. Nama "Merah Putih" dipilih sebagai simbol persatuan dan nasionalisme, mengambil warna bendera Indonesia, sekaligus menggantikan nama lama "Jembatan Teluk Ambon" yang lebih generik.

Secara visual, Jembatan Merah Putih sangat mencolok dengan warna merah cerah pada struktur pylon dan kabel putih yang kontras. Dua menara pylon kembar menjulang setinggi 68 meter dengan desain yang elegan penampang ramping yang sedikit melebar di dasar untuk stabilitas. Kabel-kabel disusun dalam pola modified fan atau semi-harp yang menciptakan siluet geometris yang indah, terutama ketika dilihat dari kejauhan atau dari atas bukit-bukit yang mengelilingi teluk. Di malam hari, sistem pencahayaan LED menyinari struktur dengan warna merah dan putih yang bergantian, menciptakan pemandangan spektakuler yang bisa dilihat dari berbagai sudut kota Ambon.

Tantangan teknis terbesar dalam pembangunan Jembatan Merah Putih adalah kondisi geologis Maluku yang sangat kompleks dan rawan gempa. Maluku terletak di zona Ring of Fire dengan aktivitas seismik dan vulkanik yang sangat tinggi. Wilayah ini berada di pertemuan tiga lempeng tektonik besar Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Indo-Australia yang bergerak relatif satu sama lain dan menciptakan zona subduksi dan patahan aktif. Gempa bumi dengan magnitudo 6-7 skala Richter terjadi cukup sering, dan gempa megathrust dengan magnitudo lebih dari 7 adalah ancaman nyata. Oleh karena itu, desain seismik jembatan harus sangat robust dengan analisis yang mendetail.



Gambar 1.18 Jembatan Merah Putih

Analisis gempa untuk Jembatan Merah Putih menggunakan metode yang paling canggih yang tersedia pada saat itu. Pertama, dilakukan studi seismotektonik untuk mengidentifikasi semua sumber gempa potensial dalam radius ratusan kilometer dari lokasi jembatan baik gempa subduksi di laut maupun gempa patahan di darat. Setiap sumber gempa dikarakterisasi berdasarkan sejarah gempa historis, geologi, dan data GPS untuk menentukan recurrence interval atau periode ulang gempa besar. Dari data ini, dibuat response spectrum grafik yang menunjukkan percepatan maksimum yang mungkin dialami struktur pada berbagai frekuensi getaran. Struktur jembatan kemudian dimodelkan menggunakan finite element analysis dengan ribuan elemen untuk mensimulasikan respons terhadap gempa. Beberapa skenario gempa dengan berbagai magnitudo dan jarak episentrum disimulasikan untuk memastikan struktur bisa bertahan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur cable-stayed relatif baik dalam menahan gempa karena fleksibilitasnya. Kabel-kabel memiliki kemampuan bergerak dan menyerap energi gempa melalui deformasi elastis. Namun, titik-titik kritis seperti sambungan antara kabel dengan pylon dan antara deck dengan bearing memerlukan perhatian khusus. Untuk ini, digunakan sistem bearing khusus yang memungkinkan pergerakan multi-arah namun tetap memberikan restoring force yang mengembalikan struktur ke posisi semula setelah gempa. Fondasi pylon juga dirancang dengan pile group kelompok tiang pancang dalam jumlah banyak yang ditanamkan hingga kedalaman puluhan meter untuk mencapai lapisan batuan keras atau tanah padat yang bisa memberikan daya dukung dan menahan beban lateral gempa.

Kondisi dasar laut di Teluk Ambon juga menambah kompleksitas. Investigasi geoteknik menggunakan metode seismik refleksi dan pengeboran laut mengungkapkan bahwa dasar



teluk terdiri dari lapisan sedimen laut yang relatif lunak di atas batuan vulkanik. Lapisan sedimen ini rentan terhadap liquefaction atau pencairan tanah saat gempa, di mana tanah yang jenuh air kehilangan kekuatan dan berperilaku seperti cairan. Liquefaction bisa menyebabkan fondasi tenggelam atau miring, yang sangat berbahaya untuk struktur jembatan. Untuk mengatasi risiko ini, fondasi dirancang untuk menembus lapisan sedimen dan tertanam kuat di batuan vulkanik di bawahnya. Selain itu, dilakukan analisis liquefaction untuk memastikan bahwa bahkan jika lapisan sedimen mencair, fondasi yang tertanam di batuan tetap stabil.

Aspek konstruksi Jembatan Merah Putih juga sangat menantang karena keterbatasan infrastruktur di Maluku. Ambon adalah pulau yang relatif kecil dengan akses terbatas tidak ada pabrik baja struktural, tidak ada casting yard beton besar, dan tenaga konstruksi terampil juga terbatas. Hampir semua material dan komponen utama harus didatangkan dari Jawa atau bahkan dari luar negeri melalui jalur laut yang panjang. Segmen-segmen deck beton prategang diproduksi di Surabaya, dimuat ke kapal tongkang, dan dikirim ke Ambon perjalanan yang memakan waktu sehari-hari atau bahkan berminggu-minggu tergantung cuaca dan kondisi laut. Kabel-kabel baja impor dari produsen spesialis di Korea atau Jepang juga harus diangkut dengan kapal khusus yang bisa menjaga kabel tetap dalam kondisi optimal.

Untuk mempercepat konstruksi di lokasi, metode yang digunakan adalah balanced cantilever yang sudah disebutkan sebelumnya. Pylon dibangun terlebih dahulu hingga ketinggian penuh menggunakan jump form sistem bekisting yang "melompat" ke atas secara bertahap seiring pengecoran beton pylon berlapis-lapis. Setelah pylon selesai dan beton mencapai kekuatan penuh, segmen-segmen deck mulai dipasang secara simetris dari kedua sisi pylon. Setiap segmen baru yang dipasang langsung dihubungkan dengan kabel ke pylon untuk menjaga keseimbangan dan mencegah pylon miring. Proses ini berlanjut hingga deck dari kedua pylon bertemu di tengah atau mencapai abutment di kedua ujung jembatan. Metode ini sangat efisien karena tidak memerlukan scaffolding di bawah jembatan yang sulit dan mahal di atas air laut yang dalam.

Dari perspektif sosial-ekonomi, dampak Jembatan Merah Putih sangat transformatif bagi masyarakat Ambon. Sebelum jembatan ada, untuk pergi dari Ambon kota ke Bandara Pattimura di Laha atau ke wilayah Poka dan sekitarnya, kendaraan harus memutar sangat jauh melalui jalan pesisir yang sempit dan berkelok perjalanan yang bisa memakan waktu 45 menit hingga satu jam. Dengan jembatan, waktu tempuh menjadi hanya sekitar 10-15 menit. Ini sangat penting terutama untuk akses ke bandara penerbangan tidak bisa ditunda menunggu penumpang yang terjebak macet di jalan lama. Jembatan juga membuka akses ke wilayah-wilayah di sisi lain teluk yang dulunya relatif terisolasi, mendorong pengembangan ekonomi, perumahan, dan pariwisata.

Selain itu, Jembatan Merah Putih memiliki nilai simbolis yang sangat kuat bagi masyarakat Maluku. Konflik komunal yang terjadi pada tahun 1999-2002 meninggalkan luka yang dalam dengan ribuan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur yang masif. Pembangunan jembatan besar yang menghubungkan berbagai wilayah di Ambon dilihat



sebagai simbol rekonsiliasi, persatuan, dan kebangkitan Maluku. Upacara peresmian jembatan dihadiri oleh berbagai tokoh agama dan masyarakat yang menyatakan komitmen untuk hidup berdampingan secara damai. Jembatan menjadi bukti fisik bahwa Maluku bisa bangkit dan membangun masa depan yang lebih baik.

Pemeliharaan Jembatan Merah Putih memerlukan perhatian khusus mengingat kondisi lingkungan yang agresif. Air laut di Teluk Ambon mengandung garam dengan konsentrasi tinggi yang sangat korosif terhadap baja. Kelembapan udara yang tinggi sepanjang tahun juga mempercepat proses korosi. Untuk melindungi struktur, semua komponen baja diberi lapisan pelindung berlapis: galvanisasi (pelapisan zinc), kemudian cat epoxy multi-layer yang tahan air laut. Kabel-kabel memiliki selubung pelindung dan sistem dehumidifikasi internal. Inspeksi rutin dilakukan setiap enam bulan sekali menggunakan akses crane khusus atau bahkan drone untuk memeriksa kondisi kabel, sambungan, dan struktur utama. Setiap tanda-tanda korosi, retak, atau degradasi segera ditindaklanjuti dengan perbaikan sebelum menjadi masalah serius.

Untuk mahasiswa teknik sipil, Jembatan Merah Putih adalah studi kasus yang sangat kaya tentang engineering di kondisi ekstrem. Kombinasi antara aktivitas seismik tinggi, kondisi tanah yang challenging, lingkungan laut yang korosif, dan logistik yang sulit menciptakan tantangan multi-dimensi yang memerlukan solusi terintegrasi. Ini mengajarkan bahwa engineering yang baik bukan hanya tentang menghitung struktur yang kuat, tetapi juga tentang memahami konteks geologis, iklim, sosial, dan ekonomi, kemudian mengintegrasikan semua pertimbangan ini dalam satu desain yang optimal.

7. Jembatan Barito (Banjarmasin, Kalimantan Selatan)

Jembatan Barito adalah jembatan gantung yang melintasi Sungai Barito, salah satu sungai terbesar di Kalimantan, menghubungkan Banjarmasin dengan Kabupaten Barito Kuala. Dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1997, jembatan dengan bentang utama 640 meter ini pernah menjadi jembatan gantung terpanjang di Indonesia sebelum era Jembatan Suramadu. Meskipun Suramadu menggunakan teknologi cable-stayed untuk bentang utamanya, Jembatan Barito tetap menjadi salah satu jembatan gantung sejati (true suspension bridge) terpenting di Indonesia dengan kabel utama melengkung yang khas.

Struktur Jembatan Barito mengikuti prinsip klasik jembatan gantung dengan dua menara utama setinggi 98 meter yang berdiri di kedua tepi Sungai Barito. Kabel baja utama dengan diameter sekitar 40 cm terdiri dari ribuan helai kawat baja berkekuatan tinggi yang dipilin membentang dari satu tepi sungai ke tepi lainnya, melewati puncak kedua menara dan turun ke angkur di kedua ujung. Kabel utama ini membentuk kurva catenary yang indah. Dari kabel utama, hanger atau kabel penggantung vertikal turun dengan jarak teratur untuk menopang deck jembatan yang berada di bawahnya. Deck sendiri menggunakan struktur baja dengan lantai beton yang mampu menampung dua lajur kendaraan plus trotoar pejalan kaki.

Yang membuat Jembatan Barito sangat menarik dari perspektif geoteknik adalah kondisi tanah di Kalimantan Selatan yang didominasi oleh tanah gambut dan lempung

lunak. Gambut adalah tanah organik yang terbentuk dari akumulasi material tumbuhan yang membusuk dalam kondisi jenuh air selama ribuan tahun. Karakteristik utama gambut adalah sangat lunak, memiliki daya dukung yang sangat rendah, kandungan air yang sangat tinggi (bisa lebih dari 90% dari volume), dan mengalami settlement atau penurunan yang besar dan berlangsung lama ketika dibebani. Membangun fondasi untuk struktur berat seperti jembatan di atas gambut adalah tantangan geoteknik yang sangat serius.



Gambar 1.19 Jembatan Barito

Untuk mengatasi kondisi tanah yang ekstrem ini, fondasi Jembatan Barito menggunakan sistem deep foundation dengan tiang pancang yang sangat panjang. Tiang-tiang pancang beton bertulang atau baja ditanamkan menembus lapisan gambut dan lempung lunak hingga mencapai lapisan tanah keras atau batuan di kedalaman yang bisa mencapai 40-50 meter di bawah permukaan. Proses pemancangan di tanah gambut juga unik karena tanah sangat lunak, tiang bisa "tenggelam" dengan berat sendiri tanpa perlu banyak gaya pemancangan, tetapi justru di sinilah masalahnya: tanah yang terlalu lunak tidak memberikan friksi yang cukup untuk menahan tiang, sehingga tiang bisa terus turun atau bahkan miring. Untuk memastikan tiang mencapai kedalaman yang tepat dan tetap vertikal, digunakan pile driving analyzer alat yang mengukur respons dinamis tiang saat dipancang untuk memverifikasi bahwa tiang telah mencapai lapisan bearing yang kuat.

Tantangan lain dari tanah gambut adalah settlement jangka panjang. Bahkan setelah konstruksi selesai, tanah gambut di sekitar fondasi akan terus mengalami konsolidasi dan penurunan secara perlahan selama bertahun-tahun. Penurunan ini bisa tidak seragam beberapa bagian turun lebih banyak dari yang lain menciptakan differential settlement yang bisa menyebabkan struktur miring atau retak. Untuk mengantisipasi ini, desain jembatan menyertakan toleransi untuk settlement dan sistem monitoring untuk memantau pergerakan fondasi. Jika settlement melebihi batas yang aman, perbaikan bisa



dilakukan seperti jacking atau pengangkatan struktur dan penambahan shim atau lapisan penyesuaian di bawah bearing.

Dari perspektif hidrologi, Sungai Barito adalah sungai yang sangat besar dengan debit yang berfluktuasi drastis antara musim kemarau dan musim hujan. Saat musim hujan, debit sungai meningkat berlipat ganda dan permukaan air naik secara signifikan, bahkan bisa menyebabkan banjir besar. Desain jembatan harus memperhitungkan fluktuasi permukaan air ini untuk memastikan clearance vertikal yang cukup bagi kapal-kapal yang melintas bahkan saat banjir. Selain itu, arus sungai yang kuat saat banjir bisa memberikan gaya lateral yang besar pada pilar dan fondasi jembatan. Analisis hidrolik dilakukan untuk mensimulasikan aliran air di sekitar struktur jembatan dan memastikan tidak terjadi scour atau penggerusan dasar sungai yang bisa mengekspos fondasi.

Kabel baja utama pada jembatan gantung sangat krusial untuk keselamatan struktur. Di iklim tropis Kalimantan dengan kelembapan sangat tinggi, hujan sepanjang tahun, dan kadang kabut tebal di pagi hari, korosi kabel adalah ancaman serius. Setiap helai kawat dalam kabel harus dilindungi dari air dan oksigen yang menyebabkan karat. Proteksi dilakukan dengan beberapa lapis: pertama, kabel dilapisi dengan wrapping atau lilitan kawat galvanis yang rapat untuk mencegah air masuk. Kedua, cat pelindung khusus yang elastis diaplikasikan di atas wrapping. Ketiga, sistem inspeksi dan pemeliharaan rutin dilakukan di mana bagian-bagian kabel yang menunjukkan tanda korosi dibersihkan, diperbaiki, dan dicat ulang.

Salah satu fenomena yang harus diperhitungkan dalam desain jembatan gantung adalah aeroelasticity atau interaksi antara struktur dengan aliran angin. Jembatan gantung dengan deck yang relatif tipis dan fleksibel bisa mengalami getaran akibat angin. Ada beberapa jenis getaran: vortex-induced vibration di mana pusaran angin yang terbentuk di belakang deck menciptakan gaya bolak-balik dengan frekuensi tertentu, dan flutter di mana kombinasi antara bending (lentur) dan torsion (puntir) deck menciptakan getaran yang bisa terus membesar jika tidak diredam. Untuk menghindari masalah ini, desain deck Jembatan Barito menggunakan profil aerodinamis yang meminimalkan turbulensi, dan struktur dilengkapi dengan tuned mass damper—sistem massa yang bergetar dengan frekuensi tertentu untuk meredam getaran struktur.

Dari segi ekonomi dan transportasi, Jembatan Barito memiliki peran sangat penting dalam konektivitas Kalimantan Selatan. Sebelum jembatan ada, satu-satunya cara menyeberangi Sungai Barito adalah dengan feri yang kapasitasnya terbatas dan sangat tergantung cuaca dan kondisi sungai. Antrian panjang kendaraan menunggu feri adalah pemandangan sehari-hari, terutama saat musim liburan atau hari-hari sibuk. Dengan jembatan, waktu penyeberangan yang dulunya bisa mencapai satu jam (termasuk antri) menjadi hanya beberapa menit. Ini membuka akses transportasi barang dan orang antara Banjarmasin sebagai pusat ekonomi dengan wilayah-wilayah pertanian dan perkebunan di Barito Kuala dan sekitarnya.

Pemeliharaan Jembatan Barito adalah tugas yang berkelanjutan dan sangat penting. Selain inspeksi kabel dan struktur utama, bearing di puncak menara dan di sambungan



deck juga harus diperiksa dan dilumasi secara berkala. Bearing memungkinkan sedikit pergerakan struktur akibat thermal expansion dan kontraksi, serta getaran. Jika bearing macet, pergerakan yang seharusnya terjadi di bearing akan dipindahkan ke bagian lain struktur yang tidak dirancang untuk itu, bisa menyebabkan retak atau kerusakan. Sistem drainase jembatan juga penting air hujan yang terkumpul di deck harus dialirkan dengan cepat melalui sistem drainase yang baik untuk mencegah genangan yang membebani struktur dan menyebabkan korosi.

Untuk mahasiswa teknik sipil, Jembatan Barito memberikan pelajaran berharga tentang engineering di kondisi tanah ekstrem. Tanah gambut dan lempung lunak adalah kondisi yang sering dijumpai di wilayah pesisir dan dataran rendah Indonesia, terutama di Sumatera dan Kalimantan. Memahami karakteristik tanah ini dan teknik-teknik fondasi yang tepat adalah skill yang sangat penting. Jembatan Barito juga mendemonstrasikan bahwa jembatan gantung klasik masih relevan dan efisien untuk lokasi-lokasi tertentu, terutama di mana bentang panjang dibutuhkan dan kondisi tanah membuat pilar tengah tidak praktis.

8. Jembatan Kutai Kartanegara (Kalimantan Timur - Studi Kasus Kegagalan)

Jembatan Kutai Kartanegara adalah jembatan gantung yang menghubungkan Tenggarong dengan Samarinda di Kalimantan Timur, melintasi Sungai Mahakam. Dibuka untuk lalu lintas pada tahun 2001 dengan bentang utama sekitar 270 meter, jembatan ini menjadi infrastruktur vital untuk konektivitas regional. Namun, pada tanggal 26 November 2011, jembatan ini runtuh secara tiba-tiba, menyebabkan korban jiwa dan kerugian material yang sangat besar. Runtuhnya Jembatan Kutai Kartanegara adalah salah satu kejadian kegagalan struktur yang paling tragis dalam sejarah infrastruktur Indonesia modern, dan menjadi pelajaran yang sangat penting dalam forensic engineering—analisis mengapa struktur gagal dan bagaimana mencegah kejadian serupa.

Pada saat kejadian, jembatan sedang dalam proses perbaikan atau penggantian bagian-bagian yang mengalami deteriorasi. Pekerja konstruksi sedang berada di atas jembatan melakukan pekerjaan pada sistem kabel dan bearing. Tiba-tiba, tanpa peringatan sebelumnya, struktur jembatan mulai runtuh dari tengah. Video yang direkam oleh saksi mata menunjukkan bagaimana deck jembatan jatuh ke sungai di bawahnya dalam hitungan detik, menarik kabel-kabel dan sebagian menara bersama-sama. Kendaraan yang sedang melintasi jembatan dan pekerja di atasnya ikut jatuh. Total korban meninggal dunia mencapai lebih dari 20 orang, dengan puluhan lainnya luka-luka.



Gambar 1.20 Jembatan Kutai Kertanegara

Investigasi forensik yang dilakukan setelah kejadian melibatkan tim dari berbagai institusi termasuk Kementerian Pekerjaan Umum, perguruan tinggi, dan konsultan internasional. Investigasi ini mencakup analisis serpihan struktur yang tersisa, review dokumen desain dan konstruksi, wawancara dengan pihak terkait, dan simulasi komputer untuk merekonstruksi urutan kejadian keruntuhan. Hasil investigasi menunjukkan bahwa penyebab utama keruntuhan adalah kegagalan sistem sambungan kabel pada puncak menara tepatnya pada socketing atau sistem pengikatan ujung kabel ke anchorage.



Gambar 1.21 Runtuhnya Jembatan Kutai Kertanegara



Pada jembatan gantung, kabel baja utama harus dikaitkan dengan sangat kuat pada anchorage di puncak menara dan di blok angkur di darat. Sistem socketing adalah metode di mana ujung kabel dimasukkan ke dalam socket logam berbentuk kerucut, kemudian ruang di dalam socket diisi dengan material seperti resin atau seng cair (*zinc poured socket*) yang mengeras dan "mengunci" kabel. Kekuatan sistem socketing tergantung pada kualitas material pengisi, kepatuhan pada prosedur instalasi yang tepat, dan kondisi pemeliharaan. Investigasi menemukan bahwa beberapa socket mengalami korosi internal yang parah dan material pengisi mengalami degradasi, mengurangi kekuatan pengikatan secara signifikan. Ada juga indikasi bahwa beberapa helai kawat dalam kabel sudah putus sebelum kejadian runtuh tetapi tidak terdeteksi karena tersembunyi di dalam selubung kabel.

Faktor pemeliharaan yang tidak memadai adalah kontributor utama kegagalan. Jembatan gantung memerlukan inspeksi dan pemeliharaan yang sangat intensif, terutama untuk kabel yang merupakan komponen krusial. Inspeksi kabel tidak bisa hanya dari luar diperlukan pembukaan selubung kabel secara berkala untuk memeriksa kondisi kawat-kawat di dalam, mendeteksi korosi atau putusnya helai kawat, dan melakukan perbaikan jika diperlukan. Sayangnya, karena berbagai alasan termasuk keterbatasan anggaran dan mungkin kurangnya kesadaran akan pentingnya pemeliharaan preventif, inspeksi mendalam seperti ini tidak dilakukan secara konsisten. Akibatnya, degradasi bertahap dari kabel dan sambungan berlangsung tanpa terdeteksi hingga mencapai titik kritis.

Beban berlebih saat pekerjaan perbaikan juga diduga menjadi trigger atau pemicu langsung. Saat perbaikan, ada peralatan konstruksi berat dan material yang ditempatkan di atas deck. Beban tambahan ini, dikombinasikan dengan sistem kabel yang sudah melemah, mungkin melebihi kapasitas yang tersisa dan memicu kegagalan. Kejadian kegagalan pada struktur yang sudah melemah sering bersifat progresif: ketika satu komponen gagal, beban yang seharusnya ditopang oleh komponen tersebut dipindahkan ke komponen lain, membebani mereka secara berlebihan, sehingga mereka juga gagal, dan seterusnya dalam cascade failure atau kegagalan berantai yang cepat.

Pelajaran yang sangat penting dari kejadian Kutai Kartanegara adalah pentingnya life-cycle management untuk infrastruktur. Sebuah jembatan tidak cukup hanya didesain dan dibangun dengan baik saja, namun juga harus dipelihara dengan baik sepanjang umur layanannya. Pemeliharaan bukan hanya reactive repair ketika ada kerusakan yang terlihat, tetapi preventive maintenance yang dilakukan secara proaktif untuk mencegah kerusakan terjadi. Ini memerlukan komitmen anggaran jangka panjang, personel yang terlatih, peralatan inspeksi yang memadai, dan sistem manajemen aset yang baik.

Setelah kejadian runtuh, pemerintah membangun jembatan pengganti dengan desain yang sepenuhnya baru. Jembatan Kutai Kartanegara yang baru menggunakan teknologi cable-stayed dengan desain yang lebih modern dan sistem monitoring yang canggih. Pembangunan jembatan baru selesai pada tahun 2015, mengembalikan konektivitas vital yang terputus akibat keruntuhan. Jembatan baru dilengkapi dengan Structural Health



Monitoring System yang menggunakan sensor untuk memantau tegangan kabel, deformasi deck, getaran, dan parameter kritis lainnya secara real-time, memberikan early warning jika ada anomali.

Dari perspektif engineering ethics dan profesionalisme, kasus Kutai Kartanegara mengingatkan kita akan tanggung jawab besar yang dipikul oleh insinyur. Ketika kita mendesain atau membangun atau merawat sebuah jembatan, kita memegang keselamatan ribuan orang yang akan menggunakan jembatan tersebut setiap hari. Keputusan teknis yang kita buat apakah dalam desain, pemilihan material, metode konstruksi, atau program pemeliharaan bisa berarti perbedaan antara keselamatan dan tragedi. Ini membawa kita pada kewajiban untuk selalu mengutamakan keselamatan publik, mengikuti standar dan best practices, dan tidak pernah mengkompromikan kualitas demi penghematan biaya atau percepatan waktu.

Untuk mahasiswa, studi kasus Kutai Kartanegara harus menjadi pengingat yang sober tentang apa yang bisa terjadi jika engineering dilakukan dengan tidak benar. Ini bukan untuk menakut-nakuti, tetapi untuk menanamkan rasa tanggung jawab dan ketelitian. Dalam pendidikan teknik sipil, kita sering fokus pada bagaimana mendesain struktur yang kuat, tetapi sama pentingnya adalah memahami bagaimana struktur bisa gagal dan bagaimana mencegahnya. Forensic engineering mempelajari kegagalan masa lalu adalah salah satu cara terbaik untuk belajar. Dengan memahami mengapa Kutai Kartanegara runtuh, kita bisa memastikan kejadian serupa tidak terulang pada proyek-proyek masa depan.

9. Jembatan Kalikuto (Jalan Tol Batang-Semarang, Jawa Tengah)

Jembatan Kalikuto adalah salah satu jembatan paling ikonik di Jalan Tol Trans-Jawa, melintasi sungai kecil di wilayah Batang, Jawa Tengah. Jembatan pelengkung baja (*steel arch bridge*) sepanjang 160 meter dengan warna merah cerah yang sangat mencolok ini menjadi landmark visual yang tidak mungkin terlewatkan oleh siapa pun yang melintasi Tol Batang-Semarang. Apa yang membuat Jembatan Kalikuto sangat istimewa adalah metode konstruksinya yang unik seluruh struktur lengkungan baja dirakit secara utuh di lokasi lain, kemudian diangkat dan dipasang ke posisi akhir menggunakan teknik heavy lifting atau pengangkatan berat.

Struktur lengkungan Jembatan Kalikuto menggunakan steel box arch lengkungan terbuat dari baja box dengan penampang berbentuk kotak atau persegi panjang yang hollow atau berongga di dalam. Desain box dipilih karena sangat efisien dalam menahan gaya tekan sepanjang lengkungan serta gaya torsi atau puntir yang bisa terjadi akibat beban tidak simetris. Dimensi box cukup besar dengan tinggi dan lebar sekitar 2-3 meter, dan ketebalan plat baja beberapa sentimeter, memberikan kekakuan dan kapasitas beban yang sangat tinggi. Deck jembatan berada di bawah lengkungan dan dihubungkan dengan lengkungan melalui hanger atau batang penggantung vertikal, menciptakan konfigurasi tied arch di mana ujung-ujung lengkungan diikat oleh deck sehingga gaya horizontal ditahan oleh deck sendiri.

Proses fabrikasi lengkungan dilakukan di area yang cukup luas dan datar tidak jauh dari lokasi jembatan. Di area fabrikasi ini, segmen-segmen baja box dipotong, dibentuk, dan dilas menjadi lengkungan yang utuh. Pekerjaan pengelasan dilakukan oleh welder bersertifikat dengan prosedur yang sangat ketat. Setiap sambungan las harus diuji menggunakan non-destructive testing seperti ultrasonic testing untuk memastikan tidak ada cacat internal seperti void, crack, atau incomplete fusion yang bisa mengurangi kekuatan. Setelah seluruh lengkungan dirakit dan diverifikasi, cat pelindung multi-layer diaplikasikan: primer anti-karat, intermediate coat, dan top coat dengan warna merah yang ikonik. Pengecatan harus dilakukan dalam kondisi lingkungan yang terkontrol untuk memastikan adhesi cat yang baik dan perlindungan maksimal terhadap korosi.



Gambar 1.22 Jembatan Kalikuto

Tahap yang paling dramatis dan menantang adalah proses lifting and launching. Setelah lengkungan selesai dirakit, struktur yang beratnya ratusan ton ini harus dipindahkan dari area fabrikasi ke posisi akhir melintasi sungai. Metode yang digunakan adalah kombinasi lowering dan launching. Pertama, struktur lengkungan diletakkan pada temporary support atau penyangga sementara yang bisa bergerak, semacam trolley raksasa dengan roda atau sistem sliding. Kemudian, menggunakan sistem hydraulic jack yang sangat kuat, struktur diangkat sedikit dari tanah dan mulai didorong atau ditarik secara perlahan menuju posisi akhir.

Kecepatan pergerakan sangat lambat hanya beberapa meter per jam untuk memastikan kontrol penuh dan mencegah pergeseran atau kerusakan struktur. Saat struktur mendekati posisi akhir di atas sungai, ia berada pada temporary pier atau pilar sementara yang telah disiapkan. Pada tahap ini, struktur masih dalam posisi mendatar atau sedikit terangkat. Tahap berikutnya adalah lowering di mana struktur diturunkan



secara perlahan menggunakan hydraulic jack hingga ujung-ujung lengkungan tepat berada di atas bearing pad pada abutment permanen di kedua tepi sungai.

Proses ini memerlukan presisi yang sangat tinggi posisi horizontal dan vertikal struktur harus tepat dalam toleransi milimeter. Sistem kontrol menggunakan surveyor dengan total station yang memantau posisi struktur secara real-time, memberikan instruksi kepada operator jack untuk menyesuaikan tinggi secara individual hingga struktur duduk sempurna. Setelah struktur terpasang dengan benar, pilar sementara dibongkar dan pekerjaan finishing seperti pemasangan deck di bawah lengkungan, hanger, railing, dan sistem drainase dilakukan.

Keuntungan utama metode ini adalah efisiensi waktu dan kualitas. Dengan merakit lengkungan di area fabrikasi yang luas dan terkontrol, pekerjaan bisa dilakukan dengan lebih cepat dan dengan quality control yang lebih baik dibandingkan jika dirakit di atas sungai dengan keterbatasan ruang dan akses. Metode ini juga meminimalkan gangguan terhadap aliran sungai di bawahnya tidak perlu scaffolding besar yang menghalangi sungai selama berbulan-bulan. Namun, metode ini memerlukan perencanaan yang sangat detail, peralatan khusus yang mahal seperti hydraulic jack berkapasitas ratusan ton, dan koordinasi yang sempurna antara berbagai tim.

Dari segi struktural, Jembatan Kalikuto dirancang untuk menahan tidak hanya beban lalu lintas normal tetapi juga beban ekstrem seperti truk-truk berat yang melintasi tol secara bersamaan. Analisis beban menggunakan kombinasi dead load (berat sendiri struktur), live load (kendaraan), wind load (angin), dan seismic load (gempa). Meskipun Jawa Tengah tidak se-seismik Maluku atau Papua, wilayah ini tetap berada di zona gempa menengah dengan beberapa sesar aktif di sekitarnya. Oleh karena itu, desain seismik tetap menjadi pertimbangan penting dengan analisis response spectrum untuk memastikan struktur bisa bertahan dalam gempa dengan periode ulang tertentu (biasanya 500 atau 1000 tahun untuk infrastruktur penting).

Jembatan Kalikuto juga menjadi landmark yang meningkatkan nilai estetis Jalan Tol Trans-Jawa. Sebelum jembatan ini, sebagian besar jembatan tol di Indonesia menggunakan desain standar yang fungsional tetapi kurang menarik secara visual. Jembatan Kalikuto menunjukkan bahwa infrastruktur juga bisa indah dan ikonik. Warna merah cerah yang kontras dengan hijau pepohonan dan biru langit menciptakan focal point yang sangat photogenic. Banyak pengguna tol yang berhenti di rest area terdekat untuk mengambil foto jembatan. Ini juga memiliki dampak ekonomi—keberadaan landmark menarik bisa meningkatkan pariwisata dan menciptakan kebanggaan lokal.

Pemeliharaan Jembatan Kalikuto relatif lebih sederhana dibandingkan jembatan gantung atau cable-stayed karena tidak ada kabel yang kompleks. Namun, struktur baja tetap memerlukan inspeksi berkala untuk mendeteksi korosi, terutama pada sambungan dan bagian yang sulit diakses. Cat harus diinspeksi dan jika ada bagian yang mengelupas atau rusak, harus segera diperbaiki untuk mencegah korosi menyebar. Sistem drainase deck juga harus dijaga agar air hujan tidak menggenang dan menyebabkan korosi pada struktur baja di bawahnya.

Untuk mahasiswa, Jembatan Kalikuto memberikan pelajaran tentang inovasi dalam metode konstruksi. Engineering bukan hanya tentang desain struktur tetapi juga tentang bagaimana membangun struktur tersebut dengan cara yang efisien, aman, dan ekonomis. Metode lift-and-launch adalah contoh bagaimana kreativitas dan teknologi bisa dikombinasikan untuk mengatasi tantangan konstruksi. Studi kasus ini juga mengajarkan pentingnya construction engineering cabang engineering yang fokus pada metode dan peralatan untuk membangun, yang sama pentingnya dengan structural engineering yang fokus pada desain.

10. Jembatan Kedungombo (Tol Semarang-Solo, Jawa Tengah)

Jembatan Kedungombo adalah salah satu jembatan tol yang paling spektakuler di Jawa Tengah, melintasi lembah waduk Kedungombo dengan pilar-pilar raksasa yang menjulang tinggi. Waduk Kedungombo adalah reservoir besar yang dibentuk oleh bendungan untuk irigasi dan pembangkit listrik, menciptakan danau buatan yang luas dengan lembah yang dalam. Jalan Tol Semarang-Solo harus melintasi lembah ini, dan solusinya adalah membangun jembatan dengan pilar-pilar yang sangat tinggi beberapa pilar mencapai ketinggian lebih dari 60 meter dari dasar lembah hingga ke deck.

Struktur Jembatan Kedungombo menggunakan sistem multi-span continuous concrete girder serangkaian bentang yang dihubungkan secara kontinu dengan balok beton prategang. Berbeda dengan simple span di mana setiap bentang berdiri sendiri, continuous span berarti balok melewati beberapa pilar dan menyatu, menciptakan struktur yang lebih kaku dan efisien. Keuntungan continuous span adalah momen lentur maksimum di tengah bentang berkurang karena sebagian momen "didistribusikan" ke area di atas pilar, memungkinkan balok lebih ramping dan menghemat material. Deck menggunakan beton prategang dengan tendon post-tensioning yang ditarik setelah beton mengeras.



Gambar 1.23 Jembatan Kedungombo



Tantangan utama dalam konstruksi Jembatan Kedungombo adalah membangun pilar-pilar yang sangat tinggi di lereng lembah yang curam. Pilar harus berdiri stabil di lereng dengan kemiringan yang signifikan, dan fondasi harus mencapai lapisan tanah atau batuan yang stabil di bawah lereng. Investigasi geoteknik menggunakan pengeboran pada berbagai kedalaman dan lokasi untuk memetakan stratigrafi tanah. Hasil menunjukkan bahwa lapisan tanah di lereng bervariasi dari topsoil yang sangat lemah hingga batuan sedimen di kedalaman tertentu. Fondasi pilar menggunakan bored pile tiang yang dibuat dengan mengebor lubang ke dalam tanah hingga kedalaman yang diinginkan, kemudian memasukkan tulangan baja dan mengisi lubang dengan beton.

Proses pengeboran di lereng curam sangat menantang karena peralatan berat seperti bore pile rig harus diposisikan pada platform yang stabil dan horizontal. Untuk ini, dibuat temporary platform atau platform sementara dengan memotong dan meratakan sebagian lereng, kemudian memperkuatnya dengan retaining wall sementara atau soldier pile untuk mencegah longsor. Setelah platform siap, bore pile rig diposisikan dan pengeboran dimulai. Mata bor raksasa menembus tanah dan batuan, dan material yang tergali diangkat keluar dengan auger atau sistem bucket. Proses pengeboran harus dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah keruntuhan dinding lubang di tanah lunak atau batuan yang retak, dinding lubang bisa runtuh sebelum beton dicor. Untuk mencegah ini, digunakan casing sementara atau bentonite slurry lumpur khusus yang memberikan tekanan pada dinding lubang untuk menjaganya tetap stabil hingga beton dicor.

Setelah fondasi selesai, pilar beton mulai dibangun menggunakan sistem formwork atau bekisting yang naik secara bertahap. Untuk pilar yang sangat tinggi, digunakan slip form atau jump form sistem bekisting yang "melompat" ke atas. Pengecoran beton dilakukan dalam lift atau tahap dengan ketinggian beberapa meter, misalnya 3-4 meter. Setelah beton dalam satu lift mengeras dan mencapai kekuatan yang cukup, bekisting dilepas dari beton yang sudah keras, dinaikkan ke posisi berikutnya di atasnya, dan dipasang kembali untuk pengecoran lift berikutnya. Proses ini berulang hingga pilar mencapai ketinggian penuh. Untuk pilar setinggi 60 meter, ini bisa berarti 15-20 lift yang memakan waktu berbulan-bulan.

Setelah semua pilar berdiri, tahap berikutnya adalah memasang girder atau balok di atas pilar untuk membentuk deck. Untuk jembatan dengan bentang yang panjang dan tinggi seperti Kedungombo, metode yang digunakan adalah launching gantry atau sistem crane khusus yang bisa bergerak di atas pilar. Launching gantry adalah struktur baja besar yang berfungsi seperti crane bergerak ia bisa mengangkat segmen girder beton yang berat, memindahkannya ke posisi yang tepat di atas pilar, dan menempatkannya dengan presisi. Setelah satu segmen terpasang, launching gantry bergerak ke bentang berikutnya dan proses berulang. Metode ini sangat efisien karena tidak memerlukan crane dari tanah yang sulit diposisikan di lembah yang dalam.

Dari perspektif visual dan estetis, pemandangan Jembatan Kedungombo sangat mengesankan. Saat melintasi jembatan, pengguna tol bisa melihat panorama waduk yang luas dengan air biru dan perbukitan hijau di sekitarnya. Jembatan itu sendiri, dengan pilar-



pilar ramping yang menjulang dari lereng lembah, menciptakan kontras yang dramatis dengan pemandangan alam. Ini memberikan pengalaman berkendara yang memorable dan juga menjadi objek fotografi yang populer.

Namun, ketinggian jembatan juga membawa tantangan. Pilar yang sangat tinggi sangat sensitif terhadap beban angin. Angin yang bertiup horizontal memberikan gaya lateral yang besar pada pilar, menciptakan momen lentur yang harus ditahan. Semakin tinggi pilar, semakin besar momen ini. Desain struktural pilar harus memperhitungkan wind load dengan analisis yang detail, termasuk kemungkinan wind gust atau hembusan angin tiba-tiba yang bisa lebih kuat dari angin rata-rata. Selain itu, getaran akibat angin juga harus diperhitungkan pilar yang sangat ramping bisa bergetar jika frekuensi angin bertepatan dengan frekuensi natural pilar, menciptakan resonansi. Untuk mencegah ini, pilar dirancang dengan kekakuan yang cukup dan jika perlu dilengkapi dengan tuned mass damper.

Aspek keselamatan juga sangat penting mengingat ketinggian jembatan. Railing atau pagar pembatas di tepi jembatan harus cukup tinggi dan kuat untuk mencegah kendaraan terjatuh dari jembatan jika terjadi kecelakaan. Standar desain railing untuk jembatan tol mengharuskan railing mampu menahan gaya hantaman dari kendaraan dengan kecepatan dan berat tertentu tanpa roboh. Untuk jembatan setinggi Kedungombo, konsekuensi kendaraan jatuh akan sangat fatal, sehingga railing dirancang dengan margin of safety yang tinggi.

Dari segi ekonomi, meskipun Jembatan Kedungombo memerlukan investasi besar karena pilar yang sangat tinggi dan panjang jembatan, alternatifnya akan jauh lebih mahal. Jika tidak ada jembatan, Jalan Tol harus turun ke dasar lembah, menyeberangi waduk dengan jembatan rendah, kemudian naik kembali di sisi lain memerlukan jalan yang jauh lebih panjang dengan banyak lengkungan dan tanjakan yang tajam. Ini tidak hanya lebih mahal dalam konstruksi tetapi juga mengurangi kecepatan dan kenyamanan berkendara. Dengan jembatan langsung melintasi lembah, jalan tol bisa mempertahankan alignment yang lurus dan horizontal, memungkinkan kecepatan konstan dan efisiensi bahan bakar.

Untuk mahasiswa teknik sipil, Jembatan Kedungombo adalah studi kasus yang sangat baik tentang bridge engineering di topografi yang challenging. Membangun struktur tinggi di lereng curam memerlukan integrasi antara geoteknik, struktur, dan konstruksi. Ini juga mengajarkan tentang pentingnya mempertimbangkan konteks geografis dalam desain solusi optimal untuk satu lokasi mungkin tidak optimal untuk lokasi lain. Engineering yang baik adalah tentang memahami kondisi unik setiap proyek dan mendesain solusi yang sesuai.

11. Jembatan Tuntang (Salatiga, Jawa Tengah)

Jembatan Tuntang adalah jembatan yang melintasi wilayah Salatiga dengan pemandangan spektakuler ke arah Rawa Pening dan Gunung Merbabu di kejauhan. Jembatan ini menggunakan struktur steel box girder balok baja dengan penampang berbentuk kotak berongga yang sangat efisien untuk bentang menengah. Lokasi jembatan di dataran tinggi dengan elevasi sekitar 500-700 meter di atas permukaan laut membawa

karakteristik iklim dan tantangan teknis yang unik dibandingkan jembatan-jembatan di dataran rendah.

Struktur steel box girder dipilih untuk Jembatan Tuntang karena beberapa alasan teknis yang saling melengkapi. Pertama, bentang yang dibutuhkan sekitar 40-60 meter antar pilar terlalu panjang untuk balok beton bertulang konvensional yang akan menjadi sangat berat dan tidak ekonomis, tetapi belum cukup panjang untuk membenarkan penggunaan cable-stayed yang lebih kompleks dan mahal. Steel box girder berada di sweet spot untuk rentang bentang ini. Kedua, penampang box memberikan kekakuan torsional yang sangat baik. Torsi atau puntir adalah gaya yang terjadi ketika beban tidak simetris di sepanjang lebar jembatan misalnya truk berat hanya di satu lajur. Penampang box yang tertutup sangat efektif menahan torsi dibandingkan penampang terbuka seperti I-beam.

Fabrikasi box girder dilakukan di workshop fabrikasi baja dengan peralatan yang canggih. Plat baja dengan ketebalan yang bervariasi lebih tebal di bagian bawah (bottom flange) yang menerima tegangan tarik maksimum, lebih tipis di web vertikal dipotong menggunakan mesin CNC cutting yang presisi. Potongan-potongan plat kemudian dibentuk mengikuti kontur box menggunakan mesin press bending. Sambungan antar plat dilakukan dengan pengelasan menggunakan proses otomatis atau semi-otomatis seperti submerged arc welding (SAW) yang menghasilkan kualitas las yang konsisten dan kuat. Setiap sambungan las harus diuji pertama visual inspection untuk memastikan tidak ada cacat yang terlihat seperti crack atau porosity, kemudian non-destructive testing seperti ultrasonic atau magnetic particle testing untuk mendeteksi cacat internal.



Gambar 1.24 Jembatan Tuntang



Setelah fabrikasi selesai, segmen-segmen box girder diangkut ke lokasi jembatan menggunakan trailer khusus. Panjang setiap segmen dibatasi oleh kemampuan transportasi jalan biasanya maksimal 12-15 meter untuk bisa melewati tikungan dan jalan sempit. Di lokasi, segmen-segmen disambung menggunakan high-strength bolts atau las untuk membentuk girder yang kontinu sepanjang jembatan. Pemasangan dilakukan menggunakan mobile crane yang cukup besar untuk mengangkat segmen yang beratnya bisa mencapai puluhan ton. Proses erection harus dilakukan dengan hati-hati setiap segmen harus diposisikan dengan presisi milimeter agar sambungan bisa pas sempurna. Survey control menggunakan total station dilakukan secara kontinu untuk memastikan alignment horizontal dan vertikal tetap sesuai desain.

Tantangan unik di lokasi Tuntang adalah kondisi tanah yang bervariasi dan rentan terhadap pergerakan. Wilayah sekitar Rawa Pening memiliki kombinasi tanah alluvial yang relatif lunak dari endapan danau purba dan lapisan vulkanik dari aktivitas Gunung Merbabu. Investigasi geoteknik menggunakan soil boring dan standard penetration test (SPT) mengungkapkan bahwa daya dukung tanah bervariasi signifikan dari satu titik ke titik lain. Di beberapa lokasi, lapisan tanah keras berada pada kedalaman 10-15 meter, sementara di lokasi lain bisa mencapai 20-30 meter. Variasi ini memerlukan desain fondasi yang adaptif beberapa pilar menggunakan shallow foundation dengan raft atau mat foundation jika tanah keras dangkal, sementara pilar lain menggunakan deep foundation dengan pile group jika tanah keras dalam.

Aspek termal atau pengaruh suhu juga sangat penting untuk jembatan baja di dataran tinggi seperti Tuntang. Suhu di Salatiga bisa berfluktuasi cukup drastis antara siang dan malam perbedaan 15-20°C bukan hal yang aneh, terutama di musim kemarau. Baja memiliki koefisien ekspansi termal yang signifikan, sekitar 12×10^{-6} per °C. Untuk girder sepanjang 100 meter, perubahan suhu 20°C akan menyebabkan perubahan panjang sekitar 24 mm. Jika struktur tidak diberi ruang untuk ekspansi dan kontraksi ini, tegangan internal yang sangat besar akan terbentuk dan bisa menyebabkan buckling atau kerusakan sambungan.

Untuk mengakomodasi pergerakan termal, Jembatan Tuntang dilengkapi dengan expansion joint di beberapa lokasi strategis. Expansion joint adalah sambungan khusus yang memungkinkan dua segmen struktur bergerak relatif satu sama lain tanpa kehilangan kontinuitas deck. Ada berbagai tipe expansion joint dari yang sederhana seperti finger joint yang terlihat seperti jari-jari yang saling menjalin, hingga yang kompleks seperti modular expansion joint yang bisa mengakomodasi pergerakan hingga ratusan milimeter. Selain expansion joint, bearing di atas pilar juga dirancang untuk mengakomodasi pergerakan. Ada dua tipe bearing utama: fixed bearing yang mencegah pergerakan horizontal (biasanya di satu pilar yang berfungsi sebagai anchor point), dan sliding bearing atau elastomeric bearing yang memungkinkan pergerakan horizontal dengan friksi minimal.

Dari segi pemeliharaan, jembatan baja seperti Tuntang memerlukan perhatian khusus terhadap korosi. Meskipun dataran tinggi umumnya memiliki kelembapan yang lebih



rendah dibandingkan dataran rendah pesisir yang seharusnya mengurangi laju korosi faktor lain seperti kabut pagi yang sering terjadi di sekitar Rawa Pening dan curah hujan yang tinggi tetap menciptakan kondisi yang kondusif untuk korosi. Sistem proteksi korosi menggunakan pendekatan berlapis: pertama, permukaan baja dibersihkan hingga benar-benar bersih dari karat, minyak, dan kontaminan lain menggunakan sandblasting. Kemudian diaplikasikan primer berbasis zinc atau epoxy yang memberikan barrier protection dan juga cathodic protection. Selanjutnya intermediate coat dan top coat yang tahan UV dan cuaca diaplikasikan. Total ketebalan sistem cat bisa mencapai 200-400 mikron.

Inspeksi berkala adalah kunci untuk memastikan sistem proteksi korosi tetap efektif. Inspeksi visual dilakukan setiap tahun untuk mengecek kondisi cat apakah ada bagian yang mengelupas, berubah warna, atau menunjukkan tanda-tanda korosi di bawahnya. Setiap ketebalan cat diukur menggunakan dry film thickness gauge untuk memastikan masih dalam batas yang aman. Jika ditemukan area dengan korosi aktif, area tersebut segera dibersihkan, karat dihilangkan dengan wire brush atau grinder, dan cat perbaikan diaplikasikan. Untuk inspeksi yang lebih mendetail, digunakan under-bridge inspection vehicle atau bucket truck yang memungkinkan inspector mengakses bagian bawah jembatan yang tidak terlihat dari atas.

Selain korosi, fatigue atau kelelahan material adalah concern untuk jembatan baja yang menerima beban berulang dari lalu lintas kendaraan. Setiap kali truk berat melintas, struktur baja mengalami siklus tegangan dari kondisi tanpa beban ke kondisi beban maksimum, kemudian kembali ke tanpa beban. Seiring puluhan ribu atau bahkan jutaan siklus sepanjang umur jembatan, material baja bisa mengalami crack initiation dan propagation terutama di lokasi dengan konsentrasi tegangan seperti sambungan las atau lubang baut. Desain jembatan modern memperhitungkan fatigue dengan menggunakan detail sambungan yang fatigue-friendly dan memastikan kualitas pengelasan yang tinggi untuk meminimalkan stress concentration.

Dari perspektif lanskap dan estetika, Jembatan Tuntang memiliki nilai tambah yang signifikan karena pemandangan alam yang indah di sekitarnya. Rawa Pening dengan air yang tenang memantulkan langit dan pegunungan, menciptakan pemandangan yang sangat photogenic. Gunung Merbabu di kejauhan dengan puncaknya yang sering tertutup awan memberikan backdrop yang dramatis. Jembatan dirancang dengan mempertimbangkan visual impact proporsi yang harmonis, warna yang sesuai dengan lingkungan (biasanya abu-abu atau hijau tua yang blend dengan vegetasi), dan railing yang tidak menghalangi pandangan pengguna jalan terhadap pemandangan.

Untuk pengendara sepeda atau pejalan kaki, Jembatan Tuntang menyediakan jalur khusus yang terpisah dari lajur kendaraan bermotor. Jalur ini dilengkapi dengan railing pengaman yang cukup tinggi dan barrier yang melindungi dari lalu lintas kendaraan. Keberadaan fasilitas pejalan kaki dan sepeda ini penting untuk mendorong mobilitas berkelanjutan dan memberikan akses ke pemandangan yang indah tanpa harus menggunakan kendaraan bermotor. Di beberapa titik, disediakan viewing platform atau



area yang sedikit melebar di mana orang bisa berhenti untuk menikmati pemandangan dan mengambil foto tanpa menghalangi lalu lintas pejalan kaki.

Dari segi hidrolika dan drainase, meskipun Jembatan Tuntang tidak melintasi sungai besar, sistem drainase tetap harus dirancang dengan baik. Air hujan yang jatuh di permukaan deck harus dialirkan dengan cepat untuk mencegah genangan yang bisa membahayakan kendaraan (aquaplaning) dan juga menyebabkan korosi pada struktur baja di bawahnya. Deck biasanya dibuat dengan slight slope atau kemiringan kecil sekitar 2% ke arah tepi jembatan. Di tepi, terdapat scupper atau lubang drainase yang mengalirkan air ke downspout atau pipa vertikal yang menyalurkan air turun ke tanah di bawah jembatan, jauh dari struktur utama. Sistem drainase harus dibersihkan secara berkala karena daun, sampah, dan sedimen bisa menyumbat scupper dan menyebabkan air tergenang.

Untuk mahasiswa teknik sipil, Jembatan Tuntang memberikan pelajaran tentang pemilihan sistem struktur yang tepat untuk kondisi spesifik. Steel box girder adalah solusi yang sangat baik untuk bentang menengah di mana berat sendiri struktur perlu diminimalkan tetapi kekakuan tinggi tetap diperlukan. Pemahaman tentang thermal effects dan bagaimana mengakomodasinya melalui expansion joint dan bearing adalah aspek penting dari bridge engineering yang sering diabaikan tetapi sangat krusial untuk performance jangka panjang. Studi kasus ini juga menekankan pentingnya konteks lingkungan bagaimana jembatan tidak hanya struktur fungsional tetapi juga bagian dari lanskap yang harus diintegrasikan dengan sensitif.

12. Jembatan Sakalibel (Bumiayu, Brebes, Jawa Tengah)

Jembatan Sakalibel atau yang secara harfiah berarti "Saka Lima Belas" (Lima Belas Pilar) adalah jembatan kereta api bersejarah yang melintasi sungai di wilayah Bumiayu, Brebes. Jembatan ini adalah contoh sempurna dari evolusi teknologi jembatan di Indonesia jembatan lama yang dibangun pada era kolonial Belanda menggunakan konstruksi masonry arch atau lengkungan batu bata, sementara jembatan baru yang dibangun untuk jalur ganda menggunakan steel truss modern. Keberadaan kedua jembatan yang berdampingan memberikan kesempatan unik untuk membandingkan teknologi jembatan dari dua era yang sangat berbeda.

Jembatan Sakalibel lama dibangun pada awal abad ke-20 sebagai bagian dari pengembangan jalur kereta api Pantura (Pantai Utara Jawa) yang menghubungkan Jakarta dengan Surabaya. Pada masa itu, teknologi konstruksi yang dominan di Hindia Belanda adalah masonry penggunaan batu bata, batu alam, atau beton yang disusun untuk membentuk struktur. Jembatan terdiri dari 15 lengkungan batu bata yang tersusun rapi, setiap lengkungan dengan bentang sekitar 8-10 meter. Struktur lengkungan bekerja murni dengan gaya tekan beban kereta yang melintas di atas lengkungan disalurkan sebagai gaya tekan sepanjang kurva lengkungan ke pilar-pilar di kedua ujung setiap lengkungan, kemudian diteruskan ke fondasi.

Konstruksi masonry arch memerlukan keahlian yang sangat tinggi meskipun teknologi dasarnya sederhana. Batu bata harus dipilih dengan kualitas terbaik padat, tidak retak,

dan seragam dalam dimensi. Setiap bata ditempatkan dengan mortar atau adukan semen yang kuat, membentuk pola melingkar yang presisi. Yang menarik adalah proses pembangunan lengkungan itu sendiri memerlukan centering atau scaffolding sementara berbentuk lengkungan yang menopang batu bata selama konstruksi hingga lengkungan tertutup dan bisa berdiri sendiri. Keystone atau batu kunci di puncak lengkungan adalah bata terakhir yang dipasang, dan pemasangannya menandai bahwa lengkungan sudah strukturally sound dan centering bisa dibongkar.

Keunggulan luar biasa dari jembatan masonry arch adalah durabilitas yang hampir tak terbatas. Batu bata dan mortar yang berkualitas baik bisa bertahan ratusan bahkan ribuan tahun dengan pemeliharaan minimal buktinya adalah jembatan-jembatan Romawi kuno yang dibangun 2000 tahun lalu masih berdiri kokoh hingga hari ini. Jembatan Sakalibel lama yang sudah berusia lebih dari satu abad masih dalam kondisi yang sangat baik. Batu bata tidak berkarat seperti baja, tidak membusuk seperti kayu, dan sangat tahan terhadap cuaca. Kelemahan utamanya adalah berat sendiri yang sangat besar struktur masonry sangat masif dan keterbatasan bentang. Untuk bentang yang panjang, lengkungan harus sangat besar dan pilar harus sangat kuat untuk menahan gaya dorong horizontal yang besar dari lengkungan.



Gambar 1.25 Jembatan Sakalibel

Seiring dengan meningkatnya lalu lintas kereta api dan rencana untuk jalur ganda (*double track*) yang memerlukan kapasitas lebih besar, dibangun Jembatan Sakalibel baru di samping jembatan lama. Jembatan baru menggunakan teknologi steel truss rangka batang baja yang membentuk pola segitiga. Berbeda dengan masonry yang bekerja dengan gaya tekan, steel truss bekerja dengan kombinasi gaya tarik dan tekan pada batang-batang individualnya. Ini memungkinkan struktur jauh lebih ringan dan bisa mencakup bentang yang lebih panjang dengan material yang lebih sedikit.

Desain truss untuk jembatan kereta api harus memenuhi standar yang sangat ketat karena beban kereta jauh lebih berat dan lebih dinamis dibandingkan beban kendaraan



jalan raya. Kereta barang modern bisa memiliki berat hingga ribuan ton, dan beban ini ditransfer ke jembatan melalui roda yang bergerak dengan kecepatan tinggi, menciptakan impact load atau beban kejut yang lebih besar dari beban statis. Selain itu, getaran dari kereta menciptakan beban dinamis yang berulang, meningkatkan risiko fatigue pada struktur baja. Oleh karena itu, jembatan kereta api dirancang dengan factor of safety yang lebih tinggi dan detail sambungan yang lebih robust dibandingkan jembatan jalan raya.

Struktur truss Jembatan Sakalibel baru menggunakan pola Pratt atau Warren konfigurasi klasik di mana diagonal batang mengalami terutama gaya tarik sementara batang vertikal dan horizontal mengalami terutama gaya tekan. Batang-batang terbuat dari profil baja struktural seperti I-beam atau channel yang disambung dengan gusset plate plat baja besar yang berfungsi sebagai titik simpul di mana beberapa batang bertemu. Sambungan dilakukan dengan high-strength bolts atau rivets pada era yang lebih lama, atau dengan pengelasan pada konstruksi modern. Setiap sambungan harus dirancang untuk menahan gaya maksimum dari batang-batang yang terhubung, dengan margin of safety yang memadai.

Pembangunan jembatan baja truss untuk kereta api memerlukan presisi yang sangat tinggi. Track atau rel kereta api harus dipasang dengan alignment yang sempurna deviasi horizontal atau vertikal yang terlalu besar bisa menyebabkan kereta keluar jalur. Gauge atau jarak antara dua rel harus dijaga pada 1067 mm (untuk jalur kereta Indonesia yang menggunakan gauge cape) dengan toleransi hanya beberapa milimeter. Deck jembatan yang menopang track harus sangat kaku untuk meminimalkan defleksi atau lenturan ketika kereta melintas. Defleksi yang berlebihan bisa menyebabkan ketidaknyamanan bagi penumpang dan dalam kasus ekstrem bisa merusak track atau bahkan membahayakan keselamatan.

Salah satu aspek unik dari jembatan kereta api adalah ballast dan sleeper system. Ballast adalah lapisan batu kerikil yang diletakkan di atas deck jembatan, dan sleeper atau bantalan (biasanya dari kayu atau beton) diletakkan di atas ballast. Rel kereta dipasang di atas sleeper. Fungsi ballast adalah mendistribusikan beban dari sleeper ke deck secara merata, menyerap getaran dan noise dari kereta, dan memberikan drainase yang baik untuk air hujan. Namun, ballast menambah berat sendiri yang signifikan ke struktur jembatan satu meter kubik ballast bisa seberat 1,5-1,8 ton. Untuk jembatan panjang, berat total ballast bisa mencapai ratusan ton, yang harus diperhitungkan dalam desain struktur.

Alternatif modern adalah ballastless track atau trackless slab di mana rel dipasang langsung pada slab beton yang presisi tanpa ballast. Sistem ini lebih ringan, memerlukan pemeliharaan yang lebih rendah, dan memberikan riding quality yang lebih baik terutama untuk kereta kecepatan tinggi. Namun, biaya konstruksi awal lebih tinggi dan memerlukan presisi konstruksi yang sangat tinggi karena tidak ada ballast yang bisa disesuaikan untuk koreksi minor.

Pemeliharaan jembatan kereta api adalah operasi yang berkelanjutan dan sangat terorganisir. Inspeksi visual dilakukan secara rutin setiap hari petugas track patrol berjalan

di sepanjang jalur termasuk jembatan untuk mengecek kondisi umum. Inspeksi detail dilakukan setiap bulan atau kuartal di mana setiap komponen struktur diperiksa secara mendetail. Untuk jembatan baja, fokus inspeksi adalah pada sambungan, korosi, crack, dan kondisi cat. Untuk jembatan masonry lama, yang diperiksa adalah kondisi mortar apakah ada yang terkelupas atau erosi dan kondisi batu bata. Setiap anomali dicatat dan ditindaklanjuti sesuai prioritas.

Dari perspektif heritage conservation atau pelestarian warisan, Jembatan Sakalibel lama memiliki nilai sejarah dan budaya yang tinggi. Sebagai struktur peninggalan era kolonial yang masih berfungsi, jembatan ini adalah saksi bisu perkembangan infrastruktur kereta api Indonesia selama lebih dari satu abad. Upaya pelestarian mencakup pemeliharaan fisik struktur sesuai dengan material aslinya ketika ada perbaikan, digunakan material yang compatible dengan material lama agar tidak ada reaksi kimia atau fisik yang merusak. Dokumentasi juga penting foto, gambar teknis, dan catatan historis dijaga dengan baik sebagai arsip yang bisa dipelajari oleh generasi mendatang.

Aspek komparatif antara jembatan lama dan baru sangat menarik dari sudut pandang engineering education. Mahasiswa bisa melihat langsung bagaimana dua filosofi desain yang berbeda masonry arch yang mengandalkan gaya tekan dan massa, versus steel truss yang mengandalkan efisiensi material dan gaya tarik-tekan diterapkan untuk fungsi yang sama. Ini memberikan perspektif tentang evolusi teknologi: tidak selalu bahwa teknologi baru "lebih baik" dalam segala aspek, tetapi masing-masing memiliki keunggulan untuk konteks tertentu. Masonry unggul dalam durabilitas dan low maintenance, sementara steel unggul dalam efisiensi material dan kemampuan bentang panjang. Untuk mahasiswa, Jembatan Sakalibel juga mengajarkan tentang pentingnya context-sensitive design. Keputusan untuk mempertahankan jembatan lama sambil membangun yang baru di sampingnya adalah pilihan yang bijak menghormati warisan sejarah sambil memenuhi kebutuhan modern. Ini adalah pelajaran bahwa engineering bukan hanya tentang menciptakan yang baru, tetapi juga tentang menghargai dan merawat apa yang sudah ada.

13. Jembatan Banjir Kanal Barat (Semarang, Jawa Tengah)

Jembatan Banjir Kanal Barat di Semarang adalah contoh menarik dari urban bridge—jembatan yang berfungsi tidak hanya sebagai infrastruktur transportasi tetapi juga sebagai elemen urban design yang meningkatkan kualitas ruang kota. Jembatan ini melintasi Banjir Kanal Barat, sistem drainase besar yang dibangun untuk mengendalikan banjir di Semarang dengan mengalihkan air dari sungai-sungai yang melintasi kota langsung ke laut. Jembatan menggunakan struktur steel arch atau lengkungan baja dengan warna yang menarik dan sistem pencahayaan LED yang menciptakan visual spectacle di malam hari, termasuk instalasi air mancur menari yang sinkron dengan musik.

Banjir Kanal Barat sendiri adalah proyek hidrolika yang sangat penting untuk Kota Semarang yang memiliki masalah banjir kronis. Topografi Semarang yang unik kota terletak di dataran rendah dengan sungai-sungai yang mengalir dari pegunungan di selatan ke laut di utara membuat kota rentan terhadap banjir, terutama saat musim hujan

ketika debit sungai meningkat drastis. Ditambah lagi dengan land subsidence atau penurunan tanah yang terjadi di beberapa bagian kota akibat pengambilan air tanah berlebihan, masalah banjir semakin parah. Banjir Kanal Barat dirancang sebagai saluran bypass yang mengalihkan sebagian besar air banjir langsung ke laut tanpa melewati pusat kota, mengurangi risiko banjir secara signifikan.



Gambar 1.26 Jembatan Banjir Kanal Barat

Jembatan yang melintasi kanal ini harus dirancang dengan mempertimbangkan aspek hidrolika yang penting. Clearance vertikal di bawah jembatan harus cukup tinggi untuk memberikan ruang bagi aliran air maksimum saat banjir besar tanpa menyebabkan backwater atau air yang "terhalang" oleh jembatan dan naik ke atas. Perhitungan hidrolika menggunakan data hidrologi historis untuk menentukan debit maksimum dengan berbagai return period misalnya banjir 50 tahun atau 100 tahun kemudian mendesain profil saluran dan clearance jembatan untuk menampung debit tersebut. Pilar jembatan juga harus diposisikan dengan hati-hati agar tidak mengganggu aliran air secara signifikan. Jika pilar terlalu besar atau terlalu banyak, ia bisa menyebabkan constriction atau penyempitan aliran yang meningkatkan kecepatan air dan potensi scour di sekitar fondasi pilar.

Struktur arch Jembatan Banjir Kanal Barat dirancang tidak hanya untuk kekuatan struktural tetapi juga untuk estetika yang maksimal. Lengkungan baja dicat dengan warna yang cerah sering berubah tergantung pada tema atau event tertentu dan dihiasi dengan LED strip yang bisa diprogram untuk menampilkan berbagai pola warna. Di malam hari, kombinasi pencahayaan arch dan refleksi di permukaan air kanal menciptakan pemandangan yang sangat indah. Sistem pencahayaan menggunakan teknologi LED RGB (*Red-Green-Blue*) yang bisa menghasilkan jutaan kombinasi warna. Sistem kontrol memungkinkan sinkronisasi pencahayaan dengan musik atau program tertentu untuk acara-acara khusus.

Instalasi air mancur menari adalah fitur tambahan yang mengubah jembatan menjadi attraction atau daya tarik wisata. Air mancur ditempatkan di saluran di bawah atau di



sekitar jembatan, dengan nozzle yang bisa menyembrotkan air dengan pola dan ketinggian yang bervariasi. Sistem kontrol yang canggih menggunakan solenoid valve dan motor servo untuk mengatur timing dan intensitas semprotan air, menciptakan "tarian" yang sinkron dengan musik. Pencahayaan warna-warni diarahkan ke air yang disemprotkan, menciptakan efek visual yang spektakuler. Sistem seperti ini memerlukan infrastruktur pendukung yang signifikan termasuk pompa air berkekuatan besar, sistem filtrasi untuk menjaga kualitas air, electrical system untuk kontrol dan pencahayaan, dan software programming untuk koreografi.

Dari perspektif urban planning dan placemaking, transformasi area sekitar jembatan menjadi ruang publik yang atraktif adalah contoh bagaimana infrastruktur bisa menjadi lebih dari sekadar fungsional. Area di sekitar jembatan dikembangkan menjadi promenade atau jalur pejalan kaki dengan landscaping yang baik, sitting area, dan fasilitas pendukung seperti food court atau kios. Pada akhir pekan atau hari libur, area ini menjadi ramai dengan keluarga yang datang untuk bersantai, anak-anak bermain, dan wisatawan yang menikmati pemandangan. Ini menciptakan aktivitas ekonomi baru dengan pedagang kaki lima, penyewaan sepeda, dan bisnis-bisnis kecil lainnya yang melayani pengunjung.

Konsep ini mengikuti precedent dari kota-kota lain di dunia yang berhasil mengubah infrastruktur utilitarian menjadi public amenities. Contoh terkenal adalah Cheonggyecheon Stream di Seoul, Korea Selatan, di mana jalan layang yang dulunya ada di atas sungai dibongkar, sungai direvitalisasi, dan kawasan sekitarnya dikembangkan menjadi linear park yang sangat populer. Contoh lain adalah High Line di New York City di mana jalur kereta api elevated yang sudah tidak digunakan diubah menjadi taman linear dengan landscaping yang indah. Jembatan Banjir Kanal Barat, meskipun dalam skala yang lebih kecil, mengadopsi prinsip yang sama: mengintegrasikan infrastruktur dengan ruang publik untuk menciptakan nilai tambah sosial dan ekonomi.

Dari segi engineering, integrasi sistem pencahayaan dan air mancur dengan struktur jembatan memerlukan perencanaan yang detail. Kabel listrik dan pipa air harus diintegrasikan ke dalam struktur jembatan tanpa mengganggu integritas struktural atau estetika. Akses untuk pemeliharaan harus dipertimbangkan lampu LED yang terpasang di tempat tinggi atau sulit dijangkau harus bisa diganti tanpa memerlukan scaffolding besar atau penutupan jembatan. Sistem electrical harus memiliki proteksi yang memadai terhadap cuaca hujan, kelembapan, dan bahkan banjir sesekali dengan waterproof junction box dan grounding yang proper untuk keselamatan.

Pemeliharaan sistem pencahayaan dan air mancur adalah tugas yang berkelanjutan. Lampu LED meskipun memiliki umur yang panjang biasanya 30.000-50.000 jam tetap harus diganti secara bertahap. Sistem kontrol elektronik harus diperbarui secara berkala untuk mengikuti perkembangan teknologi dan mengatasi obsolescence. Air mancur memerlukan cleaning secara rutin karena nozzle bisa tersumbat oleh sedimen atau algae. Pompa harus diservice dan bearing diganti sesuai jadwal. Filter air harus dibersihkan atau diganti untuk menjaga kualitas air dan mencegah kerusakan pada pompa dan nozzle.

Dari perspektif community engagement, proyek seperti ini menunjukkan bahwa infrastruktur publik adalah untuk publik. Melibatkan masyarakat dalam perencanaan, desain, dan bahkan operasional bisa meningkatkan sense of ownership dan memastikan proyek benar-benar memenuhi kebutuhan masyarakat. Survey dan public hearing dilakukan untuk mendengar aspirasi warga tentang apa yang mereka inginkan dari ruang publik. Hasil input ini kemudian diintegrasikan ke dalam desain. Setelah pembangunan selesai, partisipasi masyarakat tetap penting misalnya melalui community watch yang membantu menjaga kebersihan dan keamanan area, atau event organizer lokal yang memanfaatkan ruang untuk acara komunitas.

Untuk mahasiswa teknik sipil, Jembatan Banjir Kanal Barat adalah pelajaran bahwa civil engineering bukan hanya tentang struktur dan angka, tetapi juga tentang menciptakan lingkungan yang lebih baik untuk masyarakat. Seorang insinyur yang baik harus memahami tidak hanya aspek teknis tetapi juga aspek sosial, ekonomi, dan budaya dari proyeknya. Kemampuan untuk berkolaborasi dengan arsitek, urban planner, landscape architect, dan stakeholder lain adalah skill yang sangat penting. Ini juga mengajarkan tentang pentingnya life-cycle thinking mempertimbangkan tidak hanya konstruksi awal tetapi juga operasional, pemeliharaan, dan dampak jangka panjang dari infrastruktur yang kita bangun.

14. Jembatan Lemah Ireng (Tol Semarang-Solo, Jawa Tengah)

Jembatan Lemah Ireng adalah salah satu jembatan terpanjang di Jalan Tol Semarang-Solo dengan panjang sekitar 879 meter, melintasi lembah yang dalam dan luas di wilayah perbatasan Semarang dan Kabupaten Semarang. Jembatan ini menggunakan konstruksi long-span concrete viaduct—serangkaian panjang dari balok beton prategang yang ditopang oleh pilar-pilar tinggi. Nama "Lemah Ireng" yang berarti "tanah hitam" merujuk pada karakteristik tanah di wilayah tersebut yang memang memiliki warna gelap karena kandungan organik atau mineral tertentu.





Gambar 1.27 Jembatan Lemah Ireng

Viaduct adalah istilah untuk jembatan yang sangat panjang yang biasanya terdiri dari banyak bentang berulang dengan desain yang seragam. Berbeda dengan jembatan tunggal yang melintasi rintangan spesifik seperti sungai, viaduct biasanya melintasi lembah atau area yang luas di mana membangun jalan di permukaan tanah tidak praktis atau tidak ekonomis karena akan memerlukan cutting dan filling yang sangat besar. Untuk Jembatan Lemah Ireng, alternatif tanpa viaduct adalah memotong perbukitan di satu sisi lembah (cutting) dan menggunakan material tersebut untuk menimbun lembah (filling), menciptakan jalan yang relatif datar. Namun, volume tanah yang harus dipindahkan akan sangat besar ratusan ribu atau bahkan jutaan meter kubik memerlukan waktu bertahun-tahun dan biaya yang sangat tinggi. Dengan viaduct, jalan bisa mempertahankan alignment yang lurus dan horizontal tanpa cutting dan filling yang masif.

Desain struktur Jembatan Lemah Ireng menggunakan sistem multi-span continuous prestressed concrete box girder. Box girder adalah balok beton dengan penampang berbentuk kotak berongga mirip dengan steel box girder tetapi terbuat dari beton prategang. Penampang box sangat efisien karena memberikan kekakuan torsional yang tinggi dan ratio kekuatan-terhadap-berat yang baik. "Continuous" berarti balok tidak terputus di setiap pilar tetapi menyambung secara kontinu melintasi banyak bentang, menciptakan struktur yang lebih kaku dan mengurangi jumlah expansion joint yang diperlukan. Bentang tipikal antara pilar adalah sekitar 40-50 meter, yang merupakan sweet spot untuk beton prategang cukup panjang untuk efisien tetapi tidak terlalu panjang sehingga berat sendiri menjadi dominan.

Metode konstruksi yang digunakan untuk Jembatan Lemah Ireng adalah launching gantry atau balanced cantilever, tergantung pada kondisi spesifik setiap segmen. Launching gantry adalah metode yang sangat efisien untuk viaduct panjang dengan banyak bentang yang seragam. Sistem ini menggunakan struktur baja besar yang berbentuk seperti crane bergerak di atas pilar. Prosesnya dimulai dengan membangun pilar-pilar beton hingga ketinggian penuh. Setelah pilar siap, launching gantry diposisikan di bentang pertama.



Segmen box girder yang sudah diproduksi sebelumnya di casting yard diangkut ke lokasi menggunakan trailer, kemudian diangkat oleh launching gantry dan ditempatkan pada bearing di atas pilar. Segmen pertama ditempatkan, kemudian segmen kedua ditempatkan bersebelahan dan disambung dengan segmen pertama menggunakan post-tensioning kabel baja ditarik melalui duct atau saluran yang tertanam di dalam segmen, menarik dua segmen bersama-sama dan menciptakan sambungan yang sangat kuat.

Setelah satu bentang selesai, launching gantry bergerak maju ke bentang berikutnya. Pergerakan dilakukan dengan sistem hydraulic jack yang mengangkat gantry sedikit dari girder yang sudah terpasang, kemudian mendorong atau menarik gantry ke depan hingga posisinya tepat di atas bentang berikutnya. Proses ini berulang untuk setiap bentang sepanjang viaduct. Keuntungan metode ini adalah sangat cepat dan efisien setelah sistem berjalan, satu bentang bisa diselesaikan dalam beberapa hari hingga satu minggu. Tidak ada kebutuhan untuk perancah dari tanah, yang sangat menguntungkan ketika lembah sangat dalam atau medan sulit diakses.

Casting yard atau pabrik produksi segmen adalah fasilitas khusus yang dibangun di dekat lokasi proyek untuk memproduksi segmen-segmen box girder. Yard ini dilengkapi dengan formwork atau bekisting yang presisi, sistem post-tensioning, dan area curing di mana beton dirawat hingga mencapai kekuatan yang diperlukan. Produksi segmen dilakukan secara massal dengan cycle time beberapa hari per segmen. Quality control sangat ketat setiap segmen harus memiliki dimensi yang presisi (*toleransi milimeter*), kekuatan beton yang sesuai spesifikasi, dan tendon prategang yang terpasang dengan benar. Setiap segmen diberi marking atau identifikasi yang unik yang menunjukkan posisinya di dalam struktur final, sehingga tidak ada kesalahan saat assembly.

Fondasi pilar Jembatan Lemah Ireng adalah aspek krusial mengingat beberapa pilar berdiri di lereng lembah yang curam dan kondisi tanah yang bervariasi. Investigasi geoteknik yang intensif dilakukan dengan pengeboran di setiap lokasi pilar untuk menentukan stratigrafi tanah dan mendesain fondasi yang sesuai. Di area dengan tanah keras pada kedalaman yang relatif dangkal, digunakan caisson atau raft foundation struktur beton masif yang menyebarkan beban pilar ke area tanah yang luas. Di area dengan tanah lunak hingga kedalaman signifikan, digunakan bored pile dengan panjang yang bervariasi tergantung kedalaman lapisan bearing. Kelompok tiang pancang (*pile group*) dirancang untuk bekerja bersama-sama menahan beban vertikal dan lateral, dihubungkan dengan pile cap struktur beton besar di atas tanah yang mendistribusikan beban dari pilar ke semua tiang dalam grup.

Salah satu tantangan geoteknik spesifik di area Lemah Ireng adalah potensi longsor. Lembah dengan lereng yang curam dan tanah yang relatif lunak rentan terhadap slope failure terutama saat musim hujan ketika air meresap ke dalam tanah, mengurangi kekuatan geser tanah. Analisis stabilitas lereng dilakukan untuk setiap lokasi pilar yang berada di lereng. Jika analisis menunjukkan faktor keamanan yang rendah, dilakukan perkuatan lereng menggunakan berbagai metode: retaining wall untuk menahan tanah di belakang pilar, soil nailing di mana batang baja ditanamkan ke dalam lereng untuk



meningkatkan kekuatan, gabion atau keranjang batu untuk proteksi permukaan, atau dalam kasus ekstrem, pile wall di mana deretan tiang pancang dipasang untuk membentuk dinding yang kuat menahan lereng.

Aspek drainase pada viaduct panjang seperti Lemah Ireng juga sangat penting. Air hujan yang jatuh di deck harus dialirkan dengan cepat dan efisien. Deck dibuat dengan cross slope atau kemiringan melintang sekitar 2% ke arah luar sehingga air mengalir ke tepi. Di sepanjang tepi deck, terdapat drainage gutter atau saluran yang mengumpulkan air. Pada interval tertentu biasanya setiap 20-30 meter terdapat drainage outlet atau lubang yang menyalurkan air dari gutter turun melalui downspout atau pipa vertikal yang ditempatkan di dalam pilar atau di sisi luar. Air dari downspout harus dialirkan jauh dari fondasi pilar untuk mencegah erosi atau undermining. Di area dengan tanah yang sangat lunak atau rentan erosi, dilakukan perkuatan dengan concrete apron atau riprap di tempat air dari downspout jatuh.

Dari perspektif lalu lintas dan transportasi, Jembatan Lemah Ireng memiliki peran sangat penting dalam kelancaran Tol Semarang-Solo yang merupakan bagian krusial dari Tol Trans-Jawa. Dengan viaduct yang mempertahankan alignment lurus dan gradient landai, kendaraan bisa melaju dengan kecepatan maksimum yang diizinkan di tol biasanya 80-100 km/jam tanpa harus melambat untuk tikungan atau tanjakan. Ini meningkatkan efisiensi perjalanan, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan mengurangi emisi. Dari perspektif ekonomi regional, kelancaran transportasi di koridor ini memfasilitasi pergerakan barang dan orang antara Semarang sebagai kota pelabuhan dan Solo sebagai pusat ekonomi dan budaya Jawa Tengah, mendorong pertumbuhan ekonomi kedua kota dan wilayah di antaranya.

Pemeliharaan viaduct panjang seperti Lemah Ireng memerlukan pendekatan yang sistematis. Dengan puluhan pilar dan ratusan meter deck, inspeksi manual secara detail akan sangat memakan waktu. Oleh karena itu, digunakan kombinasi inspeksi visual rutin untuk mendeteksi masalah yang obvious seperti keretakan besar atau spalling (lepasnya permukaan beton), dan inspeksi detail periodik yang menggunakan teknologi seperti under-bridge inspection vehicle yang bisa mengakses bagian bawah deck, atau bahkan drone yang dilengkapi kamera high-resolution untuk mengambil gambar detail dari semua sudut tanpa memerlukan scaffolding atau penutupan lalu lintas.

Data dari inspeksi dianalisis untuk menentukan kondisi struktur dan merencanakan perbaikan yang diperlukan. Sistem Bridge Management System (BMS) yang terkomputerisasi digunakan untuk menyimpan data inspeksi, menganalisis trend degradasi, dan memprioritaskan perbaikan berdasarkan criticality dan available budget. BMS juga bisa memprediksi kapan komponen tertentu akan mencapai kondisi kritis dan perlu diperbaiki, memungkinkan pemeliharaan preventif yang lebih efisien dibandingkan reactive maintenance yang menunggu hingga ada kerusakan serius.

Untuk mahasiswa teknik sipil, Jembatan Lemah Ireng adalah studi kasus yang sangat baik tentang konstruksi viaduct panjang dan penggunaan teknologi launching gantry. Memahami bagaimana metode konstruksi dipilih berdasarkan kondisi spesifik proyek

panjang jembatan, medan, akses, dan timeline adalah skill penting dalam construction engineering. Studi kasus ini juga menunjukkan pentingnya pendekatan sistematis dalam proyek besar: dari investigasi geoteknik yang menyeluruh, desain yang sesuai dengan kondisi lokal, metode konstruksi yang efisien, hingga sistem pemeliharaan yang terorganisir untuk memastikan struktur berfungsi dengan baik sepanjang umur layanannya.

1.9 ANALISIS JEMBATAN SELAT SUNDA (JSS) VISI MEGAPROYEK PROF. SEDYATMO

Konteks Historis dan Visi Strategis

Rancangan Jembatan Selat Sunda adalah salah satu visi paling monumental dalam sejarah perencanaan infrastruktur Indonesia. Digagas pertama kali oleh Prof. Dr. Ir. Sedyatmo tokoh legendaris yang juga merancang Bandara Soekarno-Hatta pada era 1960-an sebagai bagian dari konsep "Tri Nusa Bimasakti", proyek ini merepresentasikan ambisi untuk menyatukan tiga pulau terbesar Indonesia: Jawa, Sumatera, dan Kalimantan melalui koneksi fisik permanen. Visi Prof. Sedyatmo bukan sekadar mimpi engineering semata, tetapi sebuah strategi nasional untuk integrasi ekonomi, sosial, dan politik yang lebih erat antarpulau.

Pada saat konsep ini pertama kali diusulkan, teknologi jembatan bentang panjang masih dalam tahap perkembangan. Jembatan gantung terpanjang di dunia pada tahun 1960-an adalah Golden Gate Bridge di San Francisco dengan bentang utama 1.280 meter, yang sudah dianggap sebagai keajaiban teknik. Prof. Sedyatmo membayangkan jembatan dengan bentang hampir tiga kali lipat sebuah lompatan teknologi yang sangat berani. Namun, visi beliau bukan tanpa dasar: ia memahami bahwa tanpa konektivitas fisik yang kuat, integrasi ekonomi nasional akan selalu terhambat oleh ketergantungan pada transportasi laut yang lambat dan tidak dapat diandalkan, terutama saat cuaca buruk.

Selat Sunda yang memisahkan Jawa dan Sumatera memiliki lebar bervariasi dari sekitar 24 kilometer di bagian tersempit hingga lebih dari 100 kilometer di bagian yang lebih lebar. Jalur pelayaran internasional yang sangat sibuk melewati selat ini, menghubungkan Samudera Hindia dengan Laut Jawa dan terus ke Asia Timur. Ribuan kapal cargo, tanker minyak, dan kapal penumpang melintas setiap tahunnya. Kedalaman air mencapai ratusan meter di beberapa bagian, dengan arus yang sangat kuat akibat pasang surut dan pertukaran massa air antara dua samudera. Kondisi geografis ini menciptakan tantangan engineering yang belum pernah dihadapi sebelumnya oleh insinyur Indonesia atau bahkan dunia.

Karakteristik Teknis Dan Geometri Struktur: Engineering Di Skala Megah

Bentang Ultra-Panjang: Melampaui Batas Teknologi

Rancangan JSS yang paling ambisius mengusulkan jembatan gantung dengan bentang utama sekitar 4.000 meter atau 4 kilometer. Untuk memahami betapa ekstremnya angka ini, kita perlu membandingkan dengan jembatan-jembatan terpanjang yang ada saat ini. Per tahun 2026, jembatan gantung dengan bentang terpanjang di dunia adalah Akashi Kaikyo Bridge di Jepang dengan bentang utama 1.991 meter, yang selesai dibangun pada 1998 setelah 10 tahun konstruksi dengan biaya lebih dari 5 miliar dollar AS. Jembatan dengan bentang 4 kilometer akan dua kali lipat panjang Akashi Kaikyo sebuah prestasi yang memerlukan tidak hanya

pembesaran skala tetapi fundamental breakthrough dalam material science, structural engineering, dan construction technology.

Mengapa bentang sepanjang ini diperlukan? Jawabannya terletak pada kombinasi antara kedalaman laut dan kebutuhan navigasi. Bagian tengah Selat Sunda memiliki kedalaman yang sangat signifikan di beberapa area mencapai 200-300 meter. Membangun fondasi untuk menara atau pilar di kedalaman ini secara teknis sangat menantang dan ekonomis sangat mahal. Teknologi yang ada saat ini untuk offshore construction seperti yang digunakan di platform minyak lepas pantai bisa mencapai kedalaman tersebut, tetapi biayanya eksponensial meningkat dengan kedalaman. Lebih dari itu, menempatkan pilar atau menara di tengah selat akan mengganggu jalur pelayaran internasional yang sangat sibuk. *International Maritime Organization* (IMO) memiliki regulasi ketat tentang clearance atau ruang bebas untuk navigasi baik horizontal maupun vertikal. Kapal-kapal container modern yang sangat besar memerlukan channel yang lebar tanpa obstruksi.

Solusinya adalah menggunakan pulau-pulau yang ada di tengah Selat Sunda terutama Pulau Sangiang dan Pulau Prajurit sebagai titik tumpuan atau anchor point untuk jembatan. Dengan strategi ini, jembatan tidak perlu melintasi seluruh selat dalam satu bentang kontinu, melainkan dibagi menjadi beberapa segmen: dari Jawa ke Pulau Sangiang, dari Pulau Sangiang ke Pulau Prajurit, dan dari Pulau Prajurit ke Sumatera. Namun, bahkan dengan pembagian ini, beberapa bentang individual tetap harus mencapai 3-4 kilometer untuk memberikan clearance yang cukup untuk navigasi di channel yang paling dalam dan paling sibuk.

Sistem Struktur Hybrid: Mengoptimalkan Setiap Segmen

Rancangan JSS tidak menggunakan satu tipe jembatan saja, melainkan kombinasi sistem struktur yang disesuaikan dengan kondisi spesifik setiap segmen. Ini adalah pendekatan hybrid atau multi-system yang mencerminkan engineering yang sophisticated.

- **Segmen Pendekatan (*Approach Segments*):** Dari daratan Jawa dan Sumatera menuju perairan yang lebih dalam, digunakan viaduct atau causeway dengan konstruksi beton prategang. Di area ini, kedalaman air relatif dangkal mungkin 20-50 meter sehingga membangun pilar-pilar dengan fondasi caisson atau pile masih feasible secara teknis dan ekonomis. Viaduct memungkinkan jalan naik secara gradual dari permukaan tanah hingga mencapai ketinggian yang diperlukan untuk clearance navigasi di segmen utama. Panjang segmen approach bisa mencapai beberapa kilometer di setiap sisi, tergantung pada topografi dasar laut dan kedalaman air.
- **Segmen Utama (*Main Spans*):** Untuk bentang terpanjang yang melintasi channel navigasi utama, digunakan suspension bridge atau jembatan gantung. Sistem ini dipilih karena merupakan satu-satunya teknologi yang terbukti mampu mencapai bentang sangat panjang dengan efisiensi struktural yang baik. Kabel baja utama yang melengkung membentang dari satu menara ke menara lainnya, menopang deck melalui hanger vertikal. Menara setinggi ratusan meter kemungkinan 300-400 meter diperlukan untuk memberikan clearance vertikal yang cukup untuk kapal-kapal besar dan juga untuk mempertahankan geometri kabel yang optimal. Ketinggian clearance vertikal minimum untuk jalur pelayaran internasional biasanya 50-70 meter di atas



permukaan air tertinggi, tetapi untuk channel yang sangat penting, angka ini bisa lebih tinggi.

- **Segmen Transisi:** Antara pulau-pulau dan segmen utama, mungkin digunakan cable-stayed bridge yang menawarkan keseimbangan antara bentang yang cukup panjang (500-1000 meter) dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan suspension bridge. Cable-stayed lebih kaku dibandingkan suspension, yang menguntungkan untuk transisi antara viaduct yang sangat kaku dan suspension yang lebih fleksibel. Perbedaan kekakuan yang terlalu drastis antara segmen yang berbeda bisa menciptakan stress concentration di sambungan, sehingga cable-stayed berfungsi sebagai buffer atau penyeimbang.

Geometri Deck: Lebar dan Konfigurasi

- Deck JSS harus mengakomodasi multiple functions atau fungsi ganda yang menambah kompleksitas desain. Konfigurasi yang diusulkan mencakup:
- Lajur Kendaraan: 4-6 lajur untuk kendaraan bermotor dengan lebar total sekitar 14-21 meter. Ini cukup untuk menampung traffic volume yang diproyeksikan jutaan kendaraan per tahun dengan kapasitas untuk pertumbuhan masa depan.
- Jalur Kereta Api: 1-2 jalur kereta untuk kereta barang dan penumpang dengan lebar sekitar 6-8 meter. Integrasi kereta api sangat penting untuk efisiensi transportasi cargo berat yang lebih ekonomis diangkut dengan kereta dibanding truk.
- Lane untuk Utilitas: Pipa gas, air, kabel listrik tegangan tinggi, dan fiber optic untuk telekomunikasi bisa diintegrasikan ke dalam struktur jembatan, menciptakan utility corridor yang sangat berharga menghubungkan infrastruktur Jawa dan Sumatera.
- Lane Darurat dan Jalur Pejalan Kaki: Untuk keselamatan dan evakuasi, serta kemungkinan untuk pedestrian dan cyclist pada area tertentu dengan barrier pemisah dari lalu lintas kendaraan.

Total lebar deck bisa mencapai 30-40 meter angka yang sangat signifikan untuk jembatan gantung. Sebagai perbandingan, Golden Gate Bridge memiliki lebar deck sekitar 27 meter. Lebar yang besar menambah beban mati struktur secara signifikan dan juga meningkatkan exposure terhadap angin, menciptakan tantangan aerodinamis yang harus diatasi dengan desain yang sangat hati-hati.

Inovasi Material Dan Teknologi Konstruksi: Pushing The Boundaries

Material: Baja Mutu Ultra-Tinggi dan Beton Berkinerja Superior

Realisasi JSS memerlukan material dengan properties yang jauh melampaui standar konvensional. Kabel utama jembatan gantung tradisional menggunakan baja dengan kekuatan tarik sekitar 1.600-1.800 MPa (*megapascal*). Untuk JSS dengan bentang 4 kilometer, diperlukan baja dengan kekuatan tarik 2.000-2.400 MPa atau bahkan lebih tinggi. Material seperti ini sudah ada dalam bentuk experimental atau limited production misalnya advanced high-strength steel alloys yang dikembangkan untuk aplikasi aerospace atau military tetapi belum pernah diproduksi dalam volume dan diameter yang diperlukan untuk kabel jembatan.

Diameter kabel utama untuk bentang 4 kilometer akan sangat besar kemungkinan 1,5-2 meter atau bahkan lebih. Sebagai perbandingan, kabel utama Akashi Kaikyo memiliki diameter 1,12 meter dan terdiri dari 36.830 helai kawat individual. Untuk JSS, jumlah helai kawat bisa mencapai 50.000-70.000 atau lebih, setiap helai harus diproduksi dengan toleransi

yang sangat ketat, kemudian dipilin bersama dengan presisi tinggi. Proses spinning kabel di mana ribuan helai kawat dibawa melintasi selat satu per satu dan kemudian dikompaksi menjadi kabel akan memakan waktu berbulan-bulan atau bahkan bertahun-tahun.

Untuk struktur beton seperti viaduct approach dan menara, diperlukan *High-Performance Concrete* (HPC) atau ultra-high-performance concrete (UHPC) dengan kekuatan tekan 80-150 MPa, jauh lebih tinggi dari beton normal yang berkisar 30-40 MPa. HPC menggunakan agregat berkualitas tinggi, semen dengan komposisi khusus, admixtures kimia untuk meningkatkan workability dan durability, dan sometimes silica fume atau fly ash untuk meningkatkan kepadatan dan mengurangi permeabilitas. Beton seperti ini memiliki durabilitas yang jauh lebih baik terhadap lingkungan laut yang sangat agresif air laut mengandung klorida yang menyebabkan korosi pada tulangan baja, dan HPC dengan permeabilitas rendah mencegah penetrasi klorida ke dalam beton.

Teknologi Aerodinamika: Mengatasi Ancaman Angin

Selat Sunda terkenal dengan angin yang kuat dan variabel, terutama saat monsoon season. Kecepatan angin bisa mencapai 30-40 meter per detik atau bahkan lebih saat badai. Untuk jembatan gantung dengan deck yang panjang dan fleksibel, angin adalah ancaman terbesar. Fenomena yang paling ditakuti adalah flutter getaran self-excited di mana energi dari aliran angin ditransfer ke struktur, menyebabkan getaran yang semakin besar dalam kombinasi bending (lentur vertikal) dan torsion (puntir). Jika frekuensi flutter bertepatan dengan frekuensi natural struktur dan damping tidak cukup, getaran bisa terus membesar hingga menyebabkan kegagalan struktural persis seperti yang terjadi pada Tacoma Narrows Bridge pada 1940.

Untuk mencegah flutter, deck JSS harus dirancang dengan profil aerodinamis yang streamlined. Berbagai bentuk penampang telah dikembangkan melalui riset: dari box girder dengan tepi yang membulat, truss girder yang memungkinkan angin melewati struktur, hingga twin-box configuration dengan gap di tengah yang memecah aliran angin. Wind tunnel testing adalah wajib model skala dari deck dan menara dibuat dan diuji dalam terowongan angin yang bisa mensimulasikan berbagai kecepatan dan arah angin. Sensor mengukur gaya dan momen pada model, serta displacement dan getaran. Data dari wind tunnel kemudian digunakan untuk memvalidasi dan memperbaiki desain.

Selain bentuk deck, sistem peredam tambahan mungkin diperlukan. *Tuned Mass Damper* (TMD) massa besar yang dipasang pada struktur dan disetel untuk bergetar dengan frekuensi tertentu yang meredam getaran struktur utama bisa diintegrasikan ke dalam menara atau bahkan di dalam deck. Aerodynamic appendages seperti fairings atau winglets di tepi deck juga bisa mengurangi vortex shedding dan meningkatkan stabilitas aerodinamis.

Metode Konstruksi: Logistik di Tengah Laut

Membangun struktur sebesar JSS di tengah Selat Sunda dengan arus kuat, ombak tinggi, dan kedalaman besar adalah tantangan konstruksi yang belum pernah ada. Untuk fondasi menara di perairan dalam, teknologi yang paling mungkin adalah floating caisson atau pneumatic caisson yang sangat besar. Caisson adalah struktur beton atau baja berbentuk kotak raksasa yang dibangun di darat atau di docking facility, kemudian ditarik dengan tugboat ke

lokasi. Setelah di lokasi, caisson ditenggelamkan secara perlahan dengan mengisi bagian dalam dengan air atau beton hingga mencapai dasar laut. Untuk kedalaman 200-300 meter, caisson harus sangat besar dan kuat untuk menahan tekanan air yang luar biasa.

Alternatif lain adalah menggunakan piled foundation dengan drilled shafts atau bored piles yang sangat besar. Untuk ini, diperlukan offshore drilling platform semacam oil rig yang bisa memposisikan diri dengan presisi di lokasi dan melakukan pengeboran vertikal hingga kedalaman puluhan meter di bawah dasar laut untuk mencapai lapisan batuan keras. Concrete tremie method digunakan untuk mengisi lubang bor dengan beton di bawah air pipa tremie diturunkan hingga dasar lubang, dan beton dipompa melalui pipa sehingga beton naik dari bawah, mendorong air ke atas dan keluar tanpa tercampur dengan air laut.

Untuk erection atau pemasangan deck, karena bentang sangat panjang dan tidak ada dukungan dari bawah, metode yang paling mungkin adalah cable erection di mana segmen-segmen deck diangkat oleh crane khusus yang bergerak di atas kabel utama yang sudah terpasang. Kabel utama dipasang terlebih dahulu dengan proses spinning, kemudian hanger dipasang, dan setelah itu segmen deck satu per satu diangkat dan dihubungkan dengan hanger. Proses ini sangat lambat dan harus dilakukan pada kondisi cuaca yang baik window untuk pekerjaan mungkin hanya beberapa bulan dalam setahun ketika laut relatif tenang.

Tantangan Kondisi Alam: Engineering di Zona Bahaya Ekstrem

Aktivitas Seismik: Gempa dan Tsunami

Selat Sunda terletak di salah satu zona paling aktif secara seismik di dunia Ring of Fire. Zona subduksi Sunda Megathrust di mana Lempeng Indo-Australia menunjam di bawah Lempeng Eurasia berada hanya beberapa ratus kilometer di selatan selat. Zona ini menghasilkan gempa megathrust dengan magnitudo 8-9 yang terjadi setiap beberapa ratus tahun. Gempa terakhir yang sangat besar di zona ini terjadi pada 2004 dengan magnitudo 9,1 gempa Aceh yang menghasilkan tsunami dahsyat menewaskan lebih dari 200.000 orang. Selain megathrust, ada juga sesar-sesar lokal yang lebih kecil tetapi lebih dekat ke lokasi jembatan yang bisa menghasilkan gempa dengan magnitudo 6-7.

Desain seismik untuk JSS harus menggunakan performance-based seismic design pendekatan di mana struktur dirancang untuk mencapai performance objective tertentu pada berbagai level gempa. Untuk gempa dengan return period 100 tahun (probabilitas 1% per tahun), struktur harus tetap operational dengan damage minimal. Untuk gempa dengan return period 500 tahun, struktur boleh mengalami damage tetapi tidak boleh collapse dan harus bisa diperbaiki. Untuk gempa dengan return period 2500 tahun (maximum considered earthquake), struktur boleh mengalami damage berat tetapi tidak boleh collapse life safety tetap terjamin meskipun struktur mungkin tidak bisa digunakan lagi setelah gempa.

Analisis yang digunakan adalah nonlinear time history analysis di mana model detail dari struktur dibangun dalam software finite element, kemudian subjected to acceleration time histories dari gempa-gempa yang telah direkam atau synthetic earthquake yang dihasilkan untuk mencocokkan response spectrum target. Simulasi dilakukan untuk puluhan skenario gempa yang berbeda berbagai magnitudo, jarak episentrum, dan karakteristik



spektral untuk memastikan struktur bisa bertahan dalam range kemungkinan gempa yang luas.

Komponen kritis yang memerlukan perhatian khusus dalam desain seismik adalah sambungan antara deck dengan menara, dan antara menara dengan fondasi. Untuk jembatan gantung, deck biasanya tidak terikat kaku dengan menara ia "digantung" oleh kabel dan bisa bergerak relatif terhadap menara dalam batas tertentu. Ini sebenarnya menguntungkan dalam gempa karena memungkinkan deck dan menara bergerak semi-independently, mengurangi transfer gaya. Namun, pergerakan harus dibatasi dengan restrainer atau stopper untuk mencegah displacement berlebihan yang bisa menyebabkan deck jatuh dari menara. Seismic isolation bearing atau damping device bisa dipasang untuk menyerap energi gempa.

Tsunami adalah ancaman lain yang sangat serius. Gempa bawah laut bisa menghasilkan tsunami dengan tinggi gelombang puluhan meter. Untuk struktur di tengah laut seperti menara JSS, tsunami akan menghasilkan gaya horizontal yang sangat besar ketika massa air bergerak dengan kecepatan tinggi. Desain harus memperhitungkan hydrodynamic force dari tsunami baik drag force maupun impact force dari debris yang dibawa tsunami seperti kapal atau container. Elevasi deck harus cukup tinggi sehingga gelombang tsunami tidak menghantam deck dari bawah, yang bisa menghasilkan uplift force yang sangat destruktif.

Vulkanisme: Ancaman dari Anak Krakatau

Gunung Anak Krakatau yang tumbuh di lokasi letusan dahsyat Krakatau tahun 1883 terletak tidak jauh dari jalur jembatan. Gunung ini masih aktif dengan erupsi kecil yang terjadi berkala. Meskipun probabilitas erupsi besar seperti 1883 sangat kecil dalam time frame proyek, kemungkinan harus tetap dipertimbangkan. Erupsi besar bisa menghasilkan beberapa hazard:

- **Tsunami Vulkanik:** Longsoran material vulkanik dalam jumlah besar ke laut atau collapse sebagian gunung bisa menghasilkan tsunami lokal. Pada Desember 2018, longsoran flank Anak Krakatau menghasilkan tsunami yang menghantam pantai Banten dan Lampung, menewaskan ratusan orang. Untuk jembatan, ini berarti struktur harus mampu menahan tsunami dari arah yang berbeda—tidak hanya dari selatan (*megathrust*) tetapi juga dari barat (Anak Krakatau).
- **Abu Vulkanik:** Erupsi eksplosif menghasilkan abu yang bisa menutupi permukaan jembatan, menambah beban mati, dan juga menyebabkan degradasi material. Abu vulkanik bersifat abrasif dan bisa merusak bearing, expansion joint, dan komponen mekanis lainnya. Sistem cleaning dan washing mungkin diperlukan untuk menghilangkan abu setelah erupsi.
- **Lahar dan Pyroclastic Flow:** Jika sangat dekat, aliran lahar atau pyroclastic flow bisa mencapai struktur, tetapi ini kurang likely untuk jembatan yang berada di tengah laut dengan jarak cukup jauh dari gunung.

Kondisi Laut: Arus, Ombak, dan Korosi

Arus di Selat Sunda sangat kuat, terutama saat pasang surut spring tide di mana perbedaan antara pasang tinggi dan surut bisa mencapai beberapa meter. Arus tidal bisa mencapai kecepatan 2-3 meter per detik atau bahkan lebih. Untuk struktur yang berdiri di

tengah arus, ini menciptakan gaya drag yang konstan yang harus ditahan oleh fondasi. Lebih berbahaya lagi adalah scour penggerusan dasar laut di sekitar fondasi akibat turbulensi yang diciptakan oleh struktur. Scour bisa mengekspos fondasi dan mengurangi kapasitas bearing, berpotensi menyebabkan settlement atau bahkan collapse.

Mitigasi scour dilakukan dengan beberapa cara: pertama, fondasi ditanam cukup dalam di bawah predicted scour depth. Analisis scour menggunakan model hidrolis dan data arus untuk memprediksi kedalaman maksimum scour. Kedua, scour protection berupa riprap atau concrete mattress dipasang di sekitar fondasi untuk menstabilkan dasar laut. Ketiga, monitoring scour menggunakan echo sounder atau sensor lain untuk mendeteksi scour yang terjadi sehingga bisa dilakukan remediation sebelum terlambat.

Ombak di selat juga bisa sangat tinggi saat badai significant wave height bisa mencapai 5-8 meter. Ombak yang menghantam pilar atau menara menciptakan wave force yang pulsating, berulang dengan frekuensi gelombang. Jika frekuensi gelombang mendekati frekuensi natural struktur, bisa terjadi resonansi. Desain harus memastikan frekuensi natural struktur cukup jauh dari frekuensi gelombang yang dominan.

Korosi di lingkungan laut adalah challenge yang ongoing. Semua komponen baja yang terekspos kabel, hanger, menara baja, bearing harus dilindungi dengan sistem multi-layer: galvanizing, coating, cathodic protection, dan dalam beberapa kasus encapsulation atau sealing total untuk mencegah kontak dengan air laut. Beton juga harus memiliki cover yang cukup tebal (setidaknya 75-100 mm) untuk melindungi tulangan dari chloride penetration. Penggunaan stainless steel rebar atau fiber-reinforced polymer (FRP) rebar yang tidak korosi adalah opsi meskipun lebih mahal.

Beban Lalu Lintas dan Fungsi Strategis: Designing for the Future

Traffic Loading: Heavy and Dynamic

JSS dirancang sebagai arterial link utama antara dua pulau dengan ekonomi terbesar di Indonesia. Volume lalu lintas yang diproyeksikan sangat tinggi puluhan ribu kendaraan per hari termasuk ribuan truk cargo berat. Beban lalu lintas untuk desain mengikuti SNI 1725 tentang Pembebanan untuk Jembatan yang telah diperbarui untuk mencerminkan beban kendaraan modern yang lebih berat.

Truck loading design menggunakan multiple presence of heavy vehicles skenario di mana beberapa truk dengan berat maksimum (misalnya 50-60 ton total) melintasi jembatan secara bersamaan pada jarak yang berdekatan, menciptakan beban terdistribusi yang sangat tinggi. Untuk jembatan gantung sepanjang ini, beban terdistribusi dari ribuan kendaraan yang melintasi bersamaan bisa mencapai ratusan ribu ton angka yang sangat signifikan yang harus ditahan oleh kabel utama.

Dynamic loading dari kendaraan terutama kereta api juga penting. Kereta bergerak dengan kecepatan tinggi (misalnya 100-150 km/jam) menghasilkan impact factor atau amplifikasi dinamis pada beban. Wheel load dari kereta ditransfer ke track, kemudian ke deck, dengan frekuensi yang tergantung pada jarak antar gandengan dan kecepatan. Jika frekuensi ini mendekati frekuensi natural deck, terjadi resonansi yang bisa mengamplifikasi

displacement dan stress secara signifikan. Untuk mencegah ini, deck harus dirancang cukup kaku sehingga frekuensi natural-nya jauh di atas frekuensi eksitasi dari kereta.

Multi-Modal Integration: Road and Rail

Integrasi jalur kereta api ke dalam jembatan jalan adalah challenge yang kompleks. Kereta memerlukan track alignment yang sangat presisi dengan grade (kemiringan vertikal) yang sangat kecil biasanya maksimum 2-3% untuk kereta barang, dan bahkan lebih kecil untuk kereta penumpang kecepatan tinggi. Untuk jembatan yang melintasi laut dengan bentang sangat panjang, menjaga alignment ini sambil mengakomodasi defleksi akibat beban dan temperatur adalah sangat menantang.

Salah satu opsi adalah memisahkan deck untuk jalan dan kereta—double-deck configuration di mana kereta berada di satu level (biasanya bawah karena memerlukan kekakuan lebih) dan kendaraan di level lain (atas). Ini menambah tinggi dan berat struktur tetapi memberikan fleksibilitas dalam desain masing-masing deck untuk kebutuhan spesifiknya. Opsi lain adalah side-by-side di mana track kereta dan lajur kendaraan berada pada level yang sama tetapi separated oleh barrier.

Untuk kereta berkecepatan tinggi (high-speed rail), persyaratan bahkan lebih ketat. Track deflection harus sangat minimal biasanya kurang dari $L/10000$ (L adalah bentang) untuk menghindari ketidaknyamanan penumpang dan memastikan keselamatan. Ini berarti untuk bentang 4000 meter, defleksi maksimum hanya 400 mm angka yang sangat kecil untuk struktur sebesar itu dengan beban seberat kereta. Achieving this level of stiffness memerlukan deck yang sangat deep (tinggi) atau sistem prestressing yang sangat intensif.

Utility Corridor: Lifeline Integration

Mengintegrasikan utilities ke dalam JSS menciptakan nilai tambah yang sangat besar. Pipa gas dari ladang gas di Sumatera Selatan bisa disalurkan ke Jawa tanpa perlu subsea pipeline yang mahal dan rentan kerusakan. Kabel listrik tegangan tinggi bisa menghubungkan grid Sumatera dan Jawa, memungkinkan power exchange dan meningkatkan reliability sistem kelistrikan nasional. Fiber optic untuk telekomunikasi bisa menghubungkan network di kedua pulau dengan bandwidth yang sangat besar.

Dari perspektif engineering, utilities menambah kompleksitas. Pipa gas under pressure menciptakan beban tambahan dan juga hazard kebocoran gas bisa menyebabkan kebakaran atau ledakan. Safety measures seperti automatic shut-off valve, leak detection system, dan fire suppression harus diintegrasikan. Kabel listrik high-voltage menciptakan electromagnetic field yang bisa interfere dengan sistem elektronik lain di jembatan. Shielding dan proper grounding diperlukan. Akses untuk maintenance harus disediakan utility gallery atau corridor di dalam deck structure di mana pekerja bisa masuk untuk inspeksi dan perbaikan.

Relevansi Standar SNI dan Updating Berkelanjutan

SNI 2833:2016 dan Beyond: Earthquake Engineering

SNI 2833:2016 tentang "Perancangan Jembatan terhadap Beban Gempa" adalah standar yang sangat comprehensive yang mengadopsi best practices internasional dari AASHTO dan Eurocode sambil menyesuaikan untuk kondisi seismik Indonesia yang unik. Standar ini mengharuskan penggunaan peta gempa terbaru yang dikeluarkan oleh Pusat Studi

Gempa Nasional, yang diperbarui setiap 5-10 tahun berdasarkan data gempa terkini dan peningkatan pemahaman tentang sumber-sumber seismik.

Untuk struktur kategori special atau critical seperti JSS, SNI mengharuskan analisis yang paling rigorous nonlinear time history analysis dengan minimum 7 pasang ground motion yang di-scale untuk mencocokkan response spectrum target. Setiap gempa harus diaplikasikan dalam dua arah horizontal (*longitudinal dan transverse*) serta vertikal karena near-field megathrust earthquake bisa menghasilkan komponen vertikal yang sangat kuat.

Namun, untuk struktur se-unprecedented seperti JSS, bahkan SNI mungkin tidak cukup. Peer review oleh international experts, penggunaan state-of-the-art analysis tools seperti OpenSees atau ABAQUS untuk nonlinear finite element analysis, dan mungkin even full-scale atau large-scale physical testing dari komponen kritis bisa diperlukan untuk validate desain.

SNI 1725 dan Weigh-In-Motion: Dynamic Load Update

SNI 1725 tentang "Pembebanan untuk Jembatan" terus diperbarui untuk mencerminkan realitas beban lalu lintas. Salah satu inovasi penting adalah implementasi *Weigh-In-Motion* (WIM) system di jalan-jalan utama Indonesia. WIM adalah teknologi yang mengukur berat kendaraan saat mereka melintasi sensor yang tertanam di jalan, tanpa perlu menghentikan kendaraan. Data dari WIM di-aggregate untuk mendapatkan statistik beban lalu lintas actual: distribusi berat kendaraan, frekuensi overloading, axle configuration, dan lain-lain.

Data WIM menunjukkan bahwa beban lalu lintas actual sering kali melebihi beban desain yang diasumsikan dalam standar lama. Overloading truck adalah masalah kronis di Indonesia banyak truk beroperasi dengan beban jauh melebihi legal limit, mempercepat deterioration jembatan. Untuk JSS yang akan menjadi corridor utama, enforcement berat kendaraan harus sangat ketat, dan desain harus memperhitungkan margin untuk overloading yang mungkin terjadi.

Updating SNI berdasarkan data WIM dan performance monitoring dari jembatan existing adalah ongoing process yang memastikan standar tetap relevant. Untuk JSS, idealnya bridge-specific WIM system akan diinstall di jembatan itu sendiri untuk continuous monitoring beban actual, memungkinkan validation model desain dan early warning jika beban melebihi assumptions.

Kesimpulan: Visi, Tantangan, dan Pembelajaran

Rancangan Jembatan Selat Sunda adalah synthesis sempurna antara visi strategis nasional dengan tantangan engineering yang ekstrem. Proyek ini menuntut integrasi hampir semua aspek civil engineering: structural engineering untuk desain struktur ultra-long-span, geotechnical engineering untuk fondasi di laut dalam, earthquake engineering untuk desain seismik robust, hydraulic engineering untuk wave and current forces, material science untuk high-performance materials, construction engineering untuk metode konstruksi yang feasible, dan transportation engineering untuk optimasi traffic flow.

Untuk mahasiswa teknik sipil, JSS adalah case study yang mendemonstrasikan bahwa engineering di level tertinggi bukan hanya tentang menerapkan formula dan standar, tetapi tentang innovation, critical thinking, dan synthesis pengetahuan dari berbagai disiplin.

Pertanyaan "Mengapa visi Prof. Sedyatmo memerlukan updating standar SNI secara berkala?" memiliki jawaban yang dalam: karena kondisi alam Indonesia sangat dinamis gempa terus terjadi memberikan data baru tentang seismicity, lalu lintas terus berkembang dengan kendaraan yang lebih berat, material science terus maju dengan material baru, dan teknologi konstruksi terus berinovasi. Engineering standards harus evolve bersama pengetahuan dan kondisi yang berubah untuk memastikan struktur yang kita bangun hari ini tetap aman untuk generasi mendatang.

JSS mungkin belum terealisasi hingga saat ini berbagai pertimbangan ekonomi, politik, dan teknis masih menjadi obstacle. Namun visi ini tetap hidup, terus dievaluasi dan diperbarui dengan teknologi terkini. Suatu hari, ketika kondisi telah matang, generasi insinyur mendatang mungkin akan merealisasikan mimpi Prof. Sedyatmo, menghubungkan Jawa dan Sumatera dengan struktur yang akan menjadi salah satu keajaiban engineering dunia. Dan ketika itu terjadi, fondasi pengetahuan yang kita bangun hari ini pemahaman mendalam tentang tipologi jembatan, material, beban, dan kondisi alam Indonesia akan menjadi landasan kesuksesan proyek tersebut.

BAB 2

PRAKTIK DESAIN JEMBATAN DI TIONGKOK

2.1 PENDAHULUAN

1. Evolusi Sejarah

Dengan sejarah tercatat sekitar 5000 tahun, Tiongkok memiliki wilayah yang luas, secara topografi lebih tinggi di barat laut dan lebih rendah di tenggara. Terjalin dengan sungai-sungai, Tiongkok memiliki lembah-lembah terkenal Sungai Yangtze, Sungai Kuning, dan Sungai Mutiara, yang merupakan tempat lahirnya bangsa dan budaya Tiongkok. Sepanjang sejarah, bangsa Tiongkok telah membangun ribuan jembatan, yang merupakan bagian penting dari budaya Tiongkok.

Jembatan-jembatan kuno Tiongkok diakui secara universal dan telah menikmati prestise tinggi dalam sejarah jembatan dunia. Jembatan-jembatan tersebut dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori: jembatan balok, jembatan lengkung, jembatan gantung kabel, dan jembatan ponton.

Referensi paling awal tentang jembatan balok dalam sejarah Tiongkok adalah Jembatan Ju yang berasal dari Dinasti Shang (abad ke-16 hingga ke-11 SM). Selama Dinasti Song (960 hingga 1279 M), sejumlah besar jembatan tiang batu dan jembatan balok batu dibangun. Di Quanzhou saja, seperti yang tercatat dalam buku-buku kuno, 110 jembatan didirikan selama dua abad, termasuk 10 jembatan terkenal. Misalnya, Jembatan Anping dengan 362 bentang terkenal karena panjangnya 2223 m, sebuah rekor nasional selama lebih dari 700 tahun. Untuk memperpanjang bentang, balok kayu atau balok batu diletakkan secara horizontal di atas satu sama lain, lapisan atas menjorok di atas lapisan bawah, sehingga menopang balok sederhana di tengah. Jembatan kantilever kayu bentang tunggal yang masih ada, Jembatan Yiping yang dibangun pada Dinasti Qing (1644 hingga 1911 M) memiliki bentang lebih dari 60 m dengan bangunan beratap di atasnya.



Gambar 2.1 Jembatan Anji.

Jembatan lengkung tertua di Tiongkok yang masih bertahan dan terawat dengan baik adalah Jembatan Anji, juga dikenal sebagai Jembatan Zhaozhou, di Zhouxian, Provinsi Hebei, yang dibangun pada masa Dinasti Sui (Gambar 2.1). Jembatan ini merupakan jembatan lengkung batu segmental tunggal, terdiri dari 28 lengkung individual yang diikat melintang, dengan bentang 37,02 m dan tinggi 7,23 m di atas garis korda. Lebih sempit di bagian atas dan lebih lebar di bagian bawah, jembatan ini memiliki lebar rata-rata 9 m. Cincin lengkung utama setebal 1,03 m dengan batu lengkung pelindung di atasnya. Setiap spandrelnya dilubangi oleh dua lengkung kecil, masing-masing dengan bentang bersih 3,8 dan 2,85 m, sehingga banjir dapat dialirkan dan berat jembatan juga berkurang. Jembatan Anji memiliki dek segmental dan pagar pembatasnya diukir dengan naga dan hewan lainnya. Pembangunannya dimulai pada tahun ke-15 pemerintahan Kaithuang (595 M) dan selesai pada tahun pertama pemerintahan Day (605 M) dari Dinasti Sui. Hingga saat ini, jembatan ini telah bertahan selama 1393 tahun. Jembatan ini, dengan pengerjaan yang indah, struktur yang unik, proporsi yang baik dan bentuk yang anggun, serta ukiran yang teliti namun hidup, telah dianggap sebagai salah satu pencapaian terbesar di Tiongkok. Perhatian besar telah diberikan pada pelestariannya melalui dinasti-dinasti yang ber successive. Pada tahun 1991, Jembatan Anji dinobatkan sebagai salah satu peninggalan budaya dunia.

Lengkungan batu di Tiongkok bervariasi sesuai dengan transportasi darat yang berbeda dan sifat yang berbeda antara jalur air utara dan selatan. Di utara, yang umum adalah jembatan dek datar dengan spandrel yang kokoh, pilar yang tebal, dan cincin lengkungan, sedangkan di selatan yang dilintasi sungai, jembatan berbentuk punuk dengan pilar tipis dan lengkungan cangkang lebih umum.



Gambar 2.2 Jembatan Suzhou Baodai.

Di bagian tenggara Tiongkok, Provinsi Jiangsu dan Zhejiang, yang terhubung dengan sungai-sungai yang dapat dilayari, perahu merupakan alat transportasi utama. Karena jembatan harus dibangun di atas perairan pasang surut dan fondasinya diletakkan di tanah lunak, bahkan jembatan lengkung batu pun harus dibangun dengan pilar tipis dan lengkungan cangkang agar

beratnya dapat dikurangi semaksimal mungkin. Lingkaran lengkung tertipis hanya $\frac{1}{67}$ dari bentang, sedangkan rata-rata kedalaman lingkaran lengkung adalah $\frac{1}{20}$ dari bentang. Jembatan multi-bentang gabungan terpanjang yang masih ada dengan lengkungan cangkang dan pilar tipis adalah Jembatan Baodai (Gambar 2.2) di Suzhou, Provinsi Jiangsu. Dibangun pada Dinasti Tang (618 hingga 907 M) dan telah mengalami serangkaian renovasi pada dinasti-dinasti berikutnya, jembatan ini sekarang memiliki panjang 316,8 m, lebar 4,1 m, dengan total 53 bentang, tiga lengkungan tengah lebih tinggi daripada yang lain agar perahu dapat melewatinya. Kedua ujung jembatan dihiasi dengan singa atau paviliun dan menara, semuanya terbuat dari batu.

Jembatan gantung kabel bervariasi jenisnya tergantung pada bahan pembuatan kabelnya: rotan, bambu, kulit, dan rantai besi. Menurut catatan sejarah, pada tahun 285 SM terdapat Jembatan Zha (jembatan kabel bambu). Li Bin dari Negara Qin, yang menjaga Shu (256 hingga 251 SM), mengawasi pembangunan tujuh jembatan di Gaizhou (sekarang Chengdu, Provinsi Sichuan), salah satunya dibangun dari kabel bambu. Jembatan Jihong di Kabupaten Yongping, Provinsi Yunnan, adalah jembatan tertua dan terluas dengan sebagian besar rantai besi di Tiongkok saat ini. Membentang di atas Sungai Lanchang, jembatan ini memiliki panjang 113,4 m, lebar 4,1 m, dan bentang bebas 57,3 m. Terdapat 16 rantai bawah dan satu rantai pegangan tangan di setiap sisinya. Jembatan ini terletak di jalan kuno yang menuju India dan Burma.

Jembatan Rantai Besi Luding (Gambar 2.3) di Provinsi Sichuan, yang paling indah dari jembatan sejenis yang masih ada, membentang di atas Sungai Dadu dan telah berfungsi sebagai penghubung penting antara Provinsi Sichuan dan Tibet. Jembatan ini memiliki bentang bebas 104 m, lebar 2,8 m, dengan papan yang diletakkan di atas rantai bawah. Terdapat sembilan rantai bawah, masing-masing sepanjang sekitar 128 m, dan 2 rantai pegangan tangan di setiap sisi. Di setiap tepi sungai, terdapat penyangga batu, yang beratnya menyeimbangkan gaya tarik rantai besi. Pembangunannya dimulai pada tahun 1705 dan selesai pada tahun berikutnya.

Menurut catatan sejarah, sejumlah besar jembatan ponton dibangun di sembilan dan lima tempat berbeda di atas Sungai Yangtze dan Sungai Kuning, masing-masing, pada zaman kuno. Pada tahun 1989, di Yongji, Provinsi Shanxi, ditemukan empat patung lembu besi, masing-masing seberat lebih dari 10 ton, dan empat patung manusia besi seukuran aslinya, semuanya dengan pesona yang hidup, dan dibuat dengan sangat indah. Patung-patung ini dimaksudkan untuk menambatkan rantai besi di tepi timur Jembatan Apung Pujing pada masa Dinasti Tang.

Jembatan-jembatan kuno Tiongkok, dengan berbagai struktur, pengerjaan yang indah, dan detail yang masuk akal, adalah buah dari pengalaman praktis. Perhitungan dan analisis dengan cara modern membuktikan bahwa sebagian besar sesuai dengan prinsip-prinsip ilmiah. Jembatan-jembatan kuno Tiongkok memiliki nilai artistik dan ilmiah yang tinggi dan telah mencapai prestasi yang luar biasa, yang darinya kita dapat mengambil banyak pelajaran untuk melahirkan jembatan-jembatan baru dan masa depan.

Secara komparatif, pembangunan jembatan modern di Tiongkok dimulai terlambat. Sebelum tahun 1950-an, banyak jembatan diinvestasikan, dirancang, dan dibangun oleh orang asing. Sebagian besar jembatan jalan raya terbuat dari kayu. Setelah tahun 1950-an, pembangunan jembatan di Tiongkok memasuki era baru. Pada tahun 1956, jembatan jalan raya beton prategang pertama dibangun. Setahun kemudian, Jembatan Sungai Yangtze Wuhan didirikan, yang mengakhiri sejarah Sungai Yangtze yang tidak memiliki jembatan. Jembatan Sungai Yangtze Nanjing selesai dibangun pada tahun 1969. Pada tahun 1960-an, Tiongkok mulai mengadopsi teknologi konstruksi kantilever untuk membangun jembatan rangka kaku tipe T. Selama tahun 1970-an, lebih banyak jembatan beton prategang kontinu dibangun. Tiongkok juga mulai mempraktikkan teknologi konstruksi baru seperti metode peluncuran angkat-dorong, metode bekisting bergerak, metode pemasangan bentang demi bentang, dan lainnya. Dua jembatan kabel beton bertulang dibangun pada tahun 1975, yang menandai dimulainya pembangunan jembatan kabel di Tiongkok. Sejak tahun 1980, Tiongkok mulai mengembangkan jembatan bentang panjang. Satu demi satu, banyak jembatan bentang panjang seperti Jembatan Humen (rangka kaku kontinu beton prategang) di Provinsi Guangdong dengan bentang utama 270 m, Jembatan Sungai Yangtze Wanxian (beton bertulang lengkung) di Provinsi Sichuan dengan bentang utama 420 m, Jembatan Yangpu (kabel pancang) di Kota Shanghai dengan bentang utama 602 m, dan lain-lain telah selesai dibangun. Jembatan Sungai Yangtze Jiangying (gantung) dengan bentang utama 1385 m sedang dalam pembangunan. Dua jembatan pertama yang disebutkan di atas memiliki bentang terpanjang di dunia untuk jenisnya masing-masing. Saat ini, lima proyek skala besar dan lintas laut untuk arteri jalan kelas atas di sepanjang pantai sedang direncanakan oleh Kementerian Komunikasi Tiongkok. Dari utara ke selatan, arteri jalan tersebut melintasi Selat Bohai, Pelabuhan Yangtze, Teluk Hangzhou, Pelabuhan Pearl, Laut Lingdingyang, dan Selat Qiongzhou. Sejumlah besar jembatan bentang panjang harus dibangun dalam proyek-proyek ini. Proyek jembatan bentang panjang Lingdingyang melintasi Pelabuhan Pearl telah dimulai.



Gambar 2.3 Jembatan Rantai Besi Luding

Dua jembatan kabel beton bertulang dibangun pada tahun 1975, yang menandai dimulainya pembangunan jembatan kabel di Tiongkok. Sejak tahun 1980, Tiongkok mulai mengembangkan jembatan bentang panjang. Satu demi satu, banyak jembatan bentang panjang seperti Jembatan Humen (rangka kaku kontinu beton prategang) di Provinsi Guangdong dengan bentang utama 270 m, Jembatan Sungai Yangtze Wanxian (beton bertulang lengkung) di Provinsi Sichuan dengan bentang utama 420 m, Jembatan Yangpu (kabel pancang) di Kota Shanghai dengan bentang utama 602 m, dan lain-lain telah selesai dibangun. Jembatan Sungai Yangtze Jiangying (gantung) dengan bentang utama 1385 m sedang dalam pembangunan. Dua jembatan pertama yang disebutkan di atas memiliki bentang terpanjang di dunia untuk jenisnya masing-masing. Saat ini, lima proyek skala besar dan lintas laut untuk arteri jalan kelas atas di sepanjang pantai sedang direncanakan oleh Kementerian Komunikasi Tiongkok. Dari utara ke selatan, arteri jalan tersebut melintasi Selat Bohai, Pelabuhan Yangtze, Teluk Hangzhou, Pelabuhan Pearl, Laut Lingdingyang, dan Selat Qiongzhou. Sejumlah besar jembatan bentang panjang harus dibangun dalam proyek-proyek ini. Proyek jembatan bentang panjang Lingdingyang melintasi Pelabuhan Pearl telah dimulai.

2. Teknik Desain Jembatan

a) Spesifikasi dan Kode Desain

Terdapat dua seri spesifikasi dan kode desain jembatan di Tiongkok. Satu untuk jembatan jalan raya dan yang lainnya untuk jembatan kereta api. Selain itu, terdapat panduan



desain seperti panduan tahan angin untuk jembatan. Spesifikasi Desain untuk Jembatan Jalan Raya terutama untuk jembatan beton, yang banyak dibangun di Tiongkok. Di sini hanya spesifikasi ini yang disajikan karena keterbatasan ruang.

Spesifikasi Desain untuk Jembatan Jalan Raya saat ini, yang dikeluarkan oleh Kementerian Komunikasi Republik Rakyat Tiongkok pada tahun 1989, mencakup enam bagian. Yaitu Spesifikasi Desain Umum untuk Jembatan, Spesifikasi Desain untuk Jembatan Batu, Spesifikasi Desain untuk Jembatan Beton Bertulang dan Prategang, Spesifikasi Desain untuk Pondasi dan Alas Jembatan, Spesifikasi Desain untuk Anggota Baja dan Kayu Jembatan, dan Spesifikasi Desain Seismik untuk Jembatan. Filosofi desain dan beban disediakan dalam Spesifikasi Desain Umum. Dalam spesifikasi, dua filosofi desain diadopsi: teori desain faktor beban dan resistensi (RFD) untuk elemen beton prategang bertulang dan teori desain tegangan yang diizinkan (ASD) untuk elemen baja dan kayu.

Tiga persyaratan dasar untuk kekuatan, kekakuan, dan daya tahan perlu diperiksa untuk semua elemen jembatan. Untuk elemen jembatan yang mungkin mengalami lentur, tegangan aksial, atau kompresi, gaya lentur dan aksial gabungan, dan lainnya., harus diperiksa sesuai dengan kondisi pembebanannya. Untuk memastikan persyaratan kekuatannya, kekakuan jembatan dievaluasi sesuai dengan rentang perpindahan di tengah bentang atau ujung kantilever. Dengan memeriksa lebar retakan dan melakukan beberapa pengukuran, daya tahan struktur dapat dipastikan.

b) Teori dan Metode Analisis

Analisis struktur jembatan dalam hal layanan didasarkan pada asumsi teori elastis linier dan mekanika material umum. Sesuai dengan persyaratan desain, kurva pembungkus gaya internal dan perpindahan elemen jembatan dihitung. Kemudian, pengecekan kekuatan, kekakuan, dan daya tahan dilakukan dengan cermat sesuai dengan spesifikasi desain. Untuk struktur sederhana, biasanya disederhanakan sebagai struktur bidang, tetapi juga dapat dianalisis lebih akurat dengan 3D-FEM.

Misalnya, jembatan balok tumpuan sederhana biasanya disederhanakan dengan cara berikut. Sesuai dengan bentuk penampang dan metode konstruksi, jembatan dapat dibagi menjadi beberapa elemen dasar memanjang seperti balok T atau balok pelat berongga atau balok kotak. Gaya internal elemen dasar yang disebabkan oleh beban mati dihitung dengan asumsi setiap elemen dasar menanggung beban yang sama. Untuk mempertimbangkan efek struktur ruang di bawah beban hidup, permukaan pengaruh gaya internal dan perpindahan disederhanakan secara aproksimasi sebagai dua kurva univariat; satu adalah garis pengaruh gaya internal atau perpindahan elemen dasar dan yang lainnya adalah garis pengaruh distribusi beban transversal.

Untuk membuktikan kelayakan dan keandalan metode aproksimasi, telah dilakukan pengujian ekstensif dan studi teoritis. Beberapa metode untuk menentukan garis pengaruh distribusi beban transversal untuk berbagai struktur dan metode konstruksi telah dikembangkan. Dalam praktik saat ini, metode pelat (atau balok) yang dihubungkan secara engsel transversal, metode balok yang dihubungkan secara kaku, metode balok silang yang kaku, dan metode prinsip tuas digunakan sesuai dengan struktur dan metode konstruksi.



Metode-metode ini dapat memenuhi persyaratan desain untuk banyak jembatan. Dengan program komputer, metode analisis yang disederhanakan ini menjadi sangat mudah.

Namun, beberapa jembatan, seperti jembatan miring tidak beraturan, jembatan lengkung, dan jembatan komposit, tidak dapat dibagi menjadi beberapa balok memanjang yang terutama memiliki perilaku struktur bidang vertikal. Jembatan-jembatan tersebut tidak cocok untuk metode analisis yang disederhanakan yang disebutkan di atas. Untuk struktur ruang yang kompleks tersebut, permukaan pengaruh gaya internal dan perpindahan akibat beban mati diperoleh dengan metode elemen hingga statis dan respons dampak maksimal gaya internal dan perpindahan yang disebabkan oleh beban hidup dapat diperoleh menggunakan prosedur analisis dinamis.

c) Teori dan Metode untuk Jembatan Bentang Panjang

Jembatan bentang panjang biasanya mahal untuk dibangun dan memiliki sifat struktural yang fleksibel. Mengingat persyaratan ekonomi dan fungsional, masalah optimasi struktural, analisis nonlinier, analisis stabilitas, dan pengendalian konstruksi menjadi sangat penting untuk jembatan bentang panjang. Para ahli jembatan Tiongkok yang berpartisipasi dalam studi dan desain jembatan bentang panjang Tiongkok telah mengemukakan banyak teori dan metode untuk menyelesaikan masalah yang disebutkan di atas. Berkaitan dengan analisis nonlinier jembatan bentang panjang, mereka mengembangkan metode area pengaruh untuk analisis nonlinier geometris beban hidup, metode perhitungan penyesuaian nonlinier, dan metode perhitungan simulasi konstruksi nonlinier, untuk pengendalian konstruksi. Dengan menggunakan teori perpindahan terbatas, sistem analisis nonlinier tiga dimensi yang mempertimbangkan beban mati, beban hidup, dan tahap serta metode konstruksi telah dikembangkan. Masalah stabilitas jembatan rangka, jembatan bingkai, dan jembatan lengkung telah dipelajari secara ekstensif. Pendekatan analisis stabilitas dikembangkan untuk efek angin pada jembatan bentang panjang. Teori dan teknik optimasi telah diterapkan pada semua jenis jembatan dengan sukses. Akurasi dan efisiensi metode-metode yang dikembangkan tersebut telah diverifikasi melalui aplikasi praktis.

d) Teknik CAD Jembatan

Sejak akhir tahun 1970-an, teknologi komputer telah banyak digunakan untuk analisis struktural dalam praktik desain jembatan di Tiongkok. Banyak program analisis struktural khusus untuk desain jembatan telah dikembangkan. Dengan memperhatikan sepenuhnya fitur khusus desain jembatan, misalnya, Program Jembatan Sintetis, menyediakan kemampuan transfer tahap konstruksi, analisis rangkai dan penyusutan beton, perhitungan prategang, dan lainnya. Sampai batas tertentu, adopsi luas program ini mencerminkan status aplikasi teknologi komputasi di bidang desain jembatan jalan raya di Tiongkok selama tahun-tahun dari akhir tahun 1970-an hingga awal tahun 1980-an.

Sejak tahun 1980-an, popularisasi perangkat grafis komputer, seperti plotter gambar gulir dan digitizer, telah membawa aplikasi komputasi dari sekadar analisis struktural menjadi desain terbantu yang mencakup analisis struktural dan gambar detail. Dengan perkembangan sistem jalan raya, jembatan tumpuan sederhana yang terstandarisasi telah tersebar di Tiongkok. Berdasarkan platform mikrokomputer, banyak peneliti dan insinyur mulai



mengembangkan sistem CAD otomatis yang mengintegrasikan analisis struktural dan pembuatan gambar detail. Sistem CAD Jembatan Bentang Menengah dan Pendek Otomatis pada Mikrokomputer, yang dikembangkan bersama oleh anggota Asosiasi Aplikasi Komputer Jalan Raya Tiongkok, misalnya, memiliki kemampuan untuk menyelesaikan semua proses desain jembatan balok T dan pelat yang ditopang sederhana. Dengan bantuan sistem ini, hanya beberapa informasi utama yang perlu dimasukkan, dan komputer akan secara otomatis menghasilkan serangkaian dokumen desain termasuk spesifikasi dan gambar dalam waktu singkat. Efisiensi desainnya sangat baik dibandingkan dengan cara tradisional. Banyak lembaga dan perusahaan desain menggunakan sistem ini untuk mendesain jembatan bentang menengah dan pendek.

Selama Rencana Lima Tahun ke-7 Tiongkok (1985 hingga 1990), untuk mengembangkan sistem jembatan jalan raya baru, sebuah kelompok kerja khusus yang terdiri dari lebih dari 40 insinyur dan cendekiawan jembatan praktis dibentuk dan diorganisir oleh Kementerian Komunikasi. Sebagai proyek penelitian ilmiah kunci nasional, kelompok sekutu menginvestasikan 2 juta RMB untuk meneliti dan mengembangkan teknik CAD yang diterapkan dalam pembangunan jembatan jalan raya. Pada tahun 1991, "Sistem CAD Jembatan Jalan Raya (JT-HBCADS)" berhasil dikembangkan. Lebih dari 10 lembaga desain jembatan jalan raya besar telah memasang sistem ini dan menyelesaikan desain sekitar 10 jembatan besar seperti Jembatan Nanpu, Jembatan Yangpu, dan lainnya.

Selama tahun 1991 hingga 1995, peningkatan kinerja perangkat keras komputer pribadi (PC) dan teknologi perangkat lunak telah menimbulkan tantangan kritis bagi pengembangan penelitian dan penerapan teknik CAD jembatan. Banyak teknik pengembangan perangkat lunak canggih, seperti akses basis data kernel, pemrograman berorientasi objek, visualisasi aplikasi, dan pengembangan aplikasi cepat, sepenuhnya dikembangkan dan tersedia untuk komputer pribadi, yang menghadirkan banyak peluang yang belum pernah muncul sebelumnya dalam mengembangkan generasi baru sistem CAD jembatan terintegrasi dan cerdas.

Dengan mempertimbangkan sepenuhnya, dan berdasarkan pengalaman serta pemahaman tentang pengembangan JT-HBCADS dan banyak teknologi perangkat lunak pendukung yang baru tersedia, gagasan pengembangan sistem CAD jembatan terintegrasi (BICADS) telah dikemukakan, dan BICADS generasi baru berhasil dikembangkan secara menyeluruh di bawah bimbingan pemikiran ini. Dengan menggunakan sistem operasi Windows NT sebagai platform, desain arsitektur sistem BICADS sepenuhnya mengadopsi teknik akses basis data kernel untuk menghindari kesulitan pemeliharaan dan peningkatan sistem yang merupakan kelemahan bawaan dan tak terhindarkan yang disebabkan oleh sistem file tradisional. Versi pertama BICADS terdiri dari lima subsistem termasuk Dokumentasi Desain, Pra-pemrosesan FEM Jembatan, Kernel FEM Jembatan, Pasca-pemrosesan FEM Jembatan, dan Desain Awal Jembatan Balok Kotak. Beberapa subsistem desain detail jembatan umum lainnya dapat disertakan dengan menggunakan mekanisme integrasi dan perluasan yang baik dalam sistem utama. Selain itu, penelitian beberapa masalah mendasar di bidang teknik CAD cerdas jembatan dan pengembangan perangkat sistem pakar jembatan dengan

kemampuan pemrosesan grafis telah membuahkan hasil yang cukup menjanjikan. Diprediksi bahwa, didorong oleh perkembangan pesat teknologi komputer pada akhir abad ini, generasi baru dalam aplikasi dan penelitian teknik CAD jembatan di Tiongkok akan terbuka.

3. Penelitian Eksperimental Beban Dinamis dan Seismik

Uji Model untuk Jembatan

Untuk menetapkan garis dasar perilaku dinamis untuk pemantauan kesehatan struktur jembatan, uji model biasanya dilakukan segera setelah konstruksi jembatan. Prosedur eksperimental yang telah digunakan di masa lalu meliputi (1) uji benturan dan (2) getaran ambien. Untuk jembatan besar, seperti Jembatan Yangpu Shanghai (jembatan kabel) dan Jembatan Fengpu Shanghai (jembatan balok kotak kontinu), metode penggunaan kendaraan uji (lalu lintas terkontrol) untuk menggetarkan jembatan telah berhasil diverifikasi.

Uji Meja Getar Model Jembatan

Uji model jembatan balok tumpuan sederhana dan balok kontinu dilakukan pada meja getar (buatan MTS Co.). Uji ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh daktilitas dan isolasi seismik pada jembatan, di mana jembatan layang Jalan Lingkar Dalam Shanghai dianggap sebagai latar belakang model jembatan balok kontinu; sementara itu, model analitis jembatan dan elemen diverifikasi.

Kinerja Daktilitas dan Teknik Perbaikan Seismik untuk Pilar Jembatan

Baru-baru ini, beton berkekuatan tinggi dengan kekuatan tekan silindris hingga 100 MPa atau lebih tinggi dapat dibuat dengan bahan-bahan yang tersedia secara lokal, seperti semen biasa, pasir, batu pecah, superplastisizer pengurang air, metode pencampuran standar, dan kontrol kualitas yang cermat dalam produksi. Terdapat banyak karakteristik beton berkekuatan tinggi yang bermanfaat dalam teknik sipil, tetapi, di sisi lain, terdapat beberapa kekurangan dalam peningkatan penggunaan beton berkekuatan tinggi. Misalnya, sifat getas dan deformabilitas pasca-puncak yang lebih rendah dapat menyebabkan kegagalan getas selama gempa bumi atau dalam kondisi lain. Banyak pekerjaan, teoritis dan eksperimental, telah dilakukan oleh para peneliti Tiongkok untuk desain daktilitas dan peningkatan kode desain jembatan. Melalui pengujian dan analisis, beberapa kesimpulan penting dapat diringkas secara singkat sebagai berikut:

1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk kolom beton berkekuatan tinggi, daktilitas yang sangat besar dapat dicapai dengan menggunakan tulangan pengikat lateral.
2. Semua pilar yang diretrofit menggunakan jaket baja, beton serat baja, beton epoksi, dan fiberglass-epoksi menunjukkan kinerja yang sangat memuaskan. Daktilitas yang baik, kapasitas disipasi energi, dan perilaku deformasi yang stabil telah tercapai.

Uji Perilaku Dinamis Perangkat Isolasi

Untuk memenuhi persyaratan desain tahan gempa jembatan, desain seismik jembatan terisolasi dan optimasi telah banyak digunakan di Tiongkok. Sifat dinamis bantalan bantalan elastomer (bantalan EP) telah dievaluasi, termasuk modulus geser, perilaku histeresis, dan koefisien gesekan geser bantalan EP dan bantalan geser berlapis pelat Teflon (bantalan TPCS). Pengujian dilakukan pada mesin kelelahan elektro-hidrolik (buatan INSTRON Co.) dengan alat penjepit tambahan. Hasil ini dapat diringkas sebagai berikut:

1. Pada amplitudo regangan geser konstan, modulus geser bantalan EP meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi. Pada frekuensi konstan, modulus geser jelas menurun seiring dengan peningkatan amplitudo regangan geser. Ukuran dan kompresi tidak memiliki efek yang jelas pada modulus geser dinamis.
2. Pada kompresi dan amplitudo perpindahan geser konstan, energi histeresis bantalan TPCS meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi. Pada amplitudo perpindahan geser dan frekuensi konstan, peningkatan kompresi menghasilkan peningkatan energi histeresis bantalan TPCS.
3. Koefisien gesekan bantalan TPCS menurun seiring dengan peningkatan kompresi.

Berdasarkan penelitian eksperimental bantalan karet dan peredam baja, sistem isolasi seismik dan penyerapan energi, yang terdiri dari penyerap energi strip baja lengkung dan bantalan TPCS, dikembangkan, dan kemudian bantalan karet seismik dengan strip baja lunak lengkung, ditemukan.

Baru-baru ini, beberapa jenis bantalan seismik yang ditingkatkan telah muncul. Sejumlah besar eksperimen dinamis menunjukkan bahwa jenis bantalan ini memiliki karakteristik histeresis yang lebih baik daripada bantalan laminasi elastomer. Untuk menghindari kegagalan bentang jembatan akibat benturan, blok pembatas biasanya ditempatkan di ujung balok. Untuk membandingkan perilaku blok, tiga jenis blok telah diproduksi dan sebuah percobaan telah dilakukan pada blok-blok ini: (1) blok karet tipe “T”, (b) blok karet tipe “mangkuk”, dan (3) blok beton bertulang kubus. Selama pengujian, palu tumbukan jatuh bebas dari ketinggian tertentu dan gaya kontak antara blok dan palu beton berkekuatan tinggi dicatat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sangat jelas bahwa blok karet tipe T memiliki kapasitas penyerapan energi terbaik dan gaya tumbukan blok karet tipe T jauh lebih rendah daripada blok beton.

4. Teknik Uji Terowongan Angin

Sejak tahun 1980-an, dengan pembangunan jembatan kabel bentang panjang dan jembatan gantung, Tiongkok telah membuat kemajuan besar dalam bidang teknik angin. Misalnya, terdapat tiga terowongan angin lapisan batas di Laboratorium Kunci Nasional untuk Pengurangan Bencana di Teknik Sipil di Universitas Tongji. Terowongan angin lapisan batas TJ-1, TJ-2, dan TJ-3, yang baru beroperasi beberapa tahun, memiliki penampang kerja masing-masing 1,2 m (lebar), 1,8 m (tinggi); 3 m (lebar), 2,5 m (tinggi); dan 15 m (lebar), 2 m (tinggi). Kecepatan angin maksimumnya masing-masing adalah 32, 17, dan 65 m/s. Hingga saat ini, sekitar 30 uji model telah dilakukan di terowongan angin ini. Penelitian ketahanan angin pada sekitar 40 jembatan kabel dan jembatan gantung telah dilakukan terutama di Universitas Tongji, Shanghai, Tiongkok. Lebih dari 10 pengujian model jembatan aeroelastis skala penuh telah dilakukan. Untuk memenuhi persyaratan desain tahan angin jembatan jalan raya dengan bentang yang semakin lebar, sebuah Pedoman Desain Tahan Angin Jembatan Jalan Raya Tiongkok telah disusun. Beberapa pencapaian dalam analisis flutter, analisis buffeting, dan pengendalian getaran akibat angin telah dilakukan dan diperkenalkan berikut ini.

Analisis Flutter



Seperti diketahui, kecepatan flutter kritis adalah faktor pertama yang mengontrol desain jembatan bentang panjang, terutama yang terletak di daerah rawan topan. Ketepatan frekuensi torsi dalam perhitungan sangat penting. Uji model balok tunggal tradisional pada dek jembatan biasanya memberikan perkiraan frekuensi torsi yang lebih rendah daripada yang sebenarnya dan dapat menghasilkan perkiraan kecepatan flutter kritis yang lebih rendah. Model tiga balok dek jembatan yang dikembangkan oleh Xiang dan rekan-rekan, telah terbukti efisien dalam meningkatkan ketepatan frekuensi torsi secara signifikan.

Metode ruang keadaan untuk analisis flutter mengatasi kekurangan metode Scanlan untuk analisis flutter di mana hanya satu mode vertikal dan satu mode torsi yang dapat dipertimbangkan. Fenomena flutter multimode ditemukan. Partisipasi lebih dari dua mode dalam flutter membuat kecepatan kritis lebih tinggi daripada yang diperoleh dari metode Scanlan.

Analisis Buffeting

Dengan peningkatan panjang bentang, struktur jembatan cenderung menjadi lebih fleksibel. Guncangan berlebihan pada angin turbulen di dekat permukaan tanah, meskipun tidak merusak, dapat menyebabkan masalah kelelahan karena frekuensi kejadian yang tinggi dan ketidaknyamanan lalu lintas. Davenport dan Scanlan dan rekan-rekan., masing-masing mengusulkan metode analisis guncangan pada tahun 1960-an dan 1970-an. Sejak itu, studi penyempurnaan pada metode ini telah dilakukan. Dimungkinkan untuk menetapkan metode praktis untuk spektrum respons guncangan dan pemilihan berbasis guncangan.

Pemilihan aerodinamis bentuk penampang dek penting dalam tahap desain awal jembatan bentang panjang. Dalam beberapa tahun terakhir, pemilihan ini terutama ditujukan pada pemilihan berbasis flutter. Konsep "pemilihan berbasis guncangan" dan metode yang sesuai digunakan dalam desain tahan angin Jembatan Sungai Yangtze Jiangying dan Jembatan Humen, jembatan gantung dengan bentang utama 888 m.

Untuk menyelidiki karakteristik respons nonlinier jembatan bentang panjang, metode analisis getaran nonlinier dalam domain waktu telah digunakan untuk menganalisis Jembatan Sungai Yangtze Jiangying dan Jembatan Teluk Shantou, dan lainnya. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk jembatan gantung bentang panjang, efek nonlinier aerodinamis dan struktural pada respons getaran harus dipertimbangkan.

Pengendalian Getaran Akibat Angin

Dalam praktiknya saat ini, peningkatan kecepatan getaran kritis jembatan bentang panjang biasanya dicapai dengan menggunakan tindakan aerodinamis. Analisis teoritis dan eksperimen menunjukkan bahwa TMD pasif juga dapat menjadi perangkat yang efektif untuk pengendalian getaran. Beberapa TMD dengan parameter yang tepat dapat meningkatkan kecepatan getaran kritis Jembatan Gerbang Humen dengan layar angin di dek (untuk meningkatkan kondisi pergerakan kendaraan) sebesar 50%, meskipun efisiensi, durasi, dan keandalan perangkat untuk penggunaan jangka panjang masih memiliki beberapa masalah yang perlu dipecahkan.

Respons getaran meningkat seiring dengan kecepatan angin, dan dapat menjadi sangat kuat pada kecepatan angin tinggi. Dua metode baru diusulkan untuk menentukan parameter

optimal sistem TMD untuk mengendalikan respons buffeting hanya dengan mode vertikal dan dengan menggabungkan mode vertikal dan torsional, masing-masing.

5. Teknik Konstruksi Jembatan

a) Bahan Konstruksi

Menurut spesifikasi desain untuk jembatan di Tiongkok, kekuatan maksimum beton adalah 60 MPa; tendon prategang meliputi batang baja tarik keras, kawat baja berkekuatan tinggi, dan untai berkekuatan tinggi, yang kekuatannya berkisar dari 750 hingga 1860 MPa; batang tulangan umum terbuat dari A3, 16Mn, dan lainnya.; pelat baja terbuat dari A3 atau 16Mn atau 15MnVN, dan lainnya. Dalam desain normal, beton yang digunakan pada jembatan prategang harus memiliki kekuatan lebih tinggi dari 40 MPa; Tendon prategang yang digunakan pada balok pelat prategang adalah batang SiMnV 45 yang ditarik keras dengan kekuatan 750 MPa atau untai baja dengan kekuatan 1860 MPa; untai dengan kekuatan tarik tinggi dan relaksasi rendah banyak digunakan pada jembatan beton prategang. Saat ini, jembatan layang biasanya memiliki kedalaman balok yang lebih rendah sehingga beton berkekuatan tinggi di atas 50 MPa sering digunakan. Beton dengan kekuatan lebih dari 60 MPa dan kawat serta untai tarik akan digunakan pada jembatan di masa mendatang.

b) Teknik Prategang

Teknik prategang, termasuk prategang internal dan eksternal, telah digunakan selama sekitar 40 tahun di Tiongkok. Tidak hanya jembatan prategang penuh dan sebagian yang dibangun dengan cepat, tetapi juga balok prategang preflex dan balok prategang ganda telah digunakan dalam jembatan layang dan struktur pemisah. Kawat baja dengan kekuatan tarik tinggi dan relaksasi rendah, jangkar yang andal, seperti sistem OVM, dan dongkrak bertonase tinggi telah banyak digunakan di banyak jembatan termasuk jembatan balok kontinu, jembatan rangka T, jembatan kabel, dan jembatan gantung. Desain dan konstruksi struktur beton prategang merupakan proses normal di Tiongkok. Tendon prategang eksternal, termasuk tendon tanpa ikatan, telah digunakan dalam jembatan baru dan dalam penguatan banyak jembatan lama. Saat ini, beberapa jembatan komposit bentang panjang prategang eksternal sedang dibangun di Tiongkok.

c) Teknik Pracetak Balok Beton dan Baja

Sebagian besar jembatan balok tumpuan sederhana dibuat dengan metode fabrikasi di Tiongkok, dan produksi pabrik biasanya diadopsi. Ketika bentangnya lebih pendek dari sekitar 22 m, balok pelat berongga prategang dan prategang seringkali menjadi pilihan terbaik, dan untai berkekuatan tinggi dan relaksasi rendah digunakan sebagai tulangan prategang. Ketika bentangnya lebih dari sekitar 25 m, balok T pasca-tegang dapat digunakan, di mana untai disusun dengan profil melengkung. Dalam konstruksi beberapa jembatan dan viaduk perkotaan dan di tempat pracetak, pengeringan uap sering digunakan untuk meningkatkan kekuatan beton lebih awal dan untuk meningkatkan efisiensi kerja. Biasanya berat dan panjang balok pracetak dibatasi hingga di bawah sekitar 1200 kN dan 50 m untuk memudahkan pengangkutan dan pemasangan.

Jembatan segmental biasanya dibangun menggunakan metode pengecoran kantilever, atau metode pengecoran lainnya; Meskipun demikian, hanya sedikit jembatan segmental yang

dibangun dengan metode pemasangan kantilever. Kami biasanya melakukan pengecoran di tempat karena diketahui bahwa karat pada untaian prategang di sambungan segmen dapat mengurangi masa pakai jembatan. Tendon prategang eksternal atau kabel untaian anti korosi tinggi belum banyak diadopsi pada jembatan segmental pasca-tegangan.

Di Tiongkok, teknik paku keling lengkap telah digantikan oleh teknik pengelasan dan pengencangan baut berkekuatan tinggi. Balok kotak dan komposit yang dilas lengkap telah digunakan dalam viaduk perkotaan, struktur pemisah, dan jembatan kabel; teknik yang diadopsi dalam pembuatan kapal, seperti tata letak komputer dan pemotongan presisi, sedang diperkenalkan.

d) Teknik Fabrikasi Kabel

Sekitar 10 hingga 20 tahun yang lalu, kabel penahan di Tiongkok sebagian besar difabrikasi di lokasi konstruksi dan terdiri dari kawat baja galvanis paralel berdiameter 5 mm atau 7 mm. Kabel tersebut dilindungi dengan pipa selubung PE yang diisi dengan semen, atau dengan cat anti korosi dan tiga lapis serat kaca yang dilapisi resin epoksi. Banyak jembatan kabel pancang telah dibangun dalam dekade terakhir dan teknik fabrikasi kabel telah berkembang pesat. Dengan pembangunan Jembatan Nanpu Shanghai pada tahun 1988, pabrik pertama yang secara mekanis memproduksi kabel kawat paralel spiral panjang dengan selubung PE atau PE dan PU yang diekstrusi panas didirikan. Sejak itu, kualitas kabel pancang telah meningkat pesat, terutama dalam hal ketahanan terhadap korosi. Sekarang tegangan kerja maksimum kabel pancang lebih dari 10.000 kN dan angkur berkualitas tinggi telah dikembangkan. Dalam beberapa tahun terakhir, kabel untai paralel dan spiral produksi pabrik dengan tegangan kerja maksimum lebih dari 10.000 kN telah sering digunakan di jembatan kabel pancang.

Pada saat yang sama, kabel utama Jembatan Santo dan Humen (jembatan gantung) berhasil difabrikasi di Tiongkok; Rangkaian kawat paralel tersebut terdiri dari 127 kawat baja berlapis seng berdiameter 5,2 mm dan memiliki panjang lebih dari 1600 m; kesalahan akar kuadrat rata-rata pada panjang kawat lebih rendah dari 1/36.000. Sekarang, Jembatan Sungai Yangtze Jiangyin, yang memiliki bentang terpanjang, mendekati 1400 m, di Tiongkok, sedang dibangun; kabel utamanya juga akan diprefabrikasi.

e) Teknik Konstruksi Tiang Pancang Berdiameter Besar

Di Tiongkok, tiang pancang bor biasanya digunakan untuk jembatan besar. Ketika kondisi tanah buruk atau formasi batuan dekat dengan permukaan bumi atau dasar sungai, tiang pancang harus dibangun di dalam batuan dan menjadi tiang pancang penahan beban. Biasanya, diameter tiang pancang penahan beban sekitar 0,8 hingga 2,5 m. Tiang pancang berdiameter besar dapat digunakan untuk menggantikan kelompok tiang pancang guna mengurangi waktu konstruksi material. Biasanya tiang pancang berdiameter besar ini memiliki diameter 2,5 hingga 7 m, berongga, dan terdiri dari dua atau tiga segmen. Segmen pertama tiang pancang adalah pipa penggerak komposit baja dan beton berdinding ganda yang ditancapkan ke lapisan lapuk sebagai bendungan sementara; segmen kedua adalah tiang pancang penahan beban beton berongga yang memiliki diameter lebih kecil daripada segmen pertama, dan poros pilar dihubungkan di bagian atas segmen ini; segmen terakhir memiliki

diameter minimum atau, mirip dengan yang kedua, dibangun di dalam batuan. Akibatnya, konstruksi menjadi mudah, dan tidak ada platform atau tiang berongga yang menghabiskan banyak beton dan baja.

f) Teknik Konstruksi Lanjutan

Dengan perkembangan transportasi di Tiongkok, semakin banyak jembatan besar yang dibangun dan teknik konstruksi baru yang dikembangkan. Jembatan lengkung kontinu telah dibangun dengan metode peluncuran bertahap, dan kecepatan metode konstruksi pengecoran kantilever sekitar 5 atau 6 hari per segmen. Jembatan komposit kabel-stayed, yang balok kompositnya terdiri dari balok baja pracetak yang dilas sepenuhnya dan pelat dek beton bertulang pracetak, dibangun dengan metode pemasangan kantilever — misalnya, Jembatan Yangpu Shanghai sepanjang 602 m, yang dibangun pada tahun 1993. Untuk jembatan kabel-stayed beton prategang, tegangan kabel penahan dan keselarasan balok dapat dengan mudah mencapai kondisi terbaiknya dengan menggunakan teknik kontrol otomatis komputer. Metode konstruksi jembatan gantung bentang panjang modern merupakan teknik baru di Tiongkok beberapa tahun lalu, sebagian besar menggunakan metode PWS (prefabricated parallel wire strand).

Peningkatan teknik konstruksi tidak hanya pada jembatan balok kontinu, jembatan rangka kaku, jembatan kabel-stayed, dan jembatan gantung. Di lembah yang dalam atau sungai yang banjir, kerangka tulangan kaku yang terdiri dari pipa baja digunakan sebagai tulangan cincin lengkung beton bentang panjang; setelah kerangka tulangan kaku didirikan dan ditutup di tengah bentang, beton dipompa ke dalam pipa baja; kemudian, dengan menggunakan cetakan bergerak, yang ditopang pada kerangka tulangan kaku, beton dicor dan cincin lengkung kotak beton bertulang dibentuk. Metode konstruksi lain yang digunakan pada jembatan lengkung komposit bentang panjang adalah metode ayun. Dua bagian lengkung didirikan secara terpisah di setiap sisi tanggul sungai atau lereng bukit; kemudian, dengan menggunakan dongkrak, keduanya diputar di sekitar penyangganya di bawah kedudukan lengkung dan ditutup di tengah bentang; akhirnya, beton dipompa ke dalam lengkung pipa. Untuk menjaga keseimbangan setengah lengkungan, wadah air biasanya digunakan sebagai pemberat.

Kemajuan teknik konstruksi tidak hanya dilakukan untuk struktur atas tetapi juga untuk struktur bawah. Tinggi pilar berongga bertulang dan prategang serta pilar pracetak yang digunakan di lembah yang dalam telah mencapai lebih dari 80 m. Tiang pancang berongga berdiameter besar dan caisson beton dan baja besar serta bendungan komposit baja dan beton berdinding ganda diadopsi di kedalaman sungai atau laut lebih dari 50 m.

2.2 JEMBATAN BALOK

1. Deskripsi Umum

Strukturnya sederhana, mudah dibuat dan didirikan, mudah dipelihara, dan dengan waktu konstruksi yang lebih singkat dan biaya rendah, struktur balok telah banyak digunakan pada jembatan bentang pendek hingga menengah. Pada tahun 1937, di atas Sungai Qiantang, di kota Hangzhou, sebuah jembatan serbaguna kereta api-jalan raya didirikan, dengan panjang



total 1453 m, bentang terpanjangnya adalah 67 m. Setelah selesai dibangun, jembatan ini menjadi tonggak sejarah yang luar biasa dalam desain dan pembangunan jembatan balok oleh para insinyur Tiongkok sendiri.

Struktur balok beton bertulang paling umum digunakan untuk jembatan bentang pendek hingga menengah. Sebuah mahakarya representatif adalah Jembatan Sungai Rong yang selesai dibangun pada tahun 1964 di kota Nanning, ibu kota Daerah Otonom Guangxi Zhuangzu. Jembatan ini, dengan bentang utama 55 m dan penampang kotak berdinding tipis dengan sel kontinu, dirancang sesuai dengan teori anggota berdinding tipis tertutup, adalah yang pertama dari jenisnya di Tiongkok.

Jembatan balok beton prategang adalah jenis struktur baru. Tiongkok mulai meneliti dan mengembangkan konstruksinya pada tahun 1950-an. Pada awal tahun 1956, sebuah jembatan kereta api balok beton prategang yang ditopang sederhana dengan bentang utama 23,9 m didirikan di atas Sungai Xinyi di sepanjang Jalur Kereta Api Longhai. Selesai pada waktu yang sama, jembatan jalan raya beton prategang pertama adalah Jembatan Jalan Raya Jingzhou. Jembatan Sungai Feiyun di Ruan'an, Provinsi Zhejiang, yang dibangun pada tahun 1988, memiliki bentang terpanjang yang ditopang sederhana, mencapai 62 m. Contoh lain adalah Jembatan Sungai Kuning sepanjang 4475,09 m, yang dibangun di kota Kaifeng, Provinsi Henan pada tahun 1989. Jembatan ini memiliki 77 bentang berupa balok beton prategang yang ditopang sederhana sepanjang 50 m dan deknya yang menerus membentang hingga 450 m. Perlu juga dicatat bahwa Jembatan Sungai Kuning Kaifeng dirancang berdasarkan teori beton prategang parsial. Sebagai contoh jembatan kereta api balok menerus beton prategang, Jembatan Sungai Qiantang Kedua (selesai dibangun pada tahun 1991) memiliki bentang yang besar dan panjang, dengan bentang utama sepanjang 80 m dan menerus lebih dari 18 bentang. Pembangunannya merupakan tugas yang berat karena pilar-pilar jembatan tersebut terkena gelombang setinggi 1,96 m dan tekanan pasang surut sebesar 32 kPa selama konstruksi. Konstruksi jembatan balok kontinu yang ekstensif telah menyebabkan penerapan metode peluncuran bertahap, terutama untuk jembatan lurus dan lengkung bidang. Selain itu, pemasangan derek apung berkapasitas besar (500 ton) dan bekisting geser bergerak serta skema pemasangan bentang juga telah mencapai kemajuan yang luar biasa.

Jembatan balok juga banyak digunakan dalam penyeberangan layang. Pada tahun 1980-an, dengan pertumbuhan konstruksi perkotaan dan perkembangan transportasi jalan raya, banyak jalan bebas hambatan layang dibangun, yang menyediakan kapasitas lalu lintas yang besar dan memungkinkan kecepatan kendaraan yang tinggi, misalnya, Jalan Bebas Hambatan Kedua dan Ketiga Beijing dan Jalan Bebas Hambatan Kota Timur, Jalan Bebas Hambatan Menengah dan Luar di Tianjin, dan Jalan Bebas Hambatan Dalam dan Luar Guangzhou serta jembatan layang. Di Shanghai, jalan lingkar dalam layang selesai dibangun pada tahun 1996. Selanjutnya, muncul peningkatan pembangunan struktur pemisah tingkat dengan berbagai ukuran di jalan utama perkotaan dan jalan raya ekspres. Hingga saat ini, di Beijing saja, telah dibangun sekitar 80 jembatan layang besar, yang menjadikan kota ini menempati peringkat pertama di seluruh negeri dalam hal jumlah dan skala.

Untuk mengoptimalkan konfigurasi jembatan, mengurangi nilai momen puncak pada penyangga, dan meminimalkan kedalaman konstruksi balok, pilar berbentuk V atau Y dikembangkan untuk jembatan balok kontinu beton prategang, kantilever, atau rangka kaku. Contoh yang menonjol adalah Jembatan Zhongxiao (1981) di Provinsi Taiwan dan Jembatan Lijiang (1987) di Zhishan di kota Guilin.

2. Contoh Jembatan Balok

Jembatan Sungai Kuning Kaifeng

Jembatan Sungai Kuning Kaifeng (Gambar 2.4) adalah jembatan jalan raya ekstra besar, yang terletak di bagian barat laut Kota Kaifeng, Provinsi Henan. Jembatan ini terdiri dari 108 bentang ($77 \times 50 + 31 \times 20$) m, dengan panjang total mencapai 4475,09 m. Struktur atasnya menggunakan balok T beton prategang yang ditopang sederhana. Deknya memiliki lebar 18,5 m, termasuk 12,3 m untuk lalu lintas kendaraan bermotor dan dua trotoar selebar 3,1 m di kedua sisinya. Struktur bawahnya menggunakan pilar kolom ganda satu baris, yang bertumpu pada fondasi tiang bor berdiameter besar 2200 mm.

Jembatan ini bertipe sama dengan jembatan yang dibangun sebelumnya di atas Sungai Kuning di Luoyang dan Zhengzhou. Jembatan Kaifeng telah memperoleh skema desain yang dioptimalkan, dengan biaya konstruksi yang berkurang dan jadwal yang dipersingkat. Karakteristik utama jembatan ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2.4 Jembatan Sungai Kuning Kaifeng.

1. Penggunaan beton prategang parsial dalam desain balok T;
2. Modifikasi balok di atas pilar tengah sebagai struktur beton prategang;
3. Peningkatan panjang kontinu dek hingga mencapai 450 m.

Jembatan ini dirancang oleh Institut Perencanaan, Survei, dan Desain Jalan Raya Provinsi Henan, dan dibangun oleh Biro Teknik Jalan Raya Provinsi Henan. Jembatan ini dibuka pada tahun 1989.

Jembatan Layang Xuzhuangzi

Jembatan Layang Xuzhuangzi (Gambar 2.5), sebuah persimpangan jalan layang berbentuk lonceng yang panjang di jalan bebas hambatan yang menghubungkan Beijing-Tianjin dan Tangshan, merupakan pintu masuk utama ke kota Tianjin.

Jembatan layang ini memiliki panjang total 4264 m. Struktur atasnya terdiri dari balok T beton prategang yang ditopang sederhana dan balok kotak kontinu multi bentang. Tiang pancang bor berdiameter 1,5 m dan pilar trapesium yang diinvestasikan digunakan untuk struktur bawah.



Gambar 2.5 Jembatan Penyeberangan Xuzhuangzi.

Jembatan ini dirancang oleh Institut Survei dan Desain Jalan Raya pertama, Perusahaan Teknik Kota Tianjin dan dibangun oleh Perusahaan Jalan Raya pertama, Kementerian Komunikasi, Kumagai Co., Ltd, Jepang. Jembatan ini dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1992.

Jembatan Sungai Nu Liuku

Jembatan Sungai Nu Liuku (Gambar 2.6), jembatan beton prategang kontinu terpanjang di Tiongkok saat ini, terletak di Prefektur Otonomi Lisu Sungai Nu, Provinsi Yunnan. Jembatan ini memiliki tiga bentang dengan panjang $(85 + 154 + 85)$ m. Struktur atasnya adalah balok sel tunggal kotak dengan dua kantilever selebar 2,5 m di kedua sisinya. Kedalaman balok pada tumpuan adalah 8,5 m, yaitu $\frac{1}{18}$ dari bentang, sedangkan di tengah bentang hanya 2,8 m, yaitu $\frac{1}{55}$ dari bentang. Seluruh jembatan hanya memiliki dua diafragma pada blok berbentuk palu.



Gambar 2.6 Jembatan Sungai Liuku Nu.

Prategang tiga arah digunakan. Sistem angkur kelompok untai tonase besar diterapkan. Dengan tendon yang dipasang hanya di pelat atas dan bawah, tidak diperlukan tendon yang ditekuk ke atas atau ke bawah dan pelebaran web dihindari, yang membuat konstruksi sangat mudah. Prategang vertikal disediakan oleh tulangan ulir gulungan berkekuatan tinggi Grade 4 dengan diameter 32 mm, yang juga berfungsi sebagai perangkat angkur belakang dari form traveler selama pengecoran kantilever. Untuk struktur bawah, digunakan pilar berongga yang

ditopang oleh pondasi tiang bor pada lapisan batuan. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1993, dirancang oleh Institut Survei dan Desain Jalan Raya Provinsi Yunnan dan dibangun oleh Chongqing Bridge Engineering Co.

Jembatan Sungai Qiantang Kedua

Jembatan Sungai Qiantang kedua, yang terletak di Sibao di Hangzhou, Provinsi Zhejiang, adalah jembatan dwifungsi jalan raya-kereta api yang paralel dan terpisah (Gambar 2.7). Jembatan kereta api selebar 11,4 m membawa dua jalur, dengan panjang total 2861,4 m. Jembatan jalan raya, yang dirancang sesuai standar jalan bebas hambatan, memiliki lebar 20 m dan panjang 1792,8 m, membawa lalu lintas empat jalur. Kedua jembatan utama terbuat dari balok kotak kontinu beton prategang, dan balok kontinu mencapai panjang total 1340 m, yaitu $45 + 65 + 14 \times 80 + 65 + 45$ m, terpanjang di Tiongkok saat ini.



Gambar 2.7 Jembatan Sungai Qiantang Kedua.

Untuk mendapatkan besaran ekspansi 506 mm pada jembatan utama, sambungan ekspansi komposit diterapkan pada jembatan jalan raya, sedangkan balok transisi dan rel ekspansi digunakan untuk jembatan kereta api. Bantalan neoprene pot dirancang khusus untuk mengakomodasi perpindahan besar dan untuk menawarkan resistensi vertikal yang cukup.

Prasegrasi tiga arah diperkenalkan pada balok kotak. Untaian dan sistem jangkar kelompok diadopsi secara longitudinal, dengan gaya regangan maksimum melebihi 2000 kN. Metode pengecoran kantilever digunakan untuk konstruksi utama jembatan, sementara fondasi tiang bor dibangun di bagian sungai dengan gelombang pasang kuat yang jarang terjadi dengan ketinggian 1,96 m dan tekanan mencapai 32 kPa. Jembatan ini dirancang dan dibangun oleh Biro Teknik Jembatan Utama, Kementerian Perkeretaapian. Jembatan ini selesai pada November 1991.

Teknik fondasi jembatan Tiongkok yang disebutkan menggunakan tiang pancang dalam (deep bored pile) dengan kedalaman ekstrem 75 meter untuk mencapai kekuatan setara 3000 ekor gajah (sekitar 60.000 ton beban aksial). Ini umum pada jembatan mega seperti Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, di mana tiang tidak hanya berdiri di permukaan sungai tapi ditanam jauh ke bedrock sungai.

Proses Pembuatan Tiang Beton Tanam 75m

- **Pengeboran Dasar Sungai:** Gunakan mesin bor rotary (large diameter drilling rig) untuk gali hingga 75m (setara gedung 25 lantai), lewati lapisan lumpur/sedimen sungai dengan casing steel sementara guna cegah longsor galian.



Gambar 2.8 Pengeboran 75m

- **Pemasangan Tulangan:** Masukkan tulangan baja bertulang (reinforced cage) diameter besar (1-2m), panjang disambung untuk capai kedalaman desain; anti-korosi dengan epoxy coating karena lingkungan air asin.



Gambar 2.9 Tulang Rangka Baja Raksasa

- **Pencor Beton:** Pump beton bertulang kelas tinggi (K-400+) dari bawah lubang (tremie method) untuk hindari segregasi; curing bawah air hingga kuat tekan 40 MPa+.

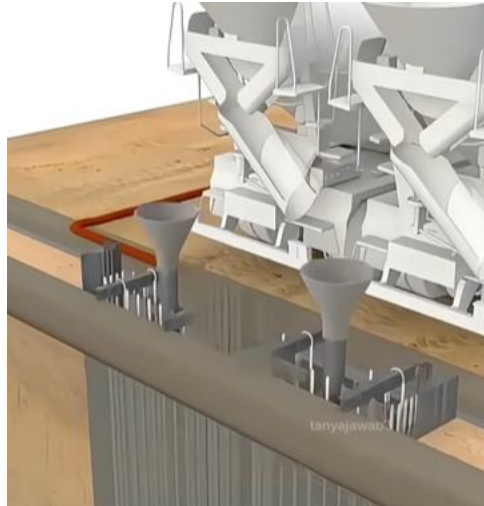
Metode Tremie, standar utama untuk pengecoran beton di bawah air atau lumpur pada fondasi tiang pancang jembatan, seperti pada proyek Tiongkok dengan kedalaman 75m.

Prinsip Kerja Tremie

Metode ini menggunakan pipa tremie (diameter 150-300mm, dilengkapi corong atas) yang dimasukkan hingga dasar lubang bor sungai. Beton dipompa dari bawah ke atas, sehingga air/lumpur terdesak keluar melalui annulus luar pipa tanpa mencampur (segregasi). Jika dicor dari atas, beton hancur karena terkontaminasi air, menurunkan kekuatan hingga 70%.

Alasan Kontinyu 8 Jam Tanpa Henti

Cold Joint: Jeda >10-30 menit (bahkan 1 jam) menyebabkan beton bawah mengeras parsial, lapisan baru tak bond sempurna; kekuatan geser turun 50%, rentan retak di zona necking.



Gambar 2.10 Pengecoran dari Atas



Gambar 2.11 Proses Pengecoran

2.3 JEMBATAN LENGKUNG

1. Deskripsi Umum

Dari semua jenis jembatan di Tiongkok, jembatan lengkung memegang peran utama dalam variasi dan besarnya. Statistik dari semua sumber yang tersedia menunjukkan bahwa hampir 60% jembatan jalan raya adalah jembatan lengkung. Tiongkok terkenal dengan pegunungannya yang memiliki pasokan batu yang melimpah. Batu telah digunakan sebagai bahan konstruksi utama untuk jembatan lengkung. Jembatan Sungai Wuchao di Provinsi



Hunan, misalnya, dengan bentang 120 m adalah jembatan lengkung batu terpanjang di dunia. Namun, jembatan lengkung beton bertulang juga banyak digunakan dalam berbagai bentuk dan gaya.

Sebagian besar lengkung yang digunakan di Tiongkok termasuk dalam kategori berikut: lengkung kotak, lengkung lengkung dua arah, lengkung berusuk, lengkung rangka, dan lengkung rangka kaku. Mayoritas struktur ini adalah jembatan dek dengan jarak bebas yang lebar, dan biaya pembangunannya lebih murah. Lengkung kotak sangat cocok untuk jembatan bentang panjang. Lengkung batu terpanjang yang pernah dibangun di Tiongkok adalah Jembatan Sungai Wu di Beiling, Provinsi Sichuan, yang bentangnya mencapai 120 m. Jembatan Sungai Yangtze Wanxian di Wanxian, Provinsi Sichuan dengan bentang spektakuler 420 m mencetak rekor dunia dalam literatur lengkung beton. Sebuah peningkatan unik dan sukses dari lengkung beton bertulang, struktur lengkung lengkung dua arah, yang berasal dari Wuxi, Provinsi Jiangsu, telah banyak diaplikasikan di seluruh negeri, karena keunggulannya dalam menghemat tenaga kerja dan perancah. Bentang terpanjang dari jenis ini adalah Jembatan Sungai Qianhe di Provinsi Henan dengan bentang 150 m, yang dibangun pada tahun 1969. Lengkungan rangka dengan bobot mati ringan ini berkinerja efektif pada fondasi tanah lunak. Konstruksi ini telah diadopsi untuk meningkatkan aksi komposit antara rusuk dan spandrel. Berdasarkan teori rangka, jembatan lengkung beton bertulang yang ringan dan serasi secara bertahap dikembangkan untuk bentang pendek dan menengah. Melalui prategangan dan dengan penerapan proses pemasangan kantilever, jenis jembatan khusus yang dikenal sebagai "jembatan lengkung rangka komposit kantilever" telah digunakan. Contoh dari jenis ini adalah Jembatan Sungai Jiangjie dengan bentang 330 m di Provinsi Guizhou. Jembatan Sungai Yong, yang terletak di Provinsi Yunnan, adalah jembatan lengkung berusuk setengah tembus dengan bentang 312 m, terpanjang dari jenisnya. Dengan konstruksi spandrel yang disederhanakan, jembatan lengkung rangka kaku memiliki distribusi tegangan yang jauh lebih baik pada rusuk utama melalui penyangga miring, yang mentransfer gaya yang ditimbulkan oleh beban hidup pada posisi kritis ke titik tumpu. Di kota Wuxi, Provinsi Jiangsu, tiga jembatan semacam itu dengan bentang masing-masing 100 m didirikan secara berurutan melintasi Terusan Besar. Banyak jembatan, yang sebagian besar merupakan jembatan lengkung berusuk, telah dibangun baik dengan lengkung terikat maupun dengan balok Langer. Jembatan Wangcang yang baru selesai dibangun di Provinsi Sichuan dan Jembatan Gaoming di Provinsi Guangdong keduanya merupakan jembatan lengkung pipa baja. Yang pertama memiliki lengkung terikat prategang sepanjang 115 m, sedangkan yang kedua memiliki lengkung rusuk tetap setengah tembus sepanjang 110 m. Beberapa jembatan lengkung baja dan jembatan rangka kaku berkaki miring juga telah dibangun.

Dalam pembangunan jembatan lengkung bentang pendek dan menengah, rusuk pracetak digunakan sebagai perancah sementara. Dan terkadang proses pengerasan kantilever digunakan. Jembatan lengkung bentang besar dibagi secara melintang dan memanjang. Dengan rusuk pracetak, jembatan dapat didirikan tanpa perancah, komponen-komponennya dirakit dan dilengkapi dengan beton cor di tempat. Selain itu, pengalaman yang sukses telah

terkumpul dalam pembangunan jembatan lengkung, khususnya pembangunan dengan metode rotasi keseluruhan tanpa perancah atau penyangga tambahan.

Seiring dengan pembangunan jembatan lengkung beton bertulang, penelitian tentang topik-topik berikut telah dilakukan: lokus sumbu lengkung optimal, redistribusi gaya internal antara beton dan tulangan yang disebabkan oleh rangkai beton, pendekatan analitis terhadap lengkung kontinu, dan distribusi beban lateral antara rusuk lengkung.

2. Contoh Jembatan Lengkung Batu Bata

Jembatan Longmen

Jembatan Longmen (Gambar 2.12), 12 km selatan Kota Luoyang, Provinsi Henan, adalah pintu masuk Gua Longmen di atas Sungai Yihe. Jembatan ini merupakan jembatan lengkung batu tiga bentang dengan panjang $60 + 90 + 60$ m, dan lebar 12,6 m. Katenari dengan rasio tinggi-bentang 1:8 dipilih sebagai sumbu lengkung. Cincin lengkung utama memiliki penampang melintang konstan, dengan kedalaman 1,1 m. Dua lengkung batu sepanjang 6 m masing-masing ditempatkan di kedua tepi sungai untuk memungkinkan lalu lintas menyeberang di bawahnya. Jembatan ini dibangun di atas perancah rangka baja yang ditopang oleh pilar sementara. Jembatan ini dirancang dan dibangun oleh Biro Teknik Jalan Raya, Departemen Komunikasi Provinsi Henan dan selesai pada tahun 1917.



Gambar 2.12 Jembatan Longmen.

Jembatan Sungai Wuchao

Jembatan Sungai Wuchao (Gambar 2.13), sebuah struktur di Rute Jalan Raya Kabupaten Fenghuang, Provinsi Hunan, membentang di lembah Sungai Wuchao dengan panjang total 241 m. Untuk menggunakan material lokal, skema jembatan lengkung batu bata diadopsi. Berdasarkan pengalaman yang terakumulasi dalam 20 tahun terakhir pembangunan jembatan lengkung batu bata di Tiongkok, jembatan ini memiliki bentang utama 120 m, yang merupakan rekor dunia untuk jenis jembatan ini.



Gambar 2.13 Jembatan Sungai Wuchao.

Jembatan ini memiliki lebar 8 m. Terdapat sembilan bentang spandrel masing-masing 13 m di atas bentang utama; tiga bentang masing-masing 13 m untuk pendekatan selatan; satu bentang 15 m untuk pendekatan utara. Cincin lengkung utama adalah struktur rusuk lengkung kembar yang terpisah, dihubungkan oleh delapan balok lantai beton bertulang. Catenary dengan $m = 1,543$ dipilih sebagai sumbu lengkung, dengan rasio tinggi terhadap bentang 1:5. Rusuk lengkung memiliki lebar yang bervariasi dan kedalaman seragam 1,6 m. Terbuat dari batu blok dengan kekuatan 100 kPa dan beton pemberat 20 MPa.

Stabilitas lateral jembatan telah diperiksa. Karena volume pasangan bata pada struktur atasnya hanya $1,36 \text{ m}^3/\text{m}^2$, struktur tersebut mencapai efek estetika yang ramping dan anggun. Jembatan ini dirancang dan dibangun oleh Biro Komunikasi Kabupaten Fenghuang, Provinsi Hunan. Selesai dibangun pada tahun 1990.

Jembatan Sungai Dong Heyuan

Jembatan Sungai Dong Heyuan (Gambar 2.14) terletak di Jalan Provinsi dekat Kabupaten Heyuan. Ini adalah jembatan lengkung pasangan bata multi-bentang $6 \times 50 \text{ m}$ dengan lebar $7 + 2 \times 1 \text{ m}$ dan panjang total 420,06 m. Rasio tinggi-bentang cincin lengkung adalah 1:6.



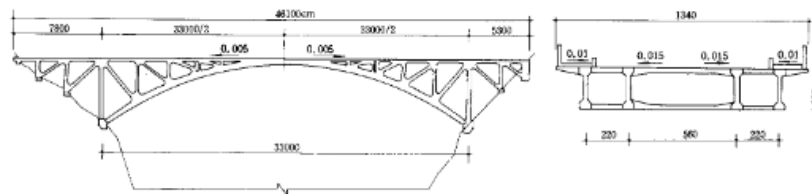
Gambar 2.14 Jembatan Sungai Heyuan Dong.

Metode pemasangan kantilever melintang diterapkan untuk konstruksi cincin lengkungnya. Cincin lengkung dibagi menjadi beberapa rusuk lengkung, dan setiap rusuk dibagi memanjang menjadi beberapa blok beton pracetak berongga. Rusuk samping didirikan dengan cara dipasang melintang dengan dukungan rusuk tengah yang telah didirikan. Jembatan ini dirancang oleh Institut Survei dan Desain Jalan Raya Provinsi Guangdong dan dibangun oleh Departemen Teknik Jalan Raya Provinsi Guangdong. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1972.

3. Contoh Jembatan Beton Prategang, Beton Bertulang, dan Lengkung

Jembatan Sungai Jiangjie

Jembatan Sungai Jiangjie (Gambar 2.15), yang terletak di Kabupaten Weng'an, Provinsi Guizhou, adalah jembatan lengkung rangka beton prategang yang melintasi Lembah Wujiang pada ketinggian 270 m di atas permukaan air normal. Jembatan ini memiliki bentang utama yang memecahkan rekor di Tiongkok, yaitu 330 m. Bentang rangka sampingnya, 30 + 20 m di satu sisi dan 30 + 25 + 20 m di sisi lainnya, disusun di sepanjang lereng gunung. Panjang total jembatan adalah 461 m.



Gambar 2.15 Jembatan Sungai Jiangjie.

Ciri paling mencolok dari jembatan ini adalah penggunaan batolit sebagai bagian bawah bentang samping dan penjangkaran batang prategang pada diagonal tarik di batolit. Dek jembatan memiliki lebar 13,4 m dengan lebar jalur 9 m dan dua jalur pejalan kaki masing-masing 1,5 m. Kedalaman lengkungnya adalah 2,7 m, $L/122$, dan lebarnya adalah 10,56 m, $L/31,3$, dengan rasio tinggi terhadap bentang 1:6. Jembatan ini dibangun dengan perakitan kantilever. Tiang derek dengan kapasitas angkat 1200 kN digunakan. Jembatan ini dirancang oleh Departemen Komunikasi Provinsi Guizhou dan dibangun oleh Perusahaan Teknik Jembatan Provinsi Guizhou.

Jembatan Kanal Besar Jinkui

Jembatan Kanal Besar Jinkui (Gambar 2.16), dengan bentang utama mencapai 100 m, adalah salah satu jembatan lengkung beton prategang berbingkai kaku terpanjang di atas fondasi tanah lunak. Jembatan ini melintasi Kanal Besar di Kabupaten Wuxi, Provinsi Jiangsu. Jembatan ini memiliki rasio tinggi-bentang 1:10. Rusuk lengkungnya bertipe I dengan penampang konstan, sedangkan segmen spandrel padat memiliki penampang variabel. Hanya dua penyangga miring yang



Gambar 2.16 Jembatan Kanal Besar Jinkui.

diatur di kedua sisi untuk mendapatkan efek estetika. Untuk mengurangi beban mati, pelat berusuk digunakan untuk dek. Struktur bawah mencakup abutmen berdinding tipis tipe gabungan, yang dirancang untuk menahan dorongan horizontal dari struktur atas dengan tiang bor dan pelat tahan geser yang bekerja bersama. Jembatan ini dirancang oleh Sekolah Tinggi Konstruksi Perkotaan Shanghai dan dibangun oleh Perusahaan Teknik Jembatan Kabupaten Wuxi. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1980.

Jembatan Taibai

Jembatan Taibai (Gambar 2.17), sebuah jembatan jalan raya lengkung beton bertulang berbingkai kaku dengan bentang 130 m, terletak di daerah pertambangan tembaga Dexi, Provinsi Jiangxi. Jembatan ini dibangun dengan metode ayun. Setelah merakit kerangka batang baja dan mengecor pelat dasar 100 mm pada perancah sederhana, 42 batang tarik 25 mm diregangkan untuk memisahkan struktur dari perancah. Seluruh sistem ayun, dengan berat total 18.100 kN, ditopang oleh engsel bulat beton bertulang pada fondasi abutmen. Jembatan ini dirancang oleh Institut Desain Metalurgi Non-ferrous Nanchang dan dibangun oleh Huachang Engineering Co. Jembatan ini selesai dibangun pada Maret 1993.



Gambar 2.17 Jembatan Taibai.

Jembatan Sungai Yangtze Wanxian

Jembatan yang terletak di Huangniu Kong, 7 km di hulu Wanxian, merupakan struktur penting di jalan raya nasional No. 318 (Gambar 2.18). Jembatan ini memiliki panjang 864,12

m. Lengkungan kotak beton bertulang dengan rasio tinggi terhadap bentang 1:5 menawarkan bentang tunggal sepanjang 420 m. Pipa baja digunakan untuk membentuk kerangka lengkungan penguat sebelum pemasangan lengkungan utama; terdapat 14 bentang beton prategang sepanjang 30 m. Balok T yang ditopang sederhana membentuk struktur spandrel,



Gambar 2.18 Jembatan Sungai Yangtze Wanxian.

sementara 13 bentang balok yang sama digunakan untuk jalan pendekat. Dek jembatan yang menerus memiliki lebar 24 m, menyediakan $2 \times 7,75$ m lajur untuk lalu lintas kendaraan bermotor dan dua trotoar masing-masing selebar 3,0 m. Kemiringan memanjang sebesar 1% diatur dari tengah bentang ke kedua sisi dengan radius kurva vertikal 5000 m, sedangkan kemiringan melintangnya adalah 2%. Jembatan ini dirancang oleh Institut Survei dan Desain Jalan Raya Provinsi Sichuan dan dibangun oleh Perusahaan Teknik Jalan Raya Provinsi Sichuan. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1997.

2.4 JEMBATAN RANGKA KAKU TIPE T DAN KONTINU

1. Deskripsi Umum

Jembatan rangka kaku T beton prategang terutama dikembangkan dan dibangun di Tiongkok pada tahun 1960-an. Struktur jenis ini paling cocok untuk dibangun dengan proses konstruksi kantilever seimbang, baik dengan pengecoran beton segmental kantilever dengan bekisting gantung atau dengan pemasangan kantilever dengan segmen beton pracetak. Contoh pertama pemasangan kantilever adalah Jembatan Sungai Wei (selesai pada tahun 1964) di Wuling, Provinsi Henan, sedangkan Jembatan Sungai Liu (selesai pada tahun 1967) di Liuzhou di Daerah Otonom Guangxi Zhuangzu adalah yang pertama dengan pengecoran kantilever. Jembatan Jalan Raya Sungai Yangtze di Chongqing (selesai pada tahun 1980), dengan bentang utama 174 m, dianggap sebagai yang terbesar dari jenis ini saat ini.

Dari jembatan rangka T kaku beton prategang, dikembangkan berbagai jembatan balok kontinu beton prategang dan jembatan rangka kaku kontinu, yang dapat memiliki bentang lebih panjang dan menawarkan kondisi lalu lintas yang lebih baik. Di antaranya, Jembatan Luoxi di Guangzhou, Provinsi Guangdong (selesai dibangun pada tahun 1988) memiliki bentang utama 180 m. Jembatan Sungai Yangtze Huangshi di Provinsi Hubei memiliki bentang utama 245 m. Dan Jembatan Rangka Kaku Kontinu Humen di Provinsi Guangdong (selesai dibangun

pada tahun 1997), yang memiliki bentang utama 270 m, dianggap sebagai yang terbesar di dunia untuk jenis jembatan ini.

Contoh Jembatan Rangka Kaku Tipe T

Jembatan Jalan Raya Sungai Kuning Qingtongxia

Jembatan Jalan Raya Qingtongxia (Gambar 2.19) terletak 80 km selatan Yinchuan, Ningxia. Panjangnya 743 m dan lebarnya 14 m. Susunan bentangnya adalah $4 \times 30 + 60 + 3 \times 90 + 60 + 6 \times 30 + 20$ m. Balok T beton prategang digunakan untuk tiga bentang utama, sedangkan balok beton prategang yang ditopang sederhana digunakan untuk jalan pendekat. Rangka T merupakan struktur dinding tipis kotak tunggal dua sel, yang dibangun dengan pengecoran kantilever. Struktur bawah terdiri dari pilar kotak berongga dinding tipis, yang bertumpu pada fondasi tiang bor yang ditinggikan, dengan diameter tiang 1,5 m. Jembatan ini dirancang oleh Institut Survei dan Desain Jalan Raya Provinsi Ningxia dan dibangun oleh Biro Teknik Jalan Raya Provinsi Ningxia. Jembatan ini selesai dibangun pada Oktober 1991.



Gambar 2.19 Jembatan Jalan Raya Sungai Kuning Qingtongxia.

Jembatan Huanglingji

Jembatan Huanglingji (Gambar 2.20), yang terletak di Kabupaten Hanyang, Provinsi Hubei, adalah jembatan jalan raya rangka T beton prategang. Jembatan ini memiliki bentang $7 \times 20 + 53 + 90 + 53 + 2 \times 20$ m, dengan panjang total 380,19 m. Bentang utama sepanjang 90 m terdiri dari dua lengan kantilever masing-masing sepanjang 37 m dan bentang gantung sepanjang 16 m.



Gambar 2.20 Jembatan Huanglingji.

Fondasi caisson dan pilar kotak diadopsi untuk struktur bawah. Struktur atasnya terdiri dari dua rangka, dengan pelat beton prategang yang ditopang sederhana di bagian atas, yang berfungsi sebagai penguat atas setelah prategang transversal diperkenalkan. Tendon prategang digunakan untuk elemen tarik, sedangkan tulangan biasa untuk elemen tekan.

Tendon prategang longitudinal disusun dalam saluran terbuka yang memudahkan peregangan. Metode perakitan kantilever digunakan.

Tipe jembatan ini memiliki konfigurasi ramping dan menghemat material konstruksi. Jembatan ini dirancang di Universitas Tongji bekerja sama dengan Biro Teknik Jalan Raya Provinsi Hubei. Unit konstruksinya adalah Perusahaan Jalan dan Jembatan Provinsi Hubei. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1979.

Jembatan Hongtang

Jembatan Hongtang (Gambar 2.21), jembatan jalan raya terpanjang di atas Sungai Min, terletak di sebelah barat Kota Fuzhou, Provinsi Fujian. Panjangnya 1843 m dan lebarnya 12 m. Bentang utamanya adalah rangka T beton prategang yang ditopang oleh korda bawah dengan tiga engsel, yang menggabungkan keunggulan jembatan kabel, jembatan rangka, dan jembatan rangka T.

Jembatan ini dibangun dengan perakitan kantilever menggunakan derek kabel. Di sisi beting, 31 bentang berupa balok beton prategang kontinu yang didirikan dengan mengadopsi perakitan segmen tanpa perekat bentang demi bentang, sebuah teknologi baru yang pertama kali diterapkan dalam konstruksi jembatan di Tiongkok. Bentang di tepi sungai berupa balok beton prategang yang ditopang sederhana.

Struktur bawah jembatan berupa pilar berongga tipe V beton prategang di atas fondasi tiang bor untuk bentang utama dan fondasi tiang bor kolom ganda untuk bentang samping. Jembatan ini dirancang oleh Institut Perencanaan dan Desain Komunikasi Provinsi Fujian dan dibangun oleh Perusahaan Teknik Jalan Raya Kedua Provinsi Fujian. Jembatan ini selesai pada Desember 1990.



Gambar 2.21 Jembatan Hongtang.

2. Contoh Jembatan Rangka Kaku Kontinu

Jembatan Luoxi

Jembatan Luoxi (Gambar 2.22), jembatan rangka kaku kontinu beton prategang terpanjang di Tiongkok, membentang di Sungai Pearl di Guangzhou, Provinsi Guangdong. Jembatan ini memiliki panjang 1916,04 m dan lebar 15,5 m. Jembatan utama memiliki bentang $65 + 125 + 180 + 110$ m, memberikan ruang bebas navigasi sebesar 34×120 m. Balok kotak sel tunggal memiliki kedalaman variabel, 10 m (yaitu, $\frac{1}{8}$ dari bentang utama) di pangkal

dan 3 m (yaitu, $\frac{1}{6}$ dari bentang utama) di tengah bentang. Prategang tiga arah diterapkan. Sistem jangkar kelompok tonase besar dengan gaya prategang 4275 kN untuk setiap kelompok, yang memecahkan rekor di Tiongkok, digunakan secara memanjang, dengan tendon mencapai panjang 190 m.



Gambar 2.22 Jembatan Luoxi.

Struktur atas didirikan dengan pengecoran kantilever. Karena ketebalannya hanya 500 mm, pilar kotak berongga dinding ganda pada bentang utama memiliki kekakuan tahan dorong yang relatif kecil. Pulau-pulau buatan dibangun di sekitar dermaga untuk melindungi dari tabrakan kapal yang lewat. Diameter atas setiap pulau adalah 23 m dan diameter bawah 28 m, dengan tinggi 20 m. Dua jenis bentang, 16 dan 32 m, dipilih untuk jalan pendekat sepanjang 1376,24 m terutama berdasarkan pertimbangan ekonomi, sehingga menghasilkan biaya konstruksi yang relatif rendah. Jembatan ini dirancang oleh Institut Survei dan Desain Jalan Raya Provinsi Guangdong. Jembatan ini dibangun oleh Departemen Teknik Jalan Raya Provinsi Guangdong dan selesai pada Agustus 1988.

Jembatan Sungai Yangtze Huangshi

Jembatan Sungai Yangtze Huangshi (Gambar 2.23) terletak di Huangshi, Provinsi Hubei, dengan panjang total mencapai 2580,08 m. Jembatan utama dirancang dengan rangka kaku balok kotak kontinu beton prategang $162,5 + 3 \times 245 + 162,5$ m. Jembatan ini memiliki lebar 20 m, menyediakan 15 m untuk lalu lintas kendaraan bermotor dan 2,5 m di kedua sisi untuk lalu lintas non-kendaraan bermotor.

Jalan pendekatan di sepanjang tepi Sungai Huangshi memiliki panjang 840,7 m, terdiri dari jembatan menerus dan jembatan balok T yang ditopang sederhana dengan dek menerus, sedangkan jalan pendekatan di sepanjang tepi Sungai Xishui memiliki panjang 679,21 m, berupa jembatan balok T yang ditopang tunggal dengan dek menerus.



Gambar 2.23 Jembatan Sungai Yangtze Huangshi.

Sebuah bendungan baja berdinding ganda berdiameter 28 m dengan fondasi 16 tiang bor berdiameter 3 m digunakan untuk pilar bentang utama, yang memberikan kapasitas yang cukup untuk menahan gaya benturan kapal. Jarak bebas navigasi jembatan adalah 200×24 m, yang memungkinkan navigasi kapal seberat 5000 ton. Jembatan ini dirancang oleh Institut Perencanaan dan Desain Jalan Raya yang berafiliasi dengan Kementerian Komunikasi. Jembatan ini dibangun oleh China Road and Bridge Corporation dan selesai pada tahun 1996.

Jembatan Humen

Jembatan Humen (Gambar 2.24), sebuah jembatan jalan raya utama tambahan di atas Sungai Pearl, terletak di jalan bebas hambatan yang menghubungkan Guangzhou, Zhuhai, dan Shenzhen. Jembatan ini terdiri dari jembatan-jembatan dengan berbagai tipe.



Gambar 2.24 Jembatan Humen (Rangka Kaku Kontinu).

Jembatan rangka kaku ($150 + 270 + 150$ m) dibangun di atas saluran navigasi tambahan, dengan bentang utama mencapai 270 m, sebuah rekor dunia untuk jenis yang sama. Struktur atas jembatan terdiri dari dua jembatan terpisah, masing-masing berupa rangka kaku kontinu beton prategang sel tunggal kotak. Dek selebar 24 m menyediakan 214,25 m untuk lalu lintas kendaraan bermotor. Penggunaan sistem prategang VSL 15,24 mm memungkinkan pelat atas yang lebih tipis dan tanpa pelat bawah pada balok kotak, penampang dinding tipis sel tunggal kotak menawarkan momen inersia per satuan luas yang lebih besar, dan kedalaman balok utama pada tumpuan adalah 14,8 m ($\frac{1}{18}$ dari bentang utama) dan 5 m ($\frac{1}{54}$ dari bentang utama) di tengah bentang. Struktur bawah terdiri dari pilar dinding tipis ganda yang bertumpu pada

fondasi tiang pancang kelompok. Metode pengecoran kantilever simetris digunakan untuk pemasangan struktur atas. Jembatan ini dirancang oleh Institut Perencanaan dan Desain Jalan Raya Guangdong dan dibangun oleh Highway Engineering Construction Ltd, Provinsi Guangdong. Jembatan ini dibuka untuk lalu lintas pada Juli 1997.

2.5 JEMBATAN BAJA

1. Deskripsi Umum

Struktur baja terutama digunakan untuk jembatan kereta api dan jembatan serbaguna kereta api-jalan raya. Pada tahun 1957, di kota Wuhan, sebuah jembatan serbaguna kereta api-jalan raya dibangun di atas Sungai Yangtze, sebuah tonggak sejarah lain dalam sejarah pembangunan jembatan di Tiongkok. Jembatan ini memiliki rangka baja kontinu dengan bentang utama 128 m. Rangka yang dihubungkan dengan paku keling terbuat dari baja kelas No. 3. Poros silinder yang baru dikembangkan dengan diameter 1,55 m awalnya digunakan pada pondasi dalam. (Kemudian pada tahun 1962, fondasi poros silinder 5,8 m diletakkan di Jembatan Ganjiang Selatan di Nanchang, Provinsi Jiangxi.) Pada tahun 1968, jembatan serupa lainnya di atas Sungai Yangtze — Jembatan Sungai Yangtze Nanjing — dibangun. Seluruh proyek, termasuk material, desain, dan pemasangannya, diselesaikan melalui upaya Tiongkok sendiri. Ini adalah jembatan rangka kontinu yang dihubungkan dengan paku keling dengan bentang utama 160 m. Material yang digunakan adalah baja berkualitas tinggi 16 Mn. Dalam konstruksi, fondasi air dalam dikembangkan. Caisson terbuka ditenggelamkan hingga kedalaman 54,87 m, dan poros silinder beton prategang berdiameter 3,6 m diletakkan, sehingga membentuk jenis fondasi gabungan baru. Dan pembersihan bawah air dilakukan pada kedalaman 65 m. Jembatan jalan raya baja terpanjang di Tiongkok adalah Jembatan Sungai Kuning Beige di Provinsi Shandong (1972), dengan bentang utama sepanjang 113 m. Jembatan ini memiliki rangka kontinu yang terdiri dari anggota las yang dihubungkan dengan baut. Fondasinya terdiri dari tiang bor beton berdiameter 1,5 m, yang kedalaman penetrasinya ke dalam tanah mencapai 107 m, tiang terdalam yang pernah dibor di Tiongkok. Struktur baru berupa balok kotak las yang dibaut di lapangan dan dilapisi dengan dek baja ortotropik pertama kali diperkenalkan di Jembatan Jalan Raya Sungai Utara di Mafang, Provinsi Guangdong, yang selesai dibangun pada tahun 1980.

Struktur raksasa dan menarik lainnya yang berdiri di atas Sungai Yangtze adalah Jembatan kereta api-jalan raya Jiujiang yang selesai dibangun pada tahun 1992. Baja 15 MnVN buatan Tiongkok digunakan dan pelat baja las pabrik setebal 56 mm dibaut di lokasi. Bentang utamanya mencapai 216 m. Rangka baja kontinu diperkuat oleh rusuk lengkung pengaku fleksibel. Dalam peletakan fondasi, dibangun bendungan sementara dari lembaran pancang berdinding ganda, di mana tiang bor beton dicor di tempat.

Saat mendirikan balok baja, rangka kabel gantung ganda menggantikan rangka tunggal, yang merupakan inovasi lain. Sejak tahun 1980-an, jembatan balok baja atau balok komposit telah diadopsi dalam pembangunan jembatan kota bentang panjang atau struktur kompleks di Tiongkok. Misalnya, jembatan tersebut diterapkan pada Jembatan Layang Jalan Guangzhong dan Jembatan Layang Jalan Yanan Timur di Shanghai.

2. Contoh Jembatan Baja

Jembatan Sungai Yangtze Nanjing

Jembatan Sungai Yangtze Nanjing (Gambar 2.25) adalah jembatan rangka baja kontinu dua tingkat untuk jalan raya dan kereta api di Nanjing, Provinsi Jiangsu. Di dek atas terdapat empat lajur lalu lintas jalan raya, yang lebarnya 15 m, ditambah dua trotoar dengan lebar masing-masing 2,25 m, dan di dek bawah terdapat dua jalur untuk kereta api. Jembatan utama memiliki panjang 1576 m. Jika memperhitungkan jalan penghubung, panjang jembatan kereta api mencapai 6772 m dan jembatan jalan raya sepanjang 4588 m.



Gambar 2.25 Jembatan Sungai Yangtze Nanjing.

Sepuluh bentang disusun untuk jembatan utama, termasuk bentang samping sepanjang 128 m berupa rangka baja yang ditopang sederhana dan sembilan bentang masing-masing sepanjang 160 m berupa rangka baja kontinu, yang berlanjut setiap tiga bentang. Rangka utama adalah rangka belah ketupat dengan tulangan bawah. Jembatan ini didirikan dengan perakitan kantilever.

Mengingat kondisi geologi yang kompleks di lokasi jembatan, berbagai jenis fondasi digunakan: pondasi beton berat dengan kedalaman penetrasi mencapai 54,87 m untuk area dengan air dangkal dan lapisan penutup yang dalam; pondasi baja tipe apung yang dikombinasikan dengan fondasi kolom pipa digunakan untuk pertama kalinya di lokasi dengan air dalam. Jembatan ini dirancang dan dibangun oleh Biro Teknik Jembatan Utama, Kementerian Perkeretaapian. Jembatan ini selesai pada Desember 1968.

Jembatan Sungai Yangtze Jiujiang

Jembatan Jiujiang (Gambar 2.26), di perbatasan Provinsi Hubei dan Provinsi Jiangxi, adalah jembatan dua tingkat untuk jalan raya dan kereta api, dengan bentang rangka terpanjang, 216 m, di Tiongkok saat ini. Jalan raya empat jalur berada di dek atas, dengan lebar 14 m untuk kendaraan bermotor dan dua trotoar masing-masing 2 m di kedua sisi, sedangkan jalur kereta api ganda berada di dek bawah.

Jembatan utama, yang dibagi menjadi 11 bentang, semuanya terbuat dari baja. Tiga bentang utama (180 + 216 + 180 m) adalah sistem rangka-lengkung gabungan, yang

terdiri dari balok rangka baja kontinu dan lengkungan penguat baja fleksibel. Dua balok rangka baja kontinu masing-masing 3×162 m digunakan untuk bentang samping di tepi utara, sedangkan balok baja kontinu 2×126 m berada di atas tepi selatan.

Rangka utama jembatan ini berbentuk segitiga dengan batang paralel dan anggota penguat di bagian bawah, dengan kedalaman 16 m dan digandakan di bagian penyangga. Lengkungan penguat di atas bentang utama memiliki ketinggian 32 m dan lengkungan penguat di atas bentang samping memiliki ketinggian 24 m. Semua struktur baja diikat dengan baut dan dilas. Baja 15 MnVN yang pertama kali digunakan memiliki kekuatan luluh 420 MPa. Dua lapis penggantung diterapkan untuk merakit balok rangka.

Terdapat berbagai jenis fondasi yang digunakan pada jembatan ini: pondasi beton bertulang melingkar untuk pilar No. 1 di perairan dangkal, penggunaan jaket pelumas bubur tanah liat membuat kedalaman penetrasi mencapai 50 m; pondasi bendungan baja ber dinding ganda dan pondasi tiang bor di perairan dalam dengan kondisi batuan yang menguntungkan. Jembatan ini dirancang dan dibangun oleh Biro Teknik Jembatan Utama, Kementerian Perkeretaapian. Jembatan ini selesai dibangun pada Mei 1992.



Gambar 2.26 Jembatan Sungai Jiujiang Yangtze.

2.6 JEMBATAN KABEL GANTUNG

1. Deskripsi Umum

Jembatan kabel gantung pertama kali diperkenalkan di Tiongkok pada awal tahun 1960-an. Dua jembatan percobaan, Jembatan Xinwu dengan bentang utama 54 m di Shanghai dan Jembatan Tangxi dengan bentang 75,8 m di Yuyang, Provinsi Sichuan — keduanya merupakan jembatan kabel gantung beton bertulang dan selesai dibangun pada tahun 1975. Pada tahun 1977, pembangunan jembatan kabel gantung bentang panjang dimulai. Jembatan Jinan yang melintasi Sungai Kuning dengan bentang utama 220 m selesai dibangun pada tahun 1982. Pada tahun 1980-an, pembangunan jembatan kabel gantung berkembang pesat di wilayah yang luas di Tiongkok. Lebih dari 30 jembatan berbagai jenis dibangun di berbagai provinsi dan kota. Di antara jembatan-jembatan tersebut, Jembatan Sungai Yong di Tianjin memiliki bentang utama 260 m, dan Jembatan Dongying di Provinsi Shandong memiliki bentang 288 m, jembatan kabel baja pertama di Tiongkok. Selain itu, Jembatan Haiying di Guangzhou memiliki dek selebar 35 m, bidang kabel tunggal, dan pilar pylon ber dinding tipis

ganda; Jembatan Jiujiang di Nanhai, Provinsi Guangdong, didirikan dengan derek apung berkapasitas 5000 kN; Jembatan Shimen di Chongqing memiliki susunan bidang kabel tunggal asimetris dan kantilever 230 m yang dicor di tempat; dan Jembatan Sungai Xiang Utara yang tampak menarik di Changsha, Provinsi Hunan, selesai dibangun pada tahun 1990 dengan bekisting bergerak ringan. Semuanya mewakili periode ini dengan fitur masing-masing.

Pada awal tahun 1990-an, dengan selesainya Jembatan Nanpu di Shanghai pada tahun 1991, gelombang baru pembangunan jembatan kabel mulai melonjak di Tiongkok. Saat ini, lebih dari 20 jembatan kabel pancang dengan bentang lebih dari 400 m telah selesai dibangun, dan sejumlah besar jembatan kabel pancang bentang panjang sedang dalam tahap desain dan konstruksi. Yang paling menonjol adalah Jembatan Yangpu dengan bentang utama 602 m, sebuah jembatan kabel pancang dek komposit di Shanghai.

2. Contoh Jembatan Kabel Pancang

Jembatan Kereta Api Sungai Hongshui Laibin

Jembatan Sungai Hongshui Laibin (Gambar 2.27), sebuah struktur sepanjang 398 m di atas Sungai Hongshui, terletak di Jalur Kereta Api Xianggui kedua. Jembatan utama, yang memiliki tiga bentang $48 + 96 + 48$ m, adalah jembatan kereta api kabel pancang beton prategang pertama yang dibangun di Tiongkok, dengan dua pylon dan konfigurasi kabel tipe H. Balok utama, dengan penampang kotak dua sel berdimensi 4,8 m (lebar) 3,2 m (kedalaman), diberi prategang memanjang dengan tendon 245 mm yang memiliki $\sigma_p = 1600\text{MPa}$.

Pilon setinggi 29 m, terhubung secara kaku dengan balok utama oleh balok silang kotak yang kuat. Bantalan neoprene pot digunakan pada jembatan. Tiga kelompok kabel paralel dipasang di kedua sisi setiap pylon, dan setiap kelompok terdiri dari enam bundel untaian baja 705 mm. Untuk menjamin kekuatan lelah yang cukup, angkur komposit beralur kunci dirancang khusus, yang juga memungkinkan penyesuaian dan penggantian kabel.



Gambar 2.27 Jembatan Laibin.

Balok di atas bentang samping dicor di atas perancah, sedangkan bentang tengah dibangun dengan pengecoran kantilever. Selama desain dan konstruksi, studi dan pengujian khusus dilakukan untuk mendapatkan karakteristik struktur di bawah beban kereta api. Jembatan ini

dirancang oleh Akademi Ilmu Perkeretaapian Tiongkok. Jembatan ini dibangun oleh Biro Kereta Api Liuzhou dan selesai pada tahun 1981.

Jembatan Sungai Kuning Dongying

Jembatan Sungai Kuning Dongying (Gambar 2.28), jembatan kabel baja pertama yang dibangun di Tiongkok, terletak di jalur jalan raya di sepanjang pantai utara Provinsi Shandong. Panjang total jembatan adalah 2817,46 m. Jembatan utama, jembatan kabel baja kontinu, memiliki lima bentang dengan panjang $60,5 + 136,5 + 288 + 136,5 + 60,5$ m, sedangkan jalan pendekat sepanjang 2135,46 m terdiri dari 71 bentang balok kotak beton prategang prategang, masing-masing sepanjang 30 m.



Gambar 2.28 Jembatan Sungai Kuning Dongying.

Lebar dek jembatan adalah 19,5 m, di mana 16 m diperuntukkan untuk lalu lintas kendaraan. Rangka kotak baja dengan dek pelat ortotropik membentuk bentang utama jembatan kabel. Jembatan ini didirikan dengan metode perakitan kantilever. Setiap segmen perakitan rata-rata sekitar 12 m dan terdiri dari dua kotak samping, empat dek pelat, dan balok melintang. Pilar tipe H memiliki tinggi 69,7 m. Konfigurasi kabel tipe kipas diadopsi. Sepuluh pasang kabel dipasang di kedua sisi setiap pilar, dengan jarak jangkar 12 m di dek. Setiap kabel terdiri dari kawat baja galvanis 73/127 ϕ 7 dengan selubung yang dipres panas untuk perlindungan. Pondasi tiang bor digunakan pada struktur bawah. Tiang penyangga bertumpu pada kepala tiang pancang terpisah yang ditopang oleh 22 tiang pancang dengan diameter 1,5 m dan panjang 96,5 m.

Jembatan ini dirancang oleh Institut Perencanaan dan Desain Komunikasi Provinsi Shandong. Jembatan ini dibangun oleh Perusahaan Teknik Komunikasi Provinsi Shandong dan selesai pada September 1987.

Jembatan Yangpu

Jembatan Yangpu Shanghai (Gambar 2.29), yang terletak di Distrik Yangpu Shanghai, adalah jembatan penting di distrik perkotaan, yang membentang di Sungai Huangpu dan menghubungkan distrik tua Puxi dengan Zona Pengembangan Pudong. Ini adalah komponen

penting dari Jembatan Layang Lingkar Dalam. Lokasi jembatan berjarak 11 km dari Jembatan Nanpu, jembatan kabel-stayed dengan bentang utama 423 m yang selesai pada tahun 1991.



Gambar 2.29 Jembatan Yangpu Shanghai.

Panjang keseluruhan jembatan adalah 8354 m, termasuk bentang utama, bentang pendekatan, dan bentang jalur pemandu. Lebar jembatan adalah 30,35 m. Bentang utama jembatan ini merupakan struktur komposit baja-beton dengan dua tiang penyangga dan dua jalur kabel. Karena tiang penyangga terhubung secara kaku dengan pilar dan terpisah dari balok utama, struktur atasnya merupakan sistem gantung memanjang, dengan perangkat tahan perpindahan dan anti-gempa yang dipasang melintang.

Tiang penyangga berbentuk berlian setinggi 200 m terbuat dari beton bertulang, bertumpu pada fondasi tiang pipa baja. Pilar kolom yang ditopang oleh tiang beton pracetak telah banyak digunakan pada pilar bantu, pilar jangkar, dan pilar samping. Balok kotak samping baja dan balok melintang baja tipe I yang dikompositkan dengan pelat beton bertulang pracetak membentuk balok utama dan dua bentang samping. Jarak pusat ke pusat antara dua balok kotak samping baja utama adalah 25 m, sedangkan jarak antara balok melintang baja adalah 4,5 m. Untuk bentang transisi, digunakan balok T beton prategang yang ditopang sederhana. Kabel penahan berjumlah 256 dan terdapat 32 pasang di setiap sisi pylon. Panjang

maksimum kabel penahan adalah 330 m, dan 312 ϕ 7 kawat paralel berkekuatan tinggi membentuk penampang maksimum kabel penahan.

Jembatan ini dirancang oleh Institut Desain Teknik Kota Shanghai bekerja sama dengan Universitas Tongji, Institut Desain Konstruksi Perkotaan Shanghai, dan Sekolah Tinggi Konstruksi Perkotaan Shanghai. Pembangunan jembatan dipimpin oleh Markas Besar Konstruksi Teknik Jembatan Huangpujiang Shanghai. Jembatan ini selesai dan dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1993.

Jembatan Jalan Raya Sungai Yangtze Wuhan

Jembatan (Gambar 2.30) adalah struktur sepanjang 4687,73 m di Wuhan, Provinsi Hubei. Jembatan kabel penahan ini terdiri dari balok beton prategang dengan bentang t sepanjang 180 + 400 + 180 m. Jembatan kabel gantung merupakan sistem jembatan gantung, dengan perpindahan memanjang yang ditahan oleh perangkat yang dipasang di bagian persimpangan antara balok dan pylon. Lebar dek jembatan adalah 29,4 m, dengan enam lajur selebar 23 m dan dua jalur pejalan kaki masing-masing selebar 1,75 m.



Gambar 2.30 Jembatan Jalan Raya Sungai Yangtze Wuhan.

Diadopsi penampang terbuka dengan dua kotak samping, yang memiliki kedalaman 3 m dan diperkuat oleh balok melintang setiap 4 m. Pylon beton bertulang tipe H setinggi 94 m, dan mengadopsi konfigurasi multikabel tipe kipas. Terdapat total 392 kabel, yang terbuat dari kawat baja paralel galvanis berdiameter 7 mm dan dilindungi oleh selubung PE yang dipres panas. Gaya kabel maksimum mencapai 5000 kN. Pondasi tiang pancang baja dinding ganda digunakan. Jembatan ini dirancang dan dibangun oleh Biro Teknik Jembatan Utama, Kementerian Perkeretaapian. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1995.

Jembatan Huangshan Danau Taiping

Jembatan (Gambar 2.31) adalah jembatan kabel beton prategang dengan satu pylon dan satu bidang kabel. Jembatan ini memiliki dua bentang masing-masing sepanjang 190 m. Pylonnya setinggi 86,6 m. Konfigurasi kabel tipe kipas dengan jarak kabel 6 m pada girder diadopsi. Empat lajur diatur pada dek, yang lebarnya 18,2 m. Girder utama adalah girder kotak beton prategang tiga sel dengan web miring. Girder ini memiliki kedalaman seragam 3,5 m. Ketebalan pelat atas dan pelat bawah masing-masing adalah 220 dan 200 mm. Prategang tiga arah diterapkan. Jembatan ini dirancang oleh Lin & Li Consultants Shanghai Ltd., dibangun oleh

Biro Teknik Jembatan Utama, Kementerian Perkeretaapian, dan dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1996.



Gambar 2.31 Jembatan Huangshan Danau Taiping.

2.7 JEMBATAN GANTUNG

1. Deskripsi Umum

Pembangunan jembatan gantung modern di Tiongkok dimulai pada tahun 1960-an. Beberapa jembatan gantung fleksibel dengan bentang kurang dari 200 m dibangun di daerah pegunungan di barat daya Tiongkok, Jembatan Chaoyang di Chongqing, Provinsi Sichuan, menjadi yang paling terkenal. Namun, Jembatan Dazi di Tibet yang selesai dibangun pada tahun 1984 memiliki bentang 500 m.

Lonjakan pembangunan teknik transportasi pada tahun 1990-an telah membawa tahap baru jembatan gantung modern. Jembatan Teluk Shantou di Shantou, Provinsi Guangdong, selesai dibangun pada tahun 1995, memiliki balok penguat beton sepanjang 452 m. Jembatan Sungai Mutiara Humen, jembatan gantung balok kotak baja dengan bentang utama 888 m, selesai dibangun pada tahun 1997. Jembatan Sungai Yangtze Jiangying dengan bentang utama 1385 m, saat ini sedang dalam pembangunan.

Contoh Jembatan Gantung

Jembatan Chaoyang

Jembatan Chaoyang (Gambar 2.32), sebuah jembatan jalan raya yang melintasi Sungai Jialin, terletak di Distrik Beipei, Chongqing. Jembatan ini memiliki tiga bentang dengan total panjang 233,2 m. Jembatan gantung dengan rangka ganda bertulang, sepanjang lebih dari 186 m, merupakan bentang utama, dan dua balok lengkung tipis beton bertulang digunakan untuk dua bentang samping masing-masing sepanjang 21,6 m. Dek jembatan memiliki lebar 8,5 m, menyediakan ruang 7 m untuk lalu lintas kendaraan bermotor.



Gambar 2.32 Jembatan Chaoyang.

Terdapat empat kabel secara total dan setiap dua kabel membentuk rantai yang dipasang di kedua sisi. Setiap kabel terbuat dari tali baja 19 $\phi 42$; pipa baja $\phi 42$ dan tali baja $\phi 42$ digunakan sebagai penggantung atas dan penggantung bawah. Balok penguat, dengan kedalaman 2,0 m, adalah kotak baja terbuka tunggal yang dikompositkan dengan pelat dek beton bertulang. Pilar setinggi 63,8 m adalah rangka portal beton bertulang. Sistem jangkar tipe terowongan diadopsi, dan panjang terowongan mencapai 15 m. Pelat jangkar memiliki kedalaman 1,8 m dan ditambatkan pada lapisan batuan.

Jembatan ini dirancang oleh Institut Penelitian Komunikasi Chongqing dan Institut Komunikasi Chongqing, dan dibangun oleh Perusahaan Teknik Jembatan Chongqing. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1969.

Jembatan Dazi

Jembatan Dazi (Gambar 2.33), sebuah jembatan gantung sepanjang 500 m yang melintasi Sungai Lasa, terletak di Dazi, 25 km sebelah timur Lasa, Tibet. Lebarinya 4,5 m, hanya menyediakan satu jalur untuk lalu lintas jalan raya. Kabel utama terbuat dari kawat paralel berdiameter 5 mm dan rasio lendutan terhadap bentangnya adalah 1:5. Balok utama adalah rangka baja las terbuka dengan kedalaman 1,5 m. Dek ortotropik sederhana dibentuk oleh komposisi balok memanjang dan pelat baja. Empat truk masing-masing 200 kN digunakan sebagai beban desain.



Gambar 2.33 Jembatan Dazi.

Jembatan ini dirancang oleh Institut Perencanaan, Survei, dan Desain Jalan Raya Daerah Otonom Tibet dan dibangun oleh Biro Jalan Raya Daerah Otonom Tibet. Jembatan ini selesai dibangun pada Desember 1984.

Jembatan Teluk Shantou

Jembatan Teluk Shantou (Gambar 2.34), sebuah struktur sepanjang 2420 m, melintasi Teluk Shantou di Shantou, Provinsi Grangdong. Jembatan utama adalah jembatan gantung beton prategang, dengan bentang tengah 452 m dan dua bentang samping masing-masing 154 m. Empat bentang balok T beton prategang sepanjang 25 m menghubungkan jembatan utama dengan tepi sungai di kedua sisinya. Lebar jembatan bervariasi dari pendekatan 27,3 m hingga jembatan utama 23,8 m.



Gambar 2.34 Jembatan Teluk Shantou.

Balok penguatnya adalah kotak datar beton prategang dengan tiga sel. Balok ini diberi prategang memanjang oleh tendon di dalam pelat atas dan tendon di luar pelat bawah. Dua balok beton prategang, yang dirancang khusus untuk menghubungkan bentang tengah dan dua bentang samping, memberikan transisi dek yang mulus. Sepasang pilar baja fleksibel dipasang di antara setiap balok dan balok melintang bawah pylon, untuk menahan balok penguat secara elastis dan mempertahankan karakteristik fleksibel struktur.

Tiang-tiang penyangga jembatan merupakan struktur rangka kaku beton bertulang tiga lapis, masing-masing bertumpu pada dua pondasi caisson terpisah yang dihubungkan oleh balok penguat yang kuat di bagian atas. Jarak pusat ke pusat antara dua dudukan kabel pada satu tiang penyangga adalah 25,2 m. Bantalan rol digunakan selama pemasangan kabel, yang kemudian dipasang pada dudukan kabel.

Kabel utama memiliki rasio lendutan terhadap bentang sebesar 1:10. Setiap kabel terdiri dari 110 bundel kawat paralel 9 ϕ . 5 mm, yang membuat diameternya mencapai sekitar 550 hingga 630 mm. Setiap 6 m dipasang gantungan, yang terdiri dari sepasang tali baja ϕ 42. Skema perakitan segmen diadopsi untuk pemasangan balok. Segmen pracetak sepanjang 5,7 m, dengan berat 16.000 kN, dihubungkan dengan balok utama yang telah selesai dibangun dengan sambungan basah.

Jembatan ini dirancang dan dibangun oleh Biro Teknik Jembatan Utama, Kementerian Perkeretaapian. Jembatan ini dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1995.

Jembatan Tsing Ma Hong Kong

Jembatan Tsing Ma (Gambar 2.35), jembatan gantung dwifungsi jalan raya-kereta api di jalan bebas hambatan antara bandara baru dan distrik perkotaan, yang menghubungkan Pulau Tsing Yi dan Pulau Mawan di Hong Kong, adalah jembatan terpanjang di dunia dari jenisnya. Bentang utamanya adalah 1377 m.



Gambar 2.35 Jembatan Tsing Ma Hong Kong.

Desain balok utamanya terutama didasarkan pada pertimbangan stabilitas aerodinamisnya dan akhirnya diadopsi tipe rangka: Balok melintangnya adalah rangka Vierendeel. Seluruh balok memanjang dapat dianggap sebagai struktur komposit. Terdapat enam lajur lalu lintas jalan raya di dek atas dan tiga jalur di dek bawah, yang tengah di dek bawah untuk kereta api sementara yang lain dibuka untuk lalu lintas jalan raya dalam kondisi cuaca buruk. Kabel utama terdiri dari $80 \times 368 + 11 \times 360$ kawat baja, masing-masing kawat memiliki diameter 5,35 mm. Pembangunan jembatan dimulai pada tahun 1992 dan dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1997.

Jembatan Sungai Yangtze Jiangyin

Jembatan Sungai Yangtze Jiangyin (Gambar 2.36) terletak di Sistem Jalan Raya Utama Utara-Selatan yang direncanakan di daerah pesisir antara Jiangyin dan Jinjiang di Provinsi Jiangsu. Ini adalah jembatan gantung besar dengan bentang tengah 1385 m, dan akan menjadi jembatan pertama dengan bentang lebih dari 1000 m yang dirancang dan dibangun oleh insinyur Tiongkok. Panjang totalnya mencapai hampir 3 km. Dek dirancang untuk menampung lalu lintas jalan raya enam jalur, sementara jalur median dan parkir darurat juga dipertimbangkan, dengan dua jalur pejalan kaki selebar 1,5 m di bentang tengah.

Jembatan ini menggunakan rangka kotak baja pipih dengan fairing angin, dengan kedalaman dan lebar masing-masing 3 dan 37,7 m. Dua kabel utama, dengan rasio lendutan terhadap bentang 1:10,5, terdiri dari lima kawat galvanis berkekuatan tinggi, dan akan dipasang dengan metode PWS. Jembatan ini menyediakan ruang bebas navigasi setinggi 50 m. Pilar setinggi 190 m merupakan struktur beton bertulang. Pilar utara, yang terletak di area

perairan dangkal di luar tepi utara, bertumpu pada fondasi tiang pancang yang dibangun dengan metode pulau pasir, sedangkan pilar selatan bertumpu pada lapisan batuan tepi sungai.



Gambar 2.36 Jembatan Sungai Yangtze Jiangyin.

Jangkar selatan bertipe gravitasi yang tertanam di dasar batuan dibandingkan dengan jangkar utara bertipe gravitasi-gesekan di tanah lunak. Jangkar utara berupa caisson beton masif, berukuran 69 x 51 m dalam denah dan 58 m kedalaman. Ini adalah caisson beton terbesar di dunia. Semua jalan pendekat berupa jembatan balok beton prategang. Struktur rangka kaku kontinu beton prategang multi-bentang dipilih untuk bentang sisi utara.

Proyek ini dirancang oleh Institut Perencanaan dan Desain Jalan Raya, Kementerian Komunikasi bekerja sama dengan Institut Desain Komunikasi Provinsi Jiangsu dan Universitas Tongji. Proyek ini dijadwalkan selesai pada tahun 1999.

BAB 3

PRAKTIK DESAIN DI EROPA

3.1 PENDAHULUAN

Eropa adalah salah satu tempat kelahiran desain dan teknologi jembatan, dimulai dengan jembatan batu dan saluran air yang dibangun di bawah Kekaisaran Romawi di seluruh Eropa. Abad Pertengahan juga menghasilkan banyak jembatan inovatif. Peran modern insinyur dalam desain jembatan muncul di Prancis pada abad ke-18.



Gambar 3.1 Jembatan Gard Di Atas Sungai Gardon.

Jembatan pertama yang terbuat dari besi cor dibangun di Inggris pada akhir abad yang sama. Beton prategang lahir di Prancis sebelum menyebar ke seluruh dunia. Konstruksi kantilever dan peluncuran bertahap dek beton dirancang di Jerman, begitu pula jembatan kabel modern. Dek balok kotak yang ramping untuk jembatan gantung bentang panjang lahir di Inggris. Keragaman jembatan di Eropa sangat besar, baik dari segi usia maupun jenisnya. Karya-karya penting dalam sejarah jembatan di Eropa dapat disajikan sebagai berikut.

JEMBATAN	TAHUN	NEGARA	DESAINER	KETERANGAN
Tidak Diketahui	600 SM	Italia	Etruscans	Kemungkinan penggunaan vaults untuk konstruksi jembatan
Gardon River Bridge *	13 SM	Prancis	Romawi	Akuaduk 49 m tinggi, dengan tiga baris lengkungan bertumpuk
Céret Bridge over the River Tech	1339	Prancis	Tidak Diketahui	Jembatan batu (masonry) dengan bentang 42 m
Wettingen Bridge	1764	Swiss	Johann Ulrich Grubenmann	Jembatan kayu terbesar di Eropa dengan bentang 61 m
Coalbrookdale Bridge	1779	Inggris	Abraham Darby III	Jembatan logam pertama: struktur besi cor
Sunderland Bridge	1796	Inggris	Rowland Burdon	Enam lengkungan besi cor, masing-masing terdiri dari 105 segmen

Saint-Antoine Bridge	1823	Swiss	Guillaume Henri Dufour	Jembatan gantung permanen pertama dengan kabel logam di dunia
Britannia Bridge	1850	Inggris	Robert Stephenson	Jembatan tubular pertama, bentang 140 m, dari lembaran besi tempa
Crumlin Viaduct	1857	Inggris	Charles Liddell	Viaduk gelagar rangka logam pertama
Bridge over the River Isar	1857	Jerman	Von Pauli, Gerber, Werder	Gelagar rangka besi yang dilas dan dibaut
Royal Albert Bridge	1859	Inggris	Isambard Kingdom Brunel	Gelagar rangka logam, pertama dari generasi modern jembatan KA
Maria Pia Bridge / S. Douro	1877	Portugal	Gustave Eiffel	Lengkungan bentang 160 m, terbuat dari struktur logam
Antoinette Bridge	1884	Prancis	Paul Séjourné	Puncak dari jembatan batu (masonry)
Firth of Forth Bridge *	1890	Inggris	Sir J. Fowler & Sir B. Baker	Jembatan baja besar pertama di dunia — dua bentang utama 520 m
Alexandre III Bridge *	1900	Prancis	Jean Résal	15 lengkungan sangat ramping dari segmen baja cetak
Salginatobel Bridge	1930	Swiss	Robert Maillart	Lengkungan yang menandai lahirnya gelagar kotak beton
Albert Louppe Bridge *	1930	Prancis	Eugène Freyssinet	Tiga kubah beton bertulang, bentang 188 m — bekisting kayu 170 m
Linz Bridge / S. Danube	1938	Austria	A. Sarlay & R. Riedl	Gelagar las pertama sepanjang 250 m — tiga bentang
Luzancy Bridge	1946	Prancis	Eugène Freyssinet	Jembatan beton prategang tiga arah, dari segmen pracetak
Cologne Deutz Bridge	1948	Jerman	Fritz Leonhardt	Jembatan gelagar kotak komposit baja-beton bentang 184 m
Percha Bridge	1949	Jerman	Dyckerhoff & Widmann	Konstruksi kantilever bentang besar beton bertulang pertama
Donzère Mondragon Bridge	1952	Prancis	Albert Caquot	Jembatan kabel (cable-stayed) pertama — bentang utama 81 m
Düsseldorf Northern Bridge	1957	Jerman	Fritz Leonhardt	Jembatan kabel logam modern pertama
Bendorf Bridge *	1964	Jerman	Ulrich Finsterwalder	Jembatan gelagar kantilever seimbang cor di tempat — bentang 208 m
Choisy Bridge	1965	Prancis	Jean Muller	Beton prategang pracetak pertama dengan sambungan epoksi
First Severn Bridge *	1966	Inggris	William Brown	Studi aerodinamis gelagar di terowongan angin kecepatan tinggi
Weitingen Viaduct	1975	Jerman	Fritz Leonhardt	Rekor dunia bentang baja: bentang sepanjang 263 m



Saint-Nazaire Bridge	1975	Prancis	Jean-Claude Foucriat	Rekor dunia jembatan kabel baja — bentang utama 400 m
Brotonne Bridge	1977	Prancis	Jean Muller	Rekor dunia jembatan kabel beton prategang — bentang 320 m
Kirk Bridge	1980	Kroasia	Ilija Stojadinovic	Rekor dunia — lengkungan beton prategang bentang 390 m
Ganter Bridge	1980	Swiss	Christian Menn	Jembatan kabel bentang 174 m — kabel dilindungi dinding beton
Normandie Bridge *	1995	Prancis	Michel Virlogeux	Rekor dunia — jembatan kabel dengan bentang utama 856 m
Storebaelt Bridge *	1998	Denmark	Cowi Consult	Jembatan gantung dengan bentang tengah sepanjang 1624 m
Tagus Bridge	1998	Portugal	Campeon Bernard	Jembatan 13 km termasuk jembatan kabel bentang utama 420 m
Gibraltar Straight Bridge	Proyek	Spanyol	Belum diketahui	Jembatan gantung: estimasi bentang utama 3,5 - 5 km
Messina Straight Bridge	Proyek	Italia	Belum diketahui	Jembatan gantung: estimasi bentang utama 3,3 km

* Deskripsi singkat tentang jembatan-jembatan ini akan diberikan kemudian beserta fotonya.

Jika kita hanya dapat memilih delapan jembatan yang luar biasa, berikut daftarnya:

1. *Jembatan Sungai Gardon (13 SM)* — Jembatan Sungai Gardon, juga disebut Jembatan Gard, terletak di Prancis, adalah saluran air yang terdiri dari tiga baris lengkungan bertumpuk, terbuat dari blok-blok batu besar yang disusun tanpa mortar. Panjang totalnya adalah 360 m, dan lengkungan utamanya memiliki panjang 23 m di antara sumbu pilar. Jembatan ini sepenuhnya melambangkan keahlian teknik Romawi dari tahun 50 SM hingga 50 M (Gambar 3.1). Dibangun dengan batu-batu persegi panjang besar, jembatan ini mengejutkan dengan kesederhanaan arsitekturnya. Pengulangan, simetri, proporsi, dan kekokohan mencapai kesempurnaan, meskipun kesan keseluruhannya adalah karya ini kurang bersemangat.
2. *Jembatan Firth of Forth (1890)* — Jembatan Kereta Api Forth, yang terletak di Skotlandia, Britania Raya, adalah jembatan baja besar pertama yang dibangun di dunia. Bentang balok raksasanya sepanjang 521 m, lebih panjang dari panjang bentang utama jembatan gantung terbesar pada masanya, menjadikan jembatan ini sebagai pencapaian teknis (Gambar 3.2). Secara keseluruhan, 11.000 ton baja dan 6.500.000 paku keling diperlukan untuk membangun struktur ini yang menelan biaya lebih dari 3 juta pound sterling. Struktur yang sangat kuat dan kaku, terbuat dari tabung yang dipaku dan dihubungkan pada simpul, terdiri dari tiga elemen miring yang seimbang dan dua bentang gantung, dengan dua bentang pendekatan yang dibentuk dari balok rangka. Panjang total jembatan adalah 2,5 km.



Gambar 3.2 Jembatan Firth Of Forth.

3. *Jembatan Alexandre III (1900)* — Jembatan jalan raya di atas Sungai Seine di Paris, Prancis, yang dirancang oleh Jean Résal, bertumpu pada 15 lengkungan paralel yang terbuat dari segmen baja cetakan yang dirakit dengan baut. Lengkungan-lengkungan ini agak dangkal, rasionya adalah $\frac{1}{17}$, sehingga diperlukan abutmen yang masif. Sungai Seine dilintasi oleh bentang tunggal sepanjang 107 m; dek jembatan memiliki lebar 40 m (Gambar 3.3).



Gambar 3.3 Jembatan Alexandre Iii.

4. *Jembatan Albert Louppe (1930)* — Jembatan ini, yang terletak di Prancis, merupakan ekspresi terindah dari karya beton bertulang Eugène Freyssinet. Tiga lengkungan, masing-masing membentang sepanjang 186,40 m (Gambar 3.4) melintasi Sungai Elorn dengan biaya setengah dari biaya jembatan logam konvensional. Lengkungan-lengkungan tersebut adalah balok kotak tiga sel, dengan lebar rata-rata 9,50 m dan kedalaman 5,00 m. Dek jembatan ini berupa balok dengan rangka beton bertulang. Bekisting yang digunakan untuk pengecoran tiga kubah, yang dipindahkan dengan dua tongkang beton bertulang berukuran 35 x 8 m, merupakan struktur kayu terbesar dan paling berani dalam sejarah konstruksi dengan kubah raksasa selebar 10 m yang membentang sepanjang 170 m.



Gambar 3.4 Jembatan Albert Louppe.

5. *Jembatan Bendorf (1964)* — Dibangun pada tahun 1964 di dekat Koblenz, Jerman, struktur ini memiliki panjang total 1029,7 m dengan bentang navigasi sepanjang 208 m di atas Sungai Rhine. Dirancang oleh Ulrich Finsterwalder, jembatan ini merupakan contoh awal dan luar biasa dari jembatan kantilever seimbang cor di tempat (Gambar 3.5). Struktur sungai utama tujuh bentang yang kontinu terdiri dari dua balok kotak sel tunggal independen. Lebar total penampang jembatan adalah 30,86 m. Kedalaman balok adalah 10,45 m di pilar dan 4,4 m di tengah bentang. Bentang navigasi utama memiliki engsel di tengah bentang, dan struktur atas dicor secara monolitik dengan pilar utama. Struktur ini diberi prategang tiga dimensi.



Gambar 3.5 Jembatan Bendorf.

6. *Jembatan Severn Pertama (1966)* — Jembatan gantung di atas Sungai Severn, Wales, Britania Raya, yang dirancang dan dibangun pada tahun 1966, menandai perubahan yang berbeda dalam bentuk jembatan gantung selama paruh kedua abad ke-20 (Gambar 3.6). William Brown, insinyur desain utama, menciptakan bentang tengah sepanjang 988 m. Deknya adalah balok kotak yang kaku dan ramping. Stabilitas aerodinamisnya ditingkatkan di terowongan angin, dengan uji angin kecepatan tinggi di bawah aliran udara terkompresi. Sejak pembukaan jembatan, banyak perancang tertarik dari jauh pada bentuknya, yang baru pada saat itu, tetapi sekarang dianggap klasik.



Gambar 3.6 Jembatan Severn Pertama.

7. *Jembatan Normandie (1995)* — Jembatan kabel-stayed, yang melintasi Sungai Seine di dekat muaranya, di Prancis utara, memiliki panjang 2140 m. Bentang utamanya yang sepanjang 856 m merupakan rekor dunia untuk jenis struktur ini, meskipun jembatan ini pada prinsipnya tidak membawa banyak inovasi dibandingkan dengan jembatan Brotonne yang menjadi asalnya (Gambar 3.7). Bagian tengah bentang utama sepanjang 624 m terbuat dari baja, sedangkan bagian dek lainnya terbuat dari beton prategang. Dek dirancang khusus untuk mengurangi dampak angin yang bertiup dengan kecepatan 180 km/jam. Pilar berbentuk Y terbalik memiliki tinggi 200 m. Tiang-tiang penyangga, yang panjangnya bervariasi dari 100 hingga 440 m, telah menjadi subjek studi aerodinamika tingkat lanjut karena mewakili 60% dari area jembatan yang terkena angin.



Gambar 3.7 Jembatan Normandie.

8. *Penyeberangan Selat Great Belt (1998)* — Jembatan gantung Storebælt, yang terletak di Denmark, memiliki bentang tengah sepanjang 1624 m. Ini adalah bagian utama dari kompleks yang terdiri dari jembatan gabungan jalan raya dan kereta api sepanjang 6,6 km, terowongan tabung ganda sepanjang 8 km, dan jembatan jalan raya sepanjang 6,8 km (Gambar 3.8). Sambungan ini merupakan bagian dari salah satu proyek paling ambisius di Eropa, untuk menghubungkan Swedia dan kepulauan Denmark ke Benua Eropa melalui serangkaian jembatan, viaduk, dan terowongan, yang dapat mengakomodasi lalu lintas jalan raya dan kereta api.



Gambar 3.8 Jembatan Storebælt.

3.2. DESAIN JEMBATAN

1. Filosofi

Untuk memungkinkan pengaturan pasar internal tunggal, undang-undang Eropa mencakup dua jenis arahan:

1. Arahan “produk,” yang tujuannya adalah untuk menyatukan aturan nasional guna menghilangkan hambatan dalam pergerakan produk bebas.
2. Arahan “pasar publik,” yang bertujuan untuk menghindari perilaku nasional atau bahkan lokal dari pemilik atau pembeli publik.

Berdasarkan pengalaman, satu-satunya cara untuk memastikan bahwa penawaran berdasarkan metode perhitungan yang dipraktikkan di negara lain tidak ditolak adalah dengan memiliki seperangkat aturan perhitungan yang umum. Aturan-aturan ini tidak selalu memerlukan nilai numerik yang sama.

Oleh karena itu, Komisi Komunitas Eropa telah berupaya untuk menyusun serangkaian aturan teknis yang harmonis terkait dengan desain bangunan dan teknik sipil, untuk mengusulkan alternatif bagi berbagai kode dan standar yang digunakan oleh masing-masing negara anggota, dan akhirnya untuk menggantikannya. Aturan teknis ini umumnya disebut sebagai "Eurocode Struktural."

Eurocode, aturan umum untuk desain dan justifikasi struktural, adalah hasil dari harmonisasi opini teknis dan kompetensi. Norma-norma ini memiliki signifikansi komersial yang besar. Persiapan Eurocode dimulai pada tahun 1976, dan draf dari empat Eurocode pertama diusulkan selama tahun 1980-an. Pada tahun 1990, Komunitas Ekonomi Eropa menugaskan Komite Normalisasi Eropa untuk mengembangkan, menerbitkan, dan memelihara Eurocode.

Secara umum, Eurocode mengacu pada Dokumen Interpretatif. Ini adalah teks yang sangat umum yang membuat pernyataan teknis. Di negara-negara Komunitas Eropa, verifikasi ketahanan mekanik dan stabilitas umumnya didasarkan pada pertimbangan kondisi batas dan format faktor keamanan parsial, tanpa mengesampingkan kemungkinan mendefinisikan tingkat keamanan menggunakan metode lain, misalnya, teori probabilitas keandalan.

Dari dokumen yang menjadi pendahulunya, Eurocode membahas proyek dan mode pelaksanaan pekerjaan. Data numerik yang disertakan diberikan untuk bidang aplikasi yang

terdefinisi dengan baik. Oleh karena itu, Eurocode bukan hanya kerangka kerja yang mendefinisikan filosofi yang memungkinkan berbagai negara untuk menyesuaikan konten secara individual, tetapi juga sesuatu yang benar-benar unik di bidang normalisasi. Norma mendefinisikan toleransi, material, produk, kinerja. Eurocode sama sekali berbeda karena berupaya menjadi norma desain, yaitu norma yang mendefinisikan apa yang benar dan apa yang salah. Itu adalah usaha unik dari jenisnya.

Transformasi Eurocode menjadi norma Eropa dimulai pada tahun 1996 dan akan menjadi kenyataan pada tahun 2001 untuk yang pertama. Selama sekitar 5 tahun sebelum adopsi akhirnya, baik Eurocode maupun norma nasional akan tetap berlaku.

Tentu saja, terdapat kebutuhan akan keterkaitan antara Eurocode dan berbagai peraturan nasional. Nilai numerik variabel dan kemungkinan mendefinisikan spesifikasi tertentu secara berbeda memungkinkan adaptasi ini. Mulai tahun 2007 hingga 2008, norma nasional akan secara bertahap ditarik. Mengenai jembatan, mulai tahun 2008 hingga 2009 hanya Eurocode yang akan berlaku.

Teks-teks ini sepenuhnya koheren, sehingga memungkinkan untuk beralih dari satu ke yang lain dengan kombinasi yang koheren. Koherensi ini meluas ke bidang bangunan di mana kepentingannya lebih signifikan. Selain itu, teks-teks ini hanyalah bagian dari keseluruhan normatif yang luas yang mengacu pada norma konstruksi, norma produk, dan norma pengujian.

Eurocode ditulis oleh tim yang terdiri dari para ahli dari negara-negara utama Uni Eropa, yang bekerja tanpa pamrih demi kepentingan generasi mendatang. Karena alasan ini, Eurocode merupakan buah dari sintesis berbagai budaya teknis. Eurocode merupakan satu kesatuan yang terbuka. Teks-teks tersebut ditulis dengan pembedaan yang jelas antara prinsip-prinsip yang tidak dapat diganggu gugat dan aturan aplikasi. Aturan aplikasi dapat dimodulasi dalam batas-batas tertentu, sehingga tidak menghambat inovasi, dan muncul sebagai faktor kemajuan yang menentukan. Dengan membentuk aturan main yang efisien, Eurocode memungkinkan terciptanya persaingan berdasarkan alasan yang cerdas dan tidak dapat disangkal.

Eurocode yang berlaku untuk desain jembatan adalah sebagai berikut.

Eurocode 1:	Dasar desain dan aksi pada struktur
Bagian 2	Beban: beban mati, air, salju, suhu, angin, api, dan lainnya.
Bagian 3	Beban lalu lintas pada jembatan
Eurocode 2:	Desain struktur beton
Bagian 2:	Jembatan beton
Eurocode 3:	Desain struktur baja
Eurocode 4:	Desain dan dimensi struktur komposit baja-beton
Eurocode 5:	Desain pekerjaan kayu
Eurocode 6:	Desain struktur pasangan bata
Eurocode 7:	Desain geoteknik
Eurocode 8:	Desain struktur tahan gempa
Eurocode 9:	Desain struktur paduan aluminium

2. Beban

Filosofi Eurocode 1 adalah untuk mewujudkan penyatuan sebagian dari konsep yang digunakan untuk menentukan nilai representatif dari aksi. Dengan cara ini, sebagian besar aksi alam didasarkan pada periode ulang 50 tahun. Tindakan-tindakan ini umumnya dikalikan dengan faktor ULS (ultimate limit state) yang diambil sebagai 1,5. Periode ulang bergantung pada durasi referensi tindakan dan probabilitas melebihinya. Periode ulang ini umumnya 50 tahun untuk bangunan dan 100 tahun untuk jembatan. Definisi ini cukup konvensional. Saat ini, Eurocode merupakan norma sementara. Akibatnya, lampiran Eurocode 1 memungkinkan penggunaan rumus yang memungkinkan perubahan periode ulang. Mengenai beban lalu lintas, Eurocode merupakan kode yang sepenuhnya baru, tidak terinspirasi oleh kode lain. Artinya, penyusunannya dilakukan seilmiah mungkin.

Basis data beban lalu lintas terdiri dari rekaman lalu lintas nyata. Bagian jalan raya yang dipilih mewakili lalu lintas Eropa dalam hal distribusi kendaraan. Pada data nyata ini, sejumlah proses matematika direalisasikan. Tetapi tidak semua data diproses dengan matematika dan probabilitas. Beberapa situasi memungkinkan definisi beban karakteristik. Ini adalah situasi hambatan, situasi kemacetan di satu jalur dengan lalu lintas padat tetapi lancar di jalur lain, dan sebagainya, yaitu, situasi realistis.

Semua elemen ini diekstrapolasi secara matematis sehingga sesuai dengan periode ulang 1000 tahun, yaitu, probabilitas 10% untuk melebihi tingkat tertentu dalam 100 tahun. Kurva distribusi gandar mengarah pada pertimbangan faktor ULS 1,35, bukan 1,5 untuk gandar berat. Mengenai kendaraan abnormal, Eurocode memberikan katalog yang dapat dipilih oleh klien. Eurocode juga mendefinisikan bagaimana kendaraan abnormal dapat menggunakan jembatan sementara lalu lintas tetap berada di jalur lain, yang cukup realistis.

Mengenai beban pada jembatan kereta api, model UIC direvisi dalam Eurocode. Beban yang sesuai dengan kereta penumpang berkecepatan tinggi juga diperkenalkan dalam Eurocode. Tidak ada beban militer dalam Eurocode. Jenis beban ini adalah tanggung jawab klien. Mengenai angin, kecepatan yang diukur pada ketinggian 10 m di atas tanah yang diratakan selama 10 menit, dengan periode ulang 50 tahun, diperhitungkan. Periode pengembalian ini tampaknya agak konvensional, karena kecepatan ini diubah menjadi tekanan oleh model dan faktor-faktor itu sendiri termasuk margin keamanan.

Studi yang paling rinci menunjukkan bahwa periode ulang nilai tekanan angin karakteristik cukup terkandung dalam interval antara 100 dan 200 tahun. Setelah dikalikan dengan faktor ULS 1,5, nilai karakteristik ini memang memiliki periode ulang yang terkandung dalam interval antara 1000 dan 10.000 tahun. Kode tersebut juga mendefinisikan koefisien amplifikasi dinamis, yang bergantung pada karakteristik geometris elemen, periode getarannya, dan redaman struktural dan aerodinamisnya.

Mengenai beban salju, Eurocode memberikan peta untuk setiap negara Eropa. Peta-peta ini menunjukkan kedalaman salju karakteristik di tanah yang sesuai dengan periode ulang 50 tahun. Kemudian kedalaman salju ini diubah menjadi berat salju dengan mempertimbangkan detail tambahan.

Hal yang sama berlaku untuk suhu. Nilai karakteristiknya adalah suhu yang sesuai dengan periode ulang 50 tahun. Nilai karakteristik untuk beban gempa, dalam Eurocode 8, juga sesuai dengan probabilitas 10% untuk melebihi beban dalam 50 tahun.

Oleh karena itu, filosofinya cukup jelas terkait dengan beban. Beberapa orang ingin menuju penyatuan yang lebih besar, tetapi tampaknya sulit untuk diwujudkan. Meskipun demikian, definisi beban merupakan keseluruhan yang komprehensif dan homogen yang pada akhirnya memuaskan.

3.3 JEMBATAN BENTANG PENDEK DAN MENENGAH

1. Jembatan Baja dan Komposit

a) Jembatan Sungai Oise

Di Prancis, jalan raya penghubung Paris-Boulogne melintasi Sungai Oise di atas jembatan komposit beton baja tunggal (Gambar 3.9). Jembatan ini memiliki panjang 219 m dengan bentang utama sepanjang 105 m di atas sungai dan dua bentang samping simetris. Fondasi jembatan terdiri dari 14 dinding diafragma sepanjang 2,80 m, dengan kedalaman sekitar 30 m, dengan ketebalan yang bervariasi. Desain pilar dan abutmen standar.

Dek jembatan merupakan struktur komposit, dengan kedalaman 2,50 m di tengah bentang dan pada abutmen, dan 4,50 m di pilar. Balok utama baja berjarak 11,40 m. Lebar flensa bawah dan atas balok utama konstan, tetapi ketebalannya bervariasi secara kontinu dari 40 hingga 140 mm. Pelat beton memiliki lebar efektif 18 m. Pelat ini diberi prategang melintang dengan kabel 4T15, enam unit setiap 2,50 m.



Gambar 3.9 Jembatan Oise.

Struktur baja dek dirakit dalam dua bagian, satu di belakang setiap abutmen di tanggul. Setiap bagian diluncurkan di atas sungai dan dilas bersama di tengah bentang. Pelat dek beton dicor menggunakan dua bekisting bergerak. Area tengah bentang dicor terlebih dahulu, diikuti oleh area pilar. Sejak tahun 1994, jalan penghubung ini memiliki dua lajur lalu lintas, yang akan berlanjut hingga pembangunan jembatan paralel kedua yang direncanakan.

b) Jembatan Sungai Roize

Jembatan Roize dilalui oleh salah satu jalan penghubung jalan raya A49 Prancis. Dek jembatan ini dirancang oleh Jean Muller (Gambar 3.10). Pilihan ini merupakan hasil dari 10 tahun studi tentang pengurangan berat dek jembatan bentang menengah. Di sini,

penghematan berat diperoleh dengan mengganti inti beton prategang dengan rangka baja yang membentuk dua bidang triangulasi (tipe Warren) yang miring dan berpotongan di garis tengah flensa bawah, dengan menggunakan flensa bawah yang dibentuk dari tabung baja heksagonal yang dilas, dan dengan mengurangi ketebalan pelat atas dengan menggunakan beton berkekuatan tinggi yang diberi prategang oleh untai yang diikat. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1990.

Memang, inovasi struktur ini terletak pada desain modularnya. Struktur baja terdiri dari tetrahedron yang dibangun di pabrik, dibawa ke lokasi, dan kemudian dirakit. Pelat beton juga terdiri dari elemen pracetak yang dirakit di tempat.

Pelat dek diberi prategang memanjang dengan tendon eksternal untuk menjaga gaya tekan normal pada pelat atas di atas pilar, dan untuk mengurangi luas baja di bagian bawah. Pelat ini juga diberi prategang melintang.



Gambar 3.10 Jembatan Roize.

Struktur Jembatan Roize memiliki beberapa keunggulan: bobot ringan, konsumsi baja struktural rendah, fabrikasi industri, kemudahan dan kecepatan perakitan, kemampuan beradaptasi dengan profil geometris yang kompleks, daya tahan. Karakteristik dasarnya adalah panjang = 112 m; lebar = 12,20 m; ketebalan setara beton B80 = 0,18 m; baja struktural = 112kg/m² dek; prategang – prategang = 17kg/m³; prategang transversal = 15kg/m³; prategang longitudinal = 32kg/m³.

c) Jembatan Saint Pierre

Jembatan ini terletak di pusat bersejarah Toulouse di barat daya Prancis. Arsitekturnya terinspirasi oleh jembatan rangka logam abad ke-19 dengan kedalaman variabel, sementara menggunakan teknologi modern untuk pelaksanaannya (Gambar 3.11). Jembatan ini merupakan struktur komposit baja-beton sepanjang 240 m, sebagian prategang. Panjang bentangnya adalah sebagai berikut: 36,88 m, 3 × 55,00 m, 36,88 m.

Jembatan ini didirikan di atas tiang pancang cetakan berdiameter 1,80 m. Setiap pasang tiang pancang dihubungkan oleh balok kotak beton bertulang. Struktur ini menopang pilar yang

terdiri dari dua elemen. Dek jembatan bertumpu pada bantalan elastomer miring sehingga jembatan berfungsi sebagai rangka dalam arah memanjang.

Struktur komposit memanjang terdiri dari dua balok rangka logam lateral. Balok-balok dengan kedalaman bervariasi ini berjarak 11,4 m satu sama lain dengan balok melintang yang menghubungkannya setiap 14 m. Baik balok utama maupun balok melintang dihubungkan ke pelat beton. Pelat beton setebal 25 cm di bagian tengah yang menopang jalur lalu lintas. Di bagian tepi, pelat beton memiliki ketebalan 27 cm dan ditempatkan 75 cm lebih tinggi dari bagian tengah, untuk mengakomodasi trotoar.



Gambar 3.11 Jembatan Saint Pierre.

Struktur ini diberi prategang memanjang oleh kabel 4K15 yang terdiri dari untaian yang dilumasi dan terletak di dekat tepi pelat. Secara melintang, struktur ini diberi prategang oleh untaian tunggal yang dilumasi dan terletak di bagian tengah pelat. Struktur dek baja didirikan dari pilar yang menopang tiang pancang sementara. Pelat beton dicor di tempat dengan bekisting yang ditopang oleh struktur baja yang kini mandiri. Jembatan ini terintegrasi sempurna ke dalam lingkungan monumen bersejarahnya, dan dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1987.

2. Jembatan Beton

a) Jembatan Selat: Jembatan Layang di atas Jalan Raya A1

Desain segmental baru untuk jembatan layang dikembangkan di Prancis pada tahun 1992 hingga 1993, dengan mempertimbangkan perlunya standarisasi. Jembatan-jembatan tersebut memiliki dek yang terdiri dari satu pelat melintang yang ditopang oleh dua rusuk lateral memanjang (Gambar 3.12). Konsep ini, yang cocok untuk berbagai jenis jembatan dengan panjang bentang antara 15 dan 35 m, mencakup ide-ide berikut:

- Dek dibangun menggunakan segmen pracetak, dicetak sesuai cetakan, dan diberi prategang memanjang.
- Segmen diberi prategang melintang menggunakan monostrand yang dilumasi.
- Rusuk lateral digunakan sebagai penghalang.



Gambar 3.12 Jembatan Layang Jalan Raya A1.

Keuntungan utama dari konsep jenis ini adalah kemungkinan membangun jalan layang tanpa mengganggu lalu lintas dengan sangat cepat, dengan bentang yang lebih panjang, sehingga jumlah bentang lebih sedikit (dua bentang, bukan empat bentang), dibandingkan dengan jalan layang konvensional pracetak biasa.

b) Jembatan Segmental yang Ditempatkan Secara Bertahap

Jembatan Fontenoy

Jembatan Fontenoy memiliki panjang 621 m dan dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1979. Jembatan ini memungkinkan penyeberangan Sungai Moselle di timur laut Prancis dengan bentang sebagai berikut: 43,12 m, $10 \times 52,70$ m, 50,80 m. Pondasinya berupa pondasi beton agregat kasar atau tiang bor, tergantung pada lapisan tanah penahan beban. Pada pilar tipikal, bantalan yang digunakan adalah tipe elastomer, dan pada abutmen, bantalan yang digunakan adalah tipe geser. Deknya adalah balok kotak beton yang ditopang sederhana, lebar 10,50 m, dengan dua web miring dan kedalaman konstan 2,75 m.



Gambar 3.13 Jembatan Fontenoy.

Metode penempatan progresif digunakan untuk membangun dek, dimulai dari salah satu ujung struktur, berlanjut terus menerus ke ujung lainnya (Gambar 3.13). Susunan penahan sementara yang dapat dipindahkan digunakan untuk membatasi tegangan kantilever selama

konstruksi. Menara sementara terletak di atas pilar sebelumnya. Semua penahan kontinu melalui menara dan ditambatkan pada struktur dek yang telah selesai sebelumnya.

Segmen pracetak diangkut melalui bagian dek yang telah selesai ke ujung bentang kantilever yang sedang dibangun, di mana segmen tersebut diposisikan oleh derek putar yang bergerak dari satu segmen ke segmen berikutnya. Balok kotak diberi prategang memanjang oleh unit 12T13 internal.

Jembatan Les Neyrolles

Jembatan Nantua dan Neyrolles memungkinkan jalan raya A40 untuk menghubungkan Jenewa, Swiss, ke Macon, Prancis. Jembatan layang Neyrolles memiliki panjang total 985,5 m yang terbagi menjadi tiga struktur independen. Jembatan ini terdiri dari 20 bentang dengan panjang sekitar 51 m, kecuali satu bentang sepanjang 62 m yang melintasi aliran sungai “Bief du Mont” (Gambar 3.14). Dek jembatan berupa balok kotak beton dengan lebar sekitar 11 m. Balok kotak tersebut dibangun dari segmen pracetak yang dicetak sesuai ukuran.



Gambar 3.14 Jembatan Layang Neyrolles Kedua.

Pemasangan dilakukan dengan metode kantilever asimetris menggunakan penahan sementara dan derek putar yang dipasang di dek. Tiang penyangga memastikan stabilitas melalui penahan belakang yang dibawa oleh bentang sebelumnya. Tiang penyangga memungkinkan pemasangan bentang hingga 60 m. Bentang samping di abutmen tidak dapat dipasang dengan cara yang sama karena tidak adanya bentang penyeimbang. Akibatnya, segmen bentang ini ditempatkan pada perancah dan akhirnya setiap bentang diberi prategang dan diletakkan pada penyangga definitifnya menggunakan dongkrak. Bentang terbesar (62 m) dipasang dengan kedua metode konstruksi yang disebutkan.

Fase pertama terdiri dari perakitan dengan menggunakan struktur kantilever asimetris yang ditopang oleh penyangga hingga penyangga terakhir tersedia. Fase kedua terdiri dari pemasangan segmen pracetak terakhir di atas perancah. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1995.

c) Jembatan yang Dibangun Secara Rotasi

Jembatan Gilly

Jembatan Gilly, dekat Albertville di Prancis, terdiri dari dua dek tegak lurus dan dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1991. Jembatan utama melintasi sungai Isère dan jalan akses ke resor lokasi Olimpiade (Gambar 3.15).

Ini adalah jembatan kabel beton prategang, dengan dua bentang, sepanjang 102 m di atas sungai dan 60 m di atas jalan. Pilar berbentuk A dimiringkan ke belakang 20° . Penopang jembatan lainnya adalah abutmen standar di tepi kiri dan abutmen masif yang bertindak sebagai penyeimbang di tepi kanan. Secara melintang, dek beton 12 m terdiri dari dua rusuk lateral sedalam 1,90 m dan lebar 1,10 m dengan balok melintang yang berjarak 3,0 m yang menopang pelat atas.

Pylon berbentuk A dibangun secara vertikal. Pylon tersebut dimiringkan ke posisi akhirnya dengan berputar di sekitar dua engsel sementara yang terletak di dasarnya, pylon tersebut ditahan oleh dua kabel 19T15. Setelah dimiringkan, engsel dikunci dengan prategangan dan pengecoran beton. Dek jembatan utama sepanjang 162 m dicor di atas cetakan umum yang terletak di tepi kanan, sejajar dengan sungai. Setelah pengecoran dan penegangan kabel penahan, dek ditempatkan pada posisi pastinya dengan rotasi 90° di sekitar sumbu vertikal. Selama rotasi dek, seluruh struktur seberat 6000 t ditopang pada tiga titik. Reaksi vertikal diukur terus menerus oleh peralatan elektronik untuk memeriksa efek dinamis.



Gambar 3.15 Jembatan Gilly.

Penggunaan metode konstruksi asli telah memungkinkan realisasi jembatan berkualitas tinggi baik secara struktural maupun estetika.

Jembatan Ben Ahin

Jembatan Ben Ahin yang melintasi sungai Meuse di Belgia adalah jembatan asimetris kabel penahan, dengan panjang keseluruhan 341 m (Gambar 3.16), dibangun pada tahun 1988. Dek jembatan beton bertulang, sebagian prategang, digantung oleh 40 kabel yang ditambatkan ke struktur menara tunggal. Bentang tengahnya sepanjang 168 m. Balok dek memiliki penampang kotak, lebar 21,80 m pada serat atas dan 8,70 m pada serat bawah. Kedalaman, konstan di sepanjang jembatan, adalah 2,90 m.



Gambar 3.16 Jembatan Ben Ahin.



Gambar 3.17 Jembatan Ben Ahin Saat Berputar.

Seluruh struktur yang terdiri dari struktur menara, kabel penahan, dan balok dek dibangun di tepi kiri sungai. Setelah selesai, struktur tersebut diputar 70° relatif terhadap sumbu menara, untuk memutar jembatan ke posisi akhirnya (Gambar 3.17). Dua pasang dongkrak, masing-masing dengan gaya 500 ton, terletak di bawah pylon yang meluncur di atas Teflon, dan empat dongkrak masing-masing dengan gaya 300 ton, terletak 45 m dari pylon di bawah rangka logam penstabil, memungkinkan rotasi struktur seberat 16.000 ton.

Metode ini, yang sudah digunakan di Prancis untuk jembatan yang lebih ringan, dalam kasus ini dirancang untuk mencetak rekor dunia.

3. Jembatan Rangka

a) Jembatan Sylans

Jembatan Sylans membentang melalui kompleks Pegunungan Jura Prancis. Di lokasi ini, di sepanjang tepi danau, kesulitan terletak pada ketidakpastian tanah pondasi karena rute tersebut membentang di sepanjang lereng yang sangat curam yang lapisan permukaan setebal 30 m terdiri dari material yang terkikis dan retak dengan stabilitas yang sangat diragukan. Jembatan layang sepanjang 1266 m ini terdiri dari 21 bentang sepanjang 60 m, masing-masing terdiri dari dua dek paralel identik yang berjarak 15 m dan bertingkat dengan ketinggian 10 m (Gambar 3.18), dan dibangun pada tahun 1988. Deknya adalah struktur rangka ruang beton prategang selebar 10,75 m dan sedalam 4,17 m di sepanjang jembatan. Struktur ini terdiri dari 586 segmen pracetak, yaitu 14 segmen untuk setiap bentang jembatan layang.

Setiap segmen beton tipikal terdiri dari dua pelat yang dihubungkan oleh empat bidang miring dari penyangga beton prategang diagonal dengan penampang 20 cm^2 , yang dirakit berpasangan dalam bentuk X. Untuk setiap segmen, penyangga diagonal dicetak terlebih dahulu secara terpisah dengan beton berkekuatan silinder 65 MPa, dan dirakit dengan rangka penguat segmen. Kemudian, pelat atas dan bawah dicor dengan beton 50 MPa. Terakhir, diagonal diberi prategang.



Gambar 3.18 Jembatan Sylans — Dua Dek Paralel.

Segmen dek dipasang dengan metode kantilever menggunakan balok peluncur sepanjang 135 m. Prategang dek terdiri dari empat kelompok:

- Kabel kantilever yang terletak di bawah pelat atas: 4 unit T15;
- Kabel miring kuat dari pilar untuk menahan gaya geser: 12 unit T15;
- Kabel kontinuitas horizontal di atas dan di dalam pelat bawah: 12 unit T15;
- Kabel horizontal di pelat atas dan bawah: masing-masing, unit 4T15 dan 7T15.

Dek bertumpu pada pilarnya melalui bantalan elastomer bertulang.

Pilar ditopang oleh caisson setinggi 6 hingga 35 m dengan diameter 4 m. Tutup beton melingkar dicor di atas caisson dan ditambatkan ke batuan dasar yang keras. Secara keseluruhan, dibutuhkan 3,5 tahun untuk membangun jembatan ini yang dirancang dengan tujuan mencapai keringanan maksimum yang mungkin.

b) Jembatan Boulonnais

Tiga Jembatan Layang Boulonnais terletak di jalan raya A16 yang menghubungkan Inggris Raya ke wilayah perkotaan Paris, Prancis, melalui Terowongan Channel, dan selesai dibangun pada tahun 1998. Karakteristiknya adalah sebagai berikut:

Nama	Panjang, m	Distribusi Bentang (Span)	Tinggi di atas Dasar Lembah, m
Quéhen	474	$44.50 + 5 \times 77.00 + 44.50$	30
Herquelingue	259	$52.50 + 2 \times 77.00 + 52.50$	25
Echinghen	1300	$44.50 + 3 \times 77.00 + 93.50$ $5 \times 110.00 + 93.50 + 3 \times 77.00 + 44.50$	75



Gambar 3.19 Jembatan Boulonnais — Transparansi Pilar.

Fondasi terdiri dari dinding diafragma hingga kedalaman 42 m. Pilar tipikal didasarkan pada empat dinding diafragma, sedangkan pilar tertinggi didirikan di atas delapan dinding diafragma. Dinding diafragma ini dibuat menggunakan lumpur pengeboran. Jumlahnya adalah 3800 m dinding diafragma, sepertiganya digali dengan mata bor; 10.000 m³ beton; 870 ton baja tulangan.

Setiap pilar terdiri dari dua poros ramping, berbentuk berlian. Ini dihubungkan di bagian atas oleh penutup pilar yang estetik, di mana dek ditopang (Gambar 3.19). Celah antara dua poros pilar meningkatkan transparansi jembatan yang diciptakan oleh rangka pada tingkat dek. Empat poros pilar tertinggi dihubungkan di bagian bawahnya oleh dinding melintang untuk meningkatkan stabilitas tekuk. Dek jembatan merupakan struktur komposit yang terbuat dari segmen-segmen cor yang dirakit dengan metode kantilever. Ketiga jembatan tersebut dibentuk oleh 524 segmen. Struktur dek terdiri dari dua pelat beton prategang, yang disambung oleh empat bidang baja berbentuk V yang miring. Enam bidang miring meningkatkan perilaku transversal dek di dekat penyangga jembatan.

Pelat atas setebal 23 cm diperkuat oleh empat rusuk memanjang sedalam 70 cm yang terletak di bidang diagonal. Pelat atas diberi prategang secara transversal. Pelat bawah setebal 27 cm diperkuat oleh rusuk memanjang dan oleh dua balok transversal per segmen.

Dek dibangun dengan metode kantilever menggunakan gantry peluncuran sepanjang 132 m dengan berat 500 ton. Segmen, dengan berat minimal 125 ton, ditempatkan secara simetris berpasangan. Ketidakseimbangan antara kedua kantilever selama pemasangan tidak pernah melebihi 20 ton.

Jembatan Echinghen terletak di lokasi yang sangat berangin, beberapa kilometer dari pantai Selat Inggris. Hembusan angin melebihi 57 km/jam selama 103 hari dalam setahun, dan 100 km/jam selama 3 hari dalam setahun. Perhitungan khusus proyek yang memperhitungkan angin turbulen dikembangkan untuk mempelajari fase konstruksi jembatan. Perhitungan ini menyebabkan penerapan kinematika konstruksi kantilever yang sangat ketat. Selain itu, layar penahan angin dirancang untuk sisi dek yang menghadap angin dalam kondisi angin dominan untuk menghindari pembatasan lalu lintas yang sangat ketat.

3.4. JEMBATAN BENTANG PANJANG

1. Jembatan Balok

a) Jembatan Dole

Jembatan Dole, yang selesai dibangun pada tahun 1995, melintasi Sungai Doubs di Prancis, memiliki panjang 496 m. Jembatan ini merupakan balok kotak tujuh bentang kontinu dengan kedalaman yang bervariasi. Bentang tipikalnya sepanjang 80 m (Gambar 3.20). Dek jembatan didirikan dengan metode kantilever seimbang menggunakan bekisting bergerak.

Dek jembatan merupakan struktur komposit, lebar 14,5 m, dengan dua pelat beton dan dua web baja bergelombang. Web tersebut dilas ke pelat penghubung yang dipasang ke pelat atas dan bawah dengan sudut penghubung. Segmen pilar dan abutmen merupakan segmen beton murni.



Gambar 3.20 Jembatan Dole.

Dek jembatan diberi prategang memanjang oleh tiga jenis tendon:

- Tendon kantilever, ditambatkan pada fillet pelat atas: tendon 12T15;
- Tendon kontinuitas, terletak di pelat bawah di area tengah setiap bentang: tendon 12T15;
- Prategang eksternal, ditegangkan setelah penyelesaian dek, dengan tata letak trapesium. Teknologi yang digunakan memungkinkan pelepasan dan penggantian tendon apa pun.

Jembatan Dole adalah jembatan keempat dengan web baja bergelombang yang didirikan di Prancis.

b) Jembatan Nantua

Jembatan Layang Nantua dan Neyrolles memungkinkan jalan raya A40 menghubungkan Jenewa, Swiss, ke Macon, Prancis. Jembatan layang Nantua memiliki panjang 1003 m, dibagi menjadi 10 bentang. Jembatan ini dibangun pada tahun 1986. Ketinggiannya di atas tanah bervariasi dari 10 hingga 86 m (Gambar 3.21).

Ujung barat jembatan layang adalah bentang sepanjang 124 m yang ditopang di dalam terowongan yang digali melalui tebing. Untuk menyeimbangkan bentang ini, penyeimbang beton harus dibangun di dalam tebing di perpanjangan terowongan. Penyeimbang tersebut bergerak pada bantalan geser dengan ukuran yang tidak biasa. Bentang yang relatif besar (sekitar 100 m) memerlukan balok kotak beton dengan kedalaman variabel.



Gambar 3.21 Jembatan Layang Nantua.

Prinsip konstruksi untuk dek adalah segmen yang dicor di tempat secara simetris pada peralatan bergerak. Dek selebar 11,65 m, untuk bagian jalan raya dua arah pertama, diberi prategang memanjang oleh kabel yang terletak di dalam beton.

Berbagai metode pondasi digunakan, yang diperlukan karena perbedaan daya dukung tanah.

2. Jembatan Lengkung

a) Jembatan Kirk

Jembatan lengkung beton ini dirancang untuk menyediakan penghubung antara Benua Eropa dan Pulau Kirk (bekas Yugoslavia). Kedua lengkungan memiliki bentang masing-masing 244 dan 390 m (Gambar 3.22). Bentang terbesar merupakan rekor dunia dalam kategorinya. Lengkungan balok kotak masing-masing berukuran 8m(lebar), 4m(tinggi) dan 13m (lebar) × 6,50(tinggi).

Konstruksi dilakukan dalam dua fase: Pada fase pertama, lengkungan balok kotak, yang merupakan bagian tengah jembatan, dibuat dengan menggunakan segmen pracetak di darat. Perakitan dilakukan dengan cara kantilever dari kedua tepi sungai menggunakan gantry bergerak (yang ditopang oleh bagian lengkungan yang sudah dibangun) dan penyangga

sementara. Penggunaan beton pracetak menghasilkan kualitas beton yang lebih baik, toleransi fabrikasi yang lebih presisi, dan mengurangi waktu konstruksi. Batu kunci lengkungan juga ditempatkan menggunakan gantry bergerak.



Gambar 3.22 Jembatan Kirk.

Penutupan kedua setengah lengkungan dikendalikan dengan menggunakan dongkrak hidrolik. Fase konstruksi kedua terdiri dari penempatan bagian lateral jembatan, yang terdiri dari balok-balok besar yang terhubung ke lengkungan tengah. Pengecoran beton di tempat pada sambungan antara segmen pracetak dan prategang vertikal dan transversal memastikan integritas monolitik struktur.

b) Jembatan La Roche Bernard

Jembatan La Roche Bernard, yang selesai dibangun pada tahun 1996, memiliki panjang 376 m dan lebar 20,80 m. Jembatan ini melintasi Sungai Vilaine di Brittany, Prancis, dengan lengkungan sepanjang 201 m dan bentang pendekatan kecil (Gambar 3.23).

Dek jembatan merupakan struktur komposit yang terdiri dari balok kotak baja, sedalam 1,67 m dengan bentuk trapesium, yang ditutupi oleh pelat beton prategang tipis setebal 23 cm. Jembatan ini ditopang oleh empat pilar yang didirikan di tanah dan enam pilar kecil yang dipasang pada lengkungan. Pilar-pilar tersebut berjarak antara 32 dan 36 m. Seperti banyak dek komposit lainnya, balok kotak diluncurkan menggunakan alat peluncur (panjang 20 m); pelat dicor setelahnya. Lengkungan beton memiliki lebar 8 m dengan tinggi yang bervariasi dari 3,50 m di pangkal hingga 2,90 m di puncak.

Untuk pemasangan, proses kantilever seimbang diterapkan dengan menggunakan bekisting bergerak. Selain itu, tiga penyangga sementara dengan dongkrak 500 ton dan dua pylon sementara digunakan secara berurutan. Penyangga sementara ditempatkan di bawah segmen S3 (ketiga), S5, atau S15, dan pylon sementara ditempatkan di tepi sungai atau di atas segmen S15.

Kecuali untuk segmen S0 (segmen tumpuan) hingga S6 yang menggunakan penyangga sementara, semua segmen lainnya dipasang dengan menggunakan pylon sementara dan penahan sementara (unit 11T15 dan 13T15). Segmen S7 hingga S13 dipasang dengan menggunakan penahan yang dipasang pada pylon di tepi sungai dan penyangga sementara di

bawah S5. Segmen lainnya S17 hingga 27 dipasang dengan menggunakan penahan yang dipasang pada pylon utama dan dengan menggunakan penyangga di bawah segmen S5 dan S15. Pylon utama ditempatkan pada segmen S15 dan ditambatkan pada segmen yang telah dipasang sebelumnya.



Gambar 3.23 Jembatan La Roche Bernard.

Sementara jumlah penyangga yang dipasang pada pylon utama meningkat selama pemasangan, jumlah penyangga pada pylon lainnya menurun. Akibatnya, ketika segmen S20 ditopang oleh penyangga sementara yang dipasang pada pylon utama, semua penyangga pada pylon lainnya telah dilepas.

c) Jembatan Millau

Untuk memungkinkan jalan raya A75, di Prancis, menghubungkan dua dataran tinggi yang dipisahkan oleh Lembah Tarn, lima penyeberangan berbeda dirancang. Salah satu proposal untuk melintasi lembah sedalam 300 m dan selebar 2500 m dikembangkan oleh JMI dan terdiri dari lengkungan besar dan dua jembatan layang pendekatan. Dua jenis struktur dirancang untuk dek: skema dasar didasarkan pada balok kotak beton, sedangkan proyek alternatif didasarkan pada balok kotak komposit baja-beton. Banyak fitur yang sama untuk kedua desain tersebut, itulah sebabnya hanya proyek dasar yang dijelaskan di bawah ini:

Penyeberangan dibagi menjadi tiga jembatan layang:

- Jembatan layang pendekatan utara: panjang 486,50 m, dengan empat bentang antara 66,50 dan 168 m;
- Jembatan layang utama: satu lengkungan membentang 602 m di atas sungai (Gambar 3.24);
- Jembatan layang pendekatan selatan: panjang 1445,5 m, dengan delapan bentang 168 m dan satu bentang yang lebih pendek 101,50 m.

Jalan raya selebar 24 m ditopang oleh balok kotak beton selebar 8 m yang kedalamannya bervariasi dari 4 m di tengah bentang hingga 10 m di pilar, kecuali di bagian tengah lengkungan di mana kedalamannya konstan dan sama dengan 4 m. Secara melintang, kedua kantilever

selebar 8 m ditopang oleh penyangga, dengan jarak 3,50 m. Web balok kotak vertikal dan setebal 500 mm. Ketebalan pelat bawah berkurang dari 600 mm di pilar menjadi 300 mm di tengah bentang.



Gambar 3.24 Jembatan Millau.

Untuk viaduk pendekatan dan bentang pertama pada lengkungan, metode kantilever seimbang menggunakan bekisting bergerak diterapkan. Dua keluarga PT digunakan: PT internal yang terbagi dalam unit kantilever atau kontinuitas dan PT eksternal untuk unit kontinuitas umum.

Karena panjang jembatan ini yang sangat besar, sambungan ekspansi ditempatkan di tengah bentang antara P12 dan P13, sekitar 1500 m dari abutmen utara. Sambungan ini dilengkapi dengan dua balok baja memanjang yang ditopang sederhana di kedua sisi sambungan, yang memungkinkan transfer sebagian momen lentur dan transfer gaya geser sambil mengurangi defleksi.

3. Jembatan Rangka

Jembatan Bras de la Plaine

Jembatan masa depan, yang terletak di Pulau La Réunion, di Samudra Hindia (Prancis), akan membentang di atas lembah Bras de la Plaine yang memiliki lereng yang sangat miring (80°) dan mencapai kedalaman 110 m.

Dek rangka komposit prategang bentang tunggal, sepanjang 270 m, memiliki skema statis yang inovatif: dua kantilever ditahan di abutmen penyeimbang dan dihubungkan di tengah bentang oleh engsel (Gambar 3.25). Struktur dek, sedalam 17 m di dekat abutmen dan 4 m di tengah bentang, terdiri dari dua lempengan beton yang dihubungkan oleh dua bidang rangka miring.



Gambar 3.25 Jembatan Bras De La Plaine.

Pelat beton atas 60 MPa (silinder) memiliki lebar 12 m. Pelat beton bawah 60 MPa (silinder) memiliki profil parabola dengan ketebalan dan lebar yang bervariasi. Setiap panel rangka terdiri dari diagonal baja melingkar yang terhubung langsung ke pelat beton.

Di tengah bentang, empat balok memungkinkan transmisi gaya geser vertikal dan horizontal serta momen lentur horizontal. Sistem prategang terdiri dari tendon internal yang hanya terletak di pelat atas. Pemasangan dek akan dimulai pada akhir tahun 1999 menggunakan metode pemasangan kantilever standar.

4. Jembatan Kabel-Tahan

a) Jembatan Theodor-Heuss

Jembatan ini, juga disebut “Jembatan Utara”, termasuk dalam keluarga tiga struktur baja di Sungai Rhine di Düsseldorf, Jerman. Jembatan Utara adalah yang pertama dari dua jembatan tersebut, dibangun pada tahun 1957, dan termasuk dalam generasi pertama jembatan kabel-tahan.

Jenis jembatan ini dirancang untuk memungkinkan penyeberangan bentang besar tanpa penyangga tanah perantara menggunakan kabel untuk menopang dek secara elastis dalam konstruksi (Gambar 3.26). Dek baja memiliki lebar 26,60 m dan panjang 476 m yang dibagi menjadi dua bentang pendekatan sepanjang 108 m dan bentang utama sepanjang 260 m. Di tepi sungai yang tergenang, jembatan pendekatan lima bentang memperpanjang jembatan kabel-tahan. Keempat pylon tersebut memiliki tinggi 41 m, ramping (panjang 1,90 m vs. lebar 1,55 m) dan berjarak 17,60 m.

Bentang utama ditopang oleh empat pasang tiga kabel yang dipasang pada pylon. Ketiga kabel tersebut sejajar, disusun seperti harpa dalam satu bidang vertikal dan ditambatkan di setiap tepi dek dengan jarak 36 m. Karena jarak ini, dek harus kaku, sehingga kedalamannya 3,14 m. Kedalaman ini diperpanjang lebih jauh ke jembatan pendekatan.



Gambar 3.26 Jembatan Theodor Heuss.

Mengenai pemasangannya, ini adalah salah satu kali pertama metode kantilever seimbang diterapkan. Segmen kantilever pertama sepanjang 36 m dipasang dengan dek yang ditopang secara elastis dengan satu pasang penahan. Segmen kedua dan lainnya dipasang di tengah bentang.

b) Jembatan Saint Nazaire

Jembatan St. Nazaire di dekat muara Sungai Loire di Prancis, memiliki panjang sekitar 3350 m (Gambar 3.27). Jembatan ini terdiri dari bagian tengah, jembatan baja kabel-stayed sepanjang 720 m, dan dua viaduk pendekatan yang masing-masing terdiri dari 22 dan 30 bentang yang terbuat dari balok beton pracetak, dengan setiap bentang sepanjang 50 m. Jembatan kabel-stayed memiliki bentang tengah sepanjang 404 m dan dua bentang lateral sepanjang 158 m. Jembatan ini terdiri dari balok kotak baja, dengan lebar 15 m. Pembangunan jembatan kabel-stayed, yang selesai pada tahun 1975, dilakukan dalam tiga fase.



Gambar 3.27 Jembatan Saint Nazaire.

1. Fase pertama terdiri dari pembangunan bentang samping. Balok kotak baja dirakit di pabrik menjadi potongan-potongan sepanjang 96 m. Kemudian dua segmen masing-masing sepanjang 96 m dirakit di lokasi dengan sambungan las dan diangkut oleh dua tongkang untuk akhirnya diangkat ke posisi akhirnya.
2. Pada fase kedua, segmen-segmen yang membentuk pylon dirakit di dek jembatan. Kemudian pylon diangkat dengan rotasi untuk mencapai posisi akhirnya.
3. Fase ketiga terdiri dari mendirikan bentang tengah sebagai dua kantilever sepanjang 197,20 m dengan sambungan penutup di tengah bentang. Segmen-segmen tersebut diangkat dari tongkang dengan sistem balok dan derek.

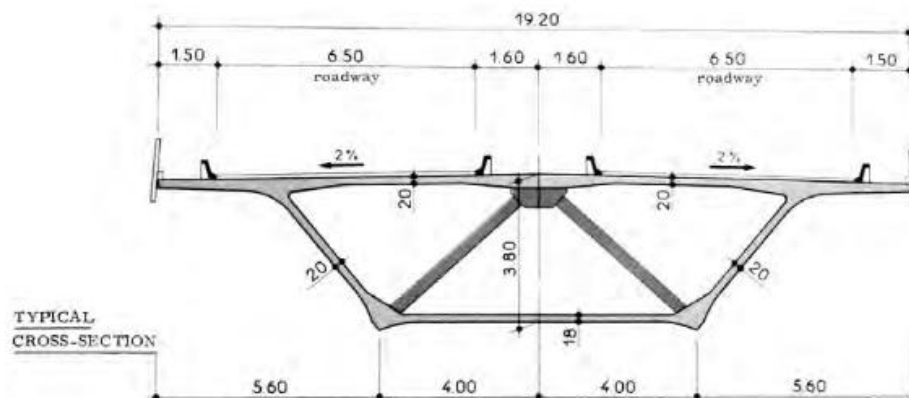
c. Jembatan Brotonne

Jembatan Brotonne dirancang untuk menyeberangi Sungai Seine di hilir Rouen, Prancis (Gambar 3.28). Jembatan ini dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1977. Jembatan ini terdiri dari dua viaduk pendekatan dan struktur kabel pancang dengan bentang tengah sepanjang 320 m. Dek jembatan terdiri dari balok kotak beton prategang dengan kedalaman 3,97 m dan lebar 19,20 m (Gambar 3.29). Kabel pancang dan pylon (Gambar 3.30) ditempatkan dalam satu bidang sepanjang sumbu longitudinal jembatan. Pendekatan dan jembatan utama dibangun dengan cara yang sama. Dalam kedua kasus, konstruksi kantilever digunakan dengan sukses. Panjang segmennya adalah 3 m.

Segmen-segmen tersebut dicor di tempat kecuali untuk web yang dicetak pracetak dan diberi prategang. Pemasangan dek-balok terdiri dari memperpanjang cetakan pelat bawah dari bekisting bergerak yang dibawa oleh segmen yang telah selesai sebelumnya, kemudian menempatkan web pracetak yang membentuk bentuk dasar dan bertindak sebagai panduan untuk bekisting bergerak yang tersisa. Web tersebut diangkut dan diangkat oleh derek menara. Mengenai jembatan utama, tali penahan dikencangkan setiap dua segmen dan ditambahkan pada sumbu pelat atas. Untuk setiap segmen, disediakan dua penguat internal miring untuk mentransfer beban vertikal yang dihasilkan oleh tali penahan. Penguat ini diberi prategang.



Gambar 3.28 Jembatan Brotonne.



Gambar 3.29 Jembatan Brotonne — Penampang Melintang Tipikal.



Gambar 3.30 Jembatan Brotonne — Penguatan Dasar Pylon.

d. Jembatan Normandie

Sejak tahun 1994, Jembatan Normandie memungkinkan jalan raya A29 untuk melintasi Sungai Seine di dekat muaranya di Prancis utara (lihat Gambar 3.7). Ini adalah jembatan kabel pancang, sepanjang 2141 m dengan bentang sebagai berikut:

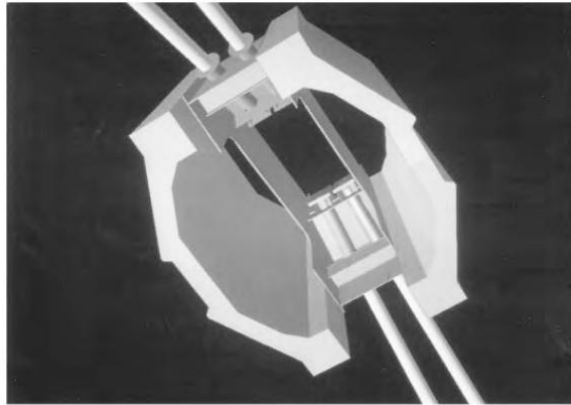
$$27.75 \text{ m} + 32.50 \text{ m} + 9 \times 43.50 \text{ m} + 96.0 \text{ m} + 856 \text{ m} \\ (\text{bentang jembatan kabel terpanjang di dunia}) + 96.00 \text{ m} + 14 \times 43.50 \text{ m} + 32.50 \text{ m}$$

Bentang tengah terdiri dari tiga bagian: bagian beton prategang sepanjang 116 m, bagian baja sepanjang 624 m, dan bagian beton prategang sepanjang 116 m. Penampang dek dirancang untuk mengurangi gaya angin pada jembatan dan memberikan kekakuan torsi yang tinggi. Pada saat yang sama, bentuknya disesuaikan untuk konstruksi baja dan beton. Lebarnya 22,30 m dan kedalamannya 3,0 m. Dek beton adalah balok kotak tiga sel dengan dua web vertikal dan dua web lateral miring. Dek baja adalah balok kotak ortotropik yang dibentuk oleh selubung luar, diperkuat oleh diafragma dan oleh stringer trapesium.

Pylon beton berbentuk A diperpanjang oleh bagian vertikal tempat penahan ditambahkan (Gambar 3.31). Tiga metode konstruksi berbeda digunakan untuk pembangunan Jembatan Normandie:

1. Bentang pendekatan (pendekatan selatan 460 m, pendekatan utara 650 m) dipasang dengan metode peluncuran bertahap dari tanggul, menggunakan ujung peluncuran.
2. Di kedua sisi pylon setinggi 200 m, struktur atas dibangun dengan metode kantilever seimbang kabel-stayed dengan segmen yang dicor di tempat dalam bekisting bergerak. Dari kantilever sepanjang 90 m, bentang samping sepanjang 96 m disambungkan ke bentang yang diluncurkan secara bertahap. Kemudian konstruksi dek beton diselesaikan dengan tambahan 20 m kantilever kabel-stayed yang dicor di tempat di sisi sungai.

3. Bagian tengah bentang utama didirikan dengan segmen baja sepanjang 19,65 m yang dipasang dengan tongkang, diangkat dengan derek, dan akhirnya dilas ke segmen sebelumnya. Sepasang kabel dikencangkan sebelum memindahkan derek untuk mengangkat segmen berikutnya.



Gambar 3.31 Jembatan Normandie — Jangkar Kabel Penahan.

Fondasi jembatan tersebut adalah sebagai berikut:

- Pilar dan abutmen didirikan di atas tiang bor berdiameter 1,50 m dan kedalaman 40 m — empat atau lima tiang per pilar.
- Menara didirikan di atas tiang bor berdiameter 2,10 m dan kedalaman 50 m — 14 tiang untuk setiap kaki pylon.

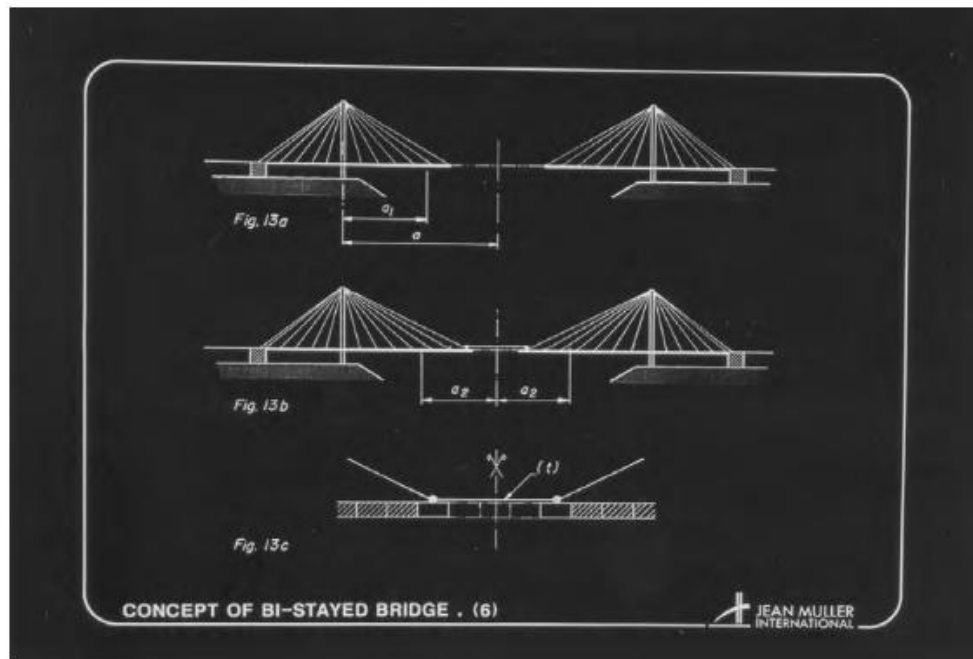
e. Jembatan Dua Penyangga

Bentang bebas jembatan kabel penahan konvensional dibatasi oleh kapasitas dek untuk menahan beban tekan aksial di dekat pylon yang dihasilkan oleh komponen horizontal gaya penahan. Untuk material saat ini (misalnya, beton berkekuatan tinggi 70 MPa), bentang batasnya antara 1200 dan 1500 m, tergantung pada imajinasi dan keberanian perancang. Di luar batas ini, hanya jembatan gantung yang memungkinkan bentang penyeberangan yang sangat besar. Situasi ini sekarang telah berubah, berkat konsep baru yang disebut bi-stayed.

Konstruksi dek masih dilakukan dengan cara yang sama seperti jembatan kabel-stayed konvensional; dimulai dari pylon ke arah luar dalam urutan simetris, dek digantung oleh penahan yang berurutan. Pada tahap konstruksi tertentu [untuk panjang dek yang sama dengan " a_1 ," Gambar 3.32: (13a)] di kedua sisi setiap pylon, misalnya, beban aksial dek akan menyerap kapasitas penuh material (dengan ketentuan untuk efek beban hidup di masa mendatang). Tidak ada panjang dek tambahan yang dapat ditambahkan, tanpa melebihi tegangan yang diizinkan.

Pada tahap ini, dipasang rangkaian kedua tali penahan [(Gambar 3.32 (13b))], yang ditugaskan untuk menopang bagian tengah bentang utama. Tali penahan tambahan ini simetris satu sama lain terhadap garis tengah bentang utama dan tidak lagi simetris terhadap pylon. Lebih lanjut, tali penahan ini tidak lagi ditambatkan di dek itu sendiri, melainkan di abutmen tanah luar di kedua ujung jembatan, hampir sama dengan kabel utama jembatan

gantung. Beban vertikal yang diberikan pada setiap tali penahan kini diseimbangkan sepanjang rantai tegangan kontinu, yang terdiri dari bagian tengah dek (yang dikenai beban tegangan), yang dikaitkan dengan dua tali penahan simetris, yang dibelokkan di atas kepala pylon, untuk akhirnya ditambatkan di luar dek jembatan.



Gambar 3.32 Jembatan Dua Tali Penahan.

Sepanjang dek, beban tekan aksial muncul di sekitar pylon (yang diciptakan oleh rangkaian tali penahan pertama), yang berubah menjadi beban aksial tegangan di garis tengah bentang utama (dibuat oleh keluarga kedua dari tali penahan).

Dalam penerapan pertama dari konsep baru ini, bentang bersih maksimum dapat ditingkatkan dengan rasio $(a_1 + a_2/a_1)$, yaitu sekitar 1,5. Bahkan, dimungkinkan untuk melampaui tahap itu, sambil meningkatkan kualitas struktur, dengan menggunakan prategang [Gambar 3.32 (13c)]. Pada panjang dek yang digantung oleh keluarga kedua tali penahan, tendon prategang dipasang untuk mengimbangi setidaknya semua gaya tarik aksial akibat beban mati dan beban hidup. Ketika tidak ada beban hidup yang diterapkan, dek dikenai beban tekan, yang hilang ketika jembatan dibebani penuh.

Dengan proporsi beban mati dan beban hidup yang biasa, mudah dibuktikan bahwa panjang bentang maksimum dapat dikalikan dengan 2,5. Sekarang kita dapat mempertimbangkan dengan percaya diri pembangunan bentang bersih 3000 m.

Contoh praktis dari konsep baru ini disiapkan untuk penyeberangan luar biasa di Asia Tenggara dengan bentang utama bersih 1200 m. Dek jembatan ini menampung enam lajur lalu lintas jalan raya, dua jalur kereta api, dan dua lajur khusus untuk kendaraan darurat. Jembatan ini juga rentan terhadap topan.

3.5. PROYEK BESAR

1. Jembatan Severn Kedua

Jembatan Severn Kedua menyediakan jalur penghubung yang lebih cepat antara Inggris dan Wales. Struktur jembatan, sepanjang 5126 m (Gambar 3.33), terdiri dari tiga bagian: viaduk timur, sepanjang 2103 m; jembatan kabel utama, sepanjang 946,6 m; dan viaduk barat, sepanjang 2077 m. Dari timur ke barat, panjang bentang jembatan adalah:

32 m, 58 m, 23×98.12 m, 456 m, 23×98.12 m, 65 m



Gambar 3.33 Jembatan Severn Kedua Pada Waktu Senja.

Jembatan layang penghubung didirikan di atas caisson beton bertulang multiseluler, satu per pilar, dicetak di darat, dengan berat bervariasi dari 1100 hingga 2000 ton tergantung pilarnya. Caisson ini diangkut dengan tongkang dari tempat pencetakan ke lokasi yang relevan. Tongkang tersebut dilengkapi dengan sepasang traktor perayap dengan kapasitas muat 1500 ton.

Dari 47 pilar beton, 38 di antaranya dicetak, mewakili 338 elemen beton. Tiga hingga tujuh elemen yang disambung dengan prategang vertikal yang diisi lilin diperlukan untuk membangun satu pilar. Dua poros pilar persegi panjang didirikan di setiap caisson fondasi. Dek jembatan layang penghubung terdiri dari dua balok kotak beton prategang monoseluler paralel yang dihubungkan oleh pelat atas untuk menyediakan platform selebar 33,20 m di sebagian besar panjang jembatan. Kedalaman dek bervariasi dari 7,0 m pada pilar hingga 3,95 m di bagian tengah bentang.

Dek jembatan layang pendekatan dibagi menjadi beberapa bagian sepanjang sekitar 500 m. Sambungan ekspansi terletak di tengah bentang. Penampang dek tipikal terdiri dari empat bentang dan dua kantilever yang ditopang oleh lima pilar. Semua bentang terbuat dari segmen pracetak sepanjang 3.643 m; segmen-segmen cor yang sesuai ini dipasang dengan metode kantilever seimbang dengan sambungan epoksi. Untuk konstruksi ini digunakan gantry peluncuran sepanjang 230 m dengan berat 850 ton. Semua kabel prategang berada di luar



dengan semua tendon dilindungi secara individual dalam selubung HDPE (polietilen densitas tinggi) yang diisi dengan lilin. Empat famili kabel prategang dapat dibedakan:

- Tendon kantilever: 11 hingga 12 pasang per kantilever
- Tendon kontinuitas bawah: 3 hingga 4 pasang per bentang
- Tendon kontinuitas atas: 1 hingga 2 pasang per bentang
- Tendon kontinuitas umum: 5 hingga 6 pasang per bentang, tersebar di dua bentang

Lingkungan jembatan sangat membatasi: muara Severn mengalami pasang surut terkuat kedua di dunia yang mewakili perbedaan yang mampu melebihi 14 m, dengan arus kuat 8 hingga 10 knot di tempat-tempat tertentu dan terkadang angin kencang. Selain itu, 80% fondasi terpapar saat air surut.

Ini berarti bahwa kunci untuk tantangan pasang surut ini adalah penggunaan maksimal komponen pracetak. Itu menjelaskan pilihan yang dibuat untuk viaduk pendekatan: pracetak caisson fondasi, dermaga di laut, segmen dek. Hal itu juga menjelaskan pracetak balok melintang pylon jembatan utama dan blok angkur, serta pracetak elemen dek jembatan kabel-stayed.

Jembatan kabel-stayed memiliki panjang 946,60 m. Ini adalah pekerjaan simetris dengan panjang bentang sebagai berikut: 49,06 m, 2 × 98,12 m, 456 m, 2 × 98,12 m, 49,08 m. Menara jembatan didirikan di atas caisson multiseluler pracetak. Setiap menara setinggi 137 m terdiri dari dua poros beton berongga persegi panjang: beton bertulang untuk penampang tipikal dan beton prategang untuk area angkur penahan.

Setiap caisson pylon dilengkapi dengan pabrik beton siap pakai berkapasitas 45 m³/jam, dan dua platform logam untuk menyimpan tulangan dan bekisting. Peralatan ini memungkinkan untuk memberikan otonomi maksimum kepada tim pylon. Poros pylon dicor di tempat dengan menggunakan bekisting panjat dalam bagian sepanjang 3,80 m. Balok melintang dicetak terlebih dahulu di darat dan masing-masing memiliki berat 1300 dan 900 ton. Balok melintang bawah diangkat ke tempatnya oleh tongkang derek dan kemudian dihubungkan dengan pengecoran beton ke kaki pylon. Balok pengikat atas diangkat dan diletakkan di atas balok pengikat bawah, dan kemudian diangkat ke posisi pastinya dengan dongkrak.

Balok melintang pertama terletak pada ketinggian 40 m di atas pasang tertinggi, sedangkan balok melintang lainnya membentuk kerangka pada level area jangkar kabel penahan. Dek jembatan utama ditopang sederhana pada balok melintang pylon bawah dengan penahan melintang. Dek tersebut ditopang pada empat pilar sekunder di kedua bentang samping dengan bantalan anti-angkat, dan terakhir ditopang sederhana pada ujung-ujung jembatan layang akses. Dek merupakan struktur komposit yang terdiri dari:

- Dua balok I sedalam 2,50 m yang dihubungkan setiap 3,65 m oleh balok rangka. Jarak antara kedua balok utama adalah 25,2 m.
- Pelat beton bertulang dengan lebar sekitar 35 m dan tebal 20 cm atau 22,5 cm untuk penampang tipikal.

Dek dirakit dari 128 elemen pracetak, dengan lebar 34,60 m dan panjang 7 m. Struktur baja dirakit dengan baut di tempat pracetak; kemudian pelat beton dicor kecuali pada sambungan

antara dua segmen yang berurutan. Setiap segmen standar dengan berat sekitar 170 ton diposisikan oleh trailer dan diangkut dengan tongkang ke lokasi. Segmen dek diangkat dan diposisikan oleh sepasang derek bergerak yang terletak di ujung setiap kantilever, dan dibaut ke segmen sebelumnya. Kemudian dua penahan dikencangkan dan sambungan dengan segmen sebelumnya dicor beton. Dek jembatan ditopang oleh empat bidang penahan, masing-masing terdiri dari 60 tali penahan dengan panjang 19 hingga 75 untai T15, dengan panjang bervariasi dari 35 hingga 243 m.

Jembatan penyeberangan Sungai Severn kedua menyediakan tiga lajur lalu lintas di setiap arah, lajur darurat, penghalang keselamatan, dan penahan angin samping. Pembangunan jembatan baru ini dibiayai oleh sektor swasta. Jembatan tol yang ada dan yang baru dikelola oleh kelompok konsesi yang bertanggung jawab atas desain, konstruksi, pembiayaan, pengoperasian, dan pemeliharaan kedua jembatan tersebut. Lebih dari 2 tahun studi dan 4 tahun pekerjaan di lokasi, yang ditantang oleh pasang surut ekstrem, diperlukan untuk membangun jembatan ini, yang terletak 5 km di hilir jembatan gantung yang didirikan pada tahun 1966, 30 tahun sebelumnya.

2. Jembatan Great Belt

Pembangunan penghubung tetap melintasi Selat Great Belt merupakan proyek jembatan dan terowongan dengan dimensi yang luar biasa. Penghubung tetap Great Belt terdiri dari tiga proyek utama:



Gambar 3.34 Jembatan Sabuk Besar — Terowongan Kereta Api.

- a. Terowongan kereta api di bawah saluran timur antara Zealand dan pulau Sprogø, di tengah Sabuk Besar. Ini adalah terowongan bor yang terdiri dari dua terowongan jalur tunggal masing-masing dengan diameter dalam 7,7 m dan diameter luar 8,50 m (Gambar 3.34). Panjang total terowongan adalah 8 km. Empat mesin bor sepanjang 220 m telah bekerja hingga kedalaman 75 m di bawah permukaan laut. Terowongan kembar dilapisi dengan cincin beton yang saling mengunci yang terbuat dari segmen beton pracetak masing-masing dengan lebar 1,65 m searah pengeboran. Setiap cincin terdiri dari enam segmen



lingkaran dan satu segmen kunci yang lebih kecil. Sebanyak 18.000 segmen terowongan telah diproduksi. Terowongan kembar dihubungkan pada interval 250 m oleh lorong penghubung dengan diameter dalam 4,5 m, dilapisi dengan segmen besi cor yang dirakit sebagai cincin. Setiap lorong penghubung terdiri dari 22 cincin yang masing-masing terdiri dari 18 elemen. Terowongan kereta api adalah terowongan bawah laut terpanjang kedua yang digali, terowongan di bawah Selat Inggris adalah yang terpanjang.

- b. Jembatan jalan raya yang melintasi selat timur memiliki panjang 6790 m. Jembatan ini terdiri dari jembatan gantung dengan bentang utama sepanjang 1624 m (lihat Gambar 3.8) dan dua bentang samping sepanjang 535 m, serta 23 bentang pendekatan dengan total panjang 4096 m (14 bentang untuk pendekatan timur dan 9 bentang untuk pendekatan barat).

Menara jembatan didirikan di atas caisson beton seberat 32.000 ton, yang ditempatkan di dasar laut. Kedua kaki pylon dicor dalam cetakan panjat dari dasar hingga puncak pylon setinggi 254 m di atas permukaan laut. Balok melintang menghubungkan kaki pylon pada ketinggian 125 dan 240 m.

Blok jangkar untuk kabel suspensi juga didirikan di atas caisson beton seberat 11.000 ton. Dua blok jangkar lainnya, termasuk ruang distribusi khusus tempat kabel utama ditambatkan, dicor di tempat dengan metode konvensional hingga ketinggian puncak 63,4 m di atas permukaan laut. Di antara pilar jembatan, sebagian besar, yaitu 18, merupakan pilar pracetak. Setiap pilar terdiri dari tiga elemen: caisson, poros pilar bawah, dan akhirnya poros pilar atas. Pilar jembatan rata-rata memiliki berat 6000 ton. Derek apung konvensional digunakan untuk perakitan caisson dan poros pilar.

Struktur baja bentang utama terdiri dari balok kotak yang dilas sepenuhnya dengan kedalaman 4 m dan lebar 31 m. Setelah segmen sepanjang 48 m diapungkan ke posisi di bawah kabel utama, segmen tersebut diangkat ke tempatnya oleh derek, dan kemudian dilas ke bagian sebelumnya. Kedua kabel utama masing-masing memiliki diameter 85 cm dan panjang sekitar 3 km. Setiap kabel utama terdiri dari 148 kabel, dan setiap kabel terdiri dari 126 kawat dengan diameter 5,13 mm; 3.000 ton baja yang mewakili panjang 112.000 km merupakan struktur penahan jembatan. Struktur baja bagian atas bentang pendekatan terdiri dari balok kotak yang dilas sepenuhnya dengan kedalaman balok konstan 6,7 m, lebar 26 m, dan bentang tipikal 193 m (Gambar 3.35). Penampang melintang memiliki bentuk sayap yang sama dengan balok bentang utama. Balok-balok baja, masing-masing beratnya sekitar 2300 ton, diangkat dari tongkang oleh derek apung besar.

Panel baja untuk balok jalan diproduksi di Italia dan kemudian dikirim dari Livorno ke Sines, Portugal. Di sini, kayu-kayu tersebut diproses menjadi bagian-bagian jembatan, yang kemudian diangkut ke Aalborg (Denmark Utara) dan dilas menjadi bentang jembatan yang lengkap.



Gambar 3.35 Jembatan Great Belt — Bentang Pendekatan Sepanjang 193 M.

- c. Jembatan gabungan jalan raya dan kereta api melintasi kanal barat antara Funen dan Sprogø. Jembatan barat ini adalah jembatan beton sepanjang 6,6 km dengan dek terpisah untuk lalu lintas kereta api dan jalan raya. Jembatan ini terdiri dari enam bagian jembatan kontinu dengan panjang sekitar 1100 m; bagian-bagian jembatan individual dihubungkan oleh sambungan ekspansi dan peredam hidrolik yang hanya mentransmisikan gaya sesaat. Girder kotak di bawah jalur kereta api hanya selebar 12,3 m, dibandingkan dengan lebar girder jalan raya sebesar 24,1 m. Namun, girder kereta api 1,36 m lebih dalam daripada girder jalan raya.

Pilar-pilar jembatan barat didirikan di atas caisson pracetak. Setiap caisson menerima dua poros pilar, satu untuk girder jalan raya, yang lain untuk girder kereta api. Setiap elemen girder sepanjang 110,4 m dicor dalam bekisting baja tetap dalam lima bagian. Bagian-bagian ini secara bertahap dihubungkan dengan prategangan di tempat pengecoran pracetak. Sebuah kapal khusus, *Svanen*, derek apung yang digerakkan sendiri dengan kapasitas angkat 7123 ton, digunakan untuk mengangkut caisson fondasi ke posisi yang relevan, untuk mengangkat poros dermaga ke tempatnya dan untuk menempatkan balok sepanjang 110 m di atas poros dermaga.

Selain bagian jembatan dan terowongan, penghubung tetap Great Belt, yang dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1998, juga mencakup bagian jalan dan kereta api baru di darat, yang menghubungkan jalan raya dan kereta api yang ada dengan penghubung tetap.

3. Jembatan Sungai Tagus

Jembatan Tagus, juga disebut Jembatan Vasco da Gama, adalah struktur sepanjang 17,2 km yang menghubungkan tepi utara dan selatan muara Tagus. Proyek ini akan menyelesaikan sebagian besar masalah lalu lintas di Lisbon dengan menciptakan penghubung antara sistem jalan raya baru di utara dan selatan kota, dan membuat arus lalu lintas lebih lancar antara bagian utara dan selatan Portugal (Gambar 3.36). Proyek Vasco da Gama dibagi menjadi tujuh bagian yang berbeda, lima di antaranya adalah jembatan dan viaduk, yang mewakili 12,3 km.

- a. Viaduk utara, dengan panjang total 488 m dari 11 bentang, melintasi jalur kereta api utara Perusahaan Kereta Api Portugal (C.P.) dan beberapa persimpangan lokal. Lebar dek bervariasi untuk mengakomodasi koneksi ke jalan lokal melalui jalan penghubung. Panjang bentang bervariasi dari 42 hingga 47 m. Dek, sedalam 3,50 m, dicor di tempat bentang demi bentang. Bentang tipikal memiliki lebar 29,3 m dan terdiri dari empat balok beton berbentuk T.
- b. Jembatan layang Pameran, dengan panjang total 672 m dan 12 bentang, juga terletak di tepi utara Sungai Tagus. Jembatan ini melintasi area tempat berlangsungnya Pameran Dunia 1998. Panjang bentang jembatan adalah sebagai berikut: $2 \times 46,2$ m, $3 \times 52,3$ m, $55,3$ m, $6 \times 61,3$ m. Dek jembatan, selebar 29,3 m, terdiri dari balok kotak beton prategang kembar, yang dihubungkan oleh pelat atas. Setiap balok kotak terdiri dari segmen pracetak yang dipasang oleh derek bergerak menggunakan metode kantilever seimbang. Setelah pengecoran sambungan penutup kantilever, prategangan eksternal ditegangkan di dalam balok kotak untuk memastikan kontinuitas dek. Dek ditopang oleh pilar beton yang didirikan di atas tiang pancang berdiameter 1700 mm melalui kepala tiang pancang beton setebal 4,5 m.
- c. Jembatan utama adalah jembatan kabel pancang, sepanjang 829 m dengan bentang utama sepanjang 420 m. Pilar berbentuk H didirikan di atas tiang pancang berdiameter 2,2 m; 44 tiang pancang bor ini memiliki panjang 53 m. Tutup tiang pancang yang sangat kaku dan kokoh memungkinkan fondasi untuk menahan benturan dari kapal seberat 30.000 ton yang berlayar dengan kecepatan 8 knot. Pilar terdiri dari dua kaki dan mencapai ketinggian 150 m. Kaki-kaki ini, dengan penampang yang bervariasi dari $12 \times 7,7$ m hingga $5,5 \times 4,7$ m, dibentuk dengan metode slip forming. Kaki-kaki tersebut dihubungkan oleh balok kotak prategang sedalam 10 m di tingkat dasar, dan oleh balok melintang 87 m di atas dasar, yang dicor di tempat dalam empat tahap. Bagian atas pilar, di atas balok melintang, terdiri dari struktur komposit baja-beton tempat penahan ditambatkan.

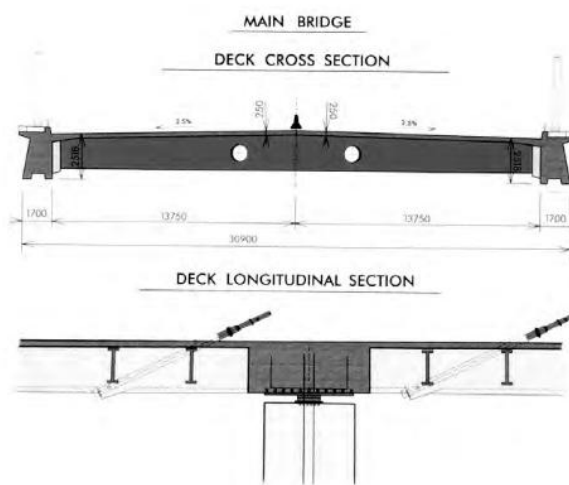


Gambar 3.36 Jembatan Tagus — Pandangan Seniman.

Dek jembatan, selebar 31,28 m, terdiri dari dua balok beton memanjang dengan kedalaman 2,50 m dan lebar 1,30 m, yang dihubungkan setiap 4,4 m oleh balok melintang baja dengan kedalaman 2,0 m. Struktur komposit ini dilengkapi dengan pelat atas beton setebal 25 cm (Gambar 3.37). Segmen dek sepanjang 8,83 m dicor di tempat menggunakan bekisting bergerak dengan metode kantilever seimbang. Dua hal perlu diperhatikan: selama pengecoran segmen, penahan akhir digunakan sebagai penahan sementara dan bekisting bergerak dirancang untuk melewati pilar belakang. Seperti semua struktur lainnya, jembatan utama dirancang untuk menahan dampak gempa bumi yang dahsyat tanpa kerusakan. Akibatnya, tidak ada sambungan tetap antara dek dan penyangganya. Peredam dipasang, peredam baja melintang, dan peredam baja memanjang yang dilengkapi dengan kopling hidrolik. Di atas itu, deviasi pemandu peredam ditempatkan di setiap ujung penahan kabel.

- d. Jembatan layang pusat memiliki panjang 6531 m dengan 80 bentang dan melintasi muara Tagus di atas gundukan pasir dan dua jalur pelayaran. Sebagian besar deknya berada kurang dari 14 m di atas permukaan laut. Bentang tipikalnya memiliki panjang 78,62 m, tetapi di atas dua jalur pelayaran, panjang bentangnya meningkat menjadi

130 m dan ketinggian di atas permukaan laut meningkat menjadi lebih dari 30 m. Panjang bentang jembatan layang adalah sebagai berikut: 79,62 m, 3 × 78,62 m/ 93,53 m, 130,00 m, 93,53 m/60 × 78,62 m/93,53 m, 130,00 m, 93,53 m/11 × 78,62 m. Dek, selebar 29,3 m, terdiri dari dua balok kotak beton prategang paralel dengan dua web setinggi 3,95 m, yang dihubungkan oleh pelat atas. Di atas saluran pelayaran, kedalaman balok bervariasi dari 3,95 m di tengah bentang hingga 7,95 m di pilar. Setiap bentang dicetak dalam seperdelapan bagian; segmen-segmen ini, dengan berat satuan sekitar 240 ton, dirakit di atas bangku dengan prategangan setelah penyesuaian. Setiap balok seberat 1800 ton hingga 2000 ton diangkat dan disimpan oleh derek gantry dengan kapasitas beban 2200 ton.



Gambar 3.37 Jembatan Tagus — Penampang Dek Jembatan Utama.

Untuk mengangkat dan menempatkan balok hingga ketinggian 50 m di atas permukaan laut, digunakan katamaran khusus, yang dilengkapi dengan dua derek dengan kapasitas 1400 ton pada radius 25 m, setinggi 82 m. Ritme pengangkutan dan pemasangan dilakukan dengan kecepatan standar satu balok setiap 2 hari. Kabel prategang memastikan kontinuitas memanjang dek. Setelah pengecoran pelat kontinuitas di antara dua balok kotak paralel, kabel prategang melintang dikencangkan. Dek ditopang oleh pilar beton yang didirikan di atas tiang pancang berdiameter 1700 mm.

- e. Jembatan layang selatan terdiri dari 85 bentang, masing-masing sepanjang 45 m, dengan total panjang 3825 m. Seperti pada jembatan layang utara, dek terdiri dari empat balok beton berbentuk T dengan kedalaman 3,50 m. Dek dicor di tempat bentang demi bentang dengan empat gantry pengecoran bergerak yang bekerja di atas dek pada dua front pengecoran. Dek ditopang oleh pilar beton yang didirikan di atas tiang bor untuk pilar darat dan di atas tiang pancang untuk pilar sungai. Pembangunan Jembatan Vasco da Gama dimulai pada Februari 1995 dan selesai pada Maret 1998. Pembangunan ini dibiayai swasta dan menelan biaya sekitar 1 miliar dolar AS.

3.6 JEMBATAN EROPA MASA DEPAN

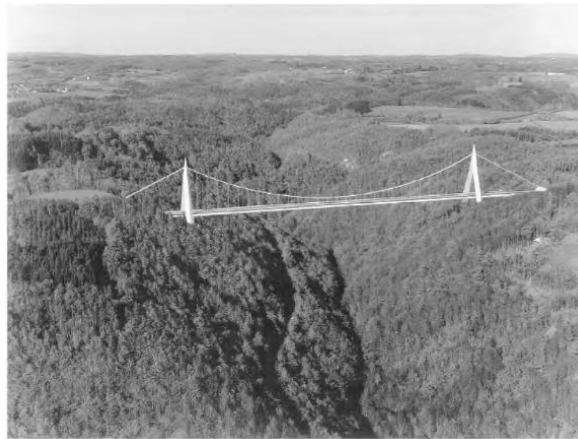
Tren masa depan dalam desain jembatan dapat diklasifikasikan dalam empat kategori:

1. Pengembangan material yang ada
 2. Pengembangan material baru
 3. Asosiasi struktural material baru
 4. Kontrol struktural
- a. Material utama yang digunakan untuk jembatan — beton dan baja — masih dalam pengembangan; kekuatannya selalu meningkat. Beton berkinerja tinggi (HPC) telah digunakan untuk jembatan untuk pertama kalinya di Prancis dan di negara-negara Skandinavia. Beton dengan kekuatan tekan 60 MPa (silinder) pada 28 hari menjadi umum untuk jembatan besar, terutama untuk bentang panjang dan pilar tinggi. Namun, keunggulan HPC bukan hanya kekuatan, tetapi juga daya tahan, karena beton ini jauh lebih padat dan jauh kurang berpori daripada beton biasa. Jenis beton baru yang disebut beton bubuk reaktif (RPC) sedang dikembangkan di Prancis; kekuatan tekannya pada 28 hari dapat mencapai 200 hingga 800 MPa. Beton ini dimaksudkan untuk prategang dan tidak termasuk tulangan pasif apa pun. Baja berkekuatan tinggi dengan tegangan luluh 420 hingga 460 MPa telah digunakan untuk jembatan di Jerman, Finlandia, Prancis, Luksemburg, Norwegia, Belanda, dan Swedia. Baja ini sebagian besar digunakan untuk jembatan bentang panjang, dan untuk bagian jembatan yang menerima gaya terkonsentrasi tinggi.
- b. Material komposit baru sedang dikembangkan untuk jembatan di Eropa. Yang utama adalah:
- Plastik yang diperkuat serat kaca (GFRP),
 - Plastik yang diperkuat serat karbon (CFRP),
 - Plastik yang diperkuat serat aramid (AFRP).

Keuntungan utamanya adalah ketahanan korosi yang tinggi dan bobot yang ringan, meskipun masih lebih mahal daripada baja.

Batang dan kabel GFRP telah dikembangkan sejak tahun 1980 di Jerman, Austria, dan Prancis. Setidaknya lima jembatan telah dibangun di Jerman menggunakan kabel prategang GFRP. Jembatan Fidget Footbridge di Inggris menggunakan batang penguat GFRP. Penyangga CFRP telah digunakan di Jerman. Penyangga AFRP telah digunakan untuk jembatan penyeberangan di Belanda dan Norwegia.

Material komposit baru juga telah digunakan untuk struktur dek itu sendiri: jembatan bergerak Bends Mill di Inggris, Jembatan Penyeberangan Arnhem di Belanda. Jembatan Penyeberangan Aberfeldy, di Skotlandia, adalah jembatan komposit pertama di dunia: dek, pylon, dan penyangga.



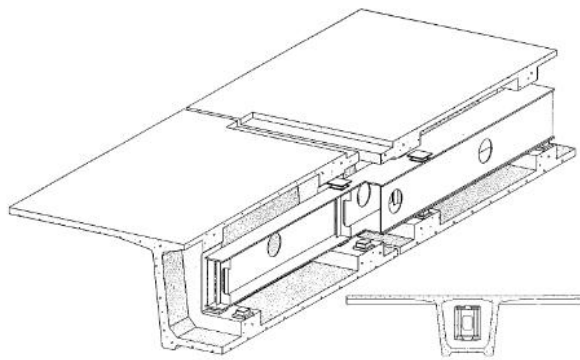
Gambar 3.38 Jembatan Chavanon.

- c. Kombinasi balok I baja dengan pelat beton telah menjadi sangat umum untuk jembatan bentang menengah. Kami berpikir bahwa kombinasi baja dan beton ini akan dikembangkan untuk berbagai macam struktur komposit di masa depan: dek rangka, lengkungan, pylon, pilar. Sejumlah proyek inovatif semacam itu telah dibangun di Prancis dan Swiss, misalnya. Penggunaan setiap material secara optimal akan menghasilkan struktur yang lebih efisien dan ekonomis. Contoh signifikan dari struktur tersebut diterapkan pada jalan raya A89 yang akan menghubungkan Clermond Ferrand ke Bordeaux di Prancis selatan. Untuk menyeberangi lembah Sungai Chavanon yang dalam dengan tetap menghormati lingkungan alam, sebuah jembatan gantung sedang dibangun (Gambar 3.38). Dek jembatan adalah struktur komposit baja-beton dengan lebar 22,4 m dan kedalaman 3,0 m. Jembatan ini digantung oleh satu bidang kabel suspensi yang terletak di sumbu penampang. Pylon berbentuk V terbalik membentang di atas dek dan membiarkannya bebas dari penyangga apa pun. Puncaknya berada 52 m di atas dek. Jembatan ini, dengan bentang utama sepanjang 300 m, merupakan proyek yang inovatif, efisien, dan sangat estetik.



Gambar 3.39 Jembatan Rogerville.

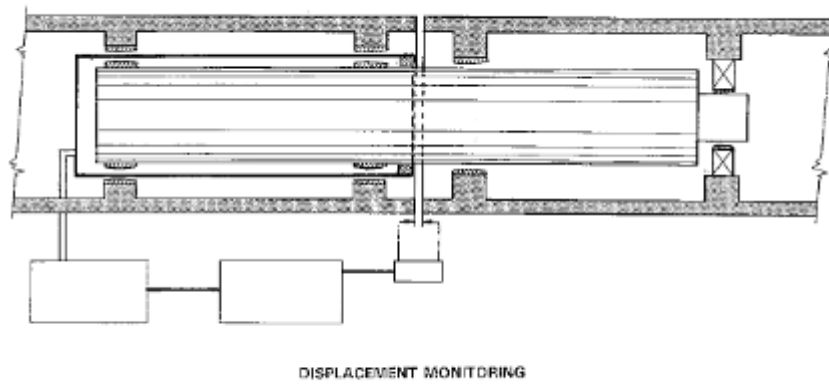
- d. Dengan perkembangan material berkekuatan tinggi, dan mungkin juga material ringan, jembatan akan menjadi semakin ramping dan ringan, sehingga lebih sensitif terhadap kelelahan dan masalah dinamis, terutama untuk jembatan bentang panjang. Akibatnya, akan diperlukan pengendalian getaran akibat beban lalu lintas, angin, dan gempa bumi. Pengendalian ini dapat dicapai melalui perangkat pasif, seperti peredam, dan perangkat aktif seperti tendon prategang aktif, penahan aktif, dan tambahan aerodinamis aktif. Ini akan menjadi jalan menuju jembatan "cerdas" di masa depan.



Gambar 3.40 Jembatan Rogerville — Perangkat Sambungan Ekspansi.

Jembatan yang sudah ada dapat dengan mudah dilengkapi dengan perangkat aktif. Perangkat seperti itu telah diterapkan di Jembatan Rogerville, yang dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1996, terletak di Prancis utara, di jalan raya A29 tidak jauh dari Jembatan Normandie (Gambar 3.39). Ini adalah balok kotak baja kontinu, yang ditempatkan di sepanjang sambungan ekspansi, di antara dua lengan kantilever yang berdekatan (Gambar 3.40). Struktur ini bertumpu pada dua diafragma di kedua sisinya dan dapat disesuaikan sebelum jembatan dibuka untuk lalu lintas guna mentransfer gaya geser dan momen lentur, dan akibatnya untuk mengkompensasi efek relaksasi baja dan rambatan beton selanjutnya. Saat ini, balok kontinuitas merupakan perangkat pasif.

Sambungan ini dapat dilengkapi untuk mentransfer (jangka panjang di bawah beban mati, dan jangka pendek di bawah beban hidup), gaya geser dan momen secara aktif setiap saat (Gambar 3.41). Dengan kata lain, besarnya beban geser dan momen di sepanjang sambungan dapat dipantau dan disesuaikan atas permintaan perancang untuk mengembalikan semua sifat geometris dan mekanis dari dek kontinu di sepanjang sambungan ekspansi.



THE ACTIVE CONNECTION

Gambar 3.41 Sambungan Aktif.

BAB 4

PRAKTIK DESAIN DI JEPANG

4.1 DESAIN JEMBATAN

1. Filosofi Desain

Dalam praktik desain jembatan Jepang saat ini, terdapat dua filosofi desain: desain kekuatan ultimate dan desain tegangan kerja.

1. Desain kekuatan ultimate dengan mempertimbangkan nonlinieritas struktural membandingkan kapasitas daya dukung beban ultimate suatu struktur dengan perkiraan kebutuhan beban dan mempertahankan rasio yang sesuai di antara keduanya. Umumnya, filosofi desain semacam ini diterapkan pada struktur jembatan bentang panjang dengan bentang lebih dari 200 m, yaitu, lengkungan, jembatan girder kabel-stayed, jembatan gantung yang diperkuat, dan lainnya.
2. Desain tegangan kerja bergantung pada analisis linier elastis struktur pada beban kerja normal. Kekuatan elemen struktural dinilai dengan menerapkan faktor keamanan antara tegangan maksimum pada beban kerja dan tegangan kritis, seperti tegangan luluh tarik material dan tegangan luluh geser atau tegangan tekuk tekan material (lihat Bagian 4.1.4).

Tabel 4.1 Kombinasi Beban Dan Koefisien Pengalinya Untuk Tegangan Yang Diizinkan

No.	Kombinasi Pembebanan	Koefisien Pengali untuk Tegangan Izin
1	P + PP + T	1.15
2	P + PP + W	1.25
3	P + PP + T + W	1.35
4	P + PP + BK	1.25
5	P + PP + CO	1.70 untuk elemen baja / 1.50 untuk elemen beton bertulang
6	W	1.2
7	BK	1.2
8	P kecuali L dan I + EQ	1.5
9	ER	1.25

2. Beban

Asosiasi Jalan Raya Jepang, Spesifikasi Standar Jembatan Jalan Raya (JAH-SSHB) mendefinisikan semua sistem beban dalam empat sistem beban sebagai berikut:

1. Beban utama (*P*) — beban mati (*D*), beban hidup (*L*), beban impak (*I*), gaya prategang (*PS*), rayapan (*CR*), penyusutan (*SH*), tekanan tanah (*E*), tekanan hidrolik (*HP*), gaya angkat akibat daya apung (*U*).
2. Beban sekunder (*S*) — beban angin (*W*), gaya termal (*T*), pengaruh gempa bumi (*EQ*).
3. Beban khusus yang sesuai dengan beban utama (*PP*) — beban salju (*SW*), pengaruh perpindahan tanah (*GD*), pengaruh perpindahan penyangga (*SD*), tekanan gelombang (*WP*), gaya sentrifugal (*CF*).

4. Beban Khusus (*PA*) — gaya miring (*BK*), gaya sementara pada saat pemasangan (*ER*), gaya tumbukan (*CO*), dan lainnya.

Kombinasi beban dan gaya yang mungkin dikenakan pada suatu struktur dan koefisien pengalinya untuk tegangan yang diizinkan ditentukan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Kombinasi beban dan gaya yang paling parah untuk suatu struktur dalam kombinasi yang diberikan pada Tabel 4.1 harus diambil sebagai sistem beban desain. Detail tentang beban tidak diberikan di sini dan pembaca harus merujuk pada spesifikasi. Nilai batas defleksi dinyatakan sebagai rasio bentang untuk masing-masing jenis superstruktur dan panjang bentang.

3. Teori

Dalam kebanyakan kasus, perhitungan desain untuk jembatan beton dan baja didasarkan pada asumsi perilaku linier (yaitu, tegangan-regangan elastis) dan teori defleksi kecil. Namun, mungkin tidak masuk akal untuk menerapkan analisis linier pada struktur bentang panjang yang menyebabkan perpindahan besar. JAH-SSHB menetapkan bahwa prosedur desain ideal termasuk analisis nonlinier pada beban maksimum harus digunakan untuk struktur deformasi besar.

Jembatan dengan dek pengaku datar menimbulkan beberapa kekhawatiran terkait ketahanan terhadap angin. Perancang perlu melakukan pengujian untuk memastikan ketahanan terhadap gaya angin dan/atau ketidakstabilan aerodinamis. Di Jepang, pengujian model terowongan angin termasuk pengujian model penuh dan model penampang sering diterapkan untuk verifikasi ini. Metode pengujian model meliputi pengujian model penuh dan pengujian model penampang. Getaran yang disebabkan oleh kendaraan, angin hujan, dan gempa bumi biasanya dikendalikan oleh peredam oli, karet peredam tinggi, dan/atau peredam baling-baling.

4. Pemeriksaan Stabilitas

JAH-SSHB menetapkan kriteria kekuatan pada stabilitas untuk elemen tekan fundamental, pelat geser, dan lengkung/rangka. Kriteria kekuatan untuk stabilitas elemen-elemen tersebut disajikan sebagai berikut:

1. Kekuatan tekan untuk elemen pelat — Kekuatan material pelat fundamental di bawah tekanan seragam disebutkan di sini tetapi detailnya belum diberikan dalam semua kasus.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{el}}{\sigma_Y} &= 1.0 \quad \text{for } R \leq 0.7 \\ &= \frac{0.5}{R^2} \quad \text{for } 0.7 \leq R \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

di mana σ_{cl} = kekuatan pelat di bawah kompresi seragam, R = parameter kelangsingan ekuivalen yang didefinisikan sebagai

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)}{\pi k^2}} \quad (4.2)$$

dan b = lebar pelat, t = ketebalan pelat, μ = rasio Poisson, k = koefisien yang diterapkan dalam tekuk pelat elastis.

2. Kekuatan tekan untuk elemen yang dibebani secara aksial — Kekuatan kolom untuk ketidakstabilan keseluruhan ditentukan sebagai

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_Y} &= 1.0 && \text{for } \bar{\lambda} \leq 0.2 \\ &= 1.109 - 0.545\bar{\lambda} && \text{for } 0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 1.0 \\ &= 1.0/(0.773 + \bar{\lambda}^2) && \text{for } 1.0 \leq \bar{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

dengan σ_{cg} = kekuatan kolom, σ_Y = tingkat tegangan leleh material, $\bar{\lambda}$ = rasio kelangsingan

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \cdot \frac{\ell}{r} \quad (4.4)$$

dan r = jari-jari girasi elemen kolom dan ℓ = panjang kolom efektif. Dengan demikian, tegangan maksimum material efektif aksial, σ_c , ditentukan sebagai

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{cg} \cdot \sigma_{el}}{\sigma_Y} \quad (4.5)$$

3. Kekuatan tekan lentur — Kekuatan maksimum untuk tekan lentur ditentukan berdasarkan kekuatan stabilitas lateral-torsional balok di bawah momen lentur seragam sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{bg}}{\sigma_Y} &= 1.0 && \text{for } \alpha \leq 0.2 \\ &= 1.0 - 0.412(\alpha - 0.2) && \text{for } \alpha > 0.2 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

di mana σ_{bg} = kekuatan stabilitas lateral-torsional balok di bawah momen seragam, α = parameter kelangsingan ekuivalen yang didefinisikan sebagai

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \cdot \frac{1}{b} \\ K &= 2 && \text{for } A_w/A_c \leq 2 \\ &= \sqrt{3 + 0.5A_w/A_c} && \text{for } 2 \leq A_w/A_c \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

dan A_w = luas bruto pelat web, A_c = luas bruto flensa tekan, ℓ = panjang tanpa penahan lateral, b = lebar flensa tekan. Pengaruh lenturan tidak seragam diperkirakan oleh koefisien pengali, m , sebagai berikut:

$$m = \frac{M}{M_{eq}} \quad (4.8)$$

di mana M = momen lentur pada penampang acuan, M_{eq} = momen konversi ekuivalen yang diberikan sebagai

$$M_{eq} = 0.6M_1 + 0.4M_2 \quad \text{or} \quad M_{eq} = 0.4M_1 \quad \text{where} \quad M_1 \geq M_2 \quad (4.9)$$

5. Fabrikasi dan Pemasangan

Prosedur fabrikasi dan pemasangan bergantung pada sistem struktur jembatan, kondisi lokasi, dimensi unit jembatan yang difabrikasi di bengkel, peralatan, dan faktor-faktor lain yang menjadi ciri proyek tertentu. Ini termasuk metode pemotongan dan pengelasan di bengkel, pemilihan peralatan dan perlengkapan pengangkat, metode pengangkutan material dan komponen, pengendalian operasi lapangan seperti pengecoran beton, dan penyelarasan serta penyelesaian sambungan lapangan pada baja, dan juga desain detail pemasangan khusus seperti yang dibutuhkan pada sambungan lengkungan, pemasangan kantilever, dan pemasangan kabel penahan. Oleh karena itu, untuk setiap struktur, ditentukan bahwa kontraktor harus memeriksa:

1. Apakah setiap produk memiliki kualitas yang ditentukan atau tidak.
2. Apakah metode pemasangan yang ditunjuk digunakan atau tidak.

Tentu saja, sambungan lapangan dari anggota utama struktur baja harus dirakit di bengkel. Rincian tentang inspeksi tidak diberikan di sini dan pembaca harus merujuk pada spesifikasi.

4.2 JEMBATAN BATU

Ada kemungkinan bahwa jembatan batu dibangun pada zaman kuno, tetapi karena kurangnya perawatan yang cermat dan/atau kurangnya kegunaan, jembatan tersebut hancur sehingga tidak ada jejak yang tersisa. Karena konstruksi batu umumnya cocok untuk tegangan tekan, biasanya digunakan untuk bentang lengkung. Oleh karena itu, sebagian besar jembatan batu yang bertahan hingga saat ini adalah jembatan lengkung. Secara umum, jembatan lengkung batu diklasifikasikan menjadi dua jenis: jenis Eropa yang terbuat dari batu bata dan jenis Cina di mana setiap batu lengkung pada lengkungan melengkung dan berperilaku sebagai elemen rusuk.



Gambar 4.1 Tennyson-Bashi.



Gambar 4.1 menunjukkan Tennyo-bashi (panjang bentang, 9,5 m) yang terletak di prefektur Okinawa. Ini adalah satu-satunya daerah di Jepang yang memiliki jenis Cina. Jembatan ini adalah jembatan lengkung batu jenis Cina tertua di Jepang yang bertahan hingga saat ini; Jembatan ini awalnya dibangun pada tahun 1502. Gambar 4.2 menunjukkan Jembatan Tsujyun yang terletak di prefektur Kumamoto (panjang bentang, 75,6 m; tinggi lengkung, 20,2 m; lebar jembatan, 6,3 m). Jembatan ini merupakan contoh tipikal jembatan lengkung batu akuaduk yang masih bertahan hingga saat ini di Jepang dan awalnya dibangun pada tahun 1852. Gambar 4.3 menunjukkan Jembatan Torii-bashi yang terletak di prefektur Oita, yang merupakan salah satu jembatan lengkung batu multi-bentang yang dibangun pada awal abad ke-3. Jembatan ini adalah jembatan lengkung lima bentang (panjang jembatan, 55,15 m; lebar jembatan, 4,35 m; tinggi jembatan, 14,05 m) yang dibangun pada tahun 1916.



Gambar 4.2 Jembatan Tsujyun.



Gambar 4.3 Torii-Bashi.

Batu-batu terpisah terkadang memiliki kekuatan tarik yang cukup untuk memungkinkan penggunaannya sebagai balok dan lempengan seperti yang terlihat pada Hojyo-bashi, yaitu jembatan bertiang yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Jembatan ini terletak di prefektur Okinawa dan memiliki bentang 5,5 m dan awalnya dibangun pada tahun 1498.



Gambar 4.4 Hojyo-Bashi.

4.3 JEMBATAN KAYU

Sejak tahun 1990, jumlah jembatan kayu yang dibangun telah meningkat. Sebagian besar menggunakan anggota laminasi lem dan banyak yang merupakan jembatan pejalan kaki. Hingga saat ini, sekitar 10 jembatan telah dibangun untuk mengangkut truk 14 atau 20 tf. Semuanya dibangun di jalan hutan. Kita tidak memiliki kode desain untuk jembatan kayu. Namun, ada manual untuk mendesain dan membangun jembatan kayu. Berikut ini adalah pengantar tentang jembatan lengkung kayu, jembatan kabel-stayed, dan jembatan gantung di Jepang.

1. Jembatan Lengkung — Tabel 4.2 menunjukkan sembilan jembatan lengkung. Gambar 4.5 menunjukkan jembatan Hiraoka, yang, di antara jembatan lengkung kayu, memiliki bentang terpanjang di Jepang. Gambar 4.6 menunjukkan jembatan Kaminomori. Ini adalah jembatan lengkung pertama yang mampu menahan beban truk 20 tf.

Tabel 4.2 Jembatan Lengkung

Nama	Bentang (m)	Lebar (m)	Tahun Konstruksi	Keterangan
Yunomata	13.0	6.0	1990	Jembatan pelengkung ikat untuk beban truk 14 tf
Kisoohashi	33.0	6.0	1991	Jembatan pelengkung tetap untuk pejalan kaki
Deai	39.0	2.0	1992	Jembatan pelengkung ikat untuk pejalan kaki
Hiroaka	45.0	3.0	1993	Jembatan pelengkung tiga sendi untuk pejalan kaki
Yasuraka	30.0	1.5	1993	Jembatan pejalan kaki tipe Nielsen Lohse
Chuo	4.0	5.0	1993	Jembatan pejalan kaki tipe Lohse
Kaminomori	6.0	5.0	1994	Jembatan pelengkung dua sendi untuk beban truk 20 tf

Awaiido	24.0	8.0	1994	Jembatan tipe Lohse untuk beban truk 20 tf
Meoto	3.0	1.5	1994	Jembatan pelengkung dua sendi untuk pejalan kaki



Gambar 4.5 Jembatan Hiraoka.



Gambar 4.6 Jembatan Kaminomori.

2. Jembatan Kabel-Stayed — Tabel 4.3 menunjukkan tiga jembatan kabel-stayed. Gambar 4.7 menunjukkan jembatan Yokura. Jembatan ini memiliki panjang bentang rekor dunia 77,0 m, dan memiliki menara beton.

Tabel 4.3 Jembatan Kabel-Stayed

Nama	Bentang (m)	Lebar (m)	Tahun Konstruksi	Keterangan
Midori Kakehashi	27.5	2.0	1991	Jembatan pejalan kaki kontinu dua bentang

Yokura	77.0	5.0	1992	Jembatan pejalan kaki kontinu tiga bentang
Himehana	4.5	1.5	1995	Jembatan pejalan kaki kontinu tiga bentang



Gambar 4.7 Jembatan Yokura.

3. Jembatan Gantung — Tabel 4.4 menunjukkan dua jembatan gantung. Gambar 4.8 menunjukkan jembatan Momosuke. Jembatan Momosuke adalah jembatan gantung kayu tertua di Jepang. Jembatan ini dibangun pada tahun 1922, dan direkonstruksi pada tahun 1993.

Tabel 4.4 Jembatan Gantung

Nama	Bentang dan Lebar (m)	Tahun Konstruksi	Keterangan
Momosuke	104.5 2.3	1993	Jembatan penyeberangan kontinu empat bentang
Fujikura	32.0 1.8	1994	Jembatan penyeberangan bentang tunggal



Gambar 4.8 Jembatan Momosuke.

4.4 JEMBATAN BAJA

Di Jepang, logam sebagai material struktural dimulai dengan besi cor dan/atau besi tempa yang digunakan pada jembatan setelah tahun 1870-an. Namun, karena kurangnya fasilitas ini di daerah perkotaan, hampir semua jembatan tersebut telah rusak. Sejak tahun 1895, baja telah menggantikan besi tempa sebagai material logam utama untuk jembatan.



Gambar 4.9 Jembatan Kiyosu.

Setelah bencana gempa bumi besar Kanto pada tahun 1923, baja tarik tinggi telah diadopsi secara positif untuk penggunaan struktural jembatan dan Jembatan Kiyosu (panjang jembatan, 183 m; lebar jembatan, 22 m) yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 adalah contoh tipikalnya. Jembatan rantai-batang mata di atas sungai Sumida di Tokyo ini adalah jembatan gantung yang ditambatkan sendiri dan merupakan mahakarya di antara jembatan yang dipaku. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1928.



Gambar 4.10 Jembatan Rangka Tubular Melengkung Di Jalan Raya Ekspres Metropolitan.

Gambar 4.10 menunjukkan salah satu jembatan rangka tubular lengkung yang terletak di jalan tol metropolitan. Jembatan rangka lengkung telah menjadi fitur penting dari persimpangan jalan raya dan jalan tol perkotaan yang kini umum di Jepang.



Gambar 4.11 Jembatan Katashinagawa.

Gambar 4.11 menunjukkan Jembatan Katashinagawa (panjang bentang; $1033,8 \text{ m} = 116,9 + 168,9 + 116,9$; lebar jembatan, 18 m) yang terletak di prefektur Gunma. Jembatan ini merupakan jembatan rangka lengkung kontinu terpanjang di Jepang dan selesai dibangun pada tahun 1985.



Gambar 4.12 Jembatan Tatsumi.

Gambar 4.12 menunjukkan Jembatan Tatsumi (panjang jembatan, 544 m ; lebar jembatan, 8 m) yang terletak di Tokyo. Jembatan layang di jalan tol metropolitan ini merupakan contoh tipikal jembatan rangka kaku di daerah perkotaan dan selesai dibangun pada tahun 1977. Gambar 4.13 menunjukkan jembatan rangka kaku berbentuk π yang khas. Tipe struktur ini digunakan sebagai jembatan layang di atas jalan raya atau jembatan jalan raya di daerah pegunungan dan umum di Jepang.



Gambar 4.13 Jembatan Rangka Kaku Berbentuk Khas.



Gambar 4.14 Jembatan Saikai.

Jembatan Saikai yang terletak di prefektur Nagasaki (panjang bentang, 216 m; lebar jembatan, 7,5 m) yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 selesai dibangun pada tahun 1911. Pembangunan jembatan di Jepang setelah Perang Dunia II dimulai dengan sungguh-sungguh dengan Jembatan Saikai. Jembatan ini adalah jembatan lengkung tetap dan kondisi tegangan ditingkatkan dengan prategangan ketika lengkung utama akhirnya selesai.



Gambar 4.15 Jembatan Ooyano Tsubasa.



Gambar 4.15 menunjukkan Jembatan Ooyano yang terletak di prefektur Kumamoto. Jembatan ini merupakan jembatan lengkung tipe tembus yang khas (panjang jembatan, 156 m; lebar jembatan, 6,5 m) dan dibangun pada tahun 195.



Gambar 4.16 Jembatan Ikuura.

Gambar 4.16 menunjukkan Jembatan Ikuura yang terletak di prefektur Mie dan selesai dibangun pada tahun 1973. Bentang utama jembatan ini (panjang bentang, 197 m; lebar jembatan, 8,3 m) adalah lengkung terikat dengan penggantung miring dari sistem Nielsen yang merupakan salah satu jenis jembatan yang paling disukai di Jepang, bersama dengan jembatan kabel-stayed.



Gambar 4.17 Jembatan Tsurumi-Tsubasa.

Gambar 4.17 menunjukkan Jembatan Tsurumi-Tsubasa (panjang jembatan, 1021 m = bentang tengah 510 m + dua bentang samping 255 m; tinggi menara, 136,7 m) yang terletak di Teluk Yokohama, prefektur Kanagawa. Jembatan ini adalah jembatan kabel pancang bidang tunggal dengan tiga bentang kontinu. Ini adalah jembatan terpanjang dari jenis ini termasuk yang sedang dirancang di seluruh dunia dan selesai dibangun pada tahun 1994.





Gambar 4.18 Jembatan Iwakuro.

Gambar 4.18 menunjukkan Jembatan Iwagurojima (panjang jembatan, 790 m = bentang tengah 420 m + dua bentang samping 185 m; tinggi menara, 148,1 m; lebar jembatan, 22,5 m) yang terletak di prefektur Kagawa. Jembatan ini, yang selesai dibangun pada tahun 1988, adalah jembatan kabel pancang bidang ganda dengan tiga bentang kontinu dan merupakan jembatan gabungan untuk lalu lintas jalan raya dan kereta api. Jembatan ini memiliki empat jalur kereta api ekspres. Jembatan kabel pancang dengan empat jalur kereta api ekspres ini belum pernah terjadi sebelumnya, termasuk yang sedang dirancang di seluruh dunia.



Gambar 4.19 Jembatan Kanmon.

Gambar 4.19 menunjukkan Jembatan Kanmon (panjang jembatan, 1068 m = bentang tengah 420 m + dua bentang samping 185 m) yang selesai dibangun pada tahun 1973. Jembatan ini membentang di atas kanal Kanmon dan menghubungkan Moji di prefektur Fukuoka, Pulau Kyushu, dan Shimonoseki di prefektur Yamaguchi, pulau utama. Ini adalah jembatan pertama di Jepang yang membentang di atas kanal. Asosiasi Konstruksi Jembatan Baja Jepang telah berkontribusi dalam penyusunan beberapa foto di bagian ini.

4.5 JEMBATAN BETON

Pembangunan jembatan beton bertulang dimulai pada tahun 1900-an di Jepang tetapi secara bertahap menjadi tidak berguna karena perubahan kondisi utilitas di daerah perkotaan. Sejak tahun 1950-an, penggunaan prategang menyebar ke hampir setiap jenis elemen struktural sederhana dan bentang jembatan beton menjadi jauh lebih panjang. Mungkin fitur yang paling signifikan yang dapat diamati dari beton prategang adalah permukaannya yang bebas retak di bawah beban layanan. Terutama, ketika struktur terpapar kondisi cuaca, penghilangan retakan mencegah korosi. Banyak jembatan beton bertulang yang dibangun sebelumnya digantikan oleh jembatan beton prategang di Jepang.



Gambar 4.20 Jembatan Beton Bertulang Tipikal Yang Rusak Akibat Korosi.



Gambar 4.21 Chosei-Bashi.

Gambar 4.20 menunjukkan jembatan beton bertulang tipikal yang rusak akibat korosi. Sebagian besar jembatan jenis ini telah digantikan oleh struktur beton prategang. Gambar 4.21 menunjukkan Jembatan Chousei (panjang jembatan, 10,8 m = tiga bentang kontinu 3,6 m) yang terletak di prefektur Ishikawa. Jembatan ini adalah jembatan pelat komposit sederhana prategang. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1952 dan merupakan jembatan beton prategang pertama di Jepang. Gambar 4.22 menunjukkan Jembatan Ranzan (panjang jembatan, 75 m = bentang utama 51,2 m + dua bentang samping 11,9 m) yang terletak di

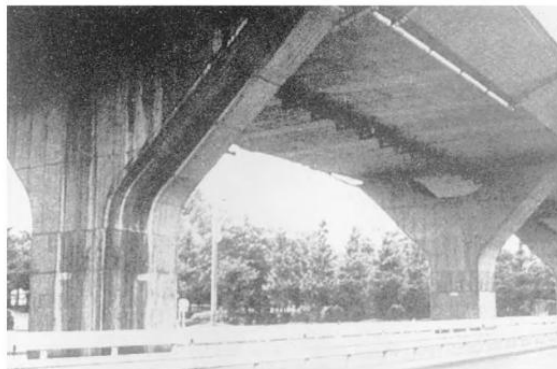
prefektur Kanagawa. Jembatan ini adalah jembatan rangka kaku yang terdiri dari tiga bentang dengan engsel. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1959 dan merupakan jembatan pertama di Jepang yang dibangun dengan metode kantilever.



Gambar 4.22 Jembatan Ranzan.



Gambar 4.23 Jembatan Pameran Internasional No. 9.



Gambar 4.24 Jembatan Takashimadaira.

Gambar 4.23 menunjukkan Jembatan Expo Internasional No. 9 (panjang jembatan, 27 m; lebar jembatan, 5,5 m; ketebalan pelat, 0,1 m) yang terletak di Osaka. Jembatan ini adalah jembatan pejalan kaki. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1969 dan merupakan jembatan pelat

gantungan pertama di Jepang. Gambar 4.24 menunjukkan Jembatan Takashimadaira (panjang jembatan, $230 \text{ m} = 75 + 75 + 80$; lebar jembatan, 18 m) yang terletak di Tokyo. Jembatan layang di jalan tol metropolitan ini terdiri dari tiga jembatan penghubung dan selesai dibangun pada tahun 1973. Masing-masing jembatan merupakan jembatan tiga bentang kontinu (panjang bentang, $25 \text{ m} + 25 + 25 \text{ m}$).



Gambar 4.25 Jembatan Akayagawa.



Gambar 4.26 Jembatan Omotogawa.

Gambar 4.25 menunjukkan Jembatan Akayagawa (panjang jembatan, 298 m; bentang lengkung, 116 m) yang terletak di prefektur Gunma. Jembatan lengkung rusuk ini adalah jembatan kereta api lengkung beton terpanjang di Jepang dan selesai dibangun pada tahun 1979. Rusuk lengkungnya terdiri dari pelat dengan ketebalan 0,8 m dan terutama menerima tegangan tekan. Gambar 4.26 menunjukkan Jembatan Omotogawa yang terletak di prefektur Iwate. Jembatan ini selesai dibangun pada tahun 1979 dan merupakan jembatan kereta api beton prategang pertama di dunia. Asosiasi Beton Prategang Jepang telah berkontribusi dalam penyusunan beberapa foto di bagian ini.

4.6 JEMBATAN HIBRIDA

Jembatan hibrida terdiri dari jembatan komposit dan jembatan gabungan. Jembatan komposit memiliki penampang baja dan beton yang dihubungkan oleh konektor geser. Jembatan gabungan terdiri dari berbagai material, seperti baja dan beton. Di Jepang, banyak jembatan balok komposit telah dibangun. Namun, sejak tahun 1980, jumlah jembatan balok komposit telah menurun. Salah satu alasan utamanya adalah kerusakan dek beton akibat kelebihan beban oleh truk berat. Dalam beberapa tahun terakhir, karena alasan ekonomi, pilihan konstruksi balok komposit telah dipertimbangkan kembali. Dalam sistem jembatan, pelat beton pracetak prategang digunakan untuk mencapai daya tahan yang lebih tinggi. Berikut ini adalah pengantar praktik dan rencana jembatan hibrida dari Perusahaan Jalan Raya Umum Jepang.



Gambar 4.27 Jembatan Hontani.

Gambar 4.27 menunjukkan Jembatan Hontani (panjang bentang total, $197 \text{ m} = 44 + 97 + 56 \text{ m}$; lebar, $11,4 \text{ m}$) yang dibangun di prefektur Gifu pada tahun 1998. Jembatan ini memiliki penampang kotak dengan pelat baja bergelombang yang digunakan sebagai penghubung antara pelat beton atas dan bawah. Untuk mengurangi berat total balok kotak beton, alih-alih menggunakan penghubung beton, digunakan penghubung baja. Sistem struktur semacam ini pertama kali digunakan pada Jembatan Cognac di Prancis. Namun, untuk sambungan antara beton dan pelat baja, digunakan sistem sederhana dengan batang tulangan yang terpasang pada pelat bergelombang dan tanpa flensa baja.



Gambar 4.28 Jembatan Tomoegawa.

Gambar 4.28 menunjukkan Jembatan Tomoegawa (panjang bentang total, $475 \text{ m} = 59 + 3 \times 119 + 59 \text{ m}$; lebar, $16,5 \text{ m}$) yang akan dibangun di jalur Jalan Tol Tomei Baru yang dibahas di Bagian 4.8.2. Jembatan ini memiliki penampang kotak, dan rangka baja digunakan sebagai penghubung antara pelat beton atas dan bawah, yang tujuan utamanya adalah untuk mengurangi berat total struktur atas. Ketika panjang bentang menjadi panjang, jika pelat baja digunakan sebagai penghubung, sambungan horizontal pada arah memanjang jembatan diperlukan untuk transportasi dari bengkel ke lokasi. Untuk menghindari masalah tersebut, direncanakan akan digunakan elemen rangka. Sistem jembatan jenis ini pertama kali digunakan pada Jembatan Arbois di Prancis. Namun, pada jembatan ini, sistem penghubung baru antara elemen rangka dan pelat beton akan digunakan.



Gambar 4.29 Jembatan Ibigawa.

Gambar 4.29 menunjukkan Jembatan Ibigawa (panjang bentang total, $1397 \text{ m} = 154 + 4 \times 271,5 + 157 \text{ m}$; lebar 33 m) yang akan dibangun di jalur Jalan Tol Meishin Baru. Jembatan ini melintasi Sungai Ibi di dekat Kota Nagoya. Jembatan Kisogawa, yang melintasi Sungai Kiso yang sejajar dengan Sungai Ibi, memiliki bentuk struktur yang mirip dengan Jembatan Ibigawa. Jembatan ini terdiri dari beton dan balok baja. Balok kotak baja digunakan untuk bagian tengah dengan panjang 100 m di empat bentang tengah, dan dihubungkan ke balok beton. Balok beton digantung oleh penahan diagonal dari menara beton. Tinggi menara

dari permukaan dek lebih rendah daripada yang digunakan pada jembatan kabel konvensional. Karena panjang bentangnya adalah 271,5 m, jika jembatan beton digunakan, kedalaman yang jauh lebih besar tidak dapat dihindari. Dengan menggantung balok beton dan menggunakan balok baja dengan bobot lebih ringan di bagian tengah jembatan, pengurangan kedalaman dapat dicapai.



Gambar 4.30 Jembatan Shinkawa.

Gambar 4.30 menunjukkan Jembatan Shinkawa (panjang bentang total, $278 \text{ m} = 2 \times 40 + 113 + 2 \times 40 \text{ m}$; lebar 21,4 m) yang akan dibangun di jalan raya di Pulau Shikoku. Jembatan ini terdiri dari balok kotak beton dan baja. Karena panjang bentang samping direncanakan pendek, digunakan balok kotak beton yang dihubungkan ke balok baja di bentang samping yang berdekatan dengan bentang utama. Tujuan dari tindakan penanggungan ini adalah untuk menyeimbangkan berat.



Gambar 4.31 Jembatan Kitachikuma.

Gambar 4.31 menunjukkan Jembatan Kitachikumagawa (panjang bentang total, $346,7 \text{ m} = 84,35 + 2 \times 89 + 84,35 \text{ m}$; lebar, 10,4 m) yang terletak di dekat Kota Nagano dan dibangun pada tahun 1997. Pada jembatan ini, pilar beton bertulang dihubungkan ke balok kotak baja. Dengan menggunakan struktur rangka kaku, bantalan dihindari dan kinerja yang baik terhadap gempa bumi tercapai.

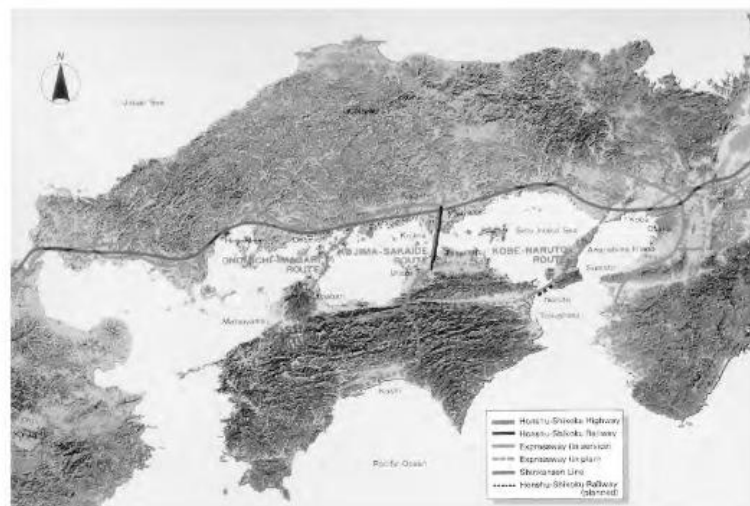


Gambar 4.32 Pilar Jembatan Shigehara.

Jembatan Shigehara (panjang bentang total; $166,8 \text{ m} = 47,4 + 72 + 47,4 \text{ m}$; lebar, $10,4 \text{ m}$) dibangun di jalan raya di Pulau Kyushu pada tahun 1995. Jembatan ini memiliki pilar komposit, di mana pipa baja terbungkus di dalamnya sebagai pengganti batang tulangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.32. Sistem ini dikembangkan untuk mengurangi volume batang tulangan, dan menghasilkan pengurangan pekerjaan konstruksi.

4.7 JEMBATAN BENTANG PANJANG (PROYEK JEMBATAN HONSHU–SHIKOKU)

Proyek Jembatan Honshu–Shikoku adalah proyek nasional untuk menghubungkan Kepulauan Honshu dan Shikoku. Pembangunan jembatan bentang panjang dimulai pada tahun 1975 dan selesai pada tahun 1999. Gambar 4.33 menunjukkan tiga rute, di mana banyak jembatan bentang panjang yang ditopang kabel dibangun. Berikut ini adalah pengenalan struktur atas dan bawah jembatan yang ditopang kabel ini.



Gambar 4.33 Rute Penghubung Jembatan Honshu–Shikoku.

1. Rute Kobe–Naruto

Rute ini memiliki panjang 89 km, dan terdapat dua jembatan gantung. Gambar 4.34 menunjukkan Jembatan Akashi Kaikyo (panjang bentang total, $3911 \text{ m} = 960 + 1991 + 960 \text{ m}$) yang merupakan jembatan gantung tiga bentang, dua engsel, dan memiliki panjang bentang rekor dunia 1991 m. Jarak antara dua kabel adalah 35,5 m. Jembatan ini dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1998. Rencana awalnya adalah untuk mengangkut lalu lintas kereta api dan jalan raya. Pada tahun 1985, rencana ini diubah sehingga jembatan hanya mengangkut lalu lintas jalan raya. Diketahui, dalam desain jembatan gantung bentang panjang, bahwa memastikan keselamatan terhadap ketidakstabilan statis dan dinamis di bawah beban angin merupakan masalah penting. Stabilitas aerodinamis diselidiki melalui uji terowongan angin lapisan batas dengan model lengkap $\frac{1}{100}$, dan pengujian dilakukan sebagai studi kerja sama antara Otoritas Jembatan Honshu–Shikoku dan Kementerian Konstruksi.



Gambar 4.34 Jembatan Akashi Kaikyo.

Melalui pengujian tersebut, dikonfirmasi bahwa flutter terjadi pada kecepatan angin melebihi 78 m/s , nilai yang jauh di atas kecepatan angin yang dibutuhkan. Untuk menghindari dua kabel utama di setiap sisi, digunakan kawat dengan kekuatan tarik 1760 MPa (lebih tinggi daripada yang digunakan pada jembatan gantung lainnya). Lebih lanjut, karena rasio beban hidup terhadap beban mati kecil, faktor keamanan 2,2 terhadap kekuatan tarik digunakan.



Gambar 4.35 Caisson Baja.

Metode pondasi caisson yang diletakkan secara horizontal diadopsi untuk pondasi menara utama. Metodenya adalah memasang caisson baja pracetak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.35 di dasar laut yang dikeruk dan kemudian menyelesaikan struktur fondasi kaku dengan mengisi beton di dalam kompartemen caisson. Beton desegregasi dikembangkan untuk tujuan ini. Fondasi jangkar dibangun dengan metode dinding lumpur bawah tanah di sisi Kobe dan metode fondasi sebar di sisi Awajishima. Beton yang sangat mudah dikerjakan dikembangkan untuk badan jangkar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.36.



Gambar 4.36 Badan Jangkar.

Gambar 4.37 menunjukkan Jembatan Ohnaruto yang selesai dibangun pada tahun 1985. Bentang tengah dan samping masing-masing adalah 876 dan 330 m. Jarak antara dua kabel

adalah 34 m. Untuk mencapai stabilitas aerodinamis, pelat penstabil vertikal dipasang di bawah jalur median dek untuk mengubah pola aliran angin. Jenis tindakan penanggulangan stabilisasi ini juga diadopsi pada rangka penguat Jembatan Akashi Kaikyo. Metode multi-kolom, yang bertujuan untuk menghindari gangguan terhadap pusaran air Naruto yang terkenal di Selat Naruto, digunakan untuk fondasi menara utama dan samping.



Gambar 4.37 Jembatan Ohnaruto.

2. Rute Kojima–Sakaide

Rute ini memiliki panjang 37 km, dan tiga jembatan gantung serta dua jembatan kabel-stayed dibangun. Karena jembatan-jembatan tersebut mengangkut lalu lintas jalan raya dan kereta api, maka dipilih struktur rangka; dek atasnya digunakan untuk jalan raya dan dek bawahnya untuk kereta api.

Metode peletakan caisson digunakan untuk 11 fondasi bawah air di rute ini. Beton pra-kemas, di mana agregat kasar pertama kali dikemas di dalam caisson baja dan kemudian mortar disuntikkan ke dalam rongga agregat, dikembangkan untuk beton bawah air fondasi.



Gambar 4.38 Jembatan Shimotsui-Seto.

Gambar 4.38 menunjukkan Jembatan Shimotsui-Seto yang selesai dibangun pada tahun 1988, yang merupakan jembatan bentang tunggal dengan panjang bentang 940 m. Jarak antara dua kabel adalah 35 m, nilai yang umum untuk semua jembatan gantung di rute ini. Kabel utama sebagian besar jembatan gantung bentang panjang di Jepang telah didirikan dengan metode untaian pracetak (PS). Namun, jembatan ini menggunakan metode pemintalan udara (AS). Karena kabel ditambatkan langsung ke batuan (jangkar terowongan), metode AS memungkinkan pembuatan sistem penjangkaran yang kecil.



Gambar 4.39 Jembatan Kita-Bisan Seto Dan Minami-Bisan Seto.

Gambar 4.39 menunjukkan Jembatan Kita Bisan-Seto dan Jembatan Minamai Bisan-Seto. Jembatan-jembatan ini memiliki rangka balok kontinu tiga bentang. Bentang tengah kedua jembatan ini masing-masing adalah 990 dan 1100 m, dan bentang sampingnya masing-masing adalah 274 m. Jembatan-jembatan ini dibangun pada tahun 1988. Tampilan sampingnya mirip dengan Jembatan San Francisco–Oakland Bay di Amerika Serikat. Kabel kedua jembatan ditambatkan ke sisi berlawanan dari satu jangkar umum. Oleh karena itu, jangkar hanya mengalami perbedaan antara komponen horizontal tegangan pada kabel kedua jembatan. Di ujung jembatan, dipasang sambungan ekspansi yang memungkinkan pergerakan 1,5 m, dan juga, sistem balok transisi digunakan untuk menyerap perubahan kemiringan yang besar pada rel untuk memastikan stabilitas kereta api. Metode pondasi caisson yang diletakkan digunakan untuk enam pondasi bawah air. Fondasi jangkar sisi Sikoku adalah yang terbesar di rute ini, mencapai 50 m di bawah permukaan laut.



Gambar 4.40 Jembatan Iwakurojima Dan Hitsuishijima.

Gambar 4.40 menunjukkan Jembatan Iwakurojima dan Jembatan Hitsuishijima. Kedua jembatan memiliki bentang tengah 420 m dan bentang samping 185 m. Jembatan-jembatan ini dibangun pada tahun 1988. Awalnya, jembatan-jembatan ini dirancang sebagai balok rangka tipe Gerber. Setelah melakukan studi tentang kemungkinan jembatan kabel-stayed, jembatan-jembatan tersebut diubah menjadi tipe tersebut. Karena berat balok yang dibutuhkan untuk membawa lalu lintas jalan dan kereta api cukup besar, dua kabel paralel ditambatkan ke batang atas di satu sisi balok rangka. Karena jarak yang sempit antara kedua kabel, terjadi osilasi gelombang di kabel sisi bawah. Untuk menekan osilasi, digunakan alat peredam yang menghubungkan kedua kabel. Di setiap ujung balok, dipasang pegas elastis searah longitudinal jembatan. Penopang elastis ini menyesuaikan periode alami jembatan, sehingga mengurangi gaya inersia akibat gempa bumi. Metode pondasi caisson yang diletakkan mendatar digunakan untuk lima pondasi bawah air.

3. Rute Onomichi–Imabara

Rute ini memiliki panjang 60 km. Di rute ini, lima jembatan gantung dan empat jembatan kabel pancang telah dibuka untuk lalu lintas.



Gambar 4.41 Jembatan Ohshima.

Gambar 4.41 menunjukkan Jembatan Ohsima yang selesai dibangun pada tahun 1988, yang merupakan jembatan bentang tunggal dengan panjang bentang 560 m. Jarak antara dua kabel adalah 22,5 m. Untuk balok penguat, digunakan penampang kotak trapesium dengan kedalaman 2,2 m karena efisiensi ekonomis dan perawatannya. Ini adalah aplikasi pertama balok kotak untuk balok penguat jembatan gantung di Jepang. Pondasi sebar diadopsi untuk semua jangkar dan menara utama yang dibangun di darat.



Gambar 4.42 Jembatan Innoshima.

Gambar 4.42 menunjukkan Jembatan Innoshima yang bentang tengah dan sampingnya masing-masing 770 dan 250 m. Jarak antara dua kabel adalah 26 m. Jembatan ini dibangun pada tahap awal proyek yang lebih besar. Satu untai yang terdiri dari 127 kawat, yang lebih besar dari ukuran yang lebih umum digunakan yaitu 61 atau 91, dikembangkan. Periode konstruksi yang lebih singkat dicapai dengan menggunakan untai ini. Jenis fondasi yang sama dengan Jembatan Ohsima diadopsi untuk jembatan ini.



Gambar 4.43 Jembatan Kurushima Kaikyo.



Gambar 4.43 menunjukkan Jembatan Kurishima Kaikyo, yang merupakan tiga jembatan gantung berurutan. Jembatan-jembatan ini dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1999. Bentang tengah ketiga jembatan tersebut adalah 600, 1020, dan 1030 m. Jarak antara dua kabel adalah 27 m. Balok jembatan memiliki penampang kotak yang ramping dengan kedalaman 4,3 m. Blok balok jembatan diangkut oleh tongkang yang dapat berlayar sendiri, diangkat dengan mesin pengangkat, dan akhirnya dipasang pada tali penggantung. Untuk penyambungan blok beberapa bagian menara, baut tarik digunakan sebagai pengganti baut gesekan. Dua jangkar umum yang memiliki sistem jangkar untaian kabel serupa dengan Jembatan Kita dan Minami Bisan-Seto dibangun di ketiga jembatan ini. Metode pemasangan caisson diterapkan untuk enam fondasi bawah air. Caisson beton digunakan untuk dua caisson yang relatif kecil, sedangkan caisson lainnya terbuat dari baja.



Gambar 4.44 Jembatan Tatarabashi.

Gambar 4.44 menunjukkan Jembatan Tarata, yang memiliki bentang rekor dunia 890 m dan bentang samping 320 dan 270 m. Jembatan ini dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1999. Karena bentang sampingnya pendek, digunakan balok beton prategang dengan bentang 110 dan 62,5 m dari kedua abutmen, dan dihubungkan ke balok baja. Balok beton prategang ini berfungsi untuk melawan gaya angkat yang besar dan berkontribusi pada peningkatan kekakuan lentur bidang jembatan. Kedalaman balok adalah 2,7 m dan rasio panjang bentang tengah terhadap kedalaman balok sekitar 330. Ketidakstabilan tekuk balok diselidiki melalui studi analitis dan eksperimental. Dalam studi eksperimental, digunakan model penuh $\frac{1}{50}$. Stabilitas aerodinamis diselidiki melalui uji terowongan angin dengan model penuh $\frac{1}{70}$ dan model penuh $\frac{1}{200}$. Pada model terakhir, pengaruh topografi sekitarnya terhadap perilaku aerodinamis juga diselidiki. Metode caisson yang diletakkan digunakan untuk dua pondasi menara.



Gambar 4.45 Jembatan Ikuchi.

Gambar 4.45 menunjukkan Jembatan Ikuchi yang selesai dibangun pada tahun 1989. Bentang tengahnya adalah 490 m dan bentang sampingnya adalah 150 m. Sekali lagi, karena panjang bentang samping pendek, balok beton prategang digunakan di kedua bentang samping dan dihubungkan ke balok baja. Berbagai metode penghubung diteliti, di mana kombinasi pelat penahan beban dan stud geser digunakan. Setiap kabel terdiri dari kawat baja galvanis dengan diameter 7 mm, dan dilapisi dengan tabung polietilen (PE). Pondasi tiang pancang diadopsi untuk semua pilar karena tanahnya terdiri dari batuan lapuk.

4.8 TEKNOLOGI JEMBATAN BARU BERKAITAN DENGAN PROYEK JEMBATAN KHUSUS

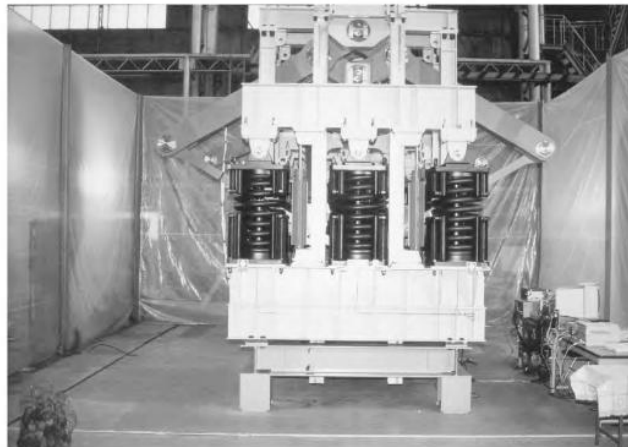
1. Material Baru pada Jembatan Tokyo Wan Aqua-Line

Jalan Tokyo Wan Aqua-Line dengan panjang 15,1 km melintasi Teluk Tokyo, dan menghubungkan prefektur Kanagawa dan Chiba. Jalan ini dibuka untuk lalu lintas pada Desember 1997. Jalan ini memiliki bagian laut sepanjang 14,3 km, dan terdiri dari terowongan sepanjang kurang lebih 9,5 km dan struktur jembatan sepanjang 4,4 km. Di sini, garis besar jembatan dan material baru untuk perlindungan korosi pilar baja diperkenalkan.



Gambar 4.46 Jembatan Baja Di Tokyo Wan Aqua-Line.

Gambar 4.46 menunjukkan tampilan umum jembatan, yang terdiri dari jembatan balok kotak baja kontinu 3, 10, 11, 10, dan 9 bentang. Karena bentang maksimum 240 m dibutuhkan untuk saluran navigasi dan kekuatan pondasi tanah lemah, balok kotak baja dirancang dan dibangun. Untuk pemasangan sebagian besar jembatan, derek apung dan tongkang dek digunakan. Setelah penyelesaian struktur atas, osilasi yang diinduksi pusaran dengan amplitudo lebih dari 0,5 m diamati. Untuk menekannya, 16 peredam massa tertala, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.47, dipasang. Sebagian dek baja dipotong dan diperkuat. Setelah memasang peredam massa tertala, pelat yang dilepas dilas ke posisi semula.



Gambar 4.47 Peredam Massa Tertala.

Untuk mencapai daya tahan yang lebih tinggi pada pilar baja, baja berlapis titanium dipasang pada pilar baja. Gambar 4.48 menunjukkan pilar dengan baja berlapis titanium. Ini digunakan di wilayah pilar baja yang dipengaruhi oleh pergerakan pasang surut dan semprotan air asin. Dengan menggunakan sistem ini, diharapkan sistem bebas perawatan lebih dari 100 tahun.



Gambar 4.48 Pilar Baja Berlapis Titanium.

2. Sistem Jembatan Baru di Jalan Tol Tomei Meishin Baru

Japan Highway Public Corporation mulai membangun Jalan Tol Tomei Baru (antara Tokyo dan Kota Nagoya) Meishin (antara Kota Nagoya dan Kobe) yang panjangnya sekitar 600 km dan menghubungkan kota-kota besar Tokyo, Nagoya, Osaka, dan Kobe.



Gambar 4.49 Balok I Pelat Dengan Balok Melintang Sederhana.

Gambar 4.49 menunjukkan jembatan balok I pelat dengan sejumlah kecil balok utama, yang merupakan sistem jembatan baru yang digunakan untuk Jembatan Layang Ohbu di dekat Kota Nagoya. Jembatan layang ini dibangun pada tahun 1998. Secara konvensional, jarak balok I, yang sesuai dengan bentang pelat beton, telah dirancang kurang dari 3 m. Namun, dalam proyek ini, dengan menggunakan pelat beton prategang pracetak, bentang pelat diperpanjang hingga 6 m. Oleh karena itu, untuk jembatan tiga jalur dengan lebar sekitar 15 m, jumlah balok I dikurangi dari 6 menjadi 3. Selanjutnya, balok I dihubungkan oleh balok sederhana yang disusun pada jarak sekitar 10 m saja. Secara konvensional, balok I telah diperkuat oleh balok melintang atau penguat, yang dipasang pada jarak kurang dari 6 m, dan anggota penguat lateral, yang dipasang pada tingkat yang lebih rendah dari balok. Sistem jembatan sederhana ini dapat mengurangi biaya konstruksi dan juga area pengecatan. Lebih lanjut, sistem ini memudahkan inspeksi.

3. Sistem Kendaraan Levitas Magnetik Superkonduktor

Perusahaan Kereta Api Jepang memiliki rencana untuk membangun jalur baru, jalur Chou-Shinkansen. Menggunakan kereta api berkecepatan tinggi, jalur ini akan melintasi bagian tengah Jepang dari Tokyo ke Osaka. Saat ini, di jalur uji sepanjang 18,4 km yang dibangun di prefektur Yamanashi, stabilitas operasional, dan lainnya., dari kereta api berkecepatan tinggi sedang diuji.



Gambar 4.50 Kereta Maglev Dan Jembatan Ogatayama.

Gambar 4.50 menunjukkan kereta Maglev yang melaju melalui Jembatan Ogatayama yang akan dijelaskan nanti. Kereta ini melayang 100 mm dari tanah dan melaju dengan kecepatan 500 km/jam. Gaya tolak dan gaya tarik yang dihasilkan antara magnet superkonduktor pada kendaraan dan kumparan pada dinding samping (kumparan pendorong dan kumparan levitasi) digunakan untuk mendorong dan melayangkan kereta. Berikut adalah masalah teknis utama yang terlibat dalam perancangan struktur.

1. Defleksi struktur harus kecil untuk memastikan stabilitas operasional dan kenyamanan perjalanan kereta.
2. Akurasi tinggi harus dicapai saat memposisikan kumparan pada dinding samping.
3. Gaya hambat magnetik akibat fenomena magnetik yang dihasilkan antara magnet dan baja harus kecil.

Penanggulangan masalah ketiga adalah menggunakan logam bermagnet rendah seperti baja mangan tinggi austenitik ketika logam tersebut ditempatkan dalam jarak 1,5 m dari magnet superkonduktor.

Jembatan Ogatayama yang selesai dibangun pada tahun 1995, sebuah jembatan Nielsen Lohse, ditunjukkan pada Gambar 4.50. Bentang dan tinggi lengkungnya masing-masing adalah 136,5 dan 23 m. Lebar antara pusat batang lengkung adalah 15 m di pangkal lengkung dan 9,6 m di puncak lengkung. Pada jembatan ini, struktur baja seperti batang lengkung dan sistem rantai dirancang untuk ditempatkan 1,5 m dari magnet. Namun, untuk batang penguat yang terbungkus dalam jalur pemandu, digunakan baja mangan tinggi bermagnet rendah.

4. Jembatan Menshin di Jalan Tol Hanshin

Pada pagi hari tanggal 17 Januari 1995, gempa bumi dahsyat mengguncang bagian selatan prefektur Hyogo yang padat penduduk. Banyak jembatan baja dan beton roboh akibat runtuhnya pilar beton bertulang. Banyak pilar baja mengalami kerusakan tekuk dan dua pilar roboh. Segera setelah gempa, penyelidikan dimulai untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan dan pekerjaan perbaikan, seperti melapisi pilar beton dan menambah rusuk memanjang pada pilar baja. Dek beton diganti dengan dek baja, dan balok beton prategang yang roboh diganti dengan jembatan baja. Hal ini untuk mengurangi berat struktur atas. Selain itu, bantalan logam juga diganti dengan penyangga karet untuk peredaman yang lebih baik.



Gambar 4.51 Bantalan Karet.



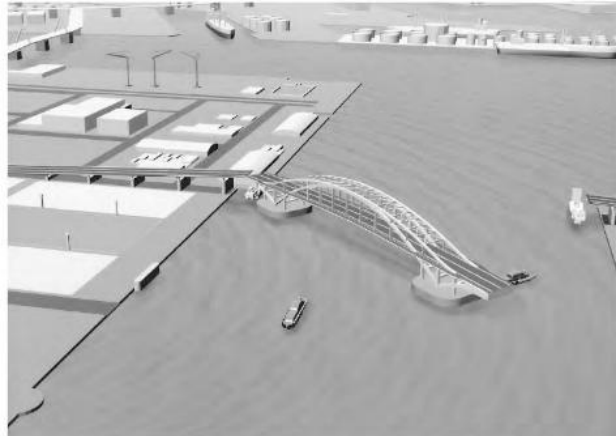
Gambar 4.52 Pilar Rangka Kaku Penampang Benten.

Gambar 4.51 menunjukkan penyangga karet yang khas. Hampir semua bantalan logam diganti dengan jenis ini. Gambar 4.52 menunjukkan pilar tipe rangka kaku. Di kaki kolom, bantalan karet dipasang untuk mengisolasi percepatan gempa. Jembatan dengan sistem isolasi ini disebut jembatan Menshin.

5. Jembatan Apung Bergerak di Kota Osaka

Jembatan ayun dan apung pertama di dunia sedang dibangun di Pelabuhan Osaka. Jembatan ini akan selesai pada tahun 2000. Peran utama jembatan ini adalah untuk menghubungkan dua pulau reklamasi (nama-namanya adalah Maishima dan Yumenoshima). Lebar jalur air antara kedua pulau tersebut sekitar 400 m. Jika terjadi kecelakaan yang tidak terduga di jalur air utama Pelabuhan Osaka di dekatnya, jalur air (jalur bawah air) ini akan menyediakan pintu masuk alternatif. Pada kesempatan seperti itu, kapal berukuran besar akan

melewati jalur bawah air. Selain itu, pondasi tanah tidak cukup kuat untuk menahan beban jembatan konvensional. Oleh karena itu, jembatan apung bergerak dengan dua pondasi ponton dan tipe ayun telah dirancang. Jembatan ini memiliki panjang total 940 m dan lebar 38,4 m. Bagian apungnya memiliki panjang 410 m dan bentang utama 280 m dengan rusuk lengkung ganda yang terhubung secara kaku ke dua ponton baja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Keamanan terhadap respons dinamis yang dipengaruhi oleh gelombang, angin, gempa bumi, dan beban rel yang berat telah diteliti melalui studi numerik dan eksperimental.



Gambar 4.53 Jembatan Yumeshima-Maishima.

Ringkasan

Tabel kronologis revisi utama spesifikasi standar jembatan jalan raya dan spesifikasi standar beton di Jepang selama paruh kedua abad ke-20 ditunjukkan pada Tabel 4.5. Bencana gempa bumi besar di Jepang juga ditunjukkan pada Tabel 4.5 untuk tujuan referensi. Spesifikasi desain jembatan telah direvisi terutama setiap kali terjadi gempa bumi kuat seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5. Kita dapat menyatakan bahwa pengaruh terpenting pada evolusi jembatan di Jepang adalah gempa bumi. Ini menunjukkan bahwa bencana telah mengendalikan rekayasa jembatan. Evaluasi kondisi untuk menghasilkan jembatan yang efisien untuk gerakan seismik jelas merupakan masalah rekayasa.

Oleh karena itu, para insinyur jembatan harus meningkatkan upaya mereka mulai sekarang sehingga rekayasa jembatan dapat mengendalikan bencana jembatan. Evolusi jembatan akan dicapai melalui upaya para insinyur jembatan untuk mengembangkan kinerja struktural optimal dengan material yang akan lebih sedikit tersedia, lebih tahan lama, memberikan kekuatan yang lebih tinggi, dan menghasilkan gaya inersia dinamis yang lebih rendah.

Tabel 4.5 Tabel Kronologis Tentang Revisi Spesifikasi Standar Dan Bencana Gempa Bumi Besar Di Jepang

Tahun	Peristiwa

<u>1948</u>	Bencana gempa bumi Fukui
1956	Revisi Spesifikasi Standar Jembatan Jalan Raya
<u>1964</u>	Bencana gempa bumi Niigata
<u>1968</u>	Bencana gempa bumi lepas pantai Tokachi
1971	Penetapan penyuntingan mandiri pada spesifikasi desain seismik dalam Spesifikasi Standar Jembatan Jalan Raya
1973	Revisi Spesifikasi Standar Jembatan Jalan Raya
<u>1978</u>	Bencana gempa bumi lepas pantai Prefektur Miyagi
1980	Revisi Spesifikasi Standar Jembatan Jalan Raya
1986	Revisi Spesifikasi Standar Beton
<u>1995</u>	Bencana gempa bumi besar Hanshin-Awaji
1996	Revisi Spesifikasi Standar Jembatan Jalan Raya
	Revisi Spesifikasi Standar Beton

BAB 5

PRAKTIK DESAIN DI RUSIA

5.1 PENDAHULUAN

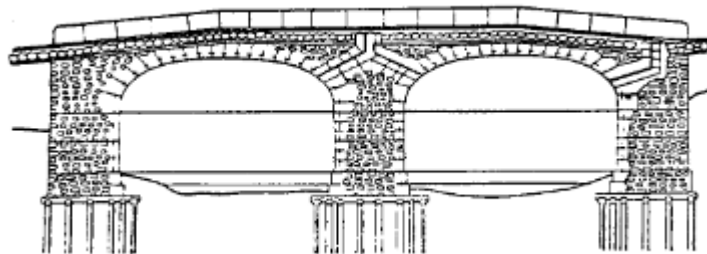
Desain dan praktik konstruksi jembatan di bekas Uni Soviet, khususnya Rusia, tidak banyak dikenal oleh para insinyur asing. Banyak teori struktural dan praktik konstruksi canggih telah dikembangkan. Mengingat ekonomi global, peluang untuk menerapkan teori-teori canggih tersebut ke dalam praktik menjadi tersedia dengan runtuhnya tirai besi.

Pada tahun 1931, Franklin D. Roosevelt mengatakan, “Tidak diragukan lagi bahwa dalam banyak hal, kisah pembangunan jembatan adalah kisah peradaban. Dengan itu, kita dapat dengan mudah mengukur kemajuan di setiap negara tertentu.” Pengembangan teknik jembatan didasarkan pada pengalaman sebelumnya dan aspek historis. Tentu saja, pengalaman Rusia dalam bidang rekayasa jembatan memiliki kekhasan tersendiri.

5.2 EVOLUSI SEJARAH

1. Jembatan Batu Bata dan Kayu

Jenis jembatan yang paling umum di masa lalu adalah jembatan kayu dan batu bata. Karena terdapat banyak sumber daya kayu alami di Rusia kuno, jembatan kayu dibangun hingga akhir abad ke-15.



Gambar 5.1 Jembatan Batu Bata Khas (1786).

Selama berabad-abad, jembatan batu bata (Gambar 5.1) telah dibangun di wilayah bekas republik Uni Soviet seperti Georgia dan Armenia. Dari berbagai sumber diketahui bahwa jembatan batu bata tertua di Armenia dan Georgia dibangun sekitar abad ke-4 hingga ke-6. Salah satu jembatan batu bata tua yang masih ada di Armenia adalah Jembatan Sanainsky di atas Sungai Debeda-chai yang dibangun pada tahun 1234. Jembatan Merah di atas Sungai Chram di Georgia dibangun pada abad ke-11. Kemungkinan jembatan batu bata pertama yang dibangun di Rusia berada di Moskow. Jembatan tertua yang dibangun pada tahun 1516 adalah jembatan lengkung batu Troitsky di dekat Gerbang Troitsky Kremlin. Jembatan batu terbesar di atas Sungai Moskva, bernama Bolshoi Kamenny, dirancang oleh Yacobson dan Kristler. Pembangunan dimulai pada tahun 1643 tetapi setelah 2 tahun pembangunan dihentikan karena kematian Kristler. Baru pada tahun 1672 pembangunan ini dilanjutkan oleh seorang



ahli Rusia yang tidak dikenal dan jembatan tersebut sebagian besar selesai pada tahun 1689. Akhirnya, Tsar Rusia Peter I menyelesaikan pembangunan jembatan ini. Jembatan Bolshoi Kamenny adalah struktur tujuh bentang dengan panjang total 140 m dan lebar 22 m. Jembatan ini dibangun kembali dua kali (pada tahun 1857 dan pada tahun 1939). Secara umum, jembatan batu tidak dapat bersaing dengan jembatan dari bahan lain, karena biaya dan durasi pembangunannya.

Ivan Kulibin (insinyur mekanik Rusia, 1735 hingga 1818) merancang jembatan lengkung kayu di atas Sungai Neva dengan bentang sekitar 300 m, yang menggambarkan salah satu upaya dalam mencari bentuk struktur yang efisien. Ia menguji model jembatan skala $\frac{1}{10}$ untuk menyelidiki kecukupan elemen dan menemukan kekuatan yang besar pada sistem struktur baru tersebut. Namun, karena alasan yang tidak diketahui, jembatan tersebut tidak dibangun.

2. Jembatan Besi dan Baja

Kemajuan yang luas dalam pembangunan jembatan pada awal abad ke-19 dipengaruhi oleh perkembangan industri secara keseluruhan. Sejumlah jembatan lengkung besi cor untuk lalu lintas jalan raya dan kereta api dibangun. Pada waktu yang hampir bersamaan, pembangunan jembatan gantung baja dimulai di Petersburg. Pada tahun 1824, Jembatan Panteleimonovsky di atas Sungai Fontanka dengan bentang sekitar 40 m dibangun. Pada tahun 1825, Jembatan Potchtamsky untuk pejalan kaki di atas Sungai Moika Bankovsky dibangun, dan Jembatan Singa dan Jembatan Mesir di atas Sungai Fontanka dengan bentang 38,4 m dibangun pada tahun 1827.

Jembatan gantung terbesar yang dibangun pada abad ke-19 adalah jembatan gantung rantai di atas Sungai Dnepr di Kiev (Ukraina), dengan panjang total 710 m termasuk enam bentang (66,3 dan 134,1 m) dan jalan pendekat, yang dibangun pada tahun 189. Pada tahun 1851 hingga 1853, dua jembatan gantung serupa dibangun di atas Sungai Velikaya di Kota Ostrov dengan bentang 93,2 m. Perkembangan sistem jembatan gantung didasarkan pada penemuan kabel kawat. Di Rusia, salah satu jembatan gantung pertama yang menggunakan kabel kawat dibangun pada tahun 1836 di dekat benteng Brest-Litovsk. Jembatan ini melintasi Sungai West Bug, dengan bentang sekitar 89 m. Namun, jembatan gantung pada paruh pertama abad ke-19, karena kurangnya pemahaman tentang kinerja struktural, memiliki kekakuan yang tidak memadai baik dalam arah vertikal maupun horizontal. Hal ini tampaknya menjadi penyebab utama serangkaian bencana yang melibatkan jembatan gantung di berbagai negara. Tidak ada kejadian bencana yang tercatat di Rusia. Untuk mengurangi fleksibilitas jembatan gantung, awalnya digunakan rangka penguat kayu dan kemudian baja. Namun, inovasi ini hanya meningkatkan kinerja sebagian, dan pengembangan jembatan balok menjadi tak terhindarkan pada paruh kedua abad ke-2.

Jembatan balok I pertama di Rusia adalah Jembatan Semenovskiy di atas Sungai Fontanka di Petersburg yang dibangun pada tahun 1857 dan jembatan di atas Sungai Neman di Kovno di jalur kereta api Petersburg–Warsawa yang dibangun pada tahun 1817. Namun, balok I untuk bentang yang besar terbukti sangat berat, dan ini mendikte penerapan sistem rangka yang lebih luas.

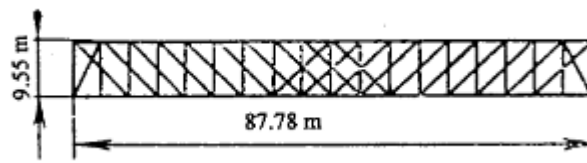
Pembangunan jalur kereta api antara Petersburg dan Moskow pada tahun 1847 hingga 1851 membutuhkan sejumlah besar jembatan. Zhuravsky memodifikasi sistem struktur rangka kayu yang diterapkan oleh Howe pada tahun 1840 untuk memasukkan sistem kontinu. Jembatan-jembatan di atas Sungai Volga, Volhov, dan beberapa sungai lainnya memiliki bentang yang relatif besar; misalnya, jembatan di atas Sungai Msta memiliki bentang 61,2 m. Sistem struktur ini (dikenal di Rusia sebagai sistem Howe–Zhuravsky) selanjutnya digunakan secara luas untuk konstruksi jembatan hingga pertengahan abad ke-3.

Jembatan rangka baja pada awalnya secara struktural mengulangi jenis jembatan kayu seperti rangka papan atau rangka kisi. Sebuah jembatan kereta api jalur ganda yang terkenal dengan sistem rangka dek, yang dirancang oleh Kerbedz, dibangun pada tahun 1857 di atas Sungai Luga di jalur kereta api Petersburg–Warsawa (Gambar 5.2). Jembatan ini terdiri dari dua bentang kontinu (masing-masing 55,3 m). Penampang berbentuk P digunakan untuk anggota korda, dan sudut untuk diagonal. Setiap jalur ditopang oleh struktur atas terpisah yang mencakup dua bidang rangka yang berjarak 2,25 m. Jembatan rangka luar biasa lainnya yang dibangun pada tahun 1861 adalah Jembatan Borodinsky di atas Sungai Moskva di Moskow, dengan panjang bentang 42,7 m. Landasan utama tahun 1860-an adalah pengenalan fondasi caisson untuk substruktur jembatan.



Gambar 5.2 Jembatan Di Atas Sungai Luga (1857).

Hingga tahun 1880-an, struktur atas baja dibuat dari baja tempa. Struktur atas jembatan dari baja cor muncul di Rusia pada tahun 1883. Dan setelah tahun 1890-an, baja tempa tidak lagi digunakan untuk struktur atas. Pada tahun 1884, Belebubsky menetapkan desain standar pertama untuk struktur atas baja yang mencakup rentang bentang dari 54,87 hingga 109,25 m. Untuk bentang yang melebihi 87,78 m, dirancang rangka poligonal. Struktur atas tipikal dengan bentang 87,78 m ditunjukkan pada Gambar 5.3. Perkembangan dalam teori struktur dan kemajuan teknologi dalam industri baja memperluas kemampuan fabrikasi struktur baja di pabrik dan membentuk dasar untuk penyederhanaan lebih lanjut dari sistem rangka dan peningkatan ukuran panel. Perbaikan ini menghasilkan penerapan rangka tipe segitiga. Pada akhir abad ke-19, kecenderungan untuk beralih dari rangka kisi ke rangka segitiga diuraikan, dan Proskuryakov memulai penggunaan sistem rangka segitiga yang dipaku pada struktur atas jembatan. Jembatan rangka segitiga berpaku keling pertama di Rusia dibangun pada tahun 1887 di jalur kereta api Romny–Kremenchug.



Gambar 5.3 Struktur Rangka Standar.

Banyak jembatan balok yang dibangun pada pertengahan abad ke-19 adalah tipe bentang kontinu. Sistem jembatan kontinu memiliki keunggulan ekonomi, tetapi sensitif terhadap penurunan pilar dan memiliki pergerakan yang lebih besar karena perubahan suhu. Mempertimbangkan aspek-aspek ini merupakan tugas yang rumit pada saat itu. Untuk mentransfer sistem kontinu ke sistem kantilever yang ditentukan secara statis, engsel diatur di dalam bentang. Ini adalah arah baru dalam konstruksi jembatan. Jembatan kereta api baja kantilever pertama di atas Sungai Sula yang dirancang oleh Proskuryakov dibangun pada tahun 1888. Jembatan jalan raya baja kantilever pertama di atas Sungai Dnepr di Smolensk dibangun. Jembatan baja sistem kantilever di atas Sungai Dnestr, jembatan gabungan kereta api dan jalan raya, dengan bentang 102 m, dirancang oleh Boguslavsky dan dibangun pada tahun 1894. Pada tahun 1908, jembatan baja di atas Sungai Dnepr dekat Kichkas, yang mengangkut lalu lintas kereta api dan jalan raya dan dengan bentang rekor 190 m, dibangun. Pengembangan teknik baru untuk konstruksi fondasi dalam dan peningkatan beban hidup pada jembatan membuat penggunaan sistem kontinu lebih layak dibandingkan dengan sistem lainnya.

Pada pertengahan abad ke-19, jembatan lengkung biasanya dibangun dari besi cor, tetapi sejak tahun 1880-an, jembatan lengkung baja mulai mendominasi jembatan besi cor. Jembatan lengkung baja pertama dirancang sebagai lengkung tetap. Jembatan lengkung berengsel muncul kemudian dan menjadi lebih banyak digunakan. Kebutuhan untuk menerapkan lengkung di daerah dataran menyebabkan terciptanya jembatan lengkung cekung.

5.3 PERKEMBANGAN MODERN

Abad ke-20 sangat luar biasa dalam penyebaran pesat material baru (beton bertulang, beton prategang, dan baja berkekuatan tinggi), bentuk struktur baru (jembatan kabel pancang), dan teknik konstruksi baru (konstruksi segmental) dalam rekayasa jembatan. Jembatan kereta api rangka lengkung baja yang ditopang di atas Sungai Moskva yang dibangun pada tahun 1904 ditunjukkan pada Gambar 5.4. Untuk mengurangi gaya dorong, digunakan lengkung sistem kantilever. Misalnya, Jembatan Kirovsky di atas Sungai Neva dengan bentang 97 m dibangun di Petersburg pada tahun 1902. Pembangunan jalur kereta api baru membutuhkan pembangunan banyak jembatan panjang dengan bentang ganda. Pada tahun 1932, dua jembatan lengkung baja terkemuka yang dirancang oleh Streletsky dibangun di atas Sungai Dnepr Lama dan Baru (Ukraina) dengan bentang utama masing-masing 224 m dan 140 m (Gambar 5.5).

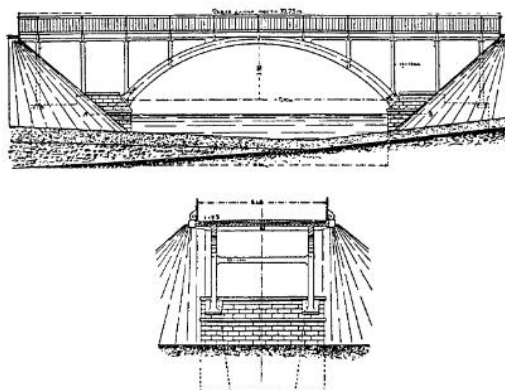


Gambar 5.4 Jembatan Kereta Api Lengkung Baja Di Atas Sungai Moskva.



Gambar 5.5 Jembatan Lengkung Baja Dengan Bentang 224 M.

Struktur beton bertulang pertama dalam praktik konstruksi jembatan Rusia adalah gorong-gorong di jalur kereta api Moskow–Kazan (1892). Pada awal abad ke-20, penggunaan beton bertulang terbatas pada jembatan kecil dengan bentang hingga 6 m. Pada tahun 1903, jembatan lengkung berusuk jalan raya di atas Sungai Kaslagach dibangun (Gambar 5.6). Jembatan ini memiliki panjang total 30,73 m dan panjang bentang lengkung 17 m. Pada tahun 1904, jembatan jalan raya di atas Sungai Kazarmen dibangun. Jembatan ini memiliki panjang total 298,2 m dan terdiri dari 13 bentang lengkung beton bertulang sepanjang 21,3 m, dengan rusuk penampang kotak.



Gambar 5.6 Jembatan Lengkung Berusuk Beton Bertulang Di Atas Sungai Kashlagash.



Infrastruktur transportasi yang ada di Rusia kurang berkembang dibandingkan dengan negara-negara Eropa lainnya. Kepadatan rata-rata jalur kereta api dan jalan raya sekitar lima kali lebih rendah daripada di Amerika Serikat. Selama dua dekade terakhir, aktivitas konstruksi kereta api dan jalan raya telah melambat, tetapi desain dan konstruksi jembatan telah meningkat secara dramatis.

1. Standardisasi Struktur Atas

Tinjauan jumlah dan skala jembatan yang dibangun di Rusia menunjukkan bahwa sekitar 70% jembatan kereta api memiliki panjang bentang kurang dari 33,6 m, dan 80% jembatan jalan raya memiliki kurang dari 42 m. Oleh karena itu, jembatan berukuran sedang dan kecil mendominasi praktik konstruksi dan solusi struktural standar telah dikembangkan dan digunakan secara efisien, menggunakan fitur desain standar untuk jembatan modern.

Standardisasi yang ada saat ini mencakup desain struktur atas untuk jenis jembatan tertentu. Untuk jembatan kereta api, desain standar berlaku untuk bentang dari 69 hingga 132,0 m. Ini adalah struktur atas beton bertulang tipe pelat, balok memanjang, balok kotak; struktur atas baja tipe pelat, balok memanjang; struktur atas komposit; Struktur atas baja berupa balok pelat tembus, rangka dek, dan tipe rangka tembus. Untuk jembatan jalan raya, desain standar mencakup rentang bentang dari 12 hingga 147 m. Ini adalah struktur atas beton bertulang berupa pelat berongga, balok memanjang, balok kanal (berbentuk P), balok web padat, tipe balok kotak, struktur atas komposit tipe balok web baja, dan struktur atas baja tipe balok web dan kotak.

Jembatan jalan raya modern dengan bentang hingga 33 m dan jembatan kereta api hingga 27,6 m biasanya dibangun dengan balok sederhana beton pracetak. Untuk jembatan jalan raya, struktur atas menerus tipe balok web padat dari segmen beton pracetak biasanya digunakan untuk bentang 42 dan 63 m, dan tipe balok kotak dari segmen kotak pracetak digunakan untuk bentang 63 dan 84 m. Berat segmen pracetak tidak melebihi 60 ton dan memenuhi persyaratan jarak bebas transportasi kereta api dan jalan raya. Untuk jembatan kereta api, struktur atas kotak baja dengan bentang penuh (33,6 m) yang dibuat di pabrik telah menjadi yang paling umum dalam praktik saat ini.

Situasi saat ini di Rusia ditandai dengan peningkatan relatif dalam skala penerapan struktur atas baja untuk jembatan. Setelah tahun 1990-an, sejumlah besar jembatan baja jalan raya dibangun. Konstruksinya terutama didasarkan pada modularisasi elemen struktur atas: segmen yang dibuat di pabrik dengan panjang hingga 21 m. Banyak di antaranya dibangun di kota Moskow, dan di atas Jalan Lingkar Moskow, serta jembatan di atas Sungai Oka di Nizhni Novgorod, di atas Sungai Belaya di kota Ufa, dan banyak lainnya. Sejumlah jembatan jalan raya baja dan komposit dengan bentang mulai dari 60 hingga 150 m saat ini sedang dalam tahap desain atau konstruksi.

Dalam pembangunan jembatan di atas Sungai Moskva, Dnepr, Oka, Volga, Irtish, Ob, di jalan raya lingkar sekitar Ankara (Turki), di Jalan Lingkar Moskow, dan beberapa lainnya, struktur atas baja kontinu tipe web dan box girder dengan kedalaman struktur permanen biasanya digunakan. Struktur atas dirakit dengan elemen modular yang difabrikasi di pabrik, yang dilas di pabrik atau lokasi konstruksi untuk membentuk konfigurasi penampang lengkap.



Pemasangan biasanya dilakukan dengan metode peluncuran bertahap atau konstruksi segmen kantilever.

Penggunaan jembatan baja yang luas di Rusia didasarkan pada solusi struktural optimal, yang memperhitungkan interaksi teknologi fabrikasi dan teknik pemasangan. Efisiensi dibuktikan dengan sambungan las berkualitas tinggi, yang memungkinkan pemasangan segmen pracetak besar, dan pengurangan jumlah pekerjaan dan periode konstruksi. Biaya perawatan yang rendah yang dapat diprediksi dengan cukup akurat juga merupakan keuntungan, sementara struktur atas beton bertulang prategang dalam beberapa kasus memerlukan biaya penting dan seringkali tidak terduga untuk memastikan kapasitas dan daya tahannya.

2. Fitur Struktur Bawah

Konstruksi pilar jembatan di Rusia sebagian besar berorientasi pada penggunaan segmen beton pracetak yang dikombinasikan dengan beton cor di tempat. Praktik umum adalah membangun pilar dengan kolom penampang persegi panjang atau lingkaran seragam yang dipasang di bagian bawah fondasi. Untuk jembatan jalan raya dengan bentang hingga 33 m, kolom persegi panjang pracetak setinggi penuh 50×80 cm merupakan desain standar. Untuk jembatan bentang yang lebih panjang, penggunaan segmen kontur pracetak yang membentuk bentuk luar pilar dan metode pengecoran di tempat menjadi lebih luas.

Praktik umum adalah penggunaan tiang pancang beton pracetak yang dipancangkan untuk fondasi tiang pancang. Jenis standar tiang pancang beton pracetak adalah penampang persegi $0,35 \times 0,35$, $0,40 \times 0,40$, $0,45 \times 0,45$ m dan penampang lingkaran berongga dengan diameter 0,60 m. Selain itu, dalam dua dekade terakhir, tiang pancang CIDH (cast-in-place drilled holes) dengan diameter 0,80 hingga 1,7 m telah banyak digunakan untuk fondasi. Tren yang meningkat adalah penggunaan tiang pancang, terutama di daerah perkotaan, ketika struktur atas ditopang langsung oleh tiang pancang yang memanjang di atas permukaan tanah (sebagai kolom). Efisiensi dicapai dengan menerapkan tiang pancang penampang persegi 35×35 , 40×40 cm, dan penampang melingkar dengan diameter 80 cm. Tiang pancang bor dan cor di tempat dengan diameter besar berkisar antara 1,6 hingga 3,0 m yang dibor hingga kedalaman 50 m dan selubung baja banyak digunakan dalam fondasi jembatan. Dalam fondasi untuk jembatan di atas sungai dan waduk, tiang pancang bor menggunakan selubung baja yang tidak dapat ditarik di dalam zona perubahan permukaan air dan kedalaman gerusan biasanya digunakan. Jenis pondasi ini diterapkan untuk pembangunan jembatan di atas Sungai Oka di jalan lingkaran sekitar Nizhni Novgorod, di atas Sungai Volga di Kota Kineshma, di atas Sungai Ob di Kota Barnaul, di atas Sungai Volga di Kota Ulyanovsk, dan beberapa lainnya.

Abutmen terbuka paling umum digunakan untuk jembatan jalan raya. Bentuk tipikalnya adalah dudukan tepi sungai, dudukan tepi sungai di atas tiang pancang, dan kerangka terpendam (spill-through). Abutmen dinding dan dudukan tepi sungai di atas tiang pancang adalah jenis struktur bawah yang terutama digunakan untuk jembatan kereta api. Dinding sayap biasanya dibangun di belakang struktur abutmen dan sejajar dengan jalan.

5.4 TEORI DAN METODE DESAIN

1. Kode dan Spesifikasi Desain

Kode Jembatan Rusia SNIP 2.05.03-84 pertama kali diterbitkan pada tahun 1984, diamandemen pada tahun 1991, dan diterbitkan kembali pada tahun 1996. Di Rusia, sistem kode konstruksi baru diadopsi pada tahun 1995. Sesuai dengan sistem ini, desain jembatan harus memenuhi persyaratan kode jembatan, kode lokal, dan standar industri. Standar memperkenalkan persyaratan baru yang menyelesaikan inkonsistensi yang ditemukan dalam kode jembatan. Kode jembatan mencakup desain jembatan baru dan rehabilitasi jembatan dan gorong-gorong yang ada untuk jalan raya, kereta api, trem, jalur metro, dan jembatan gabungan jalan raya-kereta api. Persyaratan yang ditentukan adalah untuk lokasi struktur dalam semua kondisi iklim di bekas Uni Soviet, dan untuk wilayah seismik dengan magnitudo hingga 9 pada skala Richter. Kode jembatan memiliki tujuh bagian utama: (1) ketentuan umum, (2) beban, (3) struktur beton dan beton bertulang, (4) struktur baja, (5) struktur komposit, (6) struktur kayu, dan (7) pondasi.

Pada tahun 1995, Departemen Perhubungan Kota Moskow mengembangkan dan mengadaptasi “Persyaratan Tambahan untuk Desain dan Konstruksi Jembatan dan Jalan Layang di Jalan Lingkar Moskow” untuk melengkapi kode jembatan untuk desain pelebaran jalan raya dan rehabilitasi 50 struktur jembatan di Jalan Lingkar Moskow. Beban hidup ditingkatkan sebesar 27% dalam “Persyaratan Tambahan.” Pada tahun 1998, Departemen Kota Moskow mengeluarkan draf standar TSN 32 “Norma Bangunan Regional untuk Desain Struktur Jembatan Kota di Moskow” berdasarkan “Persyaratan Tambahan.” Standar baru ini menetapkan peningkatan beban hidup dan beban abnormal serta mencerminkan perlunya peningkatan keandalan dan daya tahan struktur jembatan. TSN 32 final diterbitkan pada tahun 1998.

2. Konsep dan Filosofi Desain

Di bekas Uni Soviet, metode desain kekuatan ultimate (metode kekuatan) diadopsi untuk desain jembatan dan gorong-gorong pada tahun 1918. Tiga kondisi batas — (1) kekuatan pada beban ultimate, (2) deformasi pada beban layanan, dan (3) lebar retak pada beban layanan — ditentukan dalam standar desain jembatan, pendahulu kode jembatan saat ini. Kemudian, kondisi batas 2 dan 3 digabungkan menjadi satu kelompok. Standar Negara: GOST 27751-88 “Keandalan Konstruksi dan Pondasi” menetapkan dua kondisi batas: kekuatan dan kemampuan layanan. Kondisi batas pertama berkaitan dengan kegagalan struktural seperti hilangnya stabilitas struktur atau bagian-bagiannya, keruntuhan struktural dalam bentuk apa pun (ulet, getas, lelah) dan perkembangan mekanisme dalam sistem struktural karena peleburan material atau geser pada sambungan. Batas kedua berkaitan dengan keretakan (lebar retak), defleksi struktur dan pondasi, dan getaran struktur.

Prinsip-prinsip utama untuk desain jembatan ditentukan dalam Kode dan Peraturan Bangunan — “Jembatan dan Gorong-gorong” SNIP 2.05.03-84. Kekuatan ultimate diperoleh dari kekuatan material yang ditentukan (misalnya, beton pada kekuatan maksimum dan biasanya baja yang meleleh). Secara umum, struktur jembatan harus memenuhi batas kekuatan ultimate dalam format berikut:

$$\gamma_d S_d + \gamma_l (1 + \mu) S_l \eta \leq F(m_1, m_2, \gamma_n, \gamma_m, R_n, A) \quad (24.1)$$

di mana S_d dan S_l adalah efek gaya akibat beban mati dan beban hidup, masing-masing; γ_d dan γ_l adalah koefisien beban berlebih; μ adalah faktor dinamis; η adalah faktor kombinasi beban; F adalah fungsi yang menentukan kondisi batas struktur; m_1 adalah faktor kondisi kerja umum yang memperhitungkan kemungkinan penyimpangan struktur yang dibangun dari dimensi desain dan bentuk geometris; m_2 adalah koefisien yang mencirikan ketidakpastian perilaku struktur di bawah beban dan ketidakakuratan perhitungan; γ_n adalah koefisien homogenitas material; γ_m adalah faktor kondisi kerja material; R_n adalah resistansi nominal material; A adalah karakteristik geometris elemen struktur. Persyaratan kondisi batas kemampuan layani adalah

$$f \leq \Delta \quad (5.2)$$

di mana f adalah deformasi atau perpindahan desain dan Δ adalah deformasi atau perpindahan maksimum yang diizinkan.

Analisis struktur atas jembatan biasanya diimplementasikan menggunakan model analisis tiga dimensi. Model dua dimensi yang disederhanakan yang mempertimbangkan interaksi antar elemen juga digunakan.

3. Desain Struktur Beton

Struktur beton dirancang untuk kedua kondisi batas. Efek beban pada struktur jembatan beton statis tak tentu biasanya diperoleh dengan mempertimbangkan deformasi inelastis dan retak pada beton. Pertimbangan yang tepat diberikan pada redistribusi efek akibat rangkai dan penyusutan beton, penyesuaian gaya (jika ada), retak, dan prategang yang diterapkan menggunakan koefisien keandalan untuk beban sama dengan 1,1 atau 0,9.

Analisis untuk kondisi batas kekuatan mencakup perhitungan untuk kekuatan dan stabilitas pada kondisi operasi, prategang, transportasi, penyimpanan, dan pemasangan. Analisis kelelahan struktur jembatan dilakukan untuk kondisi operasi.

Analisis untuk kondisi batas kemampuan layani mencakup perhitungan untuk kondisi yang sama seperti yang ditunjukkan di atas untuk kondisi batas kekuatan. Kode jembatan menetapkan lima kategori persyaratan untuk ketahanan terhadap retak: tidak ada retak; memungkinkan kemungkinan kecil terbentuknya retak (lebar bukaan hingga 0,015 mm) akibat beban hidup dengan syarat penutupan retak tegak lurus terhadap sumbu longitudinal elemen di bawah beban mati terjamin; memungkinkan terbukanya retak setelah beban hidup melewati jembatan dalam batasan lebar bukaan retak masing-masing 0,15, 0,20, 0,30 mm.

Kode jembatan juga menetapkan bahwa defleksi elastis maksimum struktur atas tidak boleh melebihi, untuk jembatan kereta api, $L/600$ dan, untuk jembatan jalan raya, $L/400$. Standar baru TSN 32 memberikan batasan yang lebih ketat yaitu $L/600$ untuk defleksi jembatan jalan raya di Kota Moskow.

4. Desain Struktur Baja

Elemen baja dianalisis untuk kedua kelompok kondisi batas. Efek beban pada elemen struktur jembatan baja biasanya ditentukan menggunakan teori deformasi kecil elastis. Nonlinieritas geometris perlu diperhitungkan dalam perhitungan sistem di mana perhitungan tersebut menyebabkan perubahan efek dan perpindahan lebih dari 5%. Kondisi batas kekuatan untuk elemen baja dibatasi pada kekuatan elemen, kelelahan, stabilitas umum, dan tekuk lokal. Perhitungan kelelahan wajib dilakukan untuk jembatan kereta api dan jalan raya.

Untuk struktur atas baja dalam perhitungan kekuatan dan stabilitas hingga kondisi batas kekuatan, kode tersebut mensyaratkan pertimbangan nonlinieritas fisik pada tahap elastoplastik. Regangan tarik sisa maksimum diasumsikan sebesar 0,0006, dan regangan geser sama dengan 0,00105.

Penampang bersih digunakan untuk desain kekuatan sambungan baut (gesekan) berkekuatan tinggi dan penampang kotor untuk desain kelelahan, stabilitas, dan kekakuan. Pengembangan deformasi plastis baja yang terbatas diperbolehkan untuk elemen lentur dalam kondisi batas kekuatan. Prinsip-prinsip desain jembatan baja dengan mempertimbangkan deformasi plastis ditinjau dalam sebuah monograf. Pemeriksaan desain stabilitas meliputi tekuk lentur dan torsi global serta tekuk lokal flensa dan web.

Struktur atas jembatan komposit biasanya didasarkan pada hipotesis penampang bidang. Deformasi elastis dipertimbangkan dalam perhitungan efek yang terjadi pada elemen sistem statis tak tentu serta dalam perhitungan kekuatan dan stabilitas, kelelahan, pengendalian retak, dan ordinat kelengkungan.

5. Desain Stabilitas

Pilar dan struktur atas jembatan harus diperiksa stabilitasnya terhadap penggulingan dan pergeseran di bawah aksi kombinasi beban. Stabilitas pergeseran diperiksa dengan mengacu pada bidang horizontal. Faktor kondisi kerja lebih dari satu juga harus diterapkan untuk penggulingan dan penggerakan dan kurang dari satu untuk gaya penahan.

6. Struktur Sementara

Kriteria desain saat ini untuk struktur sementara yang digunakan untuk konstruksi jembatan ditetapkan dalam Pedoman BSN (Departemen Norma Bangunan) 136-78. Standar departemen ini dikembangkan terutama sebagai tambahan pada kode jembatan dan juga beberapa kode lain yang terkait dengan konstruksi jembatan. BSN 136-78 adalah volume tunggal yang pertama kali diterbitkan pada tahun 1978 dan diamandemen pada tahun 1984. Pedoman ini mencakup desain berbagai jenis struktur sementara (tiang pancang, bendungan sementara, dermaga sementara, perancah, dan lainnya.) dan perangkat yang diperlukan untuk konstruksi struktur jembatan permanen. Pedoman ini menetapkan beban dan koefisien beban berlebih, faktor kondisi kerja yang akan digunakan dalam desain, dan persyaratan untuk desain struktur sementara beton dan beton bertulang, baja, dan kayu. Selain itu, pedoman ini juga memberikan persyaratan khusus untuk perangkat dan unit tujuan umum, konstruksi fondasi, bentuk struktur cor di tempat, dan pemasangan struktur atas baja dan komposit.

Struktur sementara dirancang untuk dua kondisi batas yang serupa dengan prinsip-prinsip yang ditetapkan untuk struktur jembatan permanen. Sementara itu, koefisien beban

berlebih dan faktor kondisi kerja memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan struktur permanen. Studi terbaru menunjukkan bahwa Pedoman BSN 136-78 memerlukan revisi, dan oleh karena itu rekomendasi awal untuk meningkatkan persyaratan yang ditentukan dan beberapa aspek lainnya telah ditinjau dalam Referensi.

BSN 136-78 menetapkan frekuensi banjir 10 tahun. Selain itu, berdasarkan justifikasi teknis-ekonomi, periode ulang hingga 2 tahun dapat diambil dalam desain, tetapi dalam hal ini diperlukan tindakan khusus untuk debit air tinggi dan lewatnya es. Metode penyediaan justifikasi hidrologi teknis untuk fungsi yang andal dari struktur sementara ditinjau dalam Pedoman. Untuk memperluas struktur yang ada, rentang periode ulang banjir desain untuk struktur sementara ke arah probabilitas melebihi yang lebih rendah dan lebih tinggi juga direkomendasikan.

5.5 TEKNIK INSPEKSI DAN PENGUJIAN

Teknik yang dibahas di sini mencerminkan persyaratan terkini yang ditetapkan dalam SNIP 3.06.07-86, aturan inspeksi dan pengujian untuk jembatan dan gorong-gorong. Standar ini mencakup prosedur inspeksi dan pengujian jembatan yang dibangun (baru) atau direhabilitasi (lama). Selain itu, standar ini berlaku untuk inspeksi dan pengujian struktur yang sedang beroperasi atau untuk jembatan yang dirancang untuk beban khusus seperti pipa, kanal, dan lainnya. Inspeksi dan pengujian jembatan dilakukan untuk menentukan kondisi dan menyelidiki perilaku struktur. Pekerjaan ini dilakukan oleh organisasi pengujian khusus dan kontraktor atau badan operasi.

Semua jembatan yang baru dibangun harus diinspeksi sebelum dibuka untuk lalu lintas. Tujuan utama inspeksi adalah untuk memverifikasi bahwa jembatan memenuhi persyaratan desain dan persyaratan kualitas pekerjaan yang ditentukan oleh SNIP 3.06.04-91. Inspeksi dilakukan melalui pemeriksaan teknis, pengukuran kontrol, dan instrumentasi bagian struktural jembatan. Jika diperlukan, inspeksi dapat mencakup pengujian non-destruktif, pengujian laboratorium, dan pemasangan instrumentasi jangka panjang, dan lainnya. Hasil yang diperoleh selama inspeksi kemudian dibandingkan dengan toleransi yang diizinkan untuk fabrikasi dan pemasangan yang ditentukan dalam SNIP 3.06.04-91. Jika toleransi atau persyaratan standar lainnya dilanggar, pengaruh penyimpangan yang dicatat ini terhadap kapasitas daya dukung jembatan dan kondisi layanan diperkirakan.

Sebelum pengujian struktural, berbagai detail harus didefinisikan secara tepat berdasarkan hasil inspeksi. Uji beban memerlukan prosedur keselamatan yang rumit untuk melindungi struktur dan nyawa manusia. Beban maksimum, dengan mempertimbangkan kriteria desain dan penyimpangan struktural yang ada, perlu ditetapkan. Posisi struktur (sebelum pengujian dimulai) untuk identifikasi perubahan di masa mendatang yang dihasilkan dari uji beban perlu dicatat (ditandai). Untuk tujuan uji beban dinamis, kondisi beban yang melewati jembatan dievaluasi.

1. Uji Beban Statis

Selama pengujian beban statis, perpindahan dan deformasi struktur dan bagian-bagiannya, tegangan pada penampang elemen yang khas, deformasi lokal (bukaan retak, perpindahan pada sambungan, dan lainnya.) diukur. Selain itu, tergantung pada jenis struktur, kondisi lapangan, dan tujuan pengujian, pengukuran regangan sudut dan efek beban pada penahan atau penyangga dapat dilakukan.

Untuk uji beban statis, jembatan dibebani oleh lokomotif, kereta api, kereta metro atau trem, truk sebagai beban hidup. Dalam kasus di mana elemen jembatan terpisah diuji atau kekakuan struktur ditentukan, dongkrak, derek, atau beban individual lainnya mungkin diperlukan. Efek beban pada elemen yang diperoleh dari pengujian tidak boleh melebihi efek beban hidup yang dipertimbangkan dalam desain dengan memperhitungkan faktor kelebihan beban satuan dan nilai faktor dinamis yang diambil dalam desain. Pada saat yang sama, efek beban pada elemen yang diperoleh dari pengujian tidak boleh kurang dari 70% dari efek beban hidup yang disebabkan oleh desain. Karakteristik berat unit transportasi yang digunakan untuk pengujian harus diukur dengan akurasi minimal 5%. Saat menguji jembatan kereta api, metro, trem, atau jembatan untuk truk berat, efek beban pada suatu elemen biasanya tidak boleh kurang dari efek beban hidup terberat yang melewati jembatan tersebut.

Jumlah pengujian beban statis bergantung pada panjang jembatan dan kompleksitas struktur. Struktur atas dengan bentang yang lebih panjang biasanya diuji secara detail. Pada jembatan multi-bentang yang memiliki bentang yang sama, hanya satu struktur atas yang diuji secara detail; struktur atas lainnya diuji berdasarkan program yang lebih ringkas, sehingga hanya defleksi yang diukur.

Selama pengujian, beban hidup ditempatkan di dek sedemikian rupa sehingga efek beban maksimum (dalam batas yang diuraikan di atas) terjadi pada elemen yang diuji. Waktu untuk menahan beban uji pada setiap posisi ditentukan oleh stabilisasi pembacaan pada alat ukur. Peningkatan deformasi yang diamati dalam periode 5 menit tidak boleh melebihi 5%. Untuk meningkatkan akurasi pengukuran, waktu pembebanan, pelepasan beban, dan pengambilan pembacaan harus diminimalkan sebisa mungkin. Deformasi sisa pada struktur harus ditentukan berdasarkan hasil pembebanan uji pertama. Pembebanan struktur dengan beban uji biasanya harus diulang. Jumlah pengulangan pembebanan ditetapkan dengan mempertimbangkan hasil yang diperoleh dari pembebanan pertama.

2. Uji Beban Dinamis

Uji beban dinamis dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh dinamis (faktor dampak) dari kendaraan bergerak sebenarnya dan untuk menentukan karakteristik dinamis utama struktur (frekuensi osilasi bebas dan bentuk osilasi, kekakuan dinamis, dan karakteristik peredaman osilasi). Selama pengujian beban dinamis, perpindahan dan deformasi struktur secara keseluruhan (misalnya, defleksi tengah bentang, perpindahan ujung struktur atas yang dipasang di atas bantalan bergerak), serta, dalam kasus khusus, perpindahan dan tegangan pada masing-masing elemen struktur diukur.

Kendaraan berat yang mungkin benar-benar melewati jembatan akan digunakan dalam uji beban dinamis untuk menentukan karakteristik dinamis struktur dan dampak pergerakan.



Getaran, angin, dan beban lainnya dapat digunakan untuk uji dinamis. Untuk menyelidiki osilasi yang ditimbulkan oleh kendaraan bergerak, truk diharuskan melewati jembatan dengan kecepatan berbeda, mulai dari kecepatan 10 hingga 15 km/jam. Hal ini memungkinkan kita untuk menentukan perilaku struktur dalam rentang kecepatan tipikal. Disarankan untuk melakukan setidaknya 10 kali pengujian truk pada berbagai kecepatan dan mengulangi pengujian tersebut ketika dampak dinamis yang meningkat diamati. Dalam beberapa kasus ketika jembatan jalan raya diuji, untuk meningkatkan pengaruh kendaraan yang bergerak (misalnya, untuk memastikan karakteristik dinamis struktur), tindakan khusus dapat diterapkan. Tindakan ini adalah meniru kekasaran permukaan dek, misalnya, dengan meletakkan papan (misalnya, setebal 4 cm) tegak lurus terhadap jalan raya dengan jarak yang sama dengan jarak antara roda truk. Saat menguji jembatan penyeberangan, eksitasi osilasi bebas struktur dilakukan dengan menjatuhkan beban atau dengan seorang pejalan kaki atau sekelompok pejalan kaki yang berjalan atau berlari di atas jembatan. Menjatuhkan beban (misalnya, benda coran dengan berat 0,3 hingga 2 ton) menciptakan beban benturan pada permukaan jalan raya biasanya dari ketinggian 0,5 hingga 2,0 m. Lokasi penerapan beban uji harus bertepatan dengan bagian di mana defleksi maksimum terjadi (tengah bentang, ujung kantilever). Untuk melindungi permukaan jalan, lapisan pasir atau dek pelindung ditempatkan. Beban dijatuhkan beberapa kali dan setiap kali ketinggian disesuaikan. Hasil pengujian ini memberikan diagram osilasi bebas struktur atas. Efek beban pada elemen struktural selama pelaksanaan pengujian tidak boleh melebihi yang dihitung dalam desain sebagaimana diatur pada bagian di atas.

3. Pengujian Jembatan di Bawah Beban

Untuk mengungkapkan perilaku struktur yang memadai di bawah beban operasional terberat, pengujian jembatan dilakukan. Pengujian jembatan kereta api dan metro dilakukan di bawah kereta api berat, jembatan yang dirancang untuk beban jalan raya AB diuji oleh trailer berat. Pengamatan visual terhadap perilaku struktur di bawah beban dilakukan. Selain itu, defleksi tengah bentang dapat diukur dengan cara sederhana seperti perataan. Setidaknya 12 kali lintasan beban (tipe ulang-alik) dengan kecepatan berbeda direkomendasikan dalam prosedur pengujian jembatan kereta api dan metro. Dua atau tiga lintasan pertama dilakukan dengan kecepatan rendah 5 hingga 10 km/jam; Jika pengukuran defleksi diperlukan, kereta dihentikan. Penempatan trailer di atas lajur marginal dengan jarak 10 m antara roda belakang dan depan unit yang berdekatan direkomendasikan saat melewati jembatan yang dirancang untuk beban jalan raya AB dua lajur atau lebih. Disarankan agar trailer tunggal melewati lajur bebas dengan kecepatan 10 hingga 40 km/jam, dan biasanya dilakukan beberapa kali lintasan, setidaknya lima kali. Setelah pengamatan visual selesai, trailer dipindahkan ke lajur marginal lain dan trailer tunggal melewati lajur yang dikosongkan. Untuk melewati jembatan satu lajur, hanya lintasan trailer tunggal yang digunakan.

5.6 JEMBATAN BAJA DAN KOMPOSIT

Dalam beberapa dekade terakhir, telah terjadi perkembangan lebih lanjut dalam desain dan konstruksi jembatan baja di Rusia. Sistem baru memberikan tingkat standarisasi yang lebih tinggi dan mengurangi biaya konstruksi.

1. Struktur Atas untuk Jembatan Kereta Api

Sebagian besar jembatan kereta api adalah jembatan komposit baja dengan struktur atas jalur tunggal. Struktur atas standar berlaku untuk bentang dari 18,2 hingga 154 m (bentang balok baja 18,2 hingga 33,6 m; bentang balok komposit 18,2 hingga 55 m; bentang rangka dek 44 hingga 66 m; dan rangka baja 33 hingga 154 m). Gambar 5.7 dan 5.8 menunjukkan jembatan kereta api tipikal. Balok kotak baja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.9 memiliki bentang 33,6 m. Balok kotak serupa dapat dirakit dengan menghubungkan dua unit pracetak. Unit-unit ini dilas di pabrik dan dibaut di lapangan dengan baut berkekuatan tinggi tipe gesekan. Untuk sistem rangka, tinggi rangka berkisar dari 8,5 hingga 24 m dengan panel 5,5 dan 11 m. Dua jenis dek jembatan — dek berbalas dengan dasar jalan dari beton bertulang atau baja tahan korosi dan dek tanpa balas dengan jalur di atas bantalan kayu atau pelat beton bertulang — biasanya digunakan. Untuk jembatan yang lebih panjang dari 154 m atau jembatan jalur ganda, diperlukan desain khusus.



Gambar 5.7 Jembatan Rangka Baja Tipikal Dengan Bentang 44 M Pada Jalur Jembatan Kereta Api Baik-al-Amour.



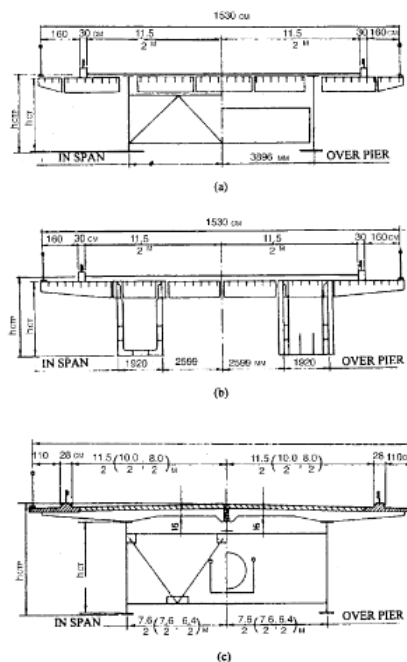
Gambar 5.8 Jembatan Komposit Gelagar Dek Dengan Bentang 55 M Di Atas Sungai Mulmuta (Siberia).



Gambar 5.9 Struktur Atas Kotak Baja Dengan Bentang 33,6 M Untuk Jembatan Kereta Api.

2. Struktur Atas untuk Jembatan Jalan Raya

Struktur atas baja standar yang mencakup bentang dari 42 hingga 147 m didasarkan pada modularisasi elemen: segmen kotak sepanjang 10,5 m, segmen double-T sepanjang 21 m, dan segmen dek ortotropik sepanjang 10,5 m. Penampang melintang standar tipikal ditunjukkan pada Gambar 5.10. Fitur teknologi utama produksi pabrik struktur jembatan baja telah dipertahankan dan disempurnakan. Mesin las busur ganda otomatis digunakan dalam 90% fabrikasi pabrik.



Gambar 5.10 Penampang Melintang Struktur Atas Jalan Raya Tipikal. (A) Balok Pelat Baja; (B) Balok Kotak; (C) Balok Komposit.

3. Teknik Konstruksi

Struktur atas baja dan komposit untuk jembatan kereta api biasanya didirikan oleh derek kantilever (Gambar 5.11) dengan kapasitas hingga 130 ton dan derek boom dengan kapasitas yang lebih besar. Struktur atas jembatan bentang 55 m dapat didirikan dengan

metode peluncuran bertahap menggunakan hidung. Ketika derek kantilever diterapkan untuk mendirikan struktur atas bentang 55 m, diperlukan pilar sementara. Untuk struktur atas rangka, metode pemasangan kantilever dan semi-kantilever banyak diterapkan. Gambar 5.12 menunjukkan pemasangan kantilever jembatan di atas Sungai Lena (bentang 110 + 132 + 110 m) menggunakan derek.



Gambar 5.11 Pemasangan Struktur Kotak Baja Sepanjang 33,6 M Menggunakan Derek Boom.



Gambar 5.12 Pemasangan Kantilever Jembatan Rangka Tipikal Menggunakan Derek Derrick.

Untuk jembatan jalan raya, metode peluncuran bertahap telah menjadi metode pemasangan utama untuk jembatan gelagar pelat dan gelagar kotak sejak tahun 1970, meskipun metode ini telah dikenal di Rusia sejak lama. Metode kantilever dan semi-kantilever juga digunakan untuk jembatan gelagar. Metode mengapung masuk (floating-in) adalah metode yang efektif untuk memasang struktur atas di atas perairan ketika dibutuhkan sejumlah besar segmen struktur atas yang telah dirakit. Penggunaan ponton standar menyederhanakan perakitan sistem apung. Pemasangan dermaga sementara apung dengan sistem perataan udara dan peralatan khusus lainnya membuat metode pemasangan ini lebih andal dan berteknologi tinggi.

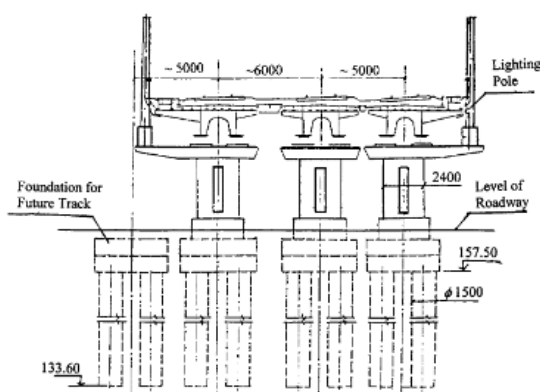
4. Jembatan Balok Khas

Jembatan Layang Kereta Api Pavelesky

Desain jembatan layang di Moskow merupakan tantangan besar bagi para insinyur. Hal ini membutuhkan kedalaman konstruksi yang rendah dan gangguan minimal terhadap arus lalu lintas. Gambar 5.13 menunjukkan Jembatan Layang Pavelesky yang dibangun pada tahun 1996 di atas Jalan Lingkar Moskow yang telah diperlebar. Jembatan ini memiliki lengkung horizontal $R = 800 \text{ m}$ dan dilalui oleh jalur rel tiga jalur. Struktur baja (Gambar 5.14) dirancang dengan kedalaman konstruksi rendah untuk memenuhi persyaratan jarak bebas jalan raya 5,5 m dan untuk mempertahankan ketinggian rel yang ada. Struktur miring empat bentang ($11 + 30 + 30 + 11 \text{ m}$) yang baru ini dirancang sebagai balok baja double-T sederhana dengan kedalaman 1,75 m.



Gambar 5.13 Jembatan Layang Kereta Api Paveletsky.



Gambar 5.14 Penampang Melintang Tipikal Jembatan Layang Kereta Api Paveletsky (Semua Dimensi Dalam Mm).

Pelat dek ortotropik dengan ketebalan 20 mm dengan rusuk T terbalik digunakan. Inovasi jembatan ini adalah kombinasi balok melintang (di mana rusuk memanjang dek ortotropik ditopang) dan penguat vertikal dari balok utama yang terhubung ke flensa bawah, sehingga membentuk diafragma dengan jarak 3 m. Lembaran penutup dek yang bersentuhan dengan balas dilindungi oleh lapisan pernis metalisasi.

Jembatan Sungai Moskva



Gambar 5.15 menunjukkan Jembatan Sungai Moskva di wilayah Moskow, dibangun pada tahun 1983. Struktur atasnya adalah balok kotak kembar tiga bentang kontinu ($51,2 + 96 + 51,2$ m) (kedalaman 2,53 m) dengan dek ortotropik. Jembatan ini menampung dua lajur lalu lintas di setiap arah dan trotoar selebar 3 m. Dalam arah melintang, kotak-kotak tersebut ditopang, dihubungkan oleh rangka silang pada jarak 9 m. Pilar-pilar tersebut terbuat dari rangka beton bertulang berbentuk Y. Tiang pondasi berukuran 40×40 cm dan ditancapkan hingga kedalaman 16 m. Balok-balok kotak diluncurkan menggunakan pilar sementara (Gambar 5.16) dari tepi kanan Sungai Moskva. Empat perangkat geser dipasang pada setiap pilar. Kecepatan peluncuran mencapai 2,7 m/jam.



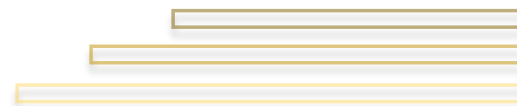
Gambar 5.15 Jembatan Sungai Moskva Di Krilatskoe.

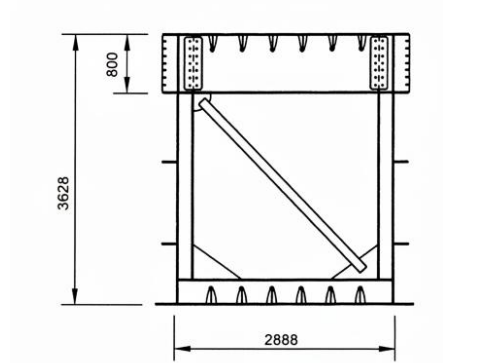


Gambar 5.16 Peluncuran Struktur Atas Untuk Jembatan Sungai Moskva Di Krilatskoe.

Jembatan Sungai Oka

Jembatan Sungai Oka, dekat Kota Nizhny Novgorod, terdiri dari bagian kotak kembar (Gambar 5.17) yang dibentuk dengan dua elemen berbentuk L dengan dek ortotropik dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1993. Jembatan baja sepanjang 988 m membentang di atas Sungai Oka dengan susunan bentang $2 \times 85 + 5 \times 126 + 2 \times 84$ m.

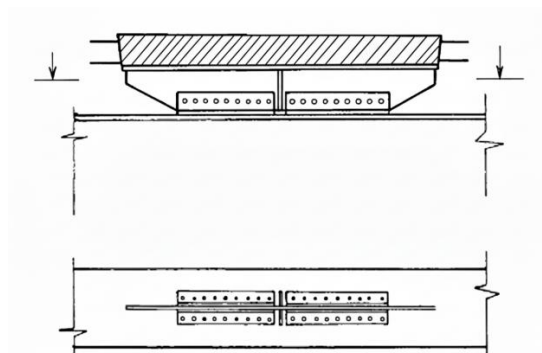




Gambar 5.17 Penampang melintang balok kotak utama (dua elemen L; dimensi mm).

Jembatan Sungai Ural

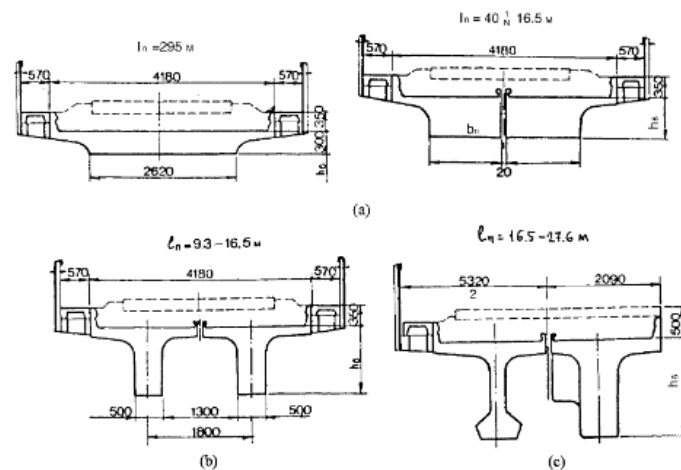
Jembatan Sungai Ural di dekat Kota Uralsk selesai dibangun pada tahun 1998. Jembatan balok komposit kontinu lima bentang ($84 + 3 \times 10^5 + 84$ m) ini (kedalaman 3,6 m) dengan kemiringan 2,6 m membawa satu lajur jalan raya dengan lebar keseluruhan 14,8 m. Segmen dek beton pracetak dihubungkan dengan balok baja menggunakan baut gesekan berkekuatan tinggi (Gambar 5.18). Detail sambungan disajikan dalam Referensi.



Gambar 5.18 Detail Sambungan Dek Beton Bertulang Pracetak Dan Balok Baja.

Jembatan Jalan Raya Sungai Chusovaya (Perm-Beresniki)

Jembatan Sungai Chusovaya, dengan panjang 1504 m dan pada kurva vertikal cembung dengan radius 8000 dan 25.000 m, selesai dibangun pada tahun 1997. Struktur atasnya terdiri dari dua balok komposit baja kontinu ($4 \times 84 + 84 + 126 + 5 \times 147 + 126 + 84$ m). Salah satu masalah utama dalam pembangunan jembatan adalah pembangunan fondasi pilar di dalam sungai di bawah kondisi geologi dan hidrologi yang kompleks. Semua pilar sungai dibangun di bawah perlindungan tiang pancang lembaran dengan menggunakan tongkang. Pilar dibangun menggunakan derek apung. Segmen struktur atas dengan panjang 94,8, 84, dan 99,7 m dirakit di tepi kanan, kemudian digeser ke sungai dan ditempatkan di atas pilar apung.



Gambar 5.19 Penampang Melintang Tipikal Struktur Beton Untuk Jembatan Kereta Api (Semua Dimensi Lainnya Dalam Mm). (A) Pelat Beton Bertulang Tanpa Prategang; (B) Balok I Beton Bertulang Tanpa Prategang; (C) Balok T Beton Prategang.

5.7 JEMBATAN BETON

Sekitar 90% jembatan modern adalah jembatan beton. Beberapa dekade terakhir ditandai dengan pengembangan intensif elemen jembatan beton pracetak standar. Persyaratan operasional utama dan berbagai kondisi konstruksi diperhitungkan oleh standardisasi yang ada. Hal ini memungkinkan pendekatan yang fleksibel dalam menyelesaikan tugas arsitektur dan perencanaan serta pembangunan jembatan dengan berbagai panjang bentang dan jarak bebas. Jembatan beton pracetak, baik kereta api maupun jalan raya, telah dibangun di banyak lingkungan, mulai dari daerah perkotaan hingga pedesaan. Karakteristik umum dari jenis struktur jembatan beton yang umum diberikan pada subbagian berikut.

1. Struktur Atas untuk Jembatan Kereta Api

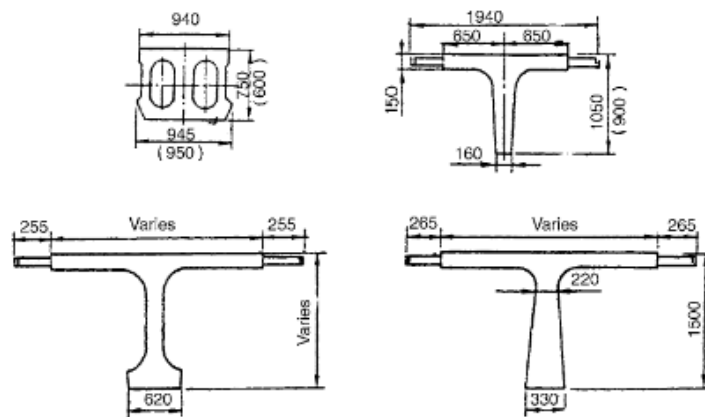
Untuk jembatan kereta api, bentuk standar untuk balok dan pelat telah banyak digunakan untuk bentang sepanjang 2,95 hingga 27,0 m. Jenis struktur atas jembatan yang paling sederhana adalah pelat dek, yang dapat berupa padat atau berongga. Struktur standar dirancang untuk menahan beban hidup S14 (jalur tunggal) dan dapat ditempatkan pada bagian lengkung jalur dengan radius 300 m atau lebih. Pelat beton prategang tipikal dengan kedalaman struktural dari 0,65 hingga 1,35 m berlaku untuk bentang mulai dari 2,95 hingga 16,5 m. Balok T pracetak prategang dengan kedalaman dari 1,25 hingga 1,75 m digunakan untuk bentang mulai dari 9,3 hingga 16,5 m. Balok T beton prategang dengan kedalaman dari 1,75 hingga 2,6 m berlaku untuk bentang dari 16,5 hingga 27,6 m. Jembatan jalur tunggal terdiri dari dua segmen pracetak penuh yang dihubungkan pada diafragma dengan pengelasan tali sambungan baja dan kemudian pengecoran beton.

Ketiga jenis segmen struktur atas pracetak biasanya dibuat di pabrik dan diangkut ke lokasi konstruksi. Sistem kedap air diterapkan di pabrik. Celah memanjang antar segmen ditutupi oleh pelat baja. Semua segmen struktur atas mulai dari panjang 1 hingga 5 m ditempatkan di atas bantalan baja. Struktur atas dapat dihubungkan menjadi sistem yang

sebagian kontinu, sehingga memungkinkan penyesuaian gaya horizontal yang ditransfer ke pilar.

2. Struktur Atas untuk Jembatan Jalan Raya

Lebih dari 80% jembatan pada jaringan jalan raya federal memiliki panjang bentang tidak melebihi 33 m. Gambar 5.20 menunjukkan penampang melintang standar tipikal untuk jembatan jalan raya. Pelat beton berongga tanpa prategang dengan kedalaman struktural dari 0,6 hingga 0,75 m berlaku untuk bentang berkisar antara 12 hingga 18 m. Balok T pracetak tanpa prategang dengan kedalaman dari 0,9 hingga 1,05 m digunakan untuk bentang berkisar antara 11,1 hingga 17,8 m. Balok T beton prategang dengan kedalaman 1,2 hingga 1,7 m dapat diaplikasikan untuk bentang 32,3 hingga 41,5 m. Gambar 5.21 menunjukkan lokasi konstruksi balok beton pracetak di Jalan Lingkar Moskow.



Gambar 5.20 Balok Pracetak Standar Untuk Jembatan Jalan Raya (Semua Dimensi Dalam Mm).



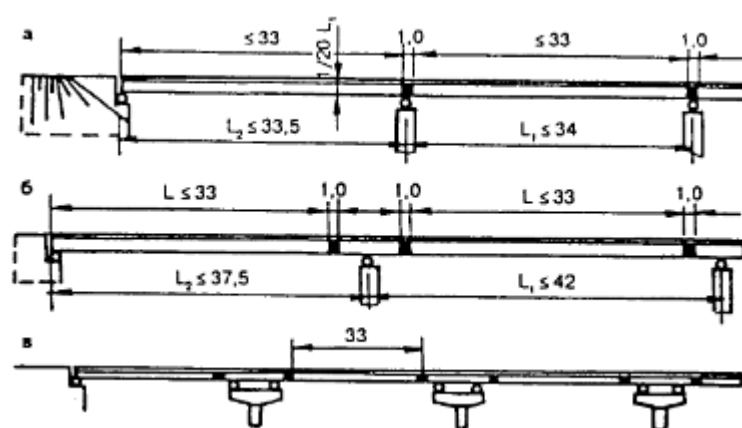
Gambar 5.21 Penampang Tipikal Jalan Layang Di Jalan Lingkar Moskow.

Pembuatan balok standar prategang dilakukan di sejumlah bengkel khusus. Namun, berdasarkan pengalaman, beberapa kesulitan teknologi telah dicatat. Ini adalah operasi yang terkait dengan pemasangan tulangan (unit ruang) ke dalam cetakan dengan konfigurasi yang kompleks, misalnya, bagian bawah balok yang menggembung, pengecoran beton ke dalam dan pengambilan balok dari cetakan ini. Untuk meningkatkan prosedur pembuatan, bentuk

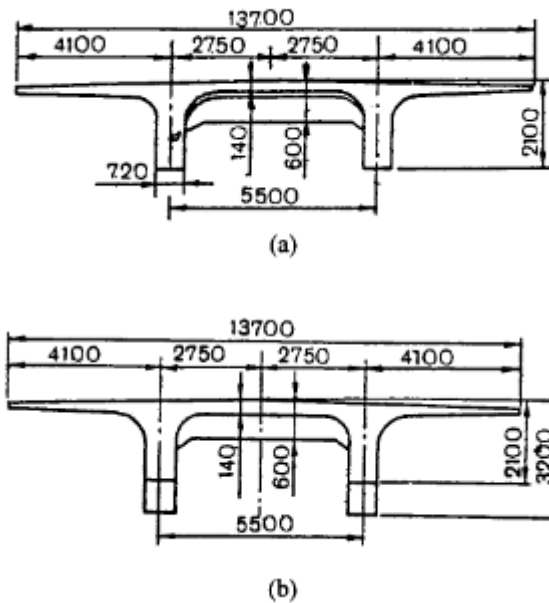
husus web balok berupa tetesan telah dikembangkan. Desain standar balok dengan panjang 27 m telah dirancang. Balok T pracetak prategang yang paling banyak digunakan dalam praktik konstruksi saat ini memiliki kedalaman struktural dari 1,2 hingga 1,7 m dengan lebar atas tipikal 1,8 m dan berat satu balok dari 32,3 hingga 59 ton.

Jika fasilitas transportasi khusus tidak tersedia atau terdapat keterbatasan transportasi atau fasilitas manufaktur seperti tali penegang mahal, balok prategang pracetak segmen dianggap menguntungkan. Desain balok T standar telah dikembangkan dengan mempertimbangkan kedua sistem prategang: pasca-penegangan dan pra-penegangan. Balok T standar telah dirancang pracetak dalam segmen dengan penegangan pasca-penegangan selanjutnya untuk panjang bentang 24, 33, dan 42 m.

Karena keterbatasan atau pembatasan transportasi atau alasan lain, alternatif rasional untuk balok pasca-penegangan adalah balok dengan sambungan melintang. Dalam hal ini, balok terdiri dari segmen dengan panjang dan berat terbatas (hingga 11,8 ton) yang dapat diangkut dengan cara biasa. Segmen tersebut dapat dicetak di lokasi atau dalam panjang pendek di pabrik dengan penegangan pasca-penegangan selanjutnya di lokasi. Sambungan antar segmen dapat diimplementasikan dengan mengisi celah sambungan setebal 20 hingga 30 mm dengan beton (sambungan tipis); dengan menempatkan beton dengan ketebalan minimum 70 mm (sambungan tebal); atau direkatkan dengan epoksi dengan ketebalan 5 mm. Untuk mengurangi sambungan ekspansi dan meningkatkan kondisi jalan, sistem sebagian kontinu — balok sederhana pada tahap pemasangan dan balok kontinu pada tahap layanan — telah banyak digunakan untuk struktur atas; bentang hingga 33 m. Balok-balok dihubungkan dengan pengecoran pelat dek di atas lokasi penyangga, pelat dihubungkan dengan pengelasan tali baja di bagian atas dek. Gambar 5.22 menunjukkan skema jembatan kontinu tipikal yang terdiri dari pelat pracetak standar atau balok T.

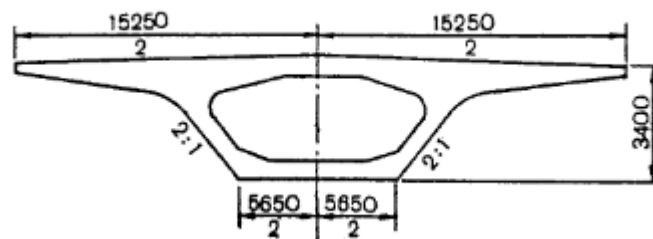


Gambar 5.22 Skema Jembatan Kontinu Tipikal Yang Terdiri Dari Balok Standar (Semua Dimensi Dalam Mm).



Gambar 5.23 Penampang Melintang Tipikal Dari Balok Web Padat Standar. (A) Untuk Susunan Bentang $33 + n(42) + 33$ m; (B) Untuk Susunan Bentang $42 + n(63) + 42$ m (Semua Dimensi Dalam Mm).

Gambar 5.23 menunjukkan desain standar untuk struktur atas kontinu dengan balok T ganda. Lebar keseluruhan segmen pracetak dapat mencapai 20 m, tetapi panjangnya dibatasi hingga 3 m karena kendala transportasi. Saluran untuk kabel prategang ditempatkan hanya di bagian web.



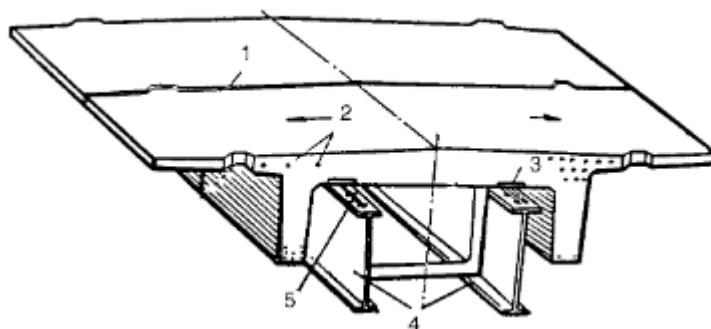
Gambar 5.24 Penampang Melintang Tipikal Dari Segmen Kotak Pracetak (Semua Dimensi Dalam Mm).

Pada tahun 1990, desain standar lain untuk sistem kontinu balok kotak dimulai. Penampang kotak tipikal ditunjukkan pada Gambar 5.24. Setiap segmen memiliki lebar 1,4 m di bagian tekukan dan 2,2 m di bagian dalam bentang dengan berat hingga 62 ton. Dengan menggunakan segmen pracetak standar, struktur atas dapat memiliki bentang 63, 71,8, 84, dan 92,8 m. Karena kesulitan keuangan, pekerjaan desain pada struktur atas segmen kotak standar belum selesai. Namun, ide umumnya telah diterapkan pada sejumlah jembatan.

3. Teknik Konstruksi

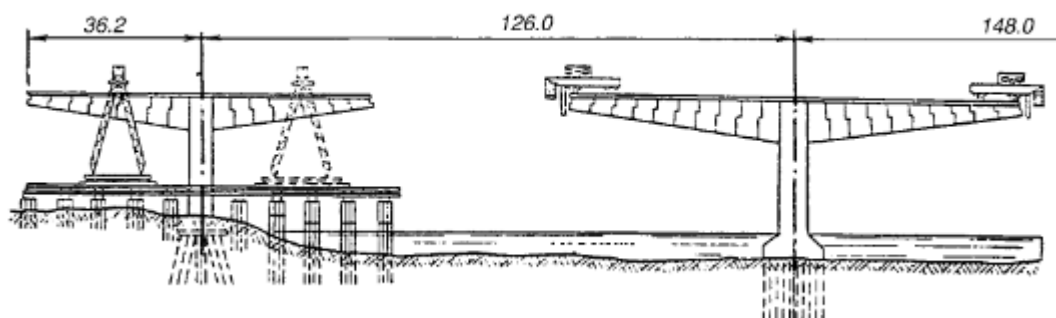
Segmen balok bentang penuh pracetak dibuat di bengkel khusus berdasarkan desain standar. Pemasangan segmen balok padat hingga 33 m dilakukan dengan derek boom bergerak

berbagai kapasitas, derek gantry, dan gantry peluncuran. Perancah khusus telah dirancang untuk memasang balok padat 24 hingga 63 m (Gambar 5.25).



Gambar 5.25 Posisi Segmen Pracetak Balok Web Padat Di Atas Perancah Khusus. 1—Sambungan Yang Direkatkan; 2—Saluran; 3—Sisipan; 4—Perancah Khusus Yang Dapat Dipindahkan; 5—Rel Untuk Memindahkan Segmen.

Ketika jembatan bentang besar dibangun, derek yang berbeda dapat digunakan secara bersamaan. Di daerah sungai dengan permukaan air rendah, derek gantry dapat digunakan, tetapi di perairan dalam, derek SPK-65 atau lainnya dapat digunakan. Skema pemasangan tipikal jembatan kantilever pracetak di atas Sungai Volga yang dibangun pada tahun 1970 ditunjukkan pada Gambar 5.26.



Gambar 5.26 Skema Pemasangan Tipikal Jembatan Di Atas Sungai Volga (Semua Dimensi Dalam Mm).

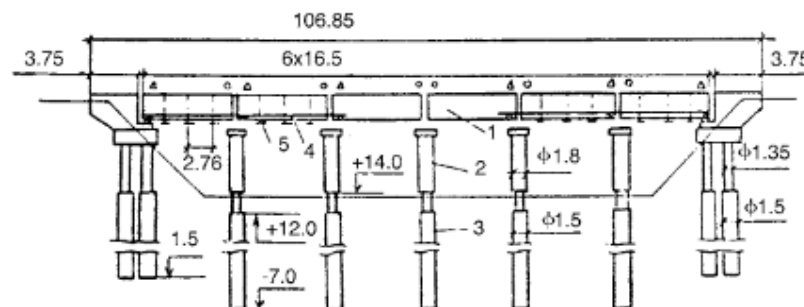
Meskipun struktur atas jembatan beton sebagian besar dibangun dengan segmen pracetak, dalam beberapa tahun terakhir konstruksi struktur atas cor di tempat telah ditinjau pada tingkat teknologi baru. Dengan metode ini, konstruksi struktur atas diatur di area di belakang abutmen pada pendekatan ke jembatan. Bagian struktur atas berikutnya dicor terhadap segmen sebelumnya dan diberi prategang sebelum melanjutkan pemasangan dengan metode peluncuran bertahap. Balok utama beton cor di tempat dan dek beton pracetak yang dimodifikasi biasanya digunakan. Secara tradisional, ketika pelat dek pracetak digunakan untuk konstruksi jembatan, elemen pracetak ini dibuat dengan menyediakan lubang untuk konektor geser yang kemudian diisi dengan beton. Solusi ini memiliki beberapa kekurangan. Untuk

meningkatkan praktik tersebut, jenis sambungan baru antara elemen struktural diperkenalkan. Penggunaan sisipan baja pada pelat pracetak memungkinkan penyambungan balok utama dengan menggunakan sudut dan baut berkekuatan tinggi.

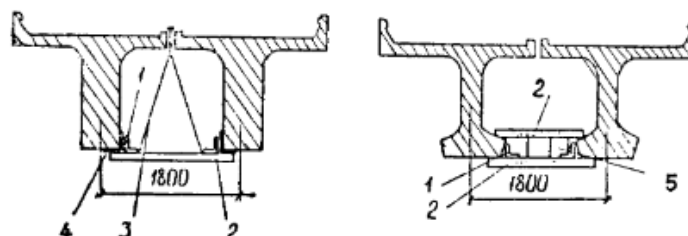
4. Jembatan Tipikal

Jembatan Komarovka

Sebuah jembatan kereta api di atas Sungai Komarovka baru-baru ini dibangun di Ussuryisk (timur jauh Rusia). Jembatan dengan panjang 106,85 m ini memiliki bentang $6 \times 16,5$ m (Gambar 5.27). Struktur atas terdiri dari balok beton bertulang dengan desain standar. Pilar tengah terbuat dari beton bertulang cor di tempat. Abutmen berupa elemen pracetak tipe spill-through dan beton cor di tempat. Pondasi berada di atas tiang bor berdiameter 1,5 m. Selubung baja berdiameter 1,35 m ditempatkan di bagian atas tiang. Sambungan terpisah struktur atas ke dalam dua sistem mengurangi gaya termal pada girt. Secara struktural, girt (Gambar 5.28) terdiri dari dua sudut $125 \times 125 \times 10$ mm, yang disambung ke simpul bantalan dengan menggunakan gusset, yang dipasang di antara flensa bawah struktur atas dan pelat dasar bantalan tetap. Girt diikat ke setiap pelat gusset dengan baut berkekuatan tinggi. Untuk mengurangi tegangan termal, girt dipasang ke struktur atas dan tertanam di atas abutmen pada suhu 0°C .



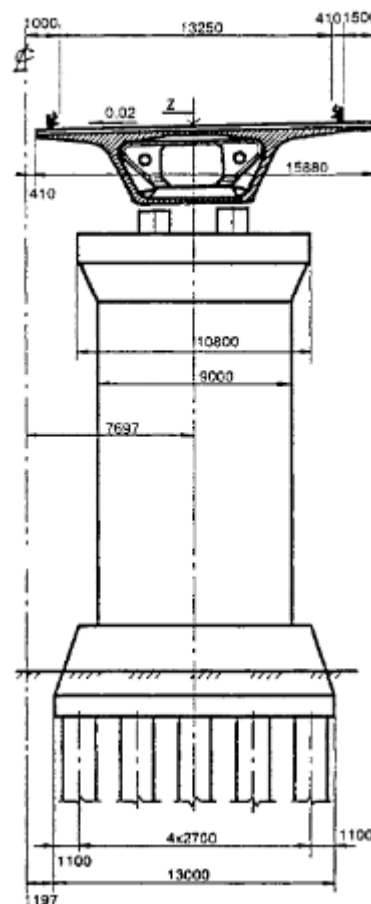
Gambar 5.27 Susunan Umum Jembatan Di Atas Sungai Komarovka. 1—Struktur Atas Beton Bertulang; 2—Pilar Cor Di Tempat; 3—Tiang Pancang Bor; 4—Balok Khusus; 5—Kunci Untuk Membatasi Pergerakan Ke Samping (Semua Dimensi Dalam Mm).



Gambar 5.28 Detail Balok Khusus. (Kiri) Balok Tanpa Prategang Dan (Kanan) Balok Prategang. 1—Balok; 2—Balok Melintang; 3—Elemen Jangkar; 4—Bantalan Noftlen; 5—Papan Sambungan (Semua Dimensi Dalam Mm).

Jembatan Sungai Oka Kashira

Pada tahun 1995, sebuah jembatan dengan panjang total 1,96 km yang melintasi Sungai Oka dekat Kashira dibangun. Bentang utama di atas saluran navigasi adalah $44,1 + 5 \times 85,5 + 42,12$ m. Jembatan ini menampung tiga lajur lalu lintas di setiap arah. Struktur atas kontinu tujuh bentang berupa segmen kotak beton pracetak dengan kedalaman 3,4 m dan lebar 16 m yang dibangun menggunakan metode kantilever dengan penguncian lebih lanjut di tengah bentang. Penampang melintang tipikal ditunjukkan pada Gambar 5.29. Segmen pracetak bervariasi dari 1,5 hingga 1,98 m dan diatur oleh kapasitas peralatan pemasangan yang terbatas hingga 60 ton. Pilar dicor di tempat, dibentuk dengan metode slip-form. Fondasi berada di atas tiang bor berdiameter 1,5 dan 1,7 m.



Gambar 5.29 Penampang Tipikal Jembatan Sungai Kashira Oka (Semua Dimensi Dalam Mm).

Jembatan Rangka dengan Kaki Ramping

Pengembangan bentuk struktural dan teknik pemasangan untuk beton prategang menyebabkan konstruksi rangka kaku tetap untuk jembatan. Dibandingkan dengan sistem jembatan rangka bentang kontinu, sistem ini kurang umum digunakan. Untuk membentuk sistem rangka, elemen struktur atas dan pilar pracetak dicor beton pada bagian di atas pilar (1 m di sepanjang jembatan) dan pada bagian dek (lebar 0,36 m dalam arah melintang). Gambar 5.30 menunjukkan jembatan rangka tipikal dengan kaki ramping. Desain fondasi

The image contains three technical drawings of a bridge structure:

- Top Left:** A side elevation of the bridge deck and support. It shows a horizontal span of 15.0. A vertical dimension of 0.85 is indicated. A horizontal dimension of 1.0 is shown. A vertical dimension of 0.73 is indicated. A horizontal dimension of 0.75 is shown. A horizontal dimension of 11.3 is shown with a note $(11.3) \times 24.0$.
- Top Right:** A side elevation of the bridge deck and support. It shows a horizontal span of 15.0. A vertical dimension of 6.0-9.0 is indicated. A horizontal dimension of 1.0 is shown.
- Bottom:** A longitudinal section labeled "A-A". It shows the bridge deck and supports. The total length is 15.0. The section is divided into segments with dimensions: 1.5, 0.2, 11.0/2, 0.2, 1.5. The section is divided into segments with dimensions: 1.5, 0.2, 11.0/2, 0.2, 1.5. The section is divided into segments with dimensions: 1.5, 0.2, 11.0/2, 0.2, 1.5. The section is divided into segments with dimensions: 1.5, 0.2, 11.0/2, 0.2, 1.5.

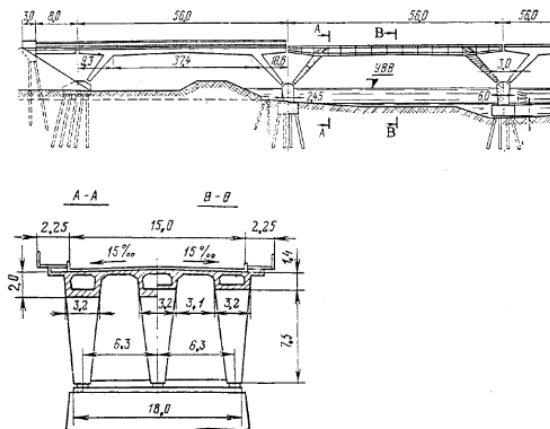
Jembatan Sungai Vyatka Buisky Perevoz

Jembatan Sungai Penza Sura

Jembatan jalan raya ini terdiri dari rangka beton pracetak prategang dengan sistem dua engsel (Gambar 5.32) yang dibangun pada tahun 1975. Struktur atasnya terdiri dari tiga kotak dengan penampang variabel (Gambar 5.33) dengan total 66 untai prategang. Kaki miring rangka memiliki penampang kotak $25 \times 1,5$ m di bagian atas dan penampang padat $1,45 \times 0,7$ m di bagian bawah.

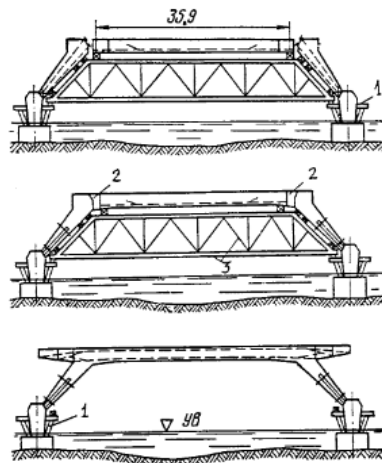


Gambar 5.32 Jembatan Sungai Sura Penza.



Gambar 5.33 Penampang Melintang Tipikal Jembatan Sungai Sura Penza (Semua Dimensi Dalam Mm).

Kaki setiap rangka diperkuat oleh 12 untai prategang. Setiap diameter untai 5 mm terdiri dari 48 kawat. Pilar terbuat dari beton cor di tempat. Pondasi berada di atas tiang pancang beton pracetak berongga 0,6 m. Setiap struktur rangka didirikan dari 60% segmen pracetak. Segmen-segmen ini memiliki lebar 5,6 m dan panjang 2,7 hingga 3,3 m. Setiap struktur rangka atas didirikan dengan 12 segmen dalam urutan yang ketat, dimulai dari tengah bentang ke pilar. Segmen bentang ditempatkan pada posisi desain, direkatkan, dan diberi prategang. Segmen kaki dihubungkan dengan segmen bentang dengan beton cor di tempat. Urutan khusus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.34, untuk penegangan untai ditetapkan untuk jembatan ini.



Gambar 5.34 Urutan Umum Pemasangan Struktur Rangka (Semua Dimensi Dalam Mm).

Jembatan Lengkung Sungai Moskva Moskow

Jembatan lengkung kantilever (Gambar 5.35) di atas Sungai Moskva di Jalan Lingkar Moskow dibangun pada tahun 1918. Jembatan ini merupakan struktur tiga bentang dengan panjang $48,65 + 98 + 48,64$ m. Lebar jalan keseluruhan adalah 21 m dan trotoar selebar 1,5 m di setiap sisi. Setengah lengkungan dihubungkan oleh ikatan 10 untai prategang pada tingkat jalan raya. Pembangunan struktur atas dilaksanakan di atas perancah baja. Lengkungan-lengkungan didirikan dari elemen pracetak dengan berat antara 10 hingga 20 ton.

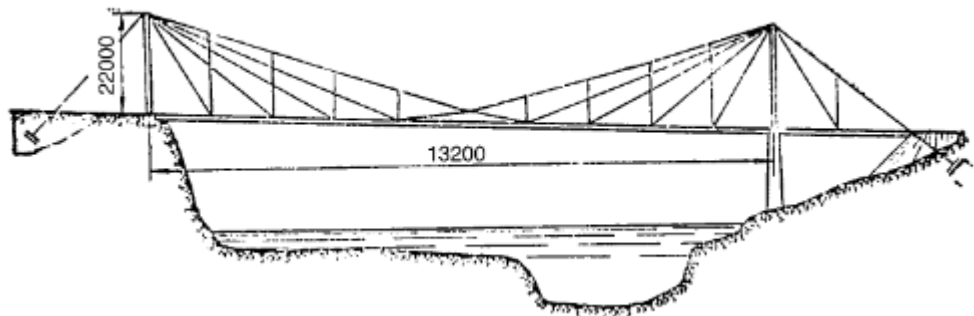


Gambar 5.35 Jembatan Lengkung Sungai Moskva Moskow.

5.8 JEMBATAN KABEL GANTUNG

Jembatan kabel gantung pertama dibangun di bekas Uni Soviet selama periode 1932–1936. Jembatan jalan raya kabel gantung dengan bentang 80 m yang dirancang oleh Kriltsov di atas Sungai Magna (bekas SSR Georgia) dibangun pada tahun 1932. Jembatan di atas Sungai Surhob, dengan bentang 120,2 m, dan di atas Sungai Narin, dengan bentang 132 m, dibangun masing-masing pada tahun 1934 dan 1936. Gambar 5.36 menunjukkan tampilan umum

Jembatan Sungai Narin. Balok penguat dari sistem rangka baja diadopsi pada jembatan-jembatan ini.

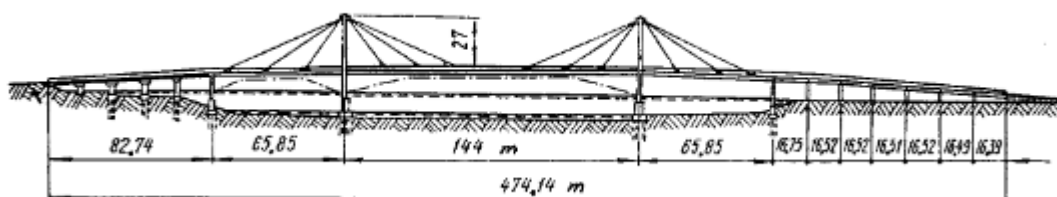


Gambar 5.36 Jembatan Sungai Narin (Semua Dimensi Dalam Mm).

Periode modern pembangunan jembatan kabel pancang dapat ditandai dengan proyek-proyek berikut: Jembatan Sungai Dnepr di Kiev (1962), Jembatan Sungai Dnepr Moskow di Kiev (1976), Jembatan Sungai Scheksna Cherepovets (1980), Jembatan Sungai Daugava Riga (1981), Jembatan Sungai Dnepr Selatan di Kiev (1991). Dua jembatan kabel pancang di atas Sungai Volga, Uiyanovsk, dan di atas Sungai Ob dekat Surgut saat ini sedang dalam pembangunan.

Jembatan Sungai Dnepr Kiev

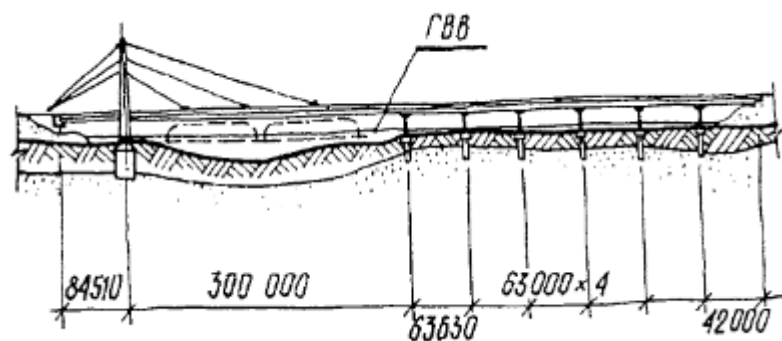
Jembatan kabel-stayed beton pertama (Gambar 5.37) yang melintasi pelabuhan Sungai Dnepr di Kiev dibangun pada tahun 1918. Sistem kabel-stayed tiga bentang memiliki bentang $65,85 + 144 + 65,85$ m. Jembatan ini dilalui lalu lintas jalan raya dengan lebar jalan 7 m dan trotoar 1,5 m di setiap sisinya. Struktur atas terdiri dari dua balok beton prategang utama berbentuk I dengan kedalaman 1,5 m, lebar 1,4 m, dan jarak 9,6 m. Susunan kabel berbentuk radial. Penyangga terdiri dari untai berdiameter 73 dan 55 mm. Menara merupakan struktur beton bertulang cor di tempat.



Gambar 5.37 Jembatan Sungai Dnepr Kiev.

Jembatan Sungai Dnepr Moskow

Pada tahun 1976, jembatan Moskow (Gambar 5.38) dengan sistem kabel penahan dibangun. Jembatan ini menampung enam lajur lalu lintas dan lima pipa berdiameter besar di bawah dek, dan memiliki lebar keseluruhan 31 m. Struktur kontinu tiga bentang memiliki susunan bentang $84,5 + 300 + 63$ m. Balok penguat terdiri dari balok kotak baja kembar dengan dek ortotropik yang dibuat dari baja paduan rendah kelas 10 XCND.

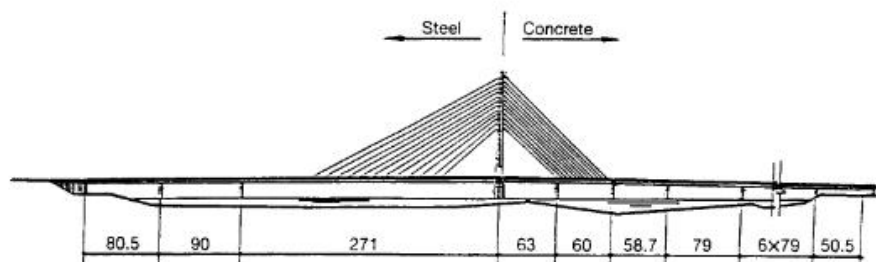


Gambar 5.38 Jembatan Sungai Dnepr Moskow (Semua Dimensi Dalam Mm).

Untuk memenuhi jarak bebas transportasi, kedalaman balok dibatasi hingga 3,6 m. Pada penampang melintang, balok utama memiliki lebar 5,5 m dengan jarak antara web bagian dalam balok yang berdekatan sebesar 20,2 m dan diafragma berjarak 12,5 m. Balok pengaku memiliki sambungan tetap ke abutmen dan sambungan bergerak pada pylon dan pilar tengah. Sebuah pylon beton bertulang tunggal berbentuk setinggi 125 m memiliki penampang kotak pada kakinya. Setiap penahan dibentuk dari 91 kawat galvanis paralel (diameter 5 mm). Penahan tersebut memiliki penampang heksagonal 55 × 48 cm dan dipasang pada dua bidang miring.

Jembatan Selatan Sungai Dnepr

Jembatan selatan yang melintasi Sungai Dnepr di Kiev (Ukraina) dibuka untuk lalu lintas pada tahun 1993. Jembatan ini terdiri dari jembatan kabel-stayed sepanjang 564,5 m dan viaduk beton sepanjang 662 m. Skema umum jembatan ditunjukkan pada Gambar 5.39. Jembatan ini memungkinkan lalu lintas empat lajur dan dua jalur kereta api. Jembatan ini juga membawa empat pipa air berdiameter besar. Fitur desain dan konstruksi jembatan ini telah disajikan dalam Referensi.

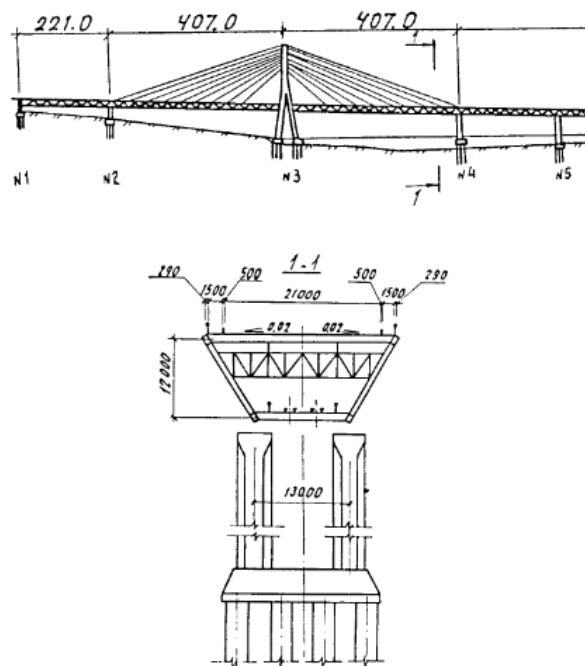


Gambar 5.39 Jembatan Selatan Sungai Dnepr (Semua Dimensi Dalam Mm).

Struktur atas terdiri dari bagian baja dan beton. Bagian baja adalah balok kotak kontinu tiga bentang yang dibentuk dari balok I vertikal dengan dek ortotropik. Bagian beton menyediakan penyeimbang yang diperlukan dan dibangun dari penampang kotak beton prategang segmental. Pylon adalah struktur rangka beton cor di tempat dua kolom yang memiliki penyangga silang di antara kolom. Kabel penahan diposisikan dalam dua bidang, sehingga kekakuan torsi jembatan terjamin secara efektif.

Jembatan Sungai Volga Ulyanovsk

Jembatan yang melintasi Sungai Volga dekat Kota Ulyanovsk memiliki panjang lebih dari 5 km dan mencakup jembatan kabel penahan. Jembatan ini saat ini sedang dibangun dan akan menampung lalu lintas gabungan: lalu lintas jalan raya empat lajur dan dua jalur untuk jalur trem. Susunan bentang jembatan kabel penahan ini didasarkan pada bentang $220 + 2 \times 407 + 220$ m dengan satu pylon. Skema jembatan kabel penahan ditunjukkan pada Gambar 5.40.



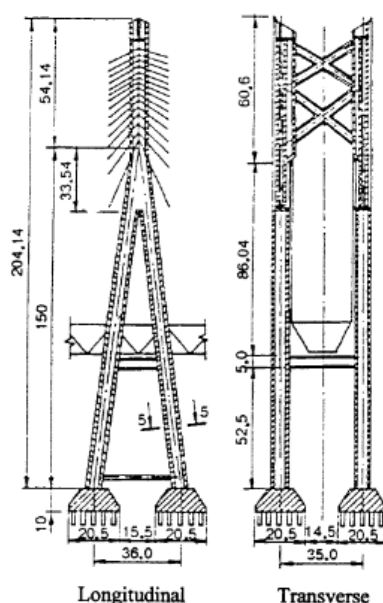
Gambar 5.40 Jembatan Sungai Volga Ulyanovsk (Semua Dimensi Dalam Mm).

Girder pengaku berbentuk trapesium yang terdiri dari dua bidang rangka yang berinteraksi dengan pelat dek atas dan bawah ortotropik. Dek ortotropik baja untuk lalu lintas jalan raya terletak di atas struktur rangka. Anggota rangka disegel secara hermetis; oleh karena itu permukaan bagian dalamnya tidak perlu dicat. Keunikan detail struktural untuk sambungan adalah bahwa simpul dalam bentuk kotak las tertutup rapat dibuat di bengkel. Sambungan flensa dan diagonal dipindahkan dari pusat simpul. Rusuk memanjang dari sistem dek ortotropik berbentuk kotak; balok melintang berjarak 5,5 m. Balok pengaku ditopang oleh dua bidang penahan. Setiap penahan mencakup kabel kawat paralel dengan diameter 7 mm. Jumlah kawat dalam kabel bervariasi dari 127 hingga 271. Berat balok pengaku jembatan kabel-stayed adalah 3.115 ton, dan penahannya, 1.900 ton. Struktur atas didirikan dengan metode kantilever.

Struktur baja bagian atas jembatan juga menggunakan sistem rangka dengan bentang kontinu 2×220 m. Struktur baja bagian atas ini berbeda dari bentang utama hanya pada bentuk persegi panjang melintangnya. Detail strukturnya serupa dengan struktur bagian atas bentang utama. Berat struktur bagian atas 2×20 m adalah 7640 ton. Struktur bagian atas

dirakit di tepi sungai dan kemudian didirikan dengan bentang 220 m menggunakan metode mengambang.

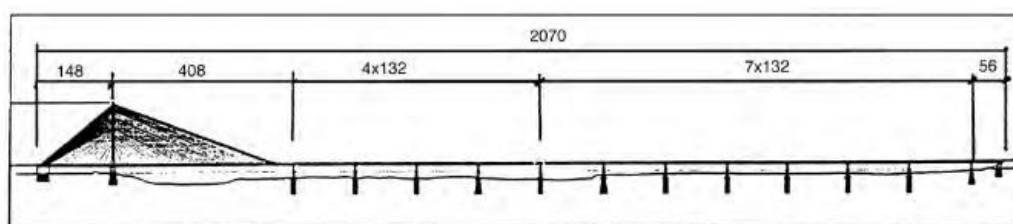
Pilon cor di tempat setinggi 204 m memiliki bentuk Y terbalik searah dengan jembatan dan rangka 2h (konfigurasi H) dengan penyangga silang searah melintang. Untuk gambaran umum alternatif desain pylon, lihat Gambar 5.41. Menara memiliki penampang kotak berongga dengan ketebalan dinding 0,8 hingga 1,0 m. Jenis struktur pylon ini dipengaruhi oleh bentang samping simetris 407 m dan tidak adanya penahan permanen. Tiang penyangga berinteraksi dengan struktur atas di bawah beban tidak simetris melalui kekakuan lenturnya. Fondasi berada di atas tiang bor berdiameter 1,7 m dengan bentuk lonceng berdiameter 3,5 m di ujungnya.



Gambar 5.41 Pilar Jembatan Sungai Volga Ulyanovsk (Alternatif Desain) (Semua Dimensi Dalam Mm).

Jembatan Sungai Ob Surgut

Baru-baru ini, pembangunan jembatan baru yang melintasi Sungai Ob dekat Kota Surgut telah dimulai. Panjang keseluruhan jembatan ini sedikit lebih dari 2 km. Skema umum jembatan ditunjukkan pada Gambar 5.42. Jembatan ini memiliki lebar keseluruhan 15,2 m dan akan memungkinkan lalu lintas dua lajur. Jembatan ini terletak pada profil kurva cembung dengan radius 13.000 m.



Gambar 5.42 Jembatan Sungai Surgut Ob (Semua Dimensi Dalam Mm).

Struktur atasnya adalah balok kotak baja tunggal dengan dek ortotropik. Sebuah pylon tunggal setinggi 146 m akan dibangun di bagian bawah dari segmen pracetak yang membentuk bentuk luar dan inti beton cor di tempat, dan di bagian atas berupa dua menara baja paralel (penampang melintang) dengan penyangga yang membentuk kerangka. Pilar perantara dibangun dari segmen pracetak dengan inti beton cor di tempat dan dengan fondasi di atas tiang bor dengan selubung baja berdiameter 1420 mm. Abutmen terbuat dari beton cor di tempat dengan fondasi di atas tiang beton bertulang berpenampang berongga berdiameter 0,6 m dan diisi dengan beton.

Ringkasan

Dalam beberapa tahun terakhir, semakin sedikit jembatan baru yang dirancang dan dibangun di Rusia. Permintaan untuk rehabilitasi dan penguatan struktur jembatan meningkat setiap tahun. Arah masa depan praktik desain jembatan adalah:

- Revisi dan modifikasi standar nasional dengan mempertimbangkan Eurocode dan standar negara-negara terkemuka lainnya;
- Pertimbangan untuk interaksi solusi struktural dengan proses teknologi dengan mempertimbangkan persyaratan estetika, ekologis, dan operasional;
- Pengembangan bentuk struktur baru seperti beton bertulang pracetak atau cor di tempat dan beton prategang, baja dan struktur komposit untuk pilar dan struktur atas untuk meningkatkan keandalan dan daya tahan;
- Desain ulang struktur standar dengan mempertimbangkan pengalaman praktis dalam praktik rekayasa, fabrikasi, dan pemasangan;
- Penyatuan elemen baja yang dibuat di pabrik dan siap dipasang hingga dimensi maksimum yang sesuai dengan persyaratan transportasi, peningkatan dek beton pracetak, peningkatan sistem perlindungan korosi hingga masa pakai 12 tahun; dan
- Pengembangan peralatan bergerak yang relevan dan pertimbangan praktis jembatan beton cor di tempat.

BAB 6

EVOLUSI JEMBATAN DI AMERIKA SERIKAT

6.1 PENDAHULUAN

Peradaban Amerika dengan jembatan-jembatannya relatif baru dibandingkan dengan peradaban kuno Asia, Eropa, dan bahkan Amerika Selatan. Amerika adalah benua terakhir yang menjadi padat penduduk dan terindustrialisasi.

Evolusi jembatan di Amerika Serikat mungkin tidak jauh berbeda dari tempat lain di dunia. Peradaban telah saling meminjam ide jembatan selama berabad-abad. Balok kayu yang tumbang melintasi sungai berfungsi sebagai jembatan primitif yang mengarah pada konsep bentang balok penopang yang digunakan saat ini. Bentang gantung melintasi jurang yang dalam adalah ide primitif yang digunakan di seluruh dunia. Lengkungan batu yang diperkenalkan oleh bangsa Romawi kuno adalah bentuk struktural yang terjadi secara alami, efisien, dan menyenangkan yang telah digunakan dengan berbagai material yang berkembang. Praktik pembangunan jembatan berkembang seiring dengan perubahan kebutuhan pengguna, lalu lintas, dan kendaraan, kemajuan teknologi, dan pengembangan material baru. Namun, panjang bentang tetap menjadi faktor penentu utama dalam pemilihan jenis jembatan.

6.2 JEMBATAN AWAL DI AMERIKA SERIKAT

Jembatan pertama yang tercatat di Amerika Serikat dibangun di Pulau James Towne, Virginia pada tahun 1611. Ini adalah lokasi salah satu koloni Eropa paling awal. Jembatan ini merupakan struktur kayu, sebenarnya sebuah dermaga yang menghubungkan kapal-kapal yang berlabuh di perairan yang lebih dalam (Gambar 6.1).



Gambar 6.1 Jembatan Akuaduk Di Misi La Purisima, Santa Barbara County, California, Adalah Contoh Jembatan Primitif, Yaitu Jembatan Lempengan Batu Bentang Pendek. Dibangun Pada Tahun 1813, Jembatan Ini Merupakan Jembatan Tertua Di California.

6.3 ERA KANAL

Melalui air merupakan metode transportasi berat yang umum digunakan sejak Amerika Serikat mulai berkembang ke pedalaman dari Pantai Timur. Para pembangun kanal pada akhir tahun 1700-an dan awal 1800-an adalah yang pertama membangun jembatan-jembatan penting di Amerika Serikat. Konsep lengkungan batu, yang dipinjam dari akuaduk Romawi, umum digunakan pada era ini. Selain itu, lengkungan batu mudah beradaptasi dengan beban yang dikenakan (Gambar 6.2).



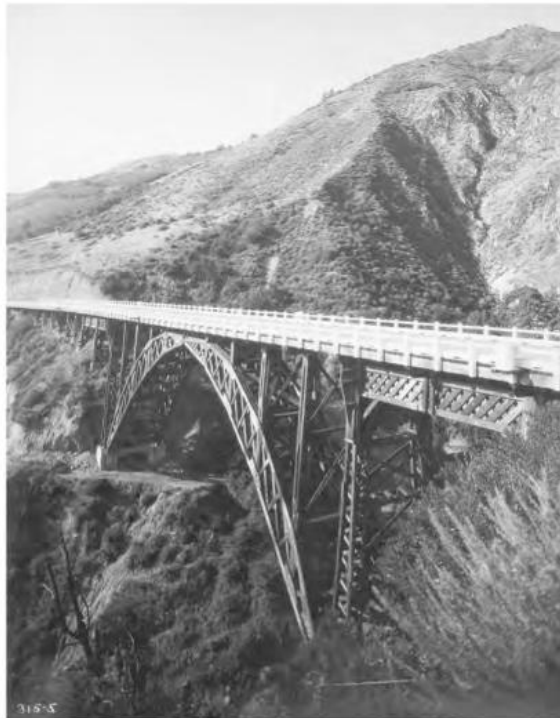
Gambar 6.2 Akuaduk Schlarie Creek Adalah Kanal Erie Di Atas Schlarie Creek Di Fort Hunter, New York. Dibangun Oleh John Jervis Pada Tahun 1841. Kanal Adalah Pengguna Utama Jembatan Pertama Di Amerika Serikat.

Jalan Tol

Jalan tol pribadi selama periode kolonial, tahun 1600-an dan 1700-an, sering kali dibangun dengan struktur kayu. Kayu gelondongan merupakan balok alami dan ketersediaannya yang melimpah menjadikannya material alami untuk jembatan-jembatan awal.

Jembatan Kayu

Kayu mudah dikerjakan dan dibangun. Namun, jembatan kayu membutuhkan perawatan terus-menerus; sambungan akan longgar karena kayu menyusut dan bergetar akibat lalu lintas, dan kayu harus dilindungi dari cuaca (Gambar 6.3).



Gambar 6.3 Jembatan Dolan Creek Di Pantai Monterey Di California Dibangun Pada Tahun 1932. Ini Adalah Salah Satu Dari Hanya Dua Jembatan Lengkung Kayu Tiga Pin Yang Pernah Dibangun Di Sistem Jalan Raya Negara Bagian California. Jembatan Ini Hanya Bertahan Beberapa Tahun, Dan Sejak Itu Telah Digantikan Dengan Jembatan Beton Pada Tahun 1917.

Jembatan Kayu Tertutup

Banyak jembatan kayu abad ke-19 ditutupi untuk melindungi kayu dari cuaca dan di iklim utara untuk mencegah salju menumpuk di dek (Gambar 6.4 dan 6.5).



Gambar 6.4 Jembatan Beratap Bridgeport Di California Mungkin Merupakan Jembatan Beratap Bentang Tunggal Terpanjang Di Dunia, Dengan Panjang 70,1 M. Struktur Atasnya Adalah Lengkungan Burr Yang Ditumpangkan Pada Rangka Howe. Jembatan Ini Merupakan Jembatan Tol Yang Dibangun Oleh David Wood Pada Tahun 1862, Dan Kemudian Dibeli Oleh Virginia Turnpike Company.



Gambar 6.5 Jembatan Beratap Cornish–Windsor Adalah Jembatan Rangka Kisi-Kisi Dua Bentang Yang Melintasi Sungai Connecticut Antara Cornish, New Hampshire Dan Windsor, Vermont. Dibangun Pada Tahun 1866, Jembatan Ini Merupakan Jembatan Beratap Terpanjang Di Amerika Serikat, Dengan Panjang 140,2 M. Jembatan Ini Telah Ditetapkan Sebagai Landmark Teknik Sipil Nasional Oleh American Society Of Civil Engineers.

Jembatan Besi

Anggota jembatan besi cor pertama kali dipertimbangkan karena kedekatan beberapa pabrik pengecoran di dekat Jalan Nasional. Material tersebut ternyata cukup kuat dan sangat tahan lama. Besi cor tahan terhadap korosi normal yang terkait dengan logam besi (Gambar 6.6 dan 6.7).



Gambar 6.6 Jembatan Dunlap's Creek, Dibangun Pada Tahun 1839, Adalah Jembatan Besi Pertama Di Amerika Serikat. Jembatan Ini Dibangun Untuk Jalan Nasional Cumberland, Di Brownsville, Pennsylvania, Oleh Kapten Richard Delafield Dari Korps Insinyur Angkatan Darat. Jembatan Ini Masih Digunakan Hingga Saat Ini.



Gambar 6.7 Jembatan Bow Di Central Park, New York, Adalah Jembatan Besi Tempa Tertua Yang Masih Berdiri Di Amerika Serikat, Dibangun Pada Tahun 1818. Jembatan Ini Memiliki Bentang Terpanjang, 26,5 M, Dari Lima Jembatan Berhias Indah Di Taman Tersebut, Yang Semuanya Dirancang Oleh Calvert Vaux Dan Jacob Wrey Mould.

6.4 ERA KERETA API

Zaman uap mengantarkan era di mana pembangunan jembatan di Amerika Serikat mencapai puncaknya. Kereta api menjadi moda transportasi dominan baik untuk penumpang maupun barang. Kemiringan yang mudah yang dibutuhkan untuk jalur kereta api, pada gilirannya, membutuhkan banyak jembatan. Kanal hampir terlupakan dan jalan kereta kuda mengalami periode pengabaian selama 50 tahun (Gambar 6.8).



Gambar 6.8 Jembatan Starrucca, Dibangun Dalam Bentuk Akuaduk Romawi Kuno, Dirancang Oleh James Kirkwood Untuk New York And Erie Rail Road Pada Tahun 1848. Jembatan Ini

Terletak Di Atas Dataran Starrucca Creek Di Lanesboro, Pennsylvania. Ini Adalah Jembatan Pertama Yang Menggunakan Fondasi Beton. Jembatan Ini Masih Beroperasi.

Rangka

Squire Whipple dan Herman Haupt, dua insinyur jembatan kereta api Amerika, dianggap sebagai orang pertama yang menghitung metode untuk menentukan tegangan pada anggota rangka dan dengan demikian mampu menentukan ukuran yang sesuai. Masing-masing bekerja secara independen satu sama lain, pada pertengahan abad ke-19, menggunakan pengetahuan kuno tentang matematika, fisika, dan kekuatan material.

Pengetahuan untuk merekayasa rangka membuat konstruksinya populer. Rangka memberikan kekuatan dengan penghematan material dan berat yang cukup besar. Konsep prinsip rasional sama-sama berlaku untuk rangka kayu dan logam. Banyak insinyur lain dengan cepat merangkul konsep tersebut dan mematenkan berbagai konfigurasi diagonal rangka untuk penggunaan mereka sendiri. Banyak nama mereka yang dikenal hingga saat ini: Pratt, Parker, Howe, Burr, Fink, dan Warren, untuk menyebutkan beberapa.

Jembatan Kereta Api

Lihat Gambar 6.9 hingga 6.11.



Gambar 6.9 Theodore Judah Memanfaatkan Kayu Untuk Membangun Jembatan Dengan Cepat Dan Segera Melanjutkan Pembangunan, Sementara Ia Juga Berlomba Membangun Jalur Kereta Api Central Pacific, Ujung California Dari Jalur Kereta Api Transkontinental. Ia Memecahkan Masalah Pemeliharaan Jangka Panjang Dengan Kemudian Mengisi Jembatan Dengan Tanah Galian Dan Terowongan, Membentuk Tanggul Yang Akan Tetap Ada Lama Setelah Kayu Membusuk. Ini Adalah Jembatan Secrettown Di Sierra California, Dibangun Pada Tahun 1865, Yang Sedang Ditimbun Dengan Tanah.



Gambar 6.10 Jembatan Tinggi Devil's Gate Di Georgetown, Colorado, Tampak Terlalu Ramping Untuk Menopang Rel Kereta Api. Namun, Penggunaan Penyeimbang Tegangan Yang Cerdas Mendistribusikan Beban Balik Ke Seluruh Menara. Jembatan Ini Diprefabrikasi Oleh Clark Reeves And Company Dari Phoenixville, Pennsylvania, Untuk Colorado Central Railroad Pada Tahun 1884. Jembatan Ini Terus Digunakan Hingga Dihancurkan Pada Tahun 1939. Replika Yang Dibangun Kembali Pada Tahun 1984 Sekarang Digunakan Oleh Georgetown Loop Mining And Railroad Park.



Gambar 6.11 Keddie Wye Adalah Jembatan Menara Baja Unik Yang Dibangun Oleh Union Pacific Railroad Di Ngarai Feather River Yang Terjal Di California Pada Tahun 1912. Jembatan Berbentuk Y Ini Muncul Dari Terowongan Di Dinding Selatan Ngarai Yang Membagi Lalu Lintas Kereta Api Di Atas Sungai; Satu Cabang Menuju Utara Untuk Bertemu Dengan Burlington Northern Railroad Dan Cabang Lainnya Adalah Jalur Utama Yang Menuju Timur Ke Arah Chicago.

Jembatan Lengkung Baja

Lihat Gambar 6.12 hingga 6.14.



Gambar 6.12 Jembatan Eads Di Atas Sungai Mississippi Di Washington Street Di Saint Louis Mendobrak Standar Teknik Pada Masanya. Ini Adalah Penggunaan Baja Secara Ekstensif Pertama Untuk Konstruksi Jembatan. Tiga Bentang Lengkung Sepanjang 175+ M Masing-Masing Terdiri Dari Empat Tabung Besi Tempa Yang Diperkuat Rangka Baja Berdiameter 464 Mm. Spandrelnya Berupa Rangka Baja Dan Struktur Kisi Yang Luas. Dibangun Oleh James B. Eads Pada Tahun 1874. Jembatan Eads Digambarkan Pada Seri Prangko Pos Amerika Serikat Pecahan Dua Dolar Yang Memperingati Pameran Trans-Mississippi Tahun 1896.



Gambar 6.13 Jembatan Navajo Di Marble Canyon, Dekat Lee's Ferry, Arizona, Adalah Contoh Klasik Dari Lengkungan Yang Terbentang Di Antara Dinding Ngarai. Ini Juga Merupakan Contoh Rangka Dek, Sebuah Evolusi Untuk Mobil, Melampaui Rangka Tembus. Ketika Dibangun Pada Tahun 1929, Jembatan Ini Merupakan Jembatan Tertinggi Di Dunia, Dengan Ketinggian 162,5 M Dari Dek Ke Air. Jembatan Ini Dirancang Oleh Ralph Hoffman Dari Departemen Jalan Raya Arizona. Sebuah Jembatan Kembar Paralel Yang Dirancang Oleh Cannon Associates Telah Dibangun Sejak Tahun 1996.



Gambar 6.14 Lengkungan Balok Pelat Baja Cold Springs Canyon, Di Santa Barbara County, California, Adalah Lengkungan Terpanjang Dengan Bentang 213,4 M, Dan Ketinggian 121,9 M. Jembatan Ini Telah Memenangkan Penghargaan Pengelasan Lincoln Foundation, Penghargaan Keindahan American Institute Of Steel Construction, Dan Penghargaan Desain Gubernur. Dibangun Pada Tahun 1963, Jembatan Ini Dirancang Oleh Divisi Jalan Raya California, Marv Shulman, Insinyur Desain.

Jembatan Rakitan

Selama akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20, beberapa perusahaan jembatan menjual "Standar Amerika," potongan jembatan besi tempa prefabrikasi (jembatan dalam kotak), dengan panjang bentang tertentu yang dapat didirikan di lokasi. Yang perlu dilakukan hanyalah memesan jembatan dari katalog, membangun penyangga untuk panjang bentang yang sesuai, dan merakit potongan-potongan tersebut seperti merakit mainan konstruksi. Jembatan rakitan mudah diadaptasi untuk dibongkar, diangkut, dan digunakan kembali di tempat lain, seperti yang telah terjadi pada banyak jembatan ini yang masih digunakan (Gambar 6.15 dan 6.16).



Gambar 6.15 Jembatan Laughery Creek, Dekat Aurora, Indiana, Dibangun Oleh Wrought Iron Bridge Company Dari Canton, Ohio, Pada Tahun 1878. Bentangnya Yang Sepanjang 92 M Belum Pernah Terjadi Sebelumnya. Jembatan Ini Muncul Di Sampul Katalog Perusahaan Pada Tahun 1893.



Gambar 6.16 Detail Ini Di Haupt Creek, Di Sonoma County, California, Menunjukkan Sambungan Pin Khas Jembatan Rakitan Dan "Kolom Phoenix," Sebuah Elemen Besi Cor Yang Dipatenkan Dan Dibuat Secara Eksklusif Oleh Phoenix Iron Works Dari Pennsylvania. Jembatan Ini Dibangun Pada Tahun 1880.

6.5 ERA MOBIL

Hampir seketika, pada pergantian abad ke-20, negara ini tersapu ke dalam era otomotif. Jalan-jalan kereta kuda yang telah lama diabaikan menjadi penting kembali. Departemen Jalan Raya Negara bermunculan dan pembangunan jalan dan jembatan, di bawah "Gerakan Jalan Raya yang Baik," mendapatkan semangat baru. Rekayasa kereta api hampir stagnan. Sebagian besar insinyur jembatan jalan raya baru adalah mantan insinyur jembatan kereta api, sehingga banyak jembatan jalan raya awal tampak seperti jembatan rangka baja kereta api.

Jembatan Rangka Baja

Lihat Gambar 6.17 hingga 6.2.



Gambar 6.17 Jembatan Selat Carquinez Di California, Yang Dibangun Oleh American Toll Bridge Company Sebagai Jembatan Tol Swasta Pada Tahun 1927, Adalah Contoh Rangka Kantilever Dengan Elemen Penegang Batang Mata. Jembatan Kembar Paralel Yang Menggunakan Baja Hibrida Berkekuatan Tinggi Yang Dilas Dirancang Dan Dibangun Pada Tahun 1954 Oleh Divisi Jalan Raya California, Roger Sunbury, Seorang Insinyur. Jembatan

Rangka Baja Dianggap Jelek Oleh Banyak Orang. Carquinez Bukanlah Salah Satu Contoh Terburuk, Tetapi Ketika Seorang Calon Arsitek Jembatan Yang Diwawancarai Untuk Departemen California Diperlihatkan Gambar Bentang Kembar Tersebut Dan Dimintai Komentar, Ia Menjawab, “Mengapa Membuat Kesalahan Yang Sama Dua Kali?” Ia Mendapatkan Pekerjaan Sebagai Kepala Arsitek Jembatan.



Gambar 6.18 Jembatan Coos Bay Di Jalan Raya Pesisir Oregon Adalah Salah Satu Dari Beberapa Jembatan Ikonik Yang Dirancang Oleh Conde B. Mccullough Dari Departemen Jalan Raya Oregon. Bentang Utama Sepanjang 225,2 M Merupakan Contoh Klasik Dari Rangka Kantilever. Dibangun Pada Tahun 1936, Jembatan Ini Adalah Yang Terbesar Dari Karya-Karya Mccullough Di Pesisir. Bentang Ujung Lengkung Beton Dan Menara-Menaranya Merupakan Ciri Khas Mccullough. Jembatan Ini Sekarang Dinamai Jembatan Memorial Mccullough Untuk Menghormati Sang Insinyur.



Gambar 6.19 Jembatan Teluk San Francisco–Oakland Bagian Timur, Merupakan Bagian Dari Penyeberangan Yang Lebih Panjang Sepanjang 13,3 Km Yang Terdiri Dari Bentang Gantung Barat, Terowongan Melalui Pulau Yerba Buena, Dan Bentang Rangka Kantilever Timur Ini. Solusi Perbaikan Seismik Di Lokasi Ini Adalah Mengganti Jembatan. Terdapat Kontroversi Lokal Mengenai Jenis Bentang Yang Akan Digunakan. Ada Kekhawatiran Tentang Biaya, Kekhawatiran San Francisco Bahwa Bentang Ikonik Sisi Timur Dapat Menutupi Bentang

Gantung Barat Mereka, Dan Aspirasi Oakland Bahwa Kota Mereka Juga Layak Mendapatkan Bentang Ikonik Di Sisi Teluk Mereka.

Beton Bertulang

Sekitar waktu yang sama dengan dimulainya era mobil, yaitu pergantian abad ke-20, konsep beton bertulang diperkenalkan. Konsep ini umumnya tidak diterima hingga gempa bumi San Francisco tahun 1906. Beberapa bangunan beton bertulang adalah satu-satunya struktur yang selamat. Sejak saat itu, beton bertulang telah digunakan secara luas (Gambar 6.20).



Gambar 6.20 Jembatan Danau Alvord Adalah Jembatan Beton Bertulang Pertama, Dibangun Oleh Ernest Ransome, Pengembang Beton Bertulang, Pada Tahun 1888. Jembatan Ini Masih Digunakan Untuk Mengangkut Jalan Raya Negara Bagian 1 Di Atas Taman Golden Gate Di San Francisco. Fasadnya Ditempa Agar Menyerupai Lengkungan Batu Yang Sudah Dikenal.

Jembatan Ini Merupakan Landmark Teknik Sipil Bersejarah Nasional.

Lengkungan Beton

Lengkungan beton bertulang populer pada awal abad ke-20. Beton bertulang adalah material modern, dan lengkungan merupakan bentuk yang nyaman, teruji, dan terbukti. Ribuan lengkungan beton bertulang dibangun hingga tahun 1950-an (Gambar 6.21 hingga 6.27).



Gambar 6.21 Jembatan Colorado Street Di Atas Arroyo Seco Di Pasadena, California, Adalah Jembatan Dengan Nilai Tertinggi Untuk Signifikansi Historis Di Negara Bagian Tersebut. Bentang Utamanya Sepanjang 46,6 M Dengan Tinggi 45,7 M. Struktur Jembatan Ini Dihiasi Dengan Ornamen Beaux Art Yang Sangat Indah. Jembatan Ini Dirancang Pada Tahun 1912 Oleh John Waddell, "Dekan" Teknik Jembatan Amerika. Jembatan Ini Melayani Rute 66 Yang Terkenal Selama Bertahun-Tahun. Perbaikan Struktur Tahan Gempa Merupakan Tantangan Dalam Upaya Mempertahankan Fitur Estetika Historis Jembatan Tersebut.



Gambar 6.22 Jembatan Fern Di Dekat Ferndale, California, Adalah Struktur Luar Biasa Yang Telah Bertahan Melewati Ujian Waktu. Enam Banjir Besar Sejak Dibangun Telah Menghancurkan Jembatan Lain Di Hilir Sungai Eel, Tetapi Jembatan Fern Masih Berdiri. Jembatan Ini Terdiri Dari Tujuh Lengkungan Beton Spandrel Tertutup Berisi Puing Sepanjang 61 M, Masing-Masing Di Atas 250 Tiang Kayu. Jembatan Ini Dirancang Oleh John B. Leonard Pada Tahun 1911 Untuk Kabupaten Humboldt. Sekarang Jembatan Ini Merupakan Bagian Dari Sistem Jalan Raya Negara Bagian California.



Gambar 6.23 Jembatan Harlan D. Miller (Dog Creek) Adalah Contoh Pengembangan Jembatan Mutakhir Oleh Negara Bagian California Di Bawah Kepemimpinan Insinyur Jembatan Harlan D. Miller Pada Tahun 1926. Badan Legislatif Negara Bagian Menamai Jembatan Tersebut Untuk Menghormatinya Atas Kemajuan Besar Yang Telah Ia Capai Dalam Pembangunan Jembatan-Jembatan Negara Bagian. Miller Meninggal Hanya Seminggu

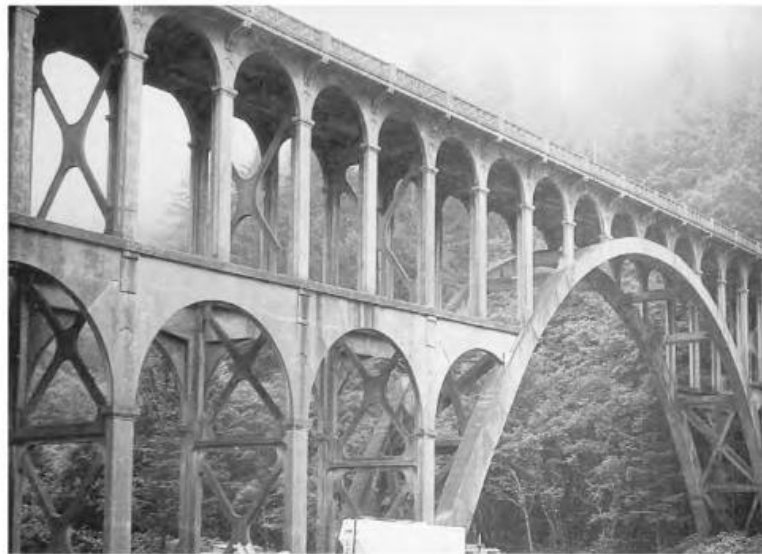
Setelah Menerima Penghargaan Tersebut, Sehingga Jembatan Itu Menjadi Jembatan Memorial Harlan D. Miller.



Gambar 6.24 Jembatan Bixby Creek Di Pantai Monterey Di California Adalah Salah Satu Jembatan Paling Indah Dan Paling Banyak Difoto Di California. Jalan Raya Pantai Monterey Ini Adalah Jalan Raya Pemandangan Pertama Yang Ditetapkan Di California, Pada Tahun 1917. Rute Ini Juga Merupakan Yang Pertama Ditetapkan Sebagai Jalan Raya Seluruh Amerika. Dibangun Pada Tahun 1932, Jembatan Ini Memiliki Bentang Utama 109,7 M Dan Berada 79,2 M Di Atas Dasar Sungai. Konstruksinya Membutuhkan 26 Lantai Perancah. Jembatan Ini Dirancang Oleh Harvey Stover Dari Divisi Jalan Raya California. Perbaikan Struktur Tahan Gempa Rumit Karena Batasan Estetika Yang Ditetapkan Oleh Kode Pelestarian Sejarah.



Gambar 6.25 Conde Mccullough, Dari Departemen Jalan Raya Negara Bagian Oregon, Perancang Dua Jembatan Yang Ditunjukkan Pada Gambar 6.25 Dan 6.26, Memperoleh Ketenaran Sebagai Perancang Beberapa Jembatan Penting Di Jalan Raya Pesisir Oregon. Jembatan Rogue River Di Gold Beach, Oregon, Adalah Jembatan Lengkung Beton Spandrel Terbuka Yang Khas. Puncak-Puncak Monumental Di Pilar Penyangga Merupakan Ciri Khas Mccullough. Kedua Jembatan Ini Dibangun Pada Tahun 1932.



Gambar 6.26 Bentangan Ujung Lengkung Beton Bertingkat Ganda Di Cape Creek, Di Pantai Oregon, Mengingatkan Kita Pada Saluran Air Romawi. Jalan Raya Menuju Utara Di Titik Ini Muncul Dari Terowongan Yang Memberikan Pemandangan Indah Mercusuar Heceta Head, Saat Pelancong Meluncur Di Atas Cape Creek.



Gambar 6.27 Lengkungan Lilac Road Dengan Anggun Membingkai Pintu Masuk Selatan Ke Lembah San Luis Rey Yang Subur, Di California Selatan. Lengkungan Ini Dibangun Di Atas Jalan Raya Antar Negara Bagian 15 Di Kabupaten San Diego Pada Tahun 1978. Perancangnya Adalah Fred Michaels Dari Departemen Transportasi California.

Balok Beton

Lihat Gambar 6.28 dan 6.29.



Gambar 6.28 Jembatan Rockcut, Milik Kabupaten Stevens Dan Ferry, Meraih Penghargaan Desain Dari Portland Cement Association Pada Tahun 1997. Perancangnya Adalah Nicholls Engineering.



Gambar 6.29 Jembatan North Santiam (Gates), Di Kabupaten Marion, Oregon, Meraih Penghargaan Desain Dari Portland Cement Association Pada Tahun 1997. Jembatan Ini Dirancang Oleh Departemen Transportasi Oregon.

Canticrete

Lihat Gambar 6.30.



Gambar 6.30 Jembatan Alsea Bay Yang Ikonik Di Waldport, Oregon, Adalah Satu-Satunya Jembatan Conde Mccullough Yang Memerlukan Penggantian Karena Kerusakan. Struktur Baru Ini Mengingatkan Pada Gaya Mccullough Dan Menggunakan Yang Terbaik Dari Dua Bahan Bangunan Paling Populer, Beton Dan Baja. Elemen Baja Yang Dilapisi Beton Disebut Canticrete. Bentang Jembatan Baru Ini, Yang Dibangun Pada Tahun 1992, Dirancang Oleh Howard Needles Tamman Bergendoff. Jembatan Ini Memenangkan Penghargaan Dari American Institute Of Steel Construction Dan Portland Cement Association.

Jembatan Gantung

Jembatan gantung adalah salah satu konsep tertua di dunia. Jembatan gantung pertama yang tercatat di Amerika Serikat adalah jembatan rantai katenari di atas Jacobs Creek pada tahun 1801 di Uniontown, Pennsylvania. Jembatan gantung terus menjadi jenis jembatan yang disukai hingga zaman modern. Jembatan ini anggun dan sangat praktis untuk bentang yang panjang (Gambar 6.31 hingga 6.35).



Gambar 6.31 Jembatan Brooklyn Mungkin Merupakan Jembatan Klasik As Yang Paling Terkenal. Ini Adalah Salah Satu Penggunaan Awal Tali Kawat, Karena Merupakan Kombinasi Jembatan Gantung Dan Jembatan Kabel. Dirancang Dan Dibangun Pada Tahun 1883 Oleh John Dan Washington Roebling Untuk Kota New York.



Gambar 6.32 Bentang Barat Jembatan San Francisco–Oakland Bay Sebenarnya Adalah Dua Jembatan Gantung Yang Disambung Ujung Ke Ujung Dengan Jangkar Pusat Di Antara Keduanya. Ini Adalah Satu-Satunya Jembatan Gantung Ganda Di Dunia. Dibuka Pada Tahun 1936, Jembatan Ini Dimiliki Oleh Departemen Transportasi California Dan Dirancang Oleh Pendahulunya, Divisi Jalan Raya California, Charles Andrew, Kepala Insinyur Jembatan.



Gambar 6.33 Jembatan Golden Gate Adalah Salah Satu Landmark Paling Terkenal Di Amerika Serikat. Jembatan Ini Membentang Di Pintu Masuk Teluk San Francisco. Jembatan Ini Memegang Rekor Bentang Terpanjang, 1280 M, Selama 27 Tahun. Dirancang Dan Dibangun Pada Tahun 1937 Oleh Charles B. Strauss. Jembatan Ini Dimiliki Oleh Golden Gate Bridge, Highway And Transportation District.



Gambar 6.34 Jembatan Mackinac Straits Adalah Pemenang Penghargaan Jembatan Artistik American Institute Of Steel Construction Tahun 1958 Dan Beberapa Medali Emas. Desainnya Memberikan Tingkat Stabilitas Aerodinamis Yang Belum Pernah Dicapai Sebelumnya Pada Jembatan Gantung. Jembatan Ini Memiliki Bentang Utama 1158 M. Jembatan Ini Dirancang Oleh David Steinman Dan Dimiliki Oleh Mackinac Bridge Authority Di Michigan Utara.





Gambar 6.35 Jembatan Verrazano Narrows, Di Kota New York, Memiliki Bentang Terpanjang, 1298 M, Dari Semua Jembatan Di Amerika. Dirancang Oleh Amman Dan Whitney, Jembatan Ini Dibuka Pada Tahun 193.

Jembatan Bergerak

Lihat Gambar 6.36 dan 6.37.



Gambar 6.36 Jembatan Tower Di Sacramento Meraih Penghargaan Desain Aisc Pada Tahun 1936, Tahun Pembangunannya. Bentang Angkat Yang Unik Ini Dilapisi Pelat Baja Untuk Menutupi Bagian-Bagian Yang Bergerak. Jembatan Ini Dirancang Oleh Leonard Hollister Dari Divisi Jalan Raya California.



Gambar 6.37 Jembatan George P. Coleman Dengan Bentang Ganda Yang Melintasi Sungai York Di Yorktown, Virginia, Baru-Baru Ini Diperlebar. Untuk Meminimalkan Dampak Pada Arus Lalu Lintas Yang Padat, Bagian Rangka Baru Dibangun Di Dok Kering Dan Diapungkan Ke Tempatnya Saat Bagian Lama Diapungkan Keluar. Jembatan Pengganti Yang Dirancang Oleh Parsons, Brinckerhoff, Quade Dan Douglas Memenangkan Medali George P. Richardson Tahun 1997 Untuk Prestasi Luar Biasa.

Jembatan Terapung

Lihat Gambar 6.38.



Gambar 6.38 Jembatan Terapung Lacey V. Murrow Sepanjang 2377 M Yang Melintasi Danau Washington Dekat Seattle Terdiri Dari Ponton Beton Berongga. Kedalaman Air, 45,7 M, Menghalangi Pembangunan Tiang Pancang, Tetapi Ada Beberapa Bentang Jembatan Di Atas Perairan Dangkal Dekat Pantai Yang Dapat Dilewati Kapal Kecil. Jembatan Ini Dirancang Oleh Charles Andrew Dan Clark Elkridge Pada Tahun 1940. Jembatan Ini Terdaftar Di Daftar Tempat Bersejarah Nasional.

6.6 ERA JALAN RAYA ANTAR NEGARA BAGIAN

Sistem Jalan Raya Antar Negara Bagian dan Pertahanan Federal setelah Perang Dunia II memberikan dorongan lain untuk pembangunan jalan raya dan jembatan. Sistem yang dirancang untuk akses tanpa henti, terpisah, dan terkontrol membutuhkan banyak jembatan agar berfungsi sesuai rencana. Para insinyur jembatan zaman dulu mengalami kesulitan untuk beradaptasi. Pengalaman mereka hingga saat itu adalah membangun jembatan di titik terendah di lembah yang melintasi jalur air. Kini, para insinyur jembatan mendapati diri mereka membangun jembatan di atas tanah kering, di punggung bukit, dan di atas jalan raya itu sendiri. Beberapa inovasi baru muncul selama periode produktif ini. Baja komposit, balok kotak beton, dan beton prategang menjadi hal yang biasa.

Balok Kotak Beton

Tipe struktur atas ini, yang dikembangkan oleh Jim Jurkovich dari Divisi Jalan Raya California, memiliki stabilitas torsi yang baik dan memberikan distribusi beban roda yang luar biasa di seluruh balok. Struktur beton berkembang menjadi tipe yang lebih disukai, dimulai di California. California memiliki sumber agregat dan semen yang melimpah. Kontraktor belajar membangunnya dengan biaya yang kompetitif dengan baja (Gambar 6.39 dan 6.40).



Gambar 6.39 Persimpangan Empat Tingkat Di Pusat Kota Los Angeles, Yang Dibangun Pada Tahun 1950, Adalah Persimpangan Bertingkat Pertama Dari Dua Jalan Bebas Hambatan. Ini Adalah Balok Kotak Beton Bertulang, Tipe Yang Dikembangkan Oleh, Dan Menjadi Ciri Khas, Divisi Jalan Raya California.



Gambar 6.40 Jembatan Layang Mission Valley Membentang Di Atas Jalan Raya Antar Negara Bagian 805 Di Atas Dataran Banjir Sungai San Diego Di California Selatan.

Beton Prategang

Beton prategang merupakan evolusi alami dari balok beton. Beton ini memanfaatkan secara optimal kualitas tekan beton dan sifat tarik baja. Prategangan memungkinkan kedalaman struktur yang lebih dangkal, dan penghematan yang sangat besar dalam pekerjaan tanah jalan pendekatan untuk pemisahan jalan tol. Beton prategang dapat berupa prategang awal (pretensioned) atau pascategang (post-tensioned), pracetak atau cor di tempat. Semua opsi ini memiliki tempatnya masing-masing dalam situasi yang berbeda. Divisi Jalan Raya California mempelopori sistem ini pada tahun 1940-an dan sejak itu telah banyak menggunakan balok kotak beton pascategang cor di tempat. Jenis ini telah menjadi sangat umum sehingga kontraktor konstruksi dapat membangunnya dengan biaya yang sama atau lebih rendah daripada struktur beton bertulang biasa (Gambar 6.41 dan 6.42).



Gambar 6.41 Persimpangan Jalan Tol 105/110 Di Los Angeles, California, Adalah Hutan Besar Kolom Beton Yang Menopang Jalan Raya Yang Saling Terkait. Majalah Smithsonian Menyoroti Bangunan Tersebut Sebagai Kreasi Beton Artistik Dalam Artikel Sampul Mereka Edisi Januari

1994. Bangunan Itu Dirancang Oleh Elweed Pomeroy Dari Departemen Transportasi California.



Gambar 6.42 Jembatan Layang Kellogg Central Business District Di Wichita, Kansas, Yang Dirancang Oleh Howard Needles Tamman Bergendoff, Memenangkan Penghargaan Portland Cement Association Pada Tahun 1996.

Baja Komposit

Balok baja komposit, di mana dek beton dipasang ke flensa atas balok baja melalui konektor mekanis, memanfaatkan keunggulan terbaik dari sifat tekan beton dan sifat tarik baja. Sementara beton mendominasi pembangunan jembatan di California dan wilayah barat, baja tetap menjadi bahan bangunan utama di negara bagian timur dan tengah Amerika Serikat (Gambar 6.43 dan 6.44).



Gambar 6.43 Jembatan South Fork Of The Eel River Di California Utara Merupakan Contoh Keunggulan Struktur Baja Komposit. Jembatan Tahun 1958 Ini Memenangkan Penghargaan Aisc Pada Tahun Tersebut.



Gambar 6.44 Jembatan Lembah Sungai Cuyahoga Yang Dibangun Pada Tahun 1980 Untuk Otoritas Jalan Tol Ohio Memperoleh Penghargaan Aisc Pada Tahun Itu. Jembatan Ini Dirancang Oleh Howard Needles Tamman Bergendoff.

Kebangkitan Kembali Baja

Seiring program Jalan Raya Antar Negara Bagian mulai menggunakan semakin banyak struktur beton, selama tahun 1960-an, industri baja dan pengelasan berjuang untuk mempertahankan pangsa pasarnya di pasar jembatan. Banyak inovasi diperkenalkan untuk penggunaan baja melalui kampanye ini, dengan pengembangan baja eksotis, distribusi alat bantu dan contoh desain, dan penyelenggaraan kontes desain.

Balok Baja

Lihat Gambar 6.45 dan 6.46.



Gambar 6.45 Jembatan Memorial Eugene A. Doran (San Mateo Creek–Crystal Springs Reservoir) Adalah Jembatan Pemenang Penghargaan Yang Terletak Di Lingkungan Taman. Pelat Fasia Eksterior Yang Miring Memberikan Penguatan Web Dan Perlakuan Estetika. Jembatan Balok Baja Pelat Las Ini, Yang Dibangun Pada Tahun 1970, Dirancang Oleh Bob Cassano Dari Divisi Jalan Raya California.



Gambar 6.46 Jembatan Sungai Sacramento Di Elkhorn Adalah Jembatan Balok Baja Yang Menggunakan Baja Berkekuatan Tinggi. Dibangun Pada Tahun 1970 Untuk Jalan Raya Antar Negara Bagian 5, Jembatan Ini Meraih Penghargaan Aisc Pada Tahun Itu. Jembatan Ini Dirancang Oleh Bert Bezzone Dari Divisi Jalan Raya California.

Balok Kotak Baja dan Dek Baja Ortropik

Lihat Gambar 6.47 sampai 6.49.



Gambar 6.47 Penyeberangan Sungai Klamath Di Orleans, California Utara, Adalah Pemandangan Indah Di Jalan Terpencil. Terdapat Tujuh Bangunan Di Lokasi Ini, Satu Terbakar Dan Lima Hanyut Terbawa Banjir Besar. Jembatan Gantung Balok Kotak Baja Yang Ada Saat Ini Telah Bertahan Lebih Lama Daripada Pendahulunya. Dibangun Pada Tahun 1967, Jembatan Ini Dirancang Oleh Bert Bezzone Dari Divisi Jalan Raya California.



Gambar 6.48 Jembatan San Mateo–Hayward Di Atas Teluk San Francisco, Tidak Hanya Memiliki Bentang Pendekatan Baja Komposit, Tetapi Bentang Utamanya Juga Memiliki Dek Baja Ortotropik. Terdaftar Di Antara Jembatan-Jembatan Yang Istimewa, Jembatan Ini Memenangkan Penghargaan American Institute Of Steel Construction Pada Tahun 1968. Jembatan Ini Dirancang Oleh Divisi Penyeberangan Tol Teluk California.



Gambar 6.49 Jembatan Pulau Coronado Di Atas Teluk San Diego Di California Selatan Adalah Jembatan Balok Kotak Baja. Jembatan Ini Memenangkan Penghargaan Aisc Pada Tahun 1970. Jembatan Ini Dirancang Oleh Divisi Penyeberangan Tol Teluk California.

6.7 ERA JEMBATAN IKONIK

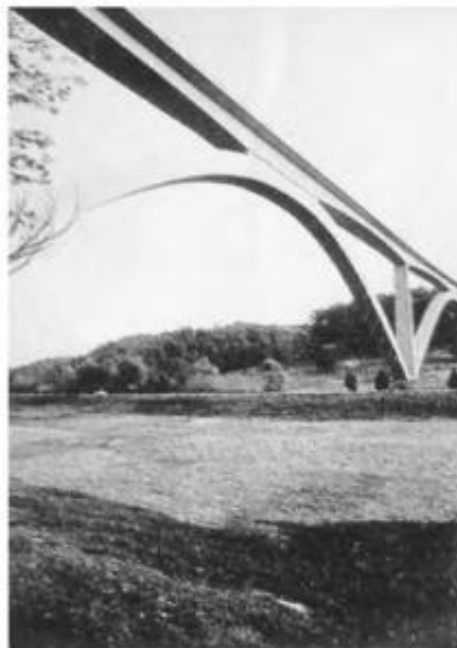
Dengan visi energik dari Era Jalan Raya Antar Negara Bagian yang hampir selesai, dan dimulainya Era Perbaikan Struktur Tahan Gempa, para insinyur jembatan mengarahkan imajinasi mereka untuk membangun monumen-monumen besar.

Jembatan Prategang Segmental

Teknologi canggih beton berkekuatan tinggi dan prategang memungkinkan struktur kantilever membentang di atas lembah yang dalam dan badan air (Gambar 6.50 dan 6.51).



Gambar 6.50 Departemen Transportasi California Bereksperimen Dengan Dan Membangun Satu-Satunya Jembatan Segmentalnya, Di Jalan Raya Antar Negara Bagian 8 Di Atas Pine Valley Di San Diego County Pada Tahun 1974. Bert Bezzone Adalah Insinyur Perancanganya. Jembatan Tersebut Menerima Penghargaan Dari American Society Of Civil Engineers Pada Tahun 1974.



Gambar 6.51 Lengkungan Anggun Karya Figg Engineering Ini, Membawa Natchez Trace Yang Bersejarah Di Atas Taman Di Tennessee. Ini Adalah Lengkungan Segmental Pracetak Pertama Dan Terpanjang, Sepanjang 317 M. Jembatan Ini Menerima Penghargaan Desain Terbaik Pada Tahun 1996.

Jembatan Kabel Gantung

Lihat Gambar 6.52 dan 6.9.



Gambar 6.52 Jembatan Kabel Gantung Sunshine Skyway Yang Baru, Dibangun Pada Tahun 1987, Jelas Merupakan Jembatan Ikonik, Memberikan Pernyataan Yang Cerah Di Atas Pintu Masuk Teluk Tampa, Florida. Struktur Ini Oleh Figg Engineering Menggantikan Rangka Sunshine Skyway Sebelumnya Yang Roboh Akibat Tongkang Yang Melaju Tak Menentu Dan Beratnya Lebih Dari Jembatan Tersebut. Pilar-Pilar Baru Dilindungi Oleh Caisson Yang Sebesar Dan Seberat Tongkang Tersebut.



Gambar 6.53 Jembatan Kanal Chesapeake Dan Delaware Milik Departemen Transportasi Delaware Dirancang Oleh Figg Engineering. Jembatan Ini Menerima Penghargaan Keunggulan Dalam Desain Pada Tahun 1996.

Komposit

Definisi baru jembatan komposit tidak ada hubungannya dengan baja atau beton. Komposit dalam penggunaan modern mengacu pada kelompok polimer kimia organik yang umumnya dikenal sebagai plastik. Ini masih merupakan material eksperimental sejauh menyangkut jembatan, tetapi telah berhasil digunakan di industri lain selama beberapa waktu sekarang. Komposit sekarang digunakan dengan kolom jembatan pembungkus serat sebagai teknik perbaikan seismik. Departemen Transportasi California saat ini sedang merancang

bentang eksperimental yang akan berupa balok tabung komposit berisi beton dengan dek komposit.



Gambar 6.54 Jembatan Laurel Lick Adalah Jembatan Komposit Kedua Yang Selesai Dibangun. Jembatan Ini Dimiliki Oleh Departemen Jalan Raya Virginia Barat Dan Dibangun Secara Eksperimental Bersama Dengan Universitas Virginia Barat, Pada Tahun 1997.

DAFTAR PUSTAKA

- Alizadeh R, Allen JK, Mistree F (2020) Managing computational complexity using surrogate models: a critical review. *Res Eng Des* 31:275–298.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). *LRFD Bridge Design Specifications* (9th ed.). AASHTO.
- Andersen, M. S., and A. Brandt. 2018. "Aerodynamic instability investigations of a novel, flexible and lightweight triple-box girder design for long-span bridges." *J. Bridge Eng.* 23 (12): 04018095
- Apaydin, N.M. 2018, Bas, S. Long-span orthotropic steel deck bridges of turkey. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 419, 012023.
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). *RSNI T-03-2005: Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan*. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 1725:2016: Pembebanan untuk Jembatan*. BSN, Jakarta.
- Berthelson PR, Ghassemi P, Wood JW, Stubblefield GG, Al-Graitti AJ, Jones MD et al (2021) A finite element-guided mathematical surrogate modeling approach for assessing occupant injury trends across variations in simplified vehicular impact conditions. *Med Biol Eng Comput* 59:1065–1079.
- Chen, W. F., & Duan, L. (Eds.). (2014). "Extradosed Bridges and Stress Ribbon Pedestrian Bridges". Dalam *Bridge Engineering Handbook, Second Edition*.
- Dan, D. H., Y. Xia, B. Xu, F. Han, and X. F. Yan. 2018. "Multistep and multiparameter identification method for bridge cable systems." *J. Bridge Eng.* 23 (1): 04017111.
- Dewabroto, Wiryanto 2016. "Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain AISC 2010 Edisi ke-2". Tangerang, Jurusan Teknik Sipil UPH.
- Fajrin, A., & Karyoto. (2017). Analisa perencanaan struktur atas jembatan pelengkung baja. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 1(1), 229-237.
- Febry Suhendra, Faisal Ananda, dan Alamsyah (2018). Perencanaan Jembatan Rangka Baja Pelengkung Sungai Liong. *Jurnal Gradasi Teknik Sipil* Vol. 2 No. 2. Penerbit: Politeknik Negri Banjarmasin

- Freire, A. M. S., Negrão, J. H. O., and Lopes, A. V. (2006). "Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cablestayed bridges." *Computers & Structures*, Vol. 84, Nos. 31-32, pp. 2128-2140, DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.047.
- Gabriele, G. A., and K. M. Ragsdell. 1980. "Large scale nonlinear programming using the generalized reduced gradient method." *J. Mech. Des.* 102 (3): 566–573.
- Gimsing, N. J. (1983). *Cable supported bridges concept and design*, Wiley, New York.
- Guan X, Burton H, Shokrabadi M, Yi Z (2021) Seismic drift demand estimation for steel moment frame buildings: from mechanics-based to data-driven models. *J Struct Eng* 147:04021058.
- Hassanabad, M. G., & Samaei, S. R. (2024). Innovations in Water Treatment: Navigating Sustainable Solutions for the Future. The 12th International Conference on Civil, Architecture and urban Management, Tbilisi, Georgia.
- Hoang, V., O. Kiyomiya, and T. An. 2018. "Experimental and numerical study of lateral cable rupture in cable-stayed bridges: Case study." *J. Bridge Eng.* 23 (6): 05018004.
- Irvine, H. M. 1981. *Cable structures*. New York: Dover, MIT Press.
- Jomvinya K, Vicat E (2009) Kanchanapisek bridge over the chao phraya river, Thailand. *Struct Eng Int* 19:58–62.
- Kim, M. Y., Kim, D. Y., Jung, M. R., and Attard, M. M. (2014). "Improved methods for determining the 3 dimensional initial shapes of cable-supported bridges." *Int. J. Steel Struct.*, 14(1), 83–102.
- Kudela J, Matousek R (2022) Recent advances and applications of surrogate models for finite element method computations: a review. *Soft Comput* 26:13709–13733.
- Lilu, D. F. (2019). Alternatif perencanaan struktur atas jembatan rangka baja tipe camel back truss dengan metode LRFD. *Jurnal Perencanaan Jembatan Rangka Baja*, 2.
- Micheli L, Alipour A, Laflamme S (2020) Multiple-surrogate models for probabilistic performance assessment of wind-excited tall buildings under uncertainties. *ASCE-ASME J Risk Uncertain Eng Syst Part A Civ Eng* 6:0001091.
- Muhamad, A., & Puluhalawa, I. (2019). Desain jembatan T-girder pada sungai jalan antara menggunakan SNI 1725:2016. *Jurnal Teknik Sipil dan Aplikasi (TEKLA)*, 1(1).
- Park C, Haftka RT, Kim NH (2017) Remarks on multi-fidelity surrogates. *Struct Multidiscip Optim* 55:1029–1050.

- Pujianto. (2007). *Bahan Kuliah Perencanaan Struktur Tahan Gempa*. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Robinson TD, Eldred MS, Willcox KE, Haimes R (2008) Surrogate-based optimization using multifidelity models with variable parameterization and corrected space mapping. *AIAA J* 46:2814–2822.
- Rochman, A. (2024). *Desain Jembatan 1*. UMS Press. ISBN: 978-602-361-632-9.
- Supriyadi, B., & Muntohar, A. S. (2000). *Jembatan*. Beta Offset, Yogyakarta.
- Troitsky, M. S. (1977). *Cable Stayed Bridges: Theory and Design*. Wiley.
- Widodo, Aris (2017). Analisis Kuat Tekan Beton Dengan Penambahan Serat Rooving Pada Beton Non Pasir. *Jurnal Teknik Sipil & Perencanaan*, 19(2), 115- 120.
- Wu, Y.X.; Zhou, J.T.; Sun, M.; Tian, Z.S.; Wang, Z. 2020. Geometry calculation method for main cables of completed suspension bridge with irregular spatial cable planes. *Bridge Constr.* 50, 37–43.
- Xiao, R. C., M. H. Chen, and B. Sun. 2017. “Determination of the reasonable state of suspension bridges with spatial cables.” *J. Bridge Eng.* 22 (9): 04017060.
- Y Wang, Z Gao, Z Zonghui Chen, W Zhao, J Shi, M Liao (2019), The design and construction of cable-stayed bridge over Bouregreg River, Morocco, *Bautechnik*. 96, 150–159.
- Zhang, W.-M., C.-Y. Yang, and J.-Q. Chang. 2021. “Cable shape and construction parameters of triple-tower double-cable suspension bridge with two asymmetrical main spans.” *J. Bridge Eng.* 26 (2): 04020127.

RANCANG BANGUN TEKNIK JEMBATAN

JILID 4

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

BIO DATA PENULIS



Penulis memiliki berbagai disiplin ilmu yang diperoleh dari Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang. dan dari Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) Salatiga. Disiplin ilmu itu antara lain teknik elektro, komputer, manajemen dan ilmu sosiologi. Penulis memiliki pengalaman kerja pada industri elektronik dan sertifikasi keahlian dalam bidang Jaringan Internet, Telekomunikasi, Artificial Intelligence, Internet Of Things (IoT), Augmented Reality (AR), Technopreneurship, Internet Marketing dan bidang pengolahan dan analisa data (komputer statistik).

Penulis adalah pendiri dari Universitas Sains dan Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) dan juga seorang dosen yang memiliki Jabatan Fungsional Akademik Lektor Kepala (Associate Professor) yang telah menghasilkan puluhan Buku Ajar ber ISBN, HAKI dari beberapa karya cipta dan Hak Paten pada produk IPTEK. Sejak tahun 2023 penulis tercatat sebagai Dosen luar biasa di Fakultas Ekonomi & Bisnis (FEB) Universitas Diponegoro Semarang. Penulis juga terlibat dalam berbagai organisasi profesi dan industri yang terkait dengan dunia usaha dan industri, khususnya dalam pengembangan sumber daya manusia yang unggul untuk memenuhi kebutuhan dunia kerja secara nyata.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7227-81-2 (no.jil.lengkap PDF)



9

786347

227812

ISBN 978-634-7227-81-2 (no.jil.lengkap)

ISBN 978-634-7227-88-1 (jil.4 PDF)



9

786347

227881