



TEKNOLOGI

KONSTRUKSI BAWAH TANAH



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK



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



TEKNOLOGI

KONSTRUKSI BAWAH TANAH

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



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 978-623-8642-82-3 (PDF)



9

786238

642823

Teknologi Konstruksi Bawah Tanah

Penulis :

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

ISBN : 978-623-8642-82-3

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 Yuniato, 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

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku yang berjudul "*Teknologi Konstruksi Bawah Tanah*" dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun dengan tujuan untuk memberikan pemahaman yang mendalam mengenai teknologi dan prinsip dasar dalam konstruksi bawah tanah, yang semakin berkembang seiring dengan kebutuhan akan infrastruktur yang efisien dan berkelanjutan di kawasan perkotaan. Konstruksi bawah tanah menghadirkan tantangan unik baik dari segi desain, pelaksanaan, maupun pemeliharannya. Dengan terbatasnya ruang yang tersedia dan kompleksitas yang ada, diperlukan pendekatan teknologi yang inovatif dan interdisipliner. Buku ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang berbagai teknik dan metodologi terkini dalam konstruksi bawah tanah, serta mengupas isu-isu terkait seperti keselamatan, keberlanjutan, dan efisiensi sumber daya.

Bab pertama buku ini mengawali pembahasan dengan mendefinisikan infrastruktur bawah tanah, serta membahas pentingnya keberlanjutan dalam pengembangannya. Bab ini juga mengidentifikasi bahaya dan risiko yang terkait, memberikan gambaran sejarah perkembangan infrastruktur bawah tanah, serta mengulas manfaat dan tantangan yang dihadapi dalam pengembangan ruang bawah tanah. Faktor manusia dan organisasi yang terlibat dalam laporan ini juga turut dibahas untuk memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh tentang topik ini. Bab kedua mengulas perkembangan ekspansi bawah tanah sepanjang abad terakhir, serta bagaimana rekayasa bawah tanah dapat berkontribusi pada keberlanjutan. Dalam bab ini, dijelaskan pula bagaimana kebijakan, ekonomi, perilaku manusia, dan ketergantungan antar sistem mempengaruhi pengambilan keputusan dalam pengembangan infrastruktur bawah tanah. Aspek perencanaan, tata kelola, dan manajemen jangka panjang yang mendukung keberlanjutan juga menjadi fokus utama.

Pada bab ketiga, dibahas kontribusi teknik bawah tanah dalam membangun perkotaan yang berkelanjutan dan tangguh. Fokus pada bahaya, keamanan, dan ketahanan wilayah perkotaan ditekankan untuk mengantisipasi berbagai ancaman yang dapat muncul, serta bagaimana teknik rekayasa bawah tanah memperkuat ketahanan tersebut dalam konteks pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Bab keempat menyoroti kesehatan dan keselamatan dalam konstruksi bawah tanah, mengidentifikasi bahaya yang mungkin timbul, dan bagaimana keselamatan pekerja dapat dikelola melalui regulasi yang efektif. Pembahasan mencakup tantangan yang dihadapi dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman, serta standar keselamatan internasional yang berlaku dalam proyek terowongan bawah tanah.

Bab kelima membahas keberlanjutan siklus hidup infrastruktur bawah tanah dengan menilai biaya dan manfaat dari perspektif ekonomi, sosial, dan lingkungan. Bab ini juga menekankan pentingnya penelitian lebih lanjut dalam mempelajari siklus hidup biaya dan manfaat, untuk mengoptimalkan keberlanjutan dalam pengembangan infrastruktur bawah tanah. Bab keenam mengulas berbagai teknologi inovatif dalam rekayasa bawah tanah, yang mendukung keberlanjutan dan ketahanan infrastruktur. Pembahasan mencakup teknologi

untuk karakterisasi lokasi bawah tanah, desain, konstruksi, serta manajemen aset, yang semuanya berperan dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pembangunan infrastruktur bawah tanah.

Bab ketujuh membahas kapasitas institusional, pendidikan, penelitian, dan tenaga kerja dalam konteks rekayasa bawah tanah. Fokus utamanya adalah pentingnya perencanaan terkoordinasi, kepemimpinan teknologi, dan pengembangan tenaga kerja yang kompeten untuk mendukung pengembangan infrastruktur bawah tanah yang berkelanjutan dan efisien. Bab kedelapan mengulang kembali pentingnya kontribusi rekayasa bawah tanah dalam pembangunan perkotaan yang berkelanjutan dan tangguh. Bab ini juga menyoroti tantangan bahaya yang harus dihadapi dan bagaimana rekayasa bawah tanah memperkuat ketahanan wilayah perkotaan terhadap berbagai ancaman.

Pada bab kesembilan, dibahas lebih lanjut tentang kesehatan dan keselamatan di bawah tanah, termasuk bahaya yang dihadapi pekerja dalam lingkungan bawah tanah, serta pentingnya peraturan keselamatan yang tepat guna melindungi pekerja dan penghuni bawah tanah. Protokol tanggap darurat dan keselamatan yang ketat juga dibahas sebagai bagian dari upaya mengurangi risiko. Bab kesepuluh menekankan pentingnya keberlanjutan dalam siklus hidup infrastruktur bawah tanah, dengan menganalisis biaya dan manfaat yang terkait dalam aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan. Bab ini juga menekankan perlunya penelitian lebih lanjut untuk memahami dampak dan efisiensi biaya dari berbagai proyek infrastruktur bawah tanah.

Bab kesebelas mengulas teknologi terbaru dalam rekayasa bawah tanah, dengan fokus pada penerapan inovasi dalam desain dan konstruksi untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan. Teknologi yang mempromosikan ketahanan dan memperpanjang masa manfaat infrastruktur bawah tanah juga dibahas secara mendalam. Bab terakhir, yaitu bab kedua belas, membahas pentingnya kapasitas institusional, pendidikan, dan penelitian untuk mendukung pengembangan infrastruktur bawah tanah yang berkelanjutan. Ditekankan juga pentingnya pendekatan siklus hidup dalam perancangan infrastruktur, serta bagaimana keselamatan dan kenyamanan pengguna menjadi prioritas dalam upaya menciptakan pembangunan yang berkelanjutan.

Melalui pemahaman yang lebih baik tentang teknologi konstruksi bawah tanah, diharapkan para profesional di bidang ini dapat meningkatkan kualitas dan keberlanjutan proyek infrastruktur bawah tanah, yang akan memberikan manfaat jangka panjang bagi masyarakat. Kami berharap buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi para insinyur, arsitek, dan semua pihak yang terlibat dalam dunia konstruksi. Terima Kasih.

Semarang, Februari 2025

Penulis

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

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Mendefinisikan Infrastruktur Bawah Tanah	1
1.2 Sejarah Singkat Penempatan Di Bawah Tanah	7
1.3 Potensi Dan Tantangan Pengembangan Ruang Bawah Tanah	13
1.4 Faktor Manusia Yang Mempengaruhi Pengembangan Bawah Tanah	16
BAB 2 EVOLUSI DAN FAKTOR PEMBANGUNAN BAWAH TANAH	19
2.1 Perluasan Ruang Bawah Tanah Pada Abad Yang Lalu	20
2.2 Rekayasa Bawah Tanah Untuk Keberlanjutan	21
2.3 Penggerak Kebijakan Dan Ekonomi Dalam Keputusan	25
2.4 Ketergantungan Antar – Sistem	31
2.5 Dampak Perencanaan Yang Tidak Lengkap	35
2.6 Perencanaan Dan Tata Kelola Untuk Keberlanjutan	38
2.7 Manajemen Jangka Panjang Bawah Tanah	41
BAB 3 KONTRIBUSI REKAYASA BAWAH TANAH PADA PERKOTAAN	43
3.1 Lingkungan Perkotaan Sebagai Sistem Dari Sistem	43
3.2 Bahaya, Keamanan Dan Ketahanan Wilayah Perkotaan	64
BAB 4 KESEHATAN DAN KESELAMATAN BAWAH TANAH	78
4.1 Rekayasa Faktor Manusia	78
4.2 Mengelola Keselamatan Melalui Regulasi	79
4.3 Bahaya Bagi Kesehatan Manusia	81
4.4 Keamanan Dari Kekerasan	84
4.5 Kode Keselamatan Terowongan Bawah Tanah Internasional	87
4.6 Meningkatkan Kenyamanan Dan Memaksimalkan Keselamatan	92
BAB 5 Siklus, Biaya, dan Manfaat Infrastruktur Bawah Tanah.....	93
5.1 Penilaian Keberlanjutan Siklus Hidup	93
5.2 Manfaat Dan Biaya Ekonomi Siklus Hidup	96
5.3 Manfaat Dan Biaya Lingkungan Siklus Hidup	102
5.4 Manfaat Dan Biaya Sosial	104
5.5 Kebutuhan Penelitian Untuk Biaya Manfaat Siklus Hidup	106
BAB 6 REKAYASA BAWAH TANAH UNTUK PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN	108
6.1 Evolusi Teknologi	108
6.2 Teknologi Untuk Karakterisasi Lokal Bawah Tanah	112
6.3 Teknologi Untuk Desain	119
6.4 Teknologi Untuk Konstruksi Bawah Tanah	123
6.5 Teknologi Untuk Manajemen Asset Efektif	133
6.6 Teknologi Yang Meningkatkan Keberlanjutan Dan Ketahanan	141
BAB 7 KAPABILITAS LEMBAGA, PENDIDIKAN, PENELITIAN, DAN TENAGA KERJA.....	146

7.1	Perencanaan Formal Yang Terkoordinasi	147
7.2	Kepemimpinan Teknologi	150
7.3	Kerangka Kerja Pendidikan	154
7.4	Memajukan Teknologi Untuk Keberlanjutan	157
7.5	Keselamatan Dan Kenyamanan Pengguna	162
Daftar Pustaka		165

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada tahun 2000, National Academy of Engineering menerbitkan daftar 20 pencapaian teknik pada abad ke-20 yang mencakup elektrifikasi, mobil, pasokan dan distribusi air, komputer, telepon, AC dan refrigerasi, jalan raya, Internet, mekanisasi petrokimia, laser dan serat optik, teknologi nuklir, dan material berkinerja tinggi (NAE, 2000). Banyak dari pencapaian ini telah digambarkan sebagai andalan kehidupan perkotaan kontemporer, dan banyak layanan penting yang terkait dengannya disampaikan menggunakan kereta bawah tanah perkotaan selama beberapa tahap produksi, penyimpanan, dan distribusi.

Pemeliharaan dan peningkatan layanan tersebut, serta kualitas hidup di wilayah perkotaan, bergantung pada aliran investasi dan inovasi teknologi yang stabil. Namun, aktivitas manusia dan pertumbuhan populasi sedang mengubah negara dan planet ini. Tantangan jangka panjang bagi masyarakat meliputi pembelajaran tentang bagaimana manusia dapat hidup sejahtera tanpa terus-menerus merusak Bumi dan bagaimana melakukan adaptasi yang sesuai dan berkelanjutan. Meningkatkan atau bahkan mempertahankan standar hidup saat ini di masa mendatang akan memberikan tekanan yang lebih besar pada sistem bumi, khususnya di lingkungan perkotaan yang diperkirakan akan mengalami peningkatan populasi.

Sekitar 80 persen penduduk Amerika Serikat tinggal di daerah perkotaan. Sekitar 53 persen penduduk Amerika tinggal dalam jarak 50 mil dari pantai (Markham, 2008) pada saat perubahan iklim global diprediksi akan berdampak signifikan pada pesisir termasuk kenaikan muka air laut, perubahan pola cuaca, dan kerusakan pasokan air minum. Sementara itu, beberapa pihak menyarankan fokus jangka pendek perlu diberikan pada desain dan adopsi strategi berbasis masyarakat untuk mengurangi kerentanan terhadap dampak perubahan iklim yang berpotensi merusak di seluruh negeri.

Penggunaan ruang bawah tanah yang intensif dan terkoordinasi dengan baik dapat menjadi komponen kunci dari solusi keberlanjutan. Insinyur ruang bawah tanah akan memiliki peran penting dalam perencanaan, perancangan, pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan, dan pengaturan ruang bawah tanah serta dalam menginformasikan keputusan sosial, ekonomi, dan bahkan politik yang terkait dengan ruang bawah tanah dan pembangunan perkotaan. Meningkatnya minat terhadap pembangunan dan pembangunan bawah tanah terlihat jelas di seluruh dunia.

Rekayasa bawah tanah dapat menyediakan sarana untuk mengurangi penggunaan energi, meningkatkan pelestarian ruang hijau, memproses dan menyimpan air dan limbah secara berkelanjutan, menempatkan infrastruktur penting secara aman dan efisien, mencegah dan membalikkan degradasi lingkungan perkotaan, dan meningkatkan kualitas hidup. Banyak daerah perkotaan telah menikmati manfaat dari penggunaan ruang bawah tanah. Arteri Sentral I-93 dan perpanjangan I-90 di Boston (dikenal secara kolektif sebagai "Big Dig"), misalnya, meskipun mahal, kontroversial, dan bukan tanpa masalah, telah meningkatkan waktu perjalanan periode puncak melalui pusat kota Boston, menghemat sekitar Rp. 1.68

Triliun dalam biaya dan waktu pelancong pusat kota tahunan, dan telah menghasilkan lanskap kota pusat kota yang ditingkatkan.

Pengalaman Swedia dengan fasilitas pengolahan limbah bawah tanah sejak tahun 1940-an dan jaringan infrastruktur bawah tanah Norwegia yang luas, termasuk pembangkit tenaga listrik, fasilitas pasokan air dan pengolahan air limbah, kontrol lalu lintas udara, keuangan, kearsipan, pertahanan sipil dan fasilitas keamanan nasional menunjukkan bahwa fasilitas bawah tanah dapat hemat biaya dan dapat diandalkan. Montreal memulai pembangunan Kota Dalam Ruangannya pada tahun 1962, jaringan jalan setapak pejalan kaki, pusat ritel, area perumahan, dan transportasi umum yang saling terhubung sekitar setengahnya berada di bawah tanah.

Pada tahun 2006, struktur tersebut diperpanjang hampir 20 mil panjangnya dan mencakup area seluas lebih dari 4,5 mil persegi di pusat kota Montreal. Proyek tersebut telah menghasilkan akses yang lebih baik ke pusat kota, mengurangi jarak berjalan kaki, dan menyediakan ruang publik tambahan di atas tanah. Menurut peserta lokakarya National Research Council (NRC) baru-baru ini tentang penelitian keberlanjutan perkotaan, urbanisasi dipandang oleh sebagian orang sebagai penyebab utama banyaknya masalah sosial saat ini, tetapi juga dipandang sebagai sarana untuk menyediakan kebutuhan berkelanjutan bagi populasi yang diproyeksikan untuk abad ke-21.

Meskipun urbanisasi mungkin bukan akar penyebabnya, masalah tertentu mungkin telah diperparah olehnya. Peserta lokakarya tersebut mengidentifikasi berbagai faktor yang mengintensifkan dampak urbanisasi (konsumsi sumber daya yang sangat besar di area yang terkonsentrasi, penurunan lingkungan, masalah kesehatan masyarakat, dan ketimpangan ekonomi dan sosial) dan mencerminkan kegagalan masyarakat untuk mengenali area perkotaan sebagai sistem.

Mengubah citra kota dari sekumpulan orang, struktur, dan fasilitas infrastruktur yang padat dan otonom menjadi sistem dinamis yang terdiri dari elemen-elemen yang saling bergantung bukanlah hal yang mudah, tetapi sangat penting bagi kapasitas kita untuk bertahan dan beradaptasi dengan tantangan masa depan. Pendekatan tiga dimensi yang terpadu terhadap desain dan pengelolaan infrastruktur yang mempertimbangkan dan menghargai penggunaan ruang serta kebutuhan manusia dan sosial dari waktu ke waktu akan menguntungkan semua sektor masyarakat dengan melindungi kesehatan masyarakat, mengurangi risiko, memaksimalkan keandalan dan kinerja jangka panjang sistem infrastruktur perkotaan, serta meminimalkan biaya jangka panjang.

Ruang bawah tanah merupakan sumber daya yang berharga. Perencanaan kota jarang sekali memperhitungkan ruang di atas dan di bawah permukaan bumi secara sistematis secara terkoordinasi dalam skala besar, dan jarang sekali memasukkan perencanaan siklus hidup infrastruktur atau keberlanjutan infrastruktur jangka panjang saat memutuskan arah masa depan. Di bawah sponsor National Science Foundation, NRC mengadakan panel pakar baru untuk mengeksplorasi pembangunan bawah tanah yang berkelanjutan di lingkungan perkotaan, untuk mengidentifikasi penelitian yang diperlukan guna memanfaatkan keuntungan dengan baik, dan untuk mengembangkan pemahaman publik dan komunitas

teknis yang lebih baik tentang peran rekayasa ruang bawah tanah dalam keberlanjutan lingkungan binaan perkotaan.

Komite tersebut terdiri dari para peneliti dan praktisi dengan keahlian dalam rekayasa geoteknik, konstruksi bawah tanah, teknologi tanpa galian, penilaian risiko, dan teknik visualisasi untuk aplikasi geoteknik. Selain itu, komite tersebut memasukkan keahlian dalam pembangunan infrastruktur berkelanjutan, kebijakan dan perencanaan infrastruktur, serta pencegahan kebakaran, keselamatan, dan ventilasi di bawah tanah.

1.1 MENDEFINISIKAN INFRASTRUKTUR BAWAH TANAH

Secara umum, infrastruktur perkotaan mengacu pada semua struktur fisik dan organisasi yang memungkinkan sistem perkotaan berfungsi. Banyak jenis infrastruktur membentuk tatanan fisik sistem perkotaan (misalnya, jalan, utilitas, gedung) dan kerangka tata kelola, ekonomi, dan sosial yang mendefinisikan masyarakat. Infrastruktur bawah tanah mengacu pada infrastruktur fisik apa pun yang ditempatkan di bawah permukaan dan mencakup utilitas bawah tanah (misalnya, air, listrik, gas, komunikasi, pengelolaan limbah), transportasi (misalnya, jalan raya dan jalan tol, kereta bawah tanah, kereta barang dan penumpang) dan fasilitas pendukungnya, fondasi bangunan, dan struktur apa pun yang dibangun di bawah tanah untuk mengakomodasi perumahan, industri, manufaktur, rekreasi, atau tujuan lainnya.

Banyak jenis infrastruktur yang didefinisikan lebih lanjut dalam Bab 3. Mengingat sifat luas dari tugas komite dan banyaknya jenis infrastruktur bawah tanah, laporan ini sering menggeneralisasi infrastruktur bawah tanah sebagai satu kategori tunggal dalam banyak diskusi, khususnya ketika merujuk pada sistem infrastruktur. Akan tetapi, perlu dicatat bahwa manfaat dan tantangan dari masing-masing jenis infrastruktur bawah tanah tidak dirasakan oleh semua orang. Infrastruktur bawah tanah dimiliki dan dioperasikan oleh berbagai jenis entitas yang melayani berbagai jenis pemangku kepentingan, masing-masing dengan kebutuhan, kepentingan, struktur pemerintahan, dan sumber daya yang mungkin berbeda dan terkadang berlawanan.

KOTAK 1.1

Pernyataan Tugas

Sebuah komite ad hoc dari Akademi Nasional akan melakukan studi untuk mengeksplorasi potensi keuntungan pengembangan bawah tanah di lingkungan perkotaan, untuk mengidentifikasi penelitian yang diperlukan guna memanfaatkan peluang ini, dan untuk mengembangkan pemahaman masyarakat umum dan teknis yang lebih baik tentang peran rekayasa ruang bawah tanah dalam keberlanjutan lingkungan binaan perkotaan, khususnya minimalisasi konsumsi sumber daya energi tak terbarukan, bahan konstruksi, dan dampak negatif pada lingkungan alam, binaan, dan sosial. Secara khusus, studi ini akan:

- Merangkum pengetahuan teknik geologi dan geoteknik terkini tentang pengembangan bawah tanah di lingkungan perkotaan dan bagaimana pemanfaatan bawah tanah dapat meningkatkan keberlanjutan, termasuk pengetahuan tentang

karakterisasi lokasi geologi, teknik pemantauan konstruksi dan geoteknik, kebutuhan energi, penggunaan bahan galian, dan biaya serta manfaat siklus hidup pengembangan infrastruktur bawah tanah.

- Mengidentifikasi penelitian yang diperlukan untuk memanfaatkan peluang guna meningkatkan pembangunan perkotaan berkelanjutan melalui rekayasa bawah tanah, dalam bidang-bidang berikut:
- Karakterisasi bawah tanah, prediksi lingkungan geologi, dan respons tanah yang penting untuk keberhasilan desain dan konstruksi proyek bawah tanah dan fasilitas penting guna memaksimalkan keberlanjutan dan ketahanan;
- Metodologi konstruksi dan pemantauan serta metode penggalian yang disempurnakan, termasuk pembuatan terowongan, yang mendukung pembangunan bawah tanah yang berkelanjutan dan tangguh;
- Struktur dan saluran bawah tanah cerdas yang melaporkan statusnya;
- Pertimbangan kesehatan dan keselamatan, seperti ventilasi yang hemat biaya, cahaya, dan masalah yang terkait dengan paparan radon atau pengendalian kebakaran;
- Masalah biaya dan manfaat siklus hidup, termasuk berkurangnya kebutuhan energi untuk pemanasan dan pendinginan, berkurangnya penggunaan material konstruksi, penggunaan material galian, peningkatan umur struktur bawah tanah, dan berkurangnya pemeliharaan yang terkait dengan suhu yang stabil dan isolasi dari efek pelapukan permukaan;
- Manfaat keberlanjutan yang potensial dari peningkatan penggunaan ruang bawah tanah untuk sistem transportasi manusia, termasuk jalan raya dan angkutan massal, serta angkutan barang;
- Potensi untuk mengintegrasikan sistem energi, air, dan limbah untuk wilayah perkotaan tertentu guna meningkatkan keberlanjutan; dan
- Bagaimana pengembangan bawah tanah dapat mengatasi masalah yang terkait dengan dampak perubahan iklim pada lingkungan perkotaan.

Panitia akan merekomendasikan arahan untuk jalur penelitian rekayasa bawah tanah baru yang difokuskan pada rekayasa dan manajemen sistem bumi untuk memastikan sumber daya manusia masa depan untuk pengembangan bawah tanah yang berkelanjutan, akan menganalisis keuntungan dan kerugian dari pendirian pusat penelitian baru di area ini, dan mempertimbangkan opsi potensial lainnya untuk meningkatkan kapasitas sumber daya manusia untuk pengembangan bawah tanah yang berkelanjutan (termasuk status quo).

Panitia juga akan mempertimbangkan dari sudut pandang ilmu sosial, kebijakan, ekonomi, dan pendorong perilaku manusia yang mendorong atau menghambat pengembangan bawah permukaan secara berkelanjutan, tetapi tidak akan membuat rekomendasi kebijakan atau pendanaan.

Keberlanjutan

Menyempurnakan definisi keberlanjutan sebagaimana diterapkan pada pembangunan

bawah tanah merupakan tugas pertama yang dilakukan oleh komite studi. Pekerjaan sebelumnya menggambarkan kesulitan dalam mendefinisikan istilah-istilah seperti “keberlanjutan” dan bahkan “perkotaan”. Konsep “Pembangunan Berkelanjutan” dijelaskan oleh Komisi Dunia untuk Lingkungan dan Pembangunan pada tahun 1987 sebagai “memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri”.

Istilah-istilah seperti “ketahanan” sering dikaitkan dengan keberlanjutan. Komite studi saat ini menganggap pemeliharaan kualitas hidup sebagai bagian dari keberlanjutan, dan mengakui bahwa memasukkan keberlanjutan ke dalam praktik pengelolaan masyarakat harus terjadi pada banyak skala dari skala global dan nasional hingga skala proyek individu. Mendefinisikan keberlanjutan sebagai bagian dari sistem perkotaan yang dapat diimplementasikan di tingkat lokal menjadi lebih sulit karena istilah tersebut diresapi dengan nilai-nilai lokal. Definisi komite tentang pembangunan bawah tanah perkotaan yang berkelanjutan disediakan dalam Kotak 1.2.

Komite mengakui ketahanan sebagai atribut utama keberlanjutan dan mendefinisikan ketahanan sebagai kemampuan untuk menanggapi perubahan lingkungan terutama sebagai akibat dari bencana alam atau bencana yang disebabkan oleh manusia dengan dampak minimum terhadap fungsi. Hal ini cukup konsisten dengan definisi ketahanan yang muncul dalam literatur ilmu sosial. Kemampuan untuk mempertahankan layanan masyarakat yang diharapkan merupakan demonstrasi ketahanan. Dalam lingkungan masyarakat, terutama dalam konteks sistem yang direkayasa, ketahanan sering dikaitkan dengan redundansi dan cadangan.

Namun, komite mengakui bahwa ketahanan lebih dari sekadar desain sistem cadangan dan persediaan fisik. Ketahanan mencakup pola pikir di mana masyarakat dianggap sebagai sistem di mana bawah tanah memainkan peran penting tetapi sering kali diabaikan. Dalam masyarakat perkotaan, ruang bawah tanah merupakan bagian dari sistem kompleks yang mencakup permukaan dan di atas tanah (misalnya, jembatan, gedung pencakar langit). Tanpa pertimbangan yang tepat terhadap ruang tiga dimensi dan penggunaan ruang dari waktu ke waktu, konflik yang disebabkan oleh persaingan penggunaan ruang bawah tanah, atau masalah yang terkait dengan pencemaran sumber daya bawah tanah (misalnya, ruang, air tanah, dan material) dapat terjadi.

Sumber daya ruang bawah tanah perkotaan perlu dipertimbangkan secara holistik untuk solusi yang paling berkelanjutan. Proyek-proyek individual sering kali dibingkai secara independen dari perencanaan lain dan ditempatkan dalam konteks penggunaan ruang yang ada, bukan sebagai bagian dari perencanaan jangka panjang yang memungkinkan penggunaan sumber daya ruang bawah tanah dan permukaan secara terpadu.

Ruang bawah tanah sering kali tidak dinilai secara koheren atau eksplisit. Akibatnya, sebagian besar desain proyek tidak dipilih untuk menjaga peluang fleksibilitas di masa mendatang dan penggunaan atau akses alternatif. Kita kurang memiliki pengetahuan tentang biaya langsung, tidak langsung, dan sosial dari penggunaan ruang bawah tanah, dan kita memiliki sedikit metrik tentang manfaat siklus hidup investasi di ruang bawah tanah.

KOTAK 1.2**Definisi Pembangunan Bawah Tanah Perkotaan yang Berkelanjutan**

Untuk tujuan laporan ini, pembangunan bawah tanah perkotaan yang berkelanjutan adalah pendekatan pembangunan bawah tanah yang memenuhi kebutuhan manusia saat ini sambil melestarikan sumber daya dan lingkungan alam dan buatan untuk memenuhi kebutuhan generasi mendatang. Pembangunan bawah tanah perkotaan yang berkelanjutan memerlukan perspektif sistem untuk penggunaan dan pengelolaan sumber daya di atas dan di bawah tanah.

Karakteristik keberlanjutan sebagaimana digunakan dalam laporan ini mencakup pertimbangan efektivitas biaya; umur panjang; fungsionalitas; keamanan; estetika dan kualitas hidup; kemampuan untuk ditingkatkan dan beradaptasi; dan memaksimalkan manfaat lingkungan dan sosial, ketahanan, dan keandalan secara bersamaan, sambil meminimalkan potensi dampak negatif. Keberlanjutan jangka panjang jarang menjadi pertimbangan pada tahap awal pengembangan wilayah berpenduduk. Pola urbanisasi yang diamati di permukiman lembah sungai di negara-negara berkembang menjadi contoh bagaimana permukiman manusia dapat tumbuh berdasarkan kebutuhan jangka pendek dan individu.

Misalnya, permukiman kecil hipotetis di lembah sungai mungkin memiliki banyak ruang untuk tinggal dan bertani di dekat sungai yang biasanya merupakan sumber air utama. Seiring pertumbuhan desa, dasar lembah yang subur menjadi sangat padat, dan lereng bukit yang berdekatan yang biasanya memiliki tanah yang lebih buruk dan membutuhkan upaya pertanian yang lebih besar dibuat terasing untuk pertanian. Manfaat dari kedekatan dengan sungai hilang, dan kondisi pertanian yang lebih sulit pun tercipta. Pola pertumbuhan yang sangat berbeda mungkin telah berkembang jika keberlanjutan jangka panjang dipertimbangkan sejak awal.

Analisis keberlanjutan dapat melihat apakah akan lebih baik untuk membuat terasing di lereng bukit untuk perumahan, menyediakan perlindungan banjir yang lebih besar di wilayah pemukiman, dan menyediakan lembah sungai untuk pertanian. Yang melekat dalam analisis semacam itu adalah pertimbangan tentang kesulitan mana yang dapat diatasi dengan lebih mudah untuk mengatasi lahan yang tersedia apakah lebih mudah untuk menciptakan lahan pertanian produktif baru atau mengembangkan pendekatan penyediaan air dan transportasi untuk melayani pembangunan di lereng bukit? Dalam skenario nyata, keputusan semacam itu meluas ke konteks regional dan nasional, tetapi contoh tersebut menggambarkan bahwa sistem permukiman manusia tidak selalu berkembang demi kepentingan jangka panjang terbaiknya sendiri.

Bahaya Dan Risiko

Istilah bahaya dan risiko muncul di seluruh laporan ini. Ada banyak definisi untuk istilah-istilah ini, dan bahkan dalam literatur satu disiplin ilmu, istilah-istilah ini dapat digunakan secara tidak konsisten dan dapat dipertukarkan. Kotak 1.3 memberikan definisi

untuk istilah-istilah ini sebagaimana digunakan di seluruh laporan ini.

1.2 SEJARAH SINGKAT PENEMPATAN DI BAWAH TANAH

Untuk menetapkan perspektif penggunaan bawah tanah saat ini dan masa depan, ada baiknya untuk merangkum penggunaan bawah tanah selama berabad-abad di masa lalu. Warisan yang kaya berupa catatan fosil dan peralatan kuno, seni, dan reruntuhan bangunan menunjukkan bahwa manusia telah memiliki hubungan yang kompleks dan erat dengan bawah permukaan sejak berevolusi menjadi Homo sapiens modern. Manusia telah mencari tempat berlindung yang praktis di bawah tanah, tetapi bawah tanah tampaknya telah membangkitkan rasa supernatural dan keinginan untuk ekspresi estetika.

Sisa-sisa manusia, kerang, tulang hewan, dan artefak batu yang ditemukan di Gua Muara Sungai Klasies di Afrika Selatan memberikan bukti kuat bahwa manusia modern hidup di sana lebih dari 120.000 tahun yang lalu ketika iklimnya sama hangat atau lebih hangat dari sekarang. Pada tingkat paling dasar, bawah tanah menyediakan tempat berlindung dari batu dan gua sebagai tempat berlindung dari iklim yang keras dan musuh bebuyutan, cadangan air dan mineral, dan tempat penyimpanan makanan semua faktor kunci untuk bertahan hidup dulu dan sekarang.

Beberapa budaya telah menjadikan bawah tanah sebagai bagian integral dari kehidupan sehari-hari dan tempat tinggal utama mereka selama ribuan tahun. Masyarakat adat di Tiongkok, Turki, Spanyol, dan Tunisia telah terus-menerus menempati ruang buatan manusia di bawah tanah selama lebih dari 4.000 tahun; puluhan juta orang Tiongkok saat ini masih tinggal di tempat tinggal yang dikenal sebagai yao dong yang diukir di dinding vertikal dari loess (tanah berlumpur), yang banyak di antaranya dikatakan berasal dari tahun 5000 SM.

KOTAK 1.3

Definisi Terkait Bahaya dan Risiko

Komite mendefinisikan bahaya sebagai potensi untuk menimbulkan kerugian. Ini adalah ancaman terhadap manusia, infrastruktur, lingkungan, atau sistem sosial. Keberlanjutan bergantung pada penghitungan semua sumber risiko dan semua konsekuensi potensial, termasuk beberapa yang dampaknya sulit diukur. Ini dapat mencakup dampak sosial, lingkungan, dan dampak jangka panjang lainnya yang kurang nyata yang mungkin tidak dipertimbangkan oleh praktik teknik tradisional.

Komite mengadopsi definisi risiko yang diperluas dari Program Perlindungan Infrastruktur Nasional yang mencakup besarnya kerugian yang diharapkan (misalnya, kematian, cedera, kerusakan ekonomi, hilangnya kepercayaan publik, atau kemampuan pemerintah) karena serangan teroris, bencana alam, atau insiden lainnya, bersama dengan kemungkinan terjadinya peristiwa tersebut dan menyebabkan kerugian tersebut. Komite mendefinisikan kerentanan sebagai sejauh mana individu, infrastruktur, lembaga, atau sistem dapat dirugikan atau rusak jika terjadi peristiwa berbahaya.

KOTAK 1.4

Spiritualitas Bawah Tanah dan Ekspresi Artistik

Ada pengaruh abadi dari dunia bawah tanah pada imajinasi kolektif kita. Hubungan dunia bawah tanah yang luas dalam sastra dan kehidupan nyata dengan kematian dan akhirat, setan dan monster tersembunyi, ritual suci, kisah heroik, pemberontakan politik rahasia, kejahatan terorganisasi, musik dan teater anarkis, film noir, penjelajah gua yang suka berpetualang, dan pencarian abadi logam dan mineral berharga mencerminkan kekuatan dan gambaran paradoksnya.

Dunia bawah tanah tidak pernah menjadi wilayah yang netral dalam hal persepsi dan emosi manusia. Di luar kelangsungan hidup dasar, manusia telah tertarik ke dunia bawah tanah selama puluhan ribu tahun untuk ekspresi spiritual dan artistik, rekreasi, dan upacara keagamaan, terutama dalam rangka memperingati orang mati. Lukisan dan ukiran yang menggugah dari hewan dan pemandangan perburuan yang terletak jauh di dalam Gua Chauvet-Pont-D'Arc di Prancis selatan (lihat Gambar) telah dikarbonisasi hingga lebih dari 30.000 tahun yang lalu.

Jejak kuil bawah tanah kuno, ruang bawah tanah, dan situs upacara dapat ditemukan di seluruh dunia, termasuk Chavin de Huantar di Peru, Osireon di Mesir, dan Hypogeum di Malta. Demikian pula, mitologi dari banyak budaya mencakup dewa dan dewi yang secara khusus didedikasikan untuk dunia bawah. Versi Romawi, Pluto, melakukan tugas ganda sebagai dewa kekayaan karena ia juga memimpin semua logam mulia yang tersembunyi di bumi.



Gambar Reproduksi Fresko Yang Ditemukan Jauh Di Dalam Gua Chauvet-Pont-D'Arc Di Prancis Selatan, Digambar 30.000 Tahun Sebelum Masa Kini.



Gambar 1.1 Contoh Yao Dong Bertingkat, Sejenis Hunian Gua Yang Diukir Pada Dinding Vertikal Atau Hampir Vertikal Dari Loess (Tanah Berlumpur), Di Provinsi Shaanxi Di Barat Laut Tiongkok.

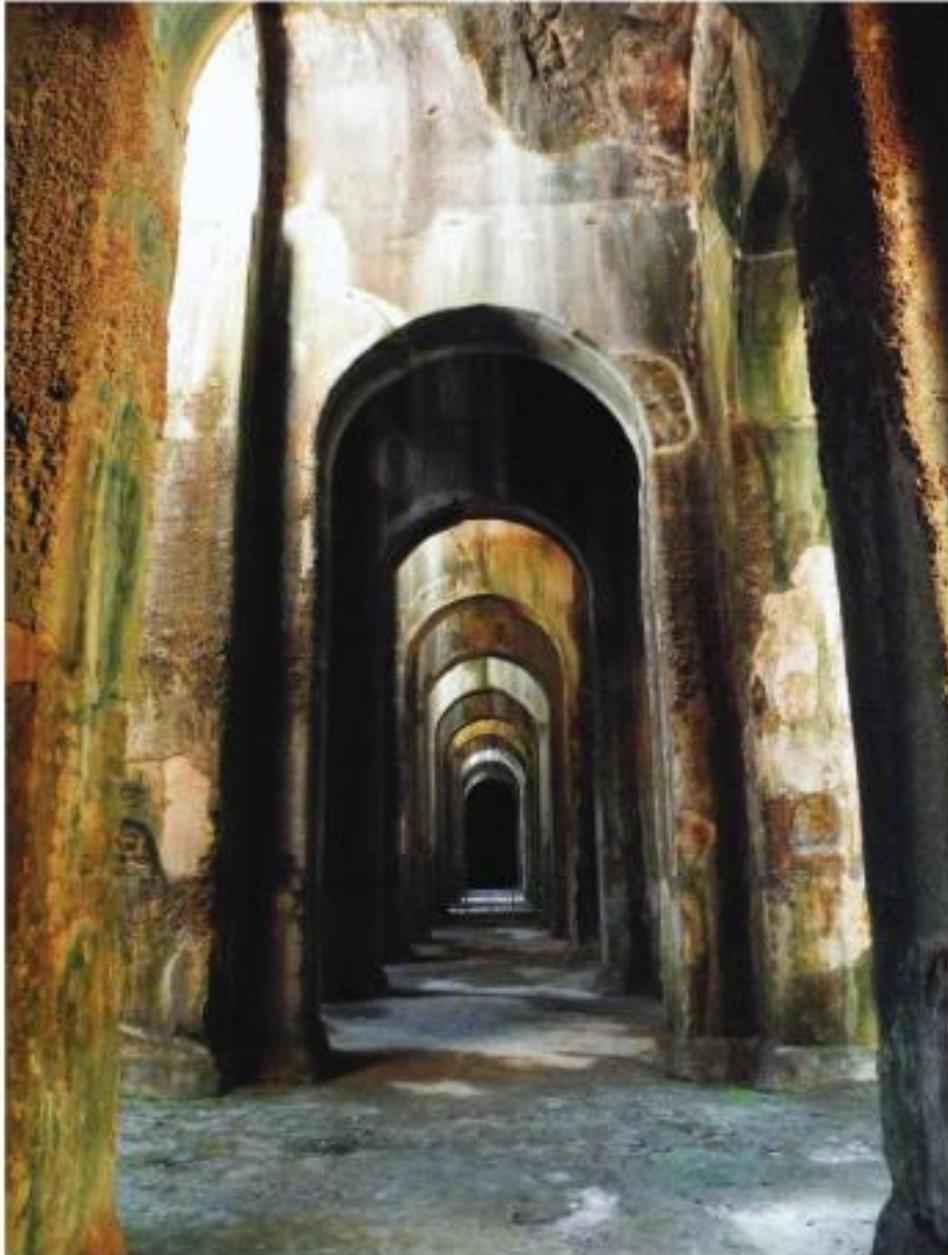
Sekitar 90 persen penduduk pedesaan di wilayah tersebut tinggal di yao dong. SUMBER: Liu, 2009. Lisensi CC BY-NC-SA 3.0. Insinyur di dunia kuno dengan terampil mengeksploitasi bawah tanah dengan teknologi dasar untuk mendorong pertumbuhan kota-kota baru dan perdagangan. Teknologi pasokan air pertama di Yerusalem adalah sistem air bawah tanah yang dibangun selama Zaman Perunggu Pertengahan (2000-1500 SM) untuk keperluan rumah tangga dan pertanian.

Terowongan Eupalinos sepanjang 1.036 meter, terowongan dalam pertama yang diketahui dalam sejarah, merupakan bagian dari sistem pasokan air Pulau Samos di Yunani dan dinamai menurut insinyur yang merancang dan membangunnya pada tahun 530 SM; terowongan ini beroperasi selama hampir 1.000 tahun hingga abad kelima Masehi. Tangki air Romawi yang spektakuler, Piscina Mirabilis (Gambar 1.2), dengan kapasitas volumetrik 12.000 meter kubik air, dipahat dari bukit tufa (batuan vulkanik lunak berpori) di wilayah Campania di Italia Selatan pada masa pemerintahan Kaisar Augustus Caesar antara tahun 33 dan 12 SM untuk menyediakan air tawar bagi pangkalan angkatan laut Romawi yang penting serta beberapa kota dan pelabuhan besar.

Sebagian besar penduduk dunia bergantung pada bawah tanah sebagai kebutuhan sehari-hari, kenyamanan, atau pilihan estetika. Sebagian kecil tinggal atau bekerja di bawah tanah penuh waktu; sebagian besar lainnya kadang-kadang menempati bawah tanah untuk menghadiri konser atau menonton film, berbelanja, beribadah, memarkir kendaraan, menyimpan barang, atau mencari kelegaan dari kondisi cuaca permukaan yang buruk. Sarana kontak langsung manusia yang sering terjadi dengan bawah tanah adalah perjalanan melalui terowongan mobil atau kereta api, kereta bawah tanah, atau jalur pejalan kaki.

Banyak fasilitas bawah tanah kontemporer yang menjadi ikon budaya terkenal di dunia, termasuk Metro Moskow, Carrousel du Louvre di Paris, Kuil Kaca di Kyoto, Jepang,

Philharmonic Hall di Cologne, Jerman, dan Cathedral Metropolitana di Brasilia, Brasil. Sebagian besar sejarah konstruksi bawah tanah sezaman dengan sejarah pembuatan terowongan. Untuk penjelasan umum tentang sejarah rekayasa bawah tanah, pembaca dapat merujuk pada karya Sandström, Széchy, Harding, dan Wood.



Gambar 1.2 Piscina Mirabilis Di Italia Selatan Adalah Tangki Berkapasitas 12.000 Meter Kubik Yang Dipahat Oleh Bangsa Romawi Kuno Antara Tahun 33 Dan 12 SM.



Gambar 1.3 Peron Metro Bawah Tanah Di Moskow. SUMBER: Boris Kogut. Dicetak Ulang Dengan Izin Boris Kogut ©2012.



Gambar 1.4 Piramida Terbalik Di Carrousel Du Louvre, Pusat Perbelanjaan Bawah Tanah Di Paris, Prancis, Yang Bersebelahan Dengan Museum Seni Rupa Louvre.

Fasilitas bawah tanah ini menyediakan tempat belanja, teater langsung, ruang auditorium, tempat parkir, dan akses bawah tanah ke museum yang terkenal. Piramida terbalik ini terbuat dari kaca dan memungkinkan cahaya alami masuk ke fasilitas bawah tanah.

Tabel 1.1 Contoh Manfaat dan Kerugian Potensial Ruang Bawah Tanah

Masalah Utama	Sub Kategori	Manfaat Potensial	Potensi Kelemahan
Masalah Fisik dan Kelembagaan	Lokasi	Kedekatan untuk manfaat fungsional Penggunaan ruang permukaan terbatas Menyediakan layanan utilitas dan transportasi	Geologi yang tidak menguntungkan di lokasi yang dipilih Geologi yang tidak pasti
	Isolasi	Iklm: termal, cuaca buruk, kebakaran, gempa bumi Perlindungan: kebisingan, getaran, ledakan, kejatuhan, kecelakaan industri Keamanan: akses terbatas, permukaan terlindungi Penahanan: bahan dan proses berbahaya	Iklm: termal, banjir, Komunikasi Masalah manusia: masalah psikologis, keselamatan kebakaran, keselamatan pribadi
	Pelestarian	Estetika: dampak visual, desain interior Lingkungan: lanskap alam, ekologi Degradasi material rendah	Estetika: dampak visual, layanan bangunan, desain yang terampil diperlukan Lingkungan: degradasi lokasi, drainase, polusi
	Tata Letak	Kebebasan topografi perencanaan 3 dimensi	Dukungan darat Batasan rentang Batasan akses Kemampuan beradaptasi Pembuangan limbah
	Kelembagaan		Akuisisi hak milik Izin Kode bangunan Ketidakpastian investasi
Biaya siklus hidup	Biaya Awal	Penghematan biaya lahan Penghematan konstruksi: tidak ada dukungan struktural, tidak tergantung cuaca, skala konstruksi Penjualan material atau mineral galian Penghematan dalam fitur desain khusus	Kondisi kerja terbatas Dukungan lapangan Akses terbatas Penggalian, pengangkutan, dan pembuangan tanah Ketidakpastian biaya: penundaan geologis, kontraktual, dan kelembagaan
	Biaya Operasional	Pemeliharaan Asuransi Penggunaan Energi	Akses peralatan/material Akses personel Ventilasi dan pencahayaan Pemeliharaan dan

			perbaikan
Masalah Sosial		Efisiensi penggunaan lahan Transportasi dan sirkulasi Efisiensi Konservasi energi Lingkungan/estetika Kesiapan menghadapi bencana Keamanan nasional Pengurangan gangguan konstruksi	Degradasi lingkungan Irreversibilitas Energi terwujud tinggi

1.3 POTENSI DAN TANTANGAN PENGEMBANGAN RUANG BAWAH TANAH

Pengembangan ruang bawah tanah menghadirkan banyak potensi manfaat, tetapi ada banyak tantangan yang harus diatasi dalam merancang, mengoperasikan, dan memelihara infrastruktur bawah tanah sehingga berkontribusi pada keberlanjutan perkotaan. Tabel 1.1 mencantumkan beberapa potensi manfaat dan kerugian pengembangan ruang bawah tanah. Pola pengembangan perkotaan yang ditetapkan sulit diubah. Ruang bawah tanah sering kali direkayasa untuk memenuhi kebutuhan satu proyek atau penggunaan.

Desain terkadang tidak mengakomodasi pemeliharaan jangka panjang, apalagi interaksi dengan struktur yang ada atau yang akan datang. Banyak praktik tata letak utilitas masa lalu dan saat ini, misalnya, tidak konsisten dengan tujuan keberlanjutan (lihat Kotak 1.5) dan tidak memperhitungkan dampak jangka panjang terhadap lingkungan, ekonomi, masyarakat, sumber daya alam, atau tata kelola. Seperti yang dijelaskan oleh Sterling et al. (2012, fasilitas bawah tanah dapat memengaruhi cara hunian manusia di suatu lahan memengaruhi lingkungan permukaan serta struktur ekonomi dan sosial suatu wilayah perkotaan dengan cara yang tidak mungkin dilakukan dengan menggunakan struktur permukaan yang sudah ada.

Jika direncanakan dan dirawat dengan baik, infrastruktur bawah tanah dapat berkontribusi terhadap keberlanjutan dengan melestarikan sumber daya permukaan alami (misalnya, tanah, air, keanekaragaman hayati), mengurangi polusi udara yang terkait dengan transportasi, menciptakan peluang untuk penggunaan energi dan produksi limbah yang lebih sedikit, dan menciptakan struktur yang lebih tangguh terhadap banyak bencana besar. Contoh-contoh di seluruh dunia menunjukkan bagaimana fasilitas bawah tanah dapat berdampak rendah terhadap lingkungan.

Terowongan Groene Hart yang terletak di bawah tanah di antara empat kota terbesar di Belanda, misalnya, telah menyediakan koneksi cepat dari Amsterdam ke pusat-pusat ekonomi utama di Eropa tanpa merusak ruang hijau besar Groene Hart. Keputusan untuk memindahkan fitur-fitur masyarakat ke bawah tanah merupakan langkah besar dalam pengembangan permukiman manusia. Infrastruktur sering kali ditempatkan di bawah tanah jika tidak dapat dipasang atau tidak diinginkan di atau di atas permukaan.

Keputusan untuk membangun bawah tanah dapat dibuat, misalnya, ketika

mempertimbangkan sistem transit baru di kota bersejarah dengan lingkungan permukaan yang unik dan penting secara budaya, atau di mana tata letak jalan atau tingkat lalu lintas yang ada tidak memungkinkan permukaan baru atau alinyemen yang ditinggikan. Namun, lokasi yang diinginkan dapat menghadirkan tantangan struktur mungkin sudah ada di ruang bawah tanah, atau kondisi geologi mungkin tidak ideal. Kebutuhan perkotaan sering kali mengalahkan geologi yang menguntungkan.

Meskipun ada volume besar di bawah permukaan Bumi, mungkin hanya 30 meter pertama di bawah kota yang digunakan untuk mendukung sebagian besar fungsi perkotaan. Dan dari 30 meter pertama, sebagian besar utilitas bawah permukaan dan layanan transportasi ditempatkan di bawah hak jalan umum (misalnya, jalan dan trotoar). Selain itu, setelah terganggu, bawah tanah tidak dapat dikembalikan ke kondisi sebelumnya. Hal ini terutama berlaku untuk ruang seperti terowongan bor atau gua yang dibuat di dalam tanah atau batu; keberadaan mereka secara signifikan memengaruhi opsi dan biaya masa depan untuk infrastruktur bawah tanah baru di sekitarnya.

Kendala struktural dan geoteknik dapat membatasi jenis fasilitas yang ditempatkan di bawah tanah di lokasi tertentu atau meningkatkan biaya konstruksi atau operasional relatif terhadap biaya fasilitas permukaan. Pengendalian air dan kelembapan di ruang bawah tanah merupakan tantangan infrastruktur bawah tanah perlu dilindungi dari aliran masuk atau rembesan cairan yang tidak diinginkan, dan sumber daya air tanah yang rentan perlu dilindungi dari kontaminasi dan penipisan.

Infrastruktur bawah tanah yang ada atau puing-puing konstruksi lama membatasi perencanaan dan konstruksi bawah tanah. Namun, menempatkan infrastruktur di bawah tanah memberikan dimensi pengembangan tambahan: sistem transportasi yang kompleks dapat ditempatkan di bawah kota, dan terowongan dapat ditempatkan di bawah pegunungan dan sungai.

KOTAK 1.5

Keberlanjutan Desain Utilitas Bawah Tanah

Keberlanjutan jangka panjang desain infrastruktur, seperti untuk utilitas perkotaan yang penting, jarang dipertimbangkan di masa lalu dan baru terkadang dipertimbangkan saat ini. Gambar 1.1 menunjukkan apa yang mungkin merupakan prestasi desain teknik pada tahun 1917. "Spaghetti" pipa dan saluran bawah tanah menyediakan berbagai layanan; namun, perbaikan atau penggantian elemen apa pun dari infrastruktur ini kemungkinan besar akan mengakibatkan gangguan pada lalu lintas lokal dan layanan infrastruktur, dan mungkin kerusakan pada elemen infrastruktur lainnya.

Koridor utilitas yang disebut utilidor, di sisi lain, adalah saluran tertutup yang digunakan oleh beberapa area perkotaan yang dirancang untuk membawa beberapa jalur utilitas seperti listrik, air dan saluran pembuangan, dan komunikasi. Perbaikan jalur utilitas individual dapat dilakukan dengan gangguan minimal pada struktur permukaan atau infrastruktur lainnya. Desain dapat mengakomodasi beberapa tingkat utilidor. Pembahasan lebih lanjut tentang utilidor, manfaatnya, dan hambatan penggunaannya disediakan dalam

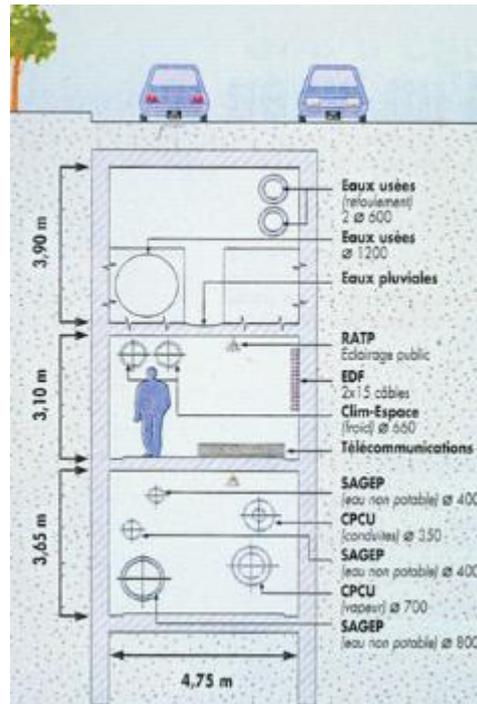
Bab 3.



Gambar 1.5 Penempatan Infrastruktur Utilitas Bawah Tanah Di Wall Street (Sekitar Tahun 1917). Sumber: Consolidated Edison Company Of New York, Inc. Dicitak Ulang Dengan Izin Dari Con Edison Company Of New York.



GAMBAR 1.6 Contoh Utilidor Di Amsterdam Yang Dapat Menyalurkan Beberapa Saluran Utilitas Seperti Listrik, Air Dan Saluran Pembuangan, Serta Komunikasi. Sumber: Courtesy H. Admiraal.



Gambar 1.7 Skema Yang Menunjukkan Desain Utilidor Di Paris, Prancis. Beberapa Tingkat Utilidor Dapat Diakomodasi. Sumber: SEMAPA. Dicitak Ulang Dengan Izin Dari © SEMAPA.

1.4 FAKTOR MANUSIA YANG MEMPENGARUHI PENGEMBANGAN BAWAH TANAH

Serangkaian peluang dan tantangan lainnya adalah yang terkait dengan orang-orang yang menggunakan atau bekerja di ruang bawah tanah. Ini termasuk kendala kelembagaan dan administratif yang terkait dengan perencanaan dan perizinan, keamanan infrastruktur bawah tanah, keselamatan, dan penerimaan psikologis terhadap struktur bawah tanah dan penggunaannya.

Laporan ini tidak membahas semua masalah ini secara terperinci, tetapi Bab 4 memberikan lebih banyak pembahasan tentang masalah-masalah ini. Tidak memiliki dasar pengalaman untuk pengambilan keputusan yang terkait dengan infrastruktur bawah tanah membuat masalah-masalah ini lebih menantang. Perizinan bawah tanah, misalnya, kurang rutin dibandingkan dengan fasilitas permukaan dan karenanya bisa lebih rumit.

Kode keselamatan untuk fasilitas bawah tanah yang ditempati, termasuk kode yang terkait dengan sistem kebakaran, jalan keluar, dan ventilasi, mungkin tidak ada atau mungkin tidak memadai (lihat Bab 4 untuk pembahasan tentang kode yang ada untuk jenis fasilitas tertentu). Infrastruktur bawah tanah bisa lebih aman daripada infrastruktur permukaan karena akses terkendali dan isolasi yang ditawarkan bawah tanah.

Demikian pula, bawah tanah dapat digunakan untuk memisahkan atau mengisolasi bahan-bahan berbahaya seperti limbah mentah atau kabel listrik bertegangan tinggi dari orang-orang dan infrastruktur di permukaan. Di sisi lain, pemisahan yang sama berarti bahwa perlindungan terhadap bahaya fisik seperti banjir, kebakaran internal, dan ledakan menjadi lebih menantang, terutama karena infrastruktur bawah tanah yang beragam menjadi lebih terintegrasi dengan infrastruktur bawah tanah dan permukaan lainnya.

Akses ke fasilitas atau sumber daya bawah tanah mungkin sulit atau tidak mungkin bagi individu yang cacat fisik tanpa alat angkut mekanis. Keselamatan bagi orang-orang dengan kebutuhan khusus merupakan tantangan besar, misalnya, jika terjadi pemadaman listrik. Anggota masyarakat lainnya mungkin tidak nyaman dengan gagasan tentang bawah tanah, atau mereka mungkin merasa kurangnya cahaya alami di bawah tanah tidak menyenangkan atau membingungkan secara spasial.

Dan bagi sebagian orang, ada hambatan fisiologis atau psikologis untuk bekerja, tinggal, mencari jalan dan bepergian, atau bermain di bawah tanah termasuk klaustrofobia atau takut terisolasi. Banyak orang yang merasa tidak nyaman dapat belajar menggunakan dan menghargai bawah tanah dengan kampanye pendidikan publik yang tepat. Ketidaknyamanan dapat ditangani secara efektif dengan perencanaan yang terampil, desain yang inovatif, tata letak, penyelesaian, dan pencahayaan.

Kisah peringatan tentang komunitas bawah tanah yang diciptakan oleh dorongan untuk efisiensi atau respons terhadap bencana dapat ditemukan dalam sejumlah karya sastra. Kekhawatiran semacam itu perlu dipertimbangkan baik dalam hal umum tentang seperti apa lingkungan hidup dan kerja seharusnya maupun dalam detail desain fasilitas. Keseimbangan antara keinginan untuk hidup di udara terbuka dan kenyamanan atau perlindungan yang ditawarkan oleh fasilitas bawah tanah bukanlah titik yang pasti. Meskipun sebagian kecil penduduk mungkin secara psikologis tidak dapat menoleransi fasilitas bawah tanah, yang lain memilih penjelajahan gua sebagai hobi.

Sebagian besar masyarakat, mungkin, dipengaruhi oleh evaluasi sadar atau tidak sadar tentang manfaat dan kerugian yang berkaitan dengan keadaan tertentu, misalnya, perjalanan cepat dan nyaman dengan metro bawah tanah versus perjalanan lambat dengan mobil atau bus di jalan, atau tempat berlindung selama serangan perang. Desain yang baik sebagai respons terhadap pemahaman tentang apa yang membuat ruang bawah tanah menarik, atraktif, aman, hemat biaya, dan bagian dari pembangunan berkelanjutan dalam keterbatasan fisik yang ada dapat menggeser titik keseimbangan mengenai persepsi penggunaan bawah tanah.

Organisasi Laporan

Kehidupan perkotaan sehari-hari umumnya berjalan tanpa disadari oleh penduduknya tentang pengoperasian infrastruktur bawah tanah, dan mungkin keberhasilan infrastruktur dapat diukur, sebagian, dari seberapa besar hal itu dianggap biasa saja. Insinyur merancang dan membangun agar berfungsi sambil meminimalkan risiko. Namun, mustahil untuk sepenuhnya menghilangkan risiko. Kegagalan infrastruktur akan terjadi sebagai akibat dari usia, kesalahan, atau kejadian ekstrem. Kegagalan seperti itulah yang menyebabkan perlunya laporan seperti ini, yang menjelaskan berbagai jenis kegagalan infrastruktur untuk menggambarkan tantangan yang harus diatasi.

Keberhasilan infrastruktur bawah tanah juga disorot untuk menunjukkan pendekatan terhadap rekayasa bawah tanah yang dapat berkontribusi pada pembangunan perkotaan yang berkelanjutan. Negara-negara seperti Finlandia, Swedia, Norwegia, Belanda, Jepang, Tiongkok, dan Singapura telah mengambil tindakan tingkat nasional yang mempromosikan penggunaan

ruang bawah tanah sebagai isu kebijakan. Negara-negara seperti Prancis, Inggris, Amerika Serikat, dan Jerman memiliki tingkat aktivitas bawah tanah yang signifikan, tetapi penggunaan bawah tanah kurang mendapat perhatian nasional.

Dalam laporan ini, komite akan mengemukakan bahwa pendekatan multilevel dan multidisiplin terhadap perencanaan perkotaan yang menggabungkan rekayasa bawah tanah sebagai bagian dari pendekatan keseluruhan dapat memberikan kerangka kerja yang lebih baik untuk pembangunan perkotaan yang berkelanjutan. Pernyataan tugas seperti yang muncul dalam Kotak 1.1 panjang dan luas, tetapi setelah mempelajari tugas tersebut secara mendalam, dan setelah beberapa kali berdiskusi dengan sponsor komite, komite memahami bahwa inti tugasnya konsisten dengan judul yang diberikan komite: Komite Rekayasa Bawah Tanah untuk Pembangunan Berkelanjutan.

Komite membahas tugasnya dan menyiapkan laporan ini dengan mempertimbangkan kontribusi ruang bawah tanah yang direkayasa terhadap pembangunan berkelanjutan serta apa yang dibutuhkan dalam lingkungan sosial, pendidikan, peraturan, edukasi, dan penelitian untuk memungkinkan kontribusi tersebut diberikan. Laporan ini disusun dalam tujuh bab. Bab 2 menelusuri evolusi penggunaan ruang bawah tanah perkotaan dan faktor pendorong yang memengaruhi pembangunan yang tepat. Dalam Bab 3, komite membahas peran rekayasa bawah tanah dalam keberlanjutan dan beberapa tantangan pembangunan bawah tanah yang berkelanjutan.

Bab 4 mengkaji hubungan manusia-sistem teknis dan bahaya yang terkait dengan penggunaan ruang bawah tanah oleh manusia. Penilaian biaya dan manfaat infrastruktur bawah tanah dan keberlanjutan siklus hidup dibahas dalam Bab 5. Bab 6 membahas teknologi yang memungkinkan rekayasa bawah tanah dan membahas jenis inovasi yang dapat meningkatkan kontribusi rekayasa bawah tanah terhadap pembangunan berkelanjutan. Akhirnya, komite menyajikan kesimpulan menyeluruhnya dalam Bab 7 dalam konteks kerangka kerja untuk meningkatkan kapasitas kelembagaan, pendidikan, penelitian, dan tenaga kerja untuk rekayasa bawah tanah demi keberlanjutan.

BAB 2

EVOLUSI DAN FAKTOR PEMBANGUNAN BAWAH TANAH

Pemanfaatan ruang bawah tanah telah berkembang seiring dengan berkembangnya desa dan kota menjadi kota. Air, energi, limbah, dan sampah yang dulunya diangkut masuk dan keluar kota melalui permukaan jalan kini diangkut melalui saluran bawah tanah. Penduduk kota sering kali tidak menyadari hubungan antara layanan utilitas penting dan struktur di gedung tempat mereka tinggal dan bekerja dengan infrastruktur dan layanan pendukung bawah tanah.

Akibatnya, masyarakat kurang menyadari betapa pentingnya sumber daya bawah tanah bagi fungsi yang baik dan standar hidup yang tinggi di wilayah perkotaan AS. Tanah bawah tanah selalu menyediakan dukungan fondasi fisik untuk bangunan dan struktur permukaan lainnya. Fondasi bangunan awal mungkin berupa rangkaian batu sederhana yang dipilih dan ditempatkan dengan tangan ke dalam galian dangkal.

Saat ini, fondasi untuk bangunan besar dan gedung pencakar langit mungkin mencakup tiang pancang yang dalam, saluran untuk pemanasan dan pendinginan panas bumi, dan beberapa tingkat ruang bawah tanah yang dapat menyediakan, misalnya, pusat perbelanjaan, parkir bawah tanah, pabrik utilitas, dan penyimpanan berkualitas tinggi. Pondasi yang dirancang dengan baik memperhitungkan kondisi tanah, batu, air tanah, dan kondisi khusus lokasi lainnya, serta membantu bangunan menahan dampak seismik dan angin ekstrem yang besar.

Pengalaman yang diperoleh dengan susah payah, keterampilan yang terampil, dan pengetahuan dari berbagai disiplin ilmu dan teknik berkontribusi pada pengembangan proses dan prosedur yang digunakan saat ini untuk menentukan lokasi, merancang, dan membangun bangunan besar. Meskipun kota tumbuh ke atas dan ke luar, pertumbuhannya bergantung pada fondasi bangunan bawah tanah dan infrastruktur utilitas. Di sebagian besar kotamadya, perencanaan dan zonasi ruang permukaan dan udara dilakukan melalui pemerintah daerah.

Sayangnya, ruang bawah tanah tidak direncanakan dan dizonasi dengan cara yang sama, dan nilai eksplisit untuk ruang bawah tanah tidak diakui secara umum. Perencanaan formal dan pengendalian ruang bawah tanah oleh kotamadya merupakan tanggung jawab yang harus diakui dan ditindaklanjuti di Amerika Serikat jika pembangunan perkotaan yang berkelanjutan ingin diwujudkan. Di beberapa negara seperti Tiongkok, perencanaan ruang bawah tanah menjadi fokus khusus untuk menanggapi pertumbuhan perkotaan, dan rencana semacam itu telah dikembangkan oleh hampir setiap kota besar Tiongkok selama beberapa tahun terakhir.

Bab ini menelusuri evolusi ruang bawah tanah perkotaan dan menggambarkan bagaimana pengembangan ruang bawah tanah yang progresif dan bertahap menimbulkan lebih banyak batasan pada pengembangan di masa mendatang dibandingkan dengan kasus pengembangan fasilitas permukaan dan infrastruktur.

2.1 PERLUASAN RUANG BAWAH TANAH PADA ABAD YANG LALU

Sistem pembuangan limbah ditempatkan di bawah tanah untuk memanfaatkan gravitasi guna mengalirkan limbah dari bangunan. Sistem distribusi air sering kali ditempatkan di bawah tanah untuk melindunginya dari pembekuan dan kerusakan lainnya. Sistem telekomunikasi dan pasokan listrik dapat ditempatkan di bawah tanah sesuai dengan preseden setempat, dengan mempertimbangkan nilai yang diberikan untuk menjaga infrastruktur yang aman dan tangguh, untuk alasan yang terkait dengan estetika permukaan, atau untuk meminimalkan dampak pemasangan pada nilai properti.

Kekhawatiran mengenai perencanaan ruang bawah tanah yang tidak terkoordinasi bukanlah hal baru. Pada tahun 1914, George Webster, kepala insinyur dan surveyor Philadelphia, menyedihkan bahwa hanya sedikit kota besar yang merencanakan ruang di bawah jalan, atau memetakan utilitas dan layanan yang ditempatkan di sana. Ia mencatat pentingnya memahami apa yang dibutuhkan bawah tanah untuk mengakomodasi dan membahas kebutuhan untuk merencanakan

- Pipa air, air panas, uap, pembuangan limbah, pendingin, dan gas; saluran listrik; tabung pneumatik; dan layanan masa depan yang belum ditentukan;
- Galeri untuk pipa dan saluran;
- Ruang bawah tanah di bawah trotoar di jalan umum sebagai bagian dari konstruksi bangunan baru;
- Kereta bawah tanah untuk sistem angkutan dan penumpang;
- Terowongan di bawah layanan bawah tanah untuk mengakomodasi pergerakan orang di antara tempat usaha tanpa perlu menyeberang jalan atau masuk ke dalam cuaca; dan
- Layanan pergerakan barang bawah tanah untuk menghubungkan terminal barang dengan bisnis komersial dan tempat industri.

Webster menganjurkan agar ruang bawah tanah direncanakan untuk memfasilitasi pemasangan di masa mendatang dan meminimalkan biaya dan penundaan yang disebabkan oleh pemasangan di masa mendatang. Ia menganjurkan agar badan resmi berwenang mengatur penggunaan bawah tanah, dan ia meramalkan bahwa tanpa kontrol tersebut, pemasangan bawah tanah baru yang besar akan membutuhkan biaya dan tantangan yang lebih besar ketika para insinyur dipaksa bekerja di sekitar infrastruktur yang ada.

Seiring dengan kemajuan kita menuju abad ke-21, bawah tanah digunakan untuk semua tujuan yang disebutkan di atas, dan banyak masalah yang diprediksi satu abad lalu telah terwujud. Tabel 2.1 menggambarkan perkiraan panjang layanan utilitas bawah tanah utama di Amerika Serikat, dengan total sekitar 10,8 juta mil (17,4 juta kilometer). Infrastruktur bawah tanah telah diperluas untuk mengakomodasi populasi yang terus bertambah dan layanan infrastruktur baru (dan berbagai pelayanannya) tetapi masih dipasang di bawah hak jalan umum yang sama. Karena lalu lintas menjadi lebih padat dengan pertumbuhan populasi, pekerjaan utilitas bawah tanah yang harus diakses dari permukaan mengakibatkan peningkatan masalah lalu lintas dan biaya.

Telah dilaporkan bahwa sekitar 4 juta lubang digali di jalan dan trotoar Inggris Raya oleh utilitas dengan biaya sekitar Rp. 225 Triliun per tahun dan biaya tidak langsung akibatnya sekitar Rp. 45 Triliun per tahun. Biaya analog di Amerika Serikat bisa jadi jauh lebih besar. Sistem air limbah juga telah diperluas dan bawah tanah sekarang menampung sistem transportasi air limbah yang besar (misalnya, sistem pembuangan air limbah sanitasi dan air hujan; sistem pembuangan air limbah gabungan) dan sistem pencegat luapan air limbah gabungan (CSO) dan sistem terowongan penyimpanan dengan bukaan berdiameter besar.

Sebagian besar segmen sistem air limbah dan drainase dirancang untuk mengalir secara gravitasi melalui pipa dan terowongan dan karenanya bergantung pada penyesuaian vertikal yang dikontrol secara ketat. Sistem ini umumnya ditempatkan di bawah campuran infrastruktur utilitas dangkal yang ada, dan dapat menghalangi penggunaan ruang bawah tanah tersebut untuk layanan masa depan termasuk kereta bawah tanah angkutan cepat dan kereta api kecepatan tinggi (HSR).

Melindungi peluang akses untuk layanan tersebut mendukung perencanaan dan perizinan dengan tujuan melestarikan koridor bawah tanah untuk infrastruktur perkotaan bernilai tinggi yang utama. Pandangan ke depan sangat penting untuk keberlanjutan karena infrastruktur yang kompleks seperti itu sering kali tidak diperlukan hingga jauh di kemudian hari dalam evolusi kota.

2.2 REKAYASA BAWAH TANAH UNTUK KEBERLANJUTAN

Terowongan, komponen dari banyak proyek konstruksi bawah tanah, berbagi banyak properti dengan jenis konstruksi lain yang dilakukan di masyarakat perkotaan. Namun, tantangan tertentu dapat menjadi lebih besar dalam lingkungan bawah tanah. Misalnya

- Terdapat ketergantungan yang lebih besar pada tanah dan pemahaman sifat-sifat tanah dalam hal risiko terhadap proyek konstruksi itu sendiri, infrastruktur lain, kesehatan dan keselamatan pekerja, lingkungan, dan kepentingan ekonomi;
- Terdapat saling ketergantungan yang lebih tinggi antara perencanaan dan desain proyek yang muncul dari kebutuhan untuk menstabilkan tanah dan menyingkirkan air tanah atau kontaminan;
- Terdapat kemungkinan lebih sedikit metode konstruksi yang tersedia mengingat kendala geologis dan antropogenik;
- Logistik dapat menjadi lebih menantang karena akses terbatas dan penanganan keselamatan pekerja (pekerja mungkin berada jauh dari titik akses); dan
- Keahlian dan waktu yang terlibat sejak dimulainya dan selesainya proyek dapat menjadi besar dan dapat mencakup yang terkait dengan keterlibatan masyarakat terhadap proyek dan masalah kepatuhan pemerintah.

Tabel 2.1 Perkiraan Panjang Layanan Utilitas Bawah Tanah Utama di Amerika Serikat

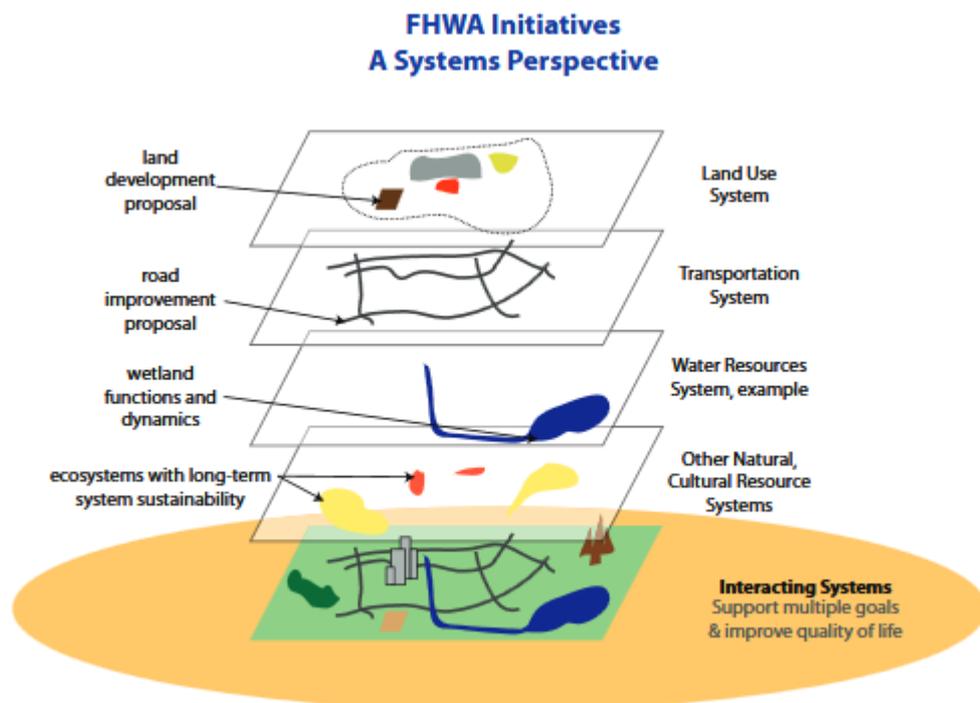
Transmisi (mil)	Distribusi/Pengumpulan (mil)	Layanan (mil)	Total (mil)
Gas Pengumpulan 41.000 (DOE, 2006) Antarnegara 250.000 Intranegara 75.000	1.212.688 (PHMSA, 2005)	780.392 (PHMSA, 2005)	2.359.080
Cairan Berbahaya. 160.868 (PHMSA, 2003)			160.868
Minyak Pengumpulan 35.000 (Jalur pipa 101, 2001) Minyak mentah 65.942 (BTS, 2004) Produk 76.258			177.200
Air 660.000 (Bronger, 2002)	995.644 (EPA, 2007)	854.364 (EPA 2007)b	2.510.008
Saluran pembuangan Umum Swasta	724.000 (EPA, 2006) 500.000		1.224.000
Listrik 167.643 (NERC, 2006)	600.000 tahun lalu	400.000 hari	1.167.643
Telekomunikasi Kabel Bawah Tanah Logam Serat Kabel Terpendam Logam Serat Sistem Saluran Parit	382.472 (FCC, 2006) 217.266 2.178.320 217.322 199.541		3.194.921
Jumlah keseluruhan			10.793.719 tahun

Jumlah total layanan gas di Amerika Serikat, menurut PHMSA, adalah 63.523.945. Angka ini kemudian diubah menjadi mil dengan mengambil panjang rata-rata satu saluran layanan menjadi 65 kaki. Jumlah total layanan air di Amerika Serikat, menurut EPA, adalah sekitar 69.545.307. Angka ini kemudian diubah menjadi mil dengan mengambil panjang rata-rata satu saluran layanan menjadi 65 kaki. Sebelas utilitas AS melaporkan total 296.093 mil. Namun, panjang distribusi listrik bawah tanah diperkirakan jauh lebih pendek daripada gas atau air, yang sepenuhnya berada di bawah tanah.

Angka 600.000 mil diasumsikan sebagai total AS. Angka ini adalah perkiraan kasar berdasarkan layanan listrik bawah tanah yang kurang dari setengah panjang layanan air bawah

tanah. Sumber: Diadaptasi dari Sterling et al., 2009. Proyek bawah tanah memerlukan perspektif sistem, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.1, yang menekankan interaksi antara sistem yang saling terkait termasuk yang terkait dengan penggunaan lahan, transportasi antarmoda, sistem lingkungan, budaya, dan sosial-ekonomi. Jenis pendekatan ini menyoroti kombinasi unik dari keterampilan, pengetahuan, manajemen, dan kepemimpinan yang diperlukan untuk perencanaan, konstruksi, pengoperasian, dan pemeliharaan infrastruktur yang sukses untuk lingkungan perkotaan yang berkelanjutan.

Gambar 2.1 merupakan awal yang baik untuk jenis pemikiran yang diperlukan, tetapi keberlanjutan sistem rekayasa dalam sistem perkotaan perlu dirancang untuk kompleksitas dan kemampuan beradaptasi yang jauh lebih besar, seperti yang dilakukan untuk rekayasa Sistem Adaptif Kompleks (CASoS). Rekayasa CASoS mempertimbangkan saling ketergantungan dan kerentanan sistem untuk mengurangi risiko dan memaksimalkan keamanan dan kesehatan, seperti yang dijelaskan dalam Kotak 2.1.



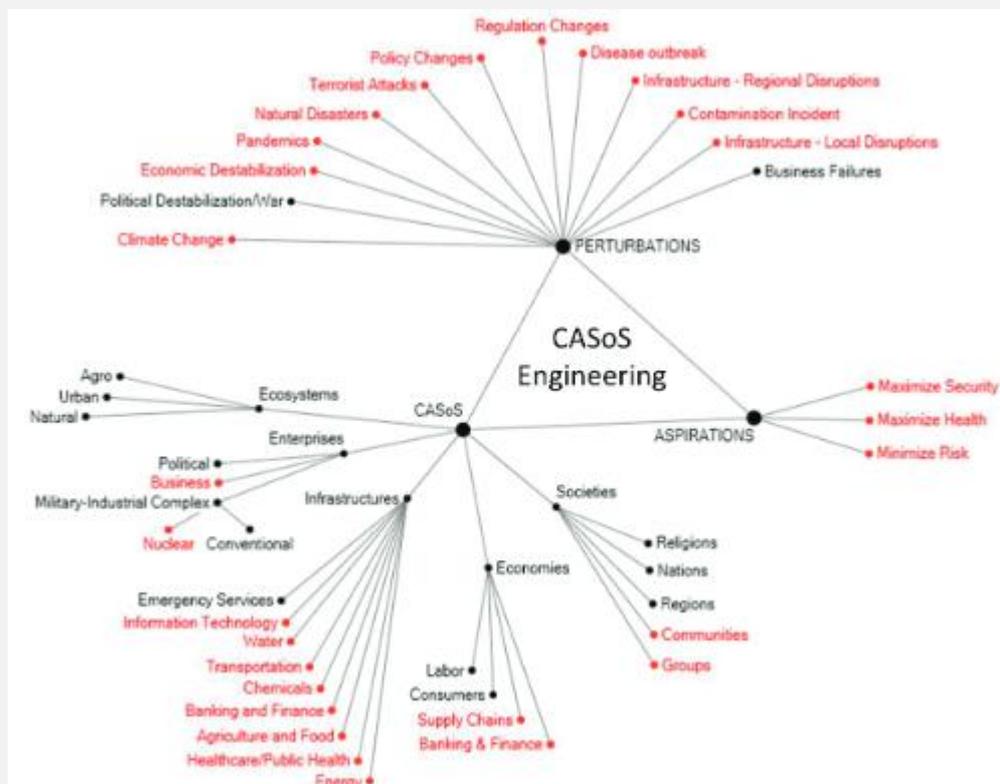
Gambar 2.1 Perspektif Sistem Terhadap Fondasi Sistem Yang Saling Berinteraksi (Ditunjukkan Di Bagian Bawah/Dasar Grafik Ini) Yang Mencakup Penggunaan Lahan, Transportasi Antarmoda, Sistem Alam, Budaya, Dan Sosial-Ekonomi Yang Memberikan Kualitas Hidup Dan Berbagai Manfaat Untuk Jangka Panjang.

Dengan pendekatan sistem sistem seperti itu, tim yang merancang, membangun, dan mengelola infrastruktur bawah tanah harus bersifat interdisipliner, dan keahlian khusus akan diperlukan untuk menanggapi tantangan tertentu (lihat Lampiran C). Namun, anggota tim harus mampu memahami bagaimana setiap komponen proyek menjadi bagian dari suatu sistem sistem.

KOTAK 2.1**Sistem Adaptif Kompleks dalam Rekayasa Sistem**

Sebuah inisiatif di Laboratorium Nasional Sandia adalah pengembangan kerangka rekayasa untuk memecahkan masalah kompleks besar yang menggabungkan sistem fisik, sosial, dan teknis yang disebut Sistem Adaptif Kompleks dalam Rekayasa Sistem (CASoS). CASoS secara luas mencakup infrastruktur fisik, pemerintahan, masyarakat, dan ekosistem. Mereka adalah entitas kompleks, nyata atau abstrak yang terdiri dari sistem, dan berubah seiring waktu karena interaksi dalam sistem atau lingkungan.

Insinyur CASoS menggunakan serangkaian proses iteratif yang ditentukan untuk memecahkan masalah, memanfaatkan peluang, mencapai tujuan, atau menjawab pertanyaan dengan mempertimbangkan pilihan, biaya dan manfaat yang diharapkan dan tidak diharapkan, ketidakpastian, dan bagaimana sistem dapat diubah untuk menghasilkan hasil yang lebih baik.



Gambar Diagram sederhana yang dikembangkan di Sandia National Laboratories tentang ruang aplikasi rekayasa CASoS sebagai jaringan yang disederhanakan. Diagram tersebut menggambarkan bagaimana rekayasa CASoS mempertimbangkan hubungan CASoS, tujuan rekayasa (disebut aspirasi), dan elemen yang dapat memengaruhi sistem (gangguan). Item berwarna hitam mewakili aplikasi yang ada untuk CASoS tertentu dan item berwarna merah mewakili aplikasi yang sedang dikembangkan. Sumber: Glass et al., 2011.

Membawa perubahan dalam CASoS dapat dicapai dengan menggunakan model konseptual, pengukuran sistem, desain observasional dan eksperimental, pengenalan pola, investigasi kebijakan, proses rekayasa, definisi masalah waktu nyata (terutama di saat krisis),

dan komunikasi, serta membangun kapasitas intelektual yang diperlukan untuk melakukan rekayasa CASoS yang berfokus pada aplikasi. Kerangka kerja CASoS mencakup perancangan model komputasional untuk konteks, penerapan model dalam lingkungan aktual, dan peninjauan tindakan pada setiap langkah untuk koreksi, adaptasi, dan "kinerja yang sesuai" pada setiap tahap tindakan. Gambar tersebut adalah diagram sederhana dari elemen-elemen yang perlu dipertimbangkan dalam rekayasa CASoS.

2.3 PENGGERAK KEBIJAKAN DAN EKONOMI DALAM KEPUTUSAN

Jaringan listrik sudah dikubur di New York pada akhir tahun 1800-an, tetapi jaringan listrik di udara masih umum di kota-kota di seluruh Amerika Serikat. Faktor apa yang mendorong penerimaan penempatan infrastruktur di bawah tanah? Pada abad terakhir, penerimaan pemasangan utilitas bawah tanah telah berkembang berdasarkan kombinasi masalah lingkungan, biaya, dan kinerja. Kinerja jangka panjang fasilitas bawah tanah belum diukur atau ditunjukkan, sehingga menimbulkan sumber ketidakpastian dan risiko yang tidak diketahui bagi para pengambil keputusan.

Estimasi biaya tiga-dasar analisis biaya dan manfaat sosial, lingkungan, dan ekonomi untuk fasilitas bawah tanah dapat memberikan justifikasi yang meyakinkan untuk pemasangan di bawah tanah, tetapi dampak langsung dan tidak langsung perlu dipertimbangkan untuk desain rekayasa siklus hidup yang sebenarnya. Biaya yang lebih tinggi untuk pemasangan utilitas bawah tanah dapat membuat bawah tanah kurang menarik bagi sektor swasta, dan pemangku kepentingan pemerintah sering kali menunjukkan penerimaan yang beragam terhadap pemasangan bawah tanah, terkadang tergantung pada hubungan mereka dengan penyedia utilitas.

Pandangan jangka panjang para pengambil keputusan masyarakat berperan dalam penerimaan utilitas bawah tanah. Keputusan untuk mengubur utilitas sebaiknya dibuat berdasarkan biaya dan pengalaman riil, bukan berdasarkan apakah para pemangku kepentingan "menyukai" fasilitas bawah tanah. Kemajuan teknologi dalam proses pemasangan bawah tanah, pemantauan sistem, dan dalam pengembangan utilitas yang hemat biaya (koridor utilitas bawah tanah yang menampung berbagai utilitas seperti air, saluran pembuangan, listrik, dan telekomunikasi) menciptakan keuntungan dan insentif untuk menempatkan utilitas di bawah tanah.

Pengambilan keputusan yang terkait dengan penempatan sistem transportasi utama sering kali terjadi di antara orang-orang dengan kepentingan yang saling bertentangan. Pandangan politik, preferensi gaya hidup masyarakat, dan kepentingan komersial dalam kontrak desain dan konstruksi memengaruhi pengambilan keputusan di banyak masyarakat di Amerika Serikat. Gangguan yang terkait dengan konstruksi dan operasi serta dampak proyek terhadap pajak dapat menghalangi penerimaan masyarakat terhadap pemasangan bawah tanah.

Masyarakat mungkin juga khawatir tentang keamanan, karena khawatir sistem transportasi massal dapat memungkinkan akses ke suatu lingkungan bagi sejumlah besar

orang yang tidak dikenal. Pejabat pemerintah mungkin khawatir dengan "keberhasilan" suatu proyek bahwa kelebihan biaya besar dan masalah konstruksi dibatasi dan bahwa infrastruktur yang telah selesai dianggap oleh masyarakat sebagai investasi yang bijaksana. Beberapa politisi mungkin khawatir bahwa penyelesaian yang berhasil terjadi sebelum siklus pemilihan berikutnya untuk memberikan penghargaan atas keberhasilan kepada petahana.

Pengalaman negatif dan positif dari kota-kota lain dapat memengaruhi bagaimana biaya dan risiko pilihan desain diterima. Sayangnya, hanya ada sedikit penilaian tindak lanjut terperinci dari investasi infrastruktur besar dengan data yang sesuai untuk analisis triple-bottom-line. Tanpa informasi tersebut, terlalu banyak fokus mungkin diberikan pada biaya awal dan terlalu sedikit pada kinerja jangka panjang dan manfaat perkotaan.

Keputusan untuk menempatkan sistem teknis seperti fasilitas terkait energi, jalan raya dan rel kereta api, pusat perbelanjaan, jaringan air, dan pengolahan air limbah di bawah tanah sering kali didasarkan terutama pada data teknis yang terkait dengan pertimbangan operasional dan lingkungan, serta pertimbangan yang terkait dengan keselamatan, kebersihan, pencegahan bencana, penggunaan lahan, dan biaya pemeliharaan. Pengalaman Skandinavia dengan instalasi pengolahan limbah bawah tanah dan fasilitas tenaga air, misalnya, telah menyebabkan preferensi yang kuat terhadap infrastruktur bawah tanah oleh publik, perusahaan utilitas, dan pemangku kepentingan pemerintah, yang didorong oleh lingkungan iklim, topografi, dan geologi.

Upaya AS untuk mengembangkan fasilitas bawah tanah terbilang sederhana dibandingkan dengan upaya sebelumnya; penerapan pendekatan baru sering kali terhambat oleh kontrol administratif, pedoman desain, kode praktik, dan praktik ketenagakerjaan yang ada. Analisis sistematis jaringan pembuat keputusan dan bagaimana aliran informasi melalui jaringan memfasilitasi atau menghambat pengambilan keputusan dapat menjadi informatif dan alat yang ampuh jika diterapkan dengan hati-hati.

Padahal jumlah pemangku kepentingan menunjukkan bahwa jaringan jaringan dalam kasus analisis sistem perkotaan itu kompleks, bahkan jaringan yang kompleks pun tidak acak dalam pembentukan dan aktivitasnya dan dapat dipelajari untuk menginformasikan pengambilan keputusan. Albert dan Barabási menggambarkan mekanika statistik dan dinamika jaringan yang pada suatu waktu tampak acak, dan Watts (2004) merangkum temuan tentang jaringan, organisasi jaringan, dan dinamika kolektif dalam jaringan yang dapat, antara lain, mendorong atau menghambat penyebaran informasi.

Ada banyak literatur dan analisis komputasional dari sistem sosioteknis kompleks yang analog yang dapat diterapkan pada diskusi ini. Misalnya Carley dan lainnya menggunakan teknik analisis kuantitatif untuk menentukan bagaimana pembelajaran terjadi dalam jaringan yang menghasilkan perubahan, dan Cataldo dan lainnya mengeksplorasi pemodelan bagaimana berbagai jenis keputusan rekayasa perangkat lunak membatasi keputusan rekayasa perangkat lunak lainnya dan mendorong kebutuhan untuk mengoordinasikan aktivitas.

Demi pembahasan ini, jaringan disederhanakan menjadi dua kategori:

- (1) Jaringan teknis yang terlibat dalam desain, konstruksi, pengoperasian, dan pemeliharaan ruang bawah tanah

- (2) Jaringan organisasi lembaga pemerintah, entitas sektor swasta, dan kelompok masyarakat yang membiayai konstruksi, menanggung gangguan, dan mendapatkan manfaat dari fasilitas bawah tanah yang telah selesai dibangun. Pengambilan keputusan yang ideal terjadi dengan interaksi berkelanjutan antara kedua jaringan ini selama semua fase siklus hidup infrastruktur.

Mengidentifikasi jenis informasi yang tepat untuk dibagikan dengan agen yang tepat dalam jaringan yang tepat untuk memfasilitasi perubahan yang mendorong keberlanjutan adalah hal yang sulit, dan tidak ada metodologi tunggal yang akan berhasil di semua sistem perkotaan, atau mungkin dalam satu sistem perkotaan dari waktu ke waktu mengingat sifat jaringan yang individual dan dinamis. Dukungan berkelanjutan terhadap investasi infrastruktur memerlukan pemahaman tentang bagaimana pers dan publik akan memandang proyek dan kegiatan terkait, dan bagaimana informasi dapat ditransfer kepada mereka.

Komitmen kepemimpinan politik selama durasi konstruksi, pengoperasian, dan pemeliharaan proyek juga diperlukan. Kepuasan publik dengan investasi dalam infrastruktur memerlukan komunikasi yang transparan termasuk representasi akurat dari nilai dan risiko investasi seperti yang terkait dengan biaya dan penjadwalan proyek. Kesulitan mempertahankan dukungan publik untuk keputusan investasi dapat menyebabkan terlalu banyak menjanjikan pada desain, analisis, dan konstruksi untuk memulai proyek.

Mungkin saja untuk mengembangkan dan menggunakan alat untuk meningkatkan kesadaran kolektif di masyarakat tentang manfaat dan biaya yang terkait dengan infrastruktur bawah tanah. Misalnya, basis data geoteknik telah dikembangkan untuk banyak komunitas di seluruh dunia yang secara visual dapat menampilkan hubungan antara infrastruktur yang dibangun dan lingkungan geologi. Ini dapat diterapkan untuk tujuan pendidikan dan perencanaan. Seperti yang dibahas lebih lanjut dalam Bab 5, penilaian komparatif keberlanjutan untuk opsi penggunaan ruang bawah tanah dan permukaan mengharuskan data dan contoh kasus yang memadai didokumentasikan sehingga dampak siklus hidup keseluruhan dan tiga hal penting dari opsi yang bersaing dapat dievaluasi.

Penerimaan Pengguna terhadap Fasilitas Industri, Komersial, dan Institusional Bawah Tanah. Fasilitas bawah tanah industri, komersial, dan institusional kini dipandang berbeda oleh mereka yang bekerja atau menghabiskan waktu lama di fasilitas tersebut dibandingkan mereka yang memilih untuk menggunakan fasilitas tersebut dalam waktu yang lebih singkat. Pekerja menginginkan ruang yang nyaman dan seaman fasilitas di atas tanah. Kurangnya akses terhadap cahaya alami, ventilasi, dan kerangka acuan spasial (misalnya, pemandangan) merupakan kerugian yang paling sering disebutkan.

Oleh karena itu, penerimaan pekerja mungkin bergantung pada sejauh mana fasilitas tersebut berada di bawah tanah atau tanpa jendela, dan jenis lingkungan yang diharapkan untuk pekerjaan mereka di fasilitas konvensional. Di sisi lain, penerimaan pengguna berputar di sekitar persepsi kemudahan dan keselamatan, selain kenyamanan. Baik pekerja maupun pengguna dapat sangat dipengaruhi oleh kualitas desain, pemeliharaan, pengoperasian, dan keamanan. Penerimaan pemangku kepentingan swasta dan publik mungkin sangat dipengaruhi oleh lokasi dan desain misalnya, apakah menempatkan seluruh atau sebagian

struktur di bawah tanah meningkatkan atributnya di lokasi tersebut?

Jika demikian, biaya dan perhatian pengguna akan dibandingkan dengan manfaat pembangunan fasilitas di lokasi tersebut. Misalnya, hotel-hotel di area Washington, D.C., sering kali membangun beberapa lantai di bawah tanah untuk tempat parkir, ruang pertemuan, dan ruang dansa. Pembatasan ketinggian arsitektur di area D.C.4 berarti bahwa ruang "berjendela" di atas tanah menjadi sangat penting. Pengembangan ruang bawah tanah merupakan hasil dari aturan yang berlaku untuk melestarikan lingkungan di atas tanah. Lingkungan menarik orang ke area tersebut, dan ruang bawah tanah yang dirancang dengan baik dan aman menarik penggunaan.

Kekuatan Pendorong

Sulit untuk menilai kekuatan pendorong apa yang paling penting dalam memajukan atau menghambat pengembangan dan penggunaan fasilitas bawah tanah. Sebagian besar area perkotaan besar di Amerika Serikat dan di seluruh dunia menunjukkan pertumbuhan fasilitas bawah tanah seiring dengan meningkatnya pembangunan perkotaan. Dalam hal ini, orang mungkin menyimpulkan bahwa tidak ada kebijakan atau pendorong khusus yang perlu diberlakukan untuk menyebabkan pengembangan bawah tanah itu akan terjadi sebagai akibat alami dari penggunaan lahan, tekanan lingkungan, dan kebutuhan untuk meningkatkan layanan transportasi dan utilitas untuk kota yang sedang berkembang.

Kelemahan pendekatan laissez-faire ini adalah pembangunan bawah tanah yang kacau, proyek demi proyek, bahkan ketika pada prinsipnya dipahami dengan baik bahwa perluasan penggunaan bawah tanah akan menyusul kemudian. Bagian ini mengkaji beberapa faktor pendorong yang dapat mendorong atau menghambat pembangunan lingkungan bawah tanah yang diperluas dan teratur.

Perencana kota mungkin merencanakan kota hanya dalam dua dimensi (dengan penggunaan kontrol ketinggian atau rasio luas lantai yang digunakan untuk mengendalikan ketinggian bangunan) dan mengabaikan pentingnya bawah tanah di daerah perkotaan besar. Tanpa badan misi federal, negara bagian, atau kota dengan tanggung jawab menyeluruh untuk penyediaan infrastruktur perkotaan, badan-badan terpisah menangani secara independen masalah yang terkait dengan transportasi, perumahan dan pembangunan perkotaan, keamanan dalam negeri, dan energi.

Meskipun mandat masing-masing badan ini penting, pendekatan umum untuk penyediaan utilitas bawah tanah dan perencanaan perkotaan bawah tanah tidak ada. Mekanisme pendanaan untuk proyek atau penelitian cenderung berfokus pada masalah atau solusi tertentu tanpa banyak mempertimbangkan bagaimana solusi tersebut memengaruhi sistem sistem dalam jangka pendek dan panjang. Resesi ekonomi lokal atau nasional yang membuat investasi pada fasilitas umum menjadi kurang mendesak dan kurang terjangkau memperburuk masalah, seperti juga biaya pengembangan proyek bawah tanah yang awalnya lebih tinggi dan jangka waktu yang panjang hingga penyelesaian proyek.

Persepsi negatif tentang lingkungan interior fasilitas bawah tanah, tata letak yang membingungkan dan kurangnya referensi ke penanda permukaan yang menghambat pencarian jalan yang mudah, dan ketakutan tentang keselamatan pribadi di fasilitas bawah

tanah yang mungkin dianggap dirancang dan dioperasikan dengan buruk dapat mengurangi dukungan publik terhadap infrastruktur bawah tanah.

KOTAK 2.2

Galeri Arthur M. Sackler dan Museum Nasional Seni Afrika, Smithsonian Institution, Washington, D.C.

Galeri Arthur M. Sackler (museum seni Asia) dan Museum Nasional Seni Afrika di Smithsonian Institution di Washington, D.C., ditempatkan di bawah tanah di halaman yang berdekatan dengan "Kastil" Smithsonian di National Mall. Fungsinya sangat sesuai dengan struktur bawah tanah penampilan bangunan Smithsonian yang ikonik dipertahankan, tidak ada ruang terbuka di National Mall yang ditutupi, dan pekerja museum sudah terbiasa bekerja di bangunan tanpa jendela di atas tanah. Kualitas desain yang tinggi dan ruang galeri yang menarik menyediakan lingkungan yang menarik bagi publik. Gambar tersebut menunjukkan penggunaan desain ruang, seni, dan pencahayaan alami untuk menciptakan lingkungan yang dramatis dan menyenangkan.



Gambar Sebuah patung karya Xu Bing menempati dan dapat dilihat di masing-masing dari empat lantai Galeri Arthur M. Sackler di ruang yang dirancang dengan indah yang memanfaatkan skylight dan pencahayaan buatan dengan cerdas. Patung tersebut dilihat dari bawah dari tingkat atas empat lantai. Perhatikan air mancur di bagian bawah patung yang memantulkan cahaya alami dari jendela atap empat lantai di atasnya. Namun, ada banyak contoh proyek infrastruktur bawah tanah yang sukses yang mengarah pada masyarakat yang lebih berkelanjutan.

Pengembangan beberapa di antaranya difasilitasi oleh struktur dan sistem tata kelola yang ada di lokasi ini, beberapa sangat berbeda dari yang ditemukan di Amerika Serikat.

Kebijakan yang kuat untuk penyediaan infrastruktur baru ditambah dengan kontrol administratif yang kuat untuk implementasi proyek yang ditemukan di Cina, misalnya, belum tentu dapat diimplementasikan di Amerika Serikat. Kebijakan yang memerlukan dan memfasilitasi perencanaan jangka panjang yang efektif untuk penggunaan ruang bawah tanah, seperti yang ditemukan di lokasi seperti Singapura atau Helsinki, Finlandia, membantu lokasi tersebut bergerak lebih dekat ke tujuan keberlanjutan.

Kebijakan yang menegakkan pelestarian lingkungan permukaan sambil mengizinkan perluasan fasilitas di bawah tanah akan memberikan alasan untuk memindahkan lebih banyak infrastruktur di bawah tanah di mana insentif lain tidak ada. Ini dapat mencakup pembatasan ketinggian bangunan ditambah dengan pengecualian ruang bawah tanah dari batasan luas lantai, atau larangan utilitas di atas kepala. Kebijakan yang meningkatkan kemungkinan untuk dengan mudah merutekan elemen infrastruktur di kedalaman di bawah tanah pribadi, seperti Undang-Undang Tindakan Khusus Jepang untuk Penggunaan Publik Bawah Tanah Dalam yang memberikan organisasi publik hak prioritas untuk mengembangkan ruang bawah tanah dalam, dapat membantu menghindari beberapa hambatan hukum untuk pembangunan yang lebih luas, lebih serbaguna, dan cepat.

Rekayasa dan konstruksi bawah tanah mahal, dan biaya konstruksi umumnya lebih besar daripada infrastruktur permukaan. Namun, penilaian penuh atas biaya dan manfaat siklus hidup dapat meyakinkan pemilik dan perencana bahwa investasi awal yang lebih besar adalah investasi yang lebih baik. Perubahan kebijakan seperti yang dijelaskan di atas dapat menurunkan beberapa biaya dengan, misalnya, merampingkan beberapa proses yang memakan waktu terkait dengan perizinan dan hak jalan.

Penggerak ekonomi lainnya lebih bersifat praktis. Wilayah perkotaan dan perluasan ekonomi dapat menciptakan permintaan untuk fasilitas dan layanan baru, tetapi lahan permukaan mungkin tidak tersedia karena meningkatnya kepadatan pembangunan perkotaan. Faktor pendorong lainnya mungkin perilaku manusia, misalnya, desakan masyarakat untuk lingkungan permukaan yang lebih baik dan layanan publik dan swasta yang lebih baik, kesadaran yang lebih besar terhadap pendekatan kualitas hidup yang diambil di berbagai kota, atau permintaan atau respons terhadap kualitas desain yang lebih baik di fasilitas bawah tanah, dan integrasi yang lebih baik dengan permukaan yang menghilangkan persepsi negatif tentang ruang bawah tanah.

Berbagai keadaan dan faktor pendorong mempercepat atau menghambat penerimaan dan pengembangan bawah tanah. Isu-isu yang terkait dengan persepsi negatif yang dirasakan dan kenyamanan bawah tanah dibahas lebih lanjut dalam Bab 4, untuk penilaian yang lebih baik terhadap biaya ekonomi, sosial, dan lingkungan yang sebenarnya dibahas dalam Bab 5, dan untuk teknologi yang lebih baik yang memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang risiko konstruksi dan operasional yang meningkatkan biaya dibahas dalam Bab 6. Pendekatan baru untuk perencanaan dan pengelolaan infrastruktur yang menghargai kontribusi rekayasa bawah tanah terhadap pembangunan berkelanjutan disarankan dengan kesimpulan komite dalam Bab 7.

Lebih baik tidak menganggap bawah tanah sebagai alternatif universal untuk

permukaan tidak demikian tetapi lebih baik untuk memberikan pertimbangan yang tepat terhadap bawah tanah sehubungan dengan masa depan jangka panjang dan keberlanjutan wilayah perkotaan. Sangat penting bahwa pilihan pengembangan bawah tanah di masa depan tidak terdegradasi oleh penggunaan sebelumnya yang tidak direncanakan atau tidak sesuai, bahwa kebijakan dan struktur administratif memberikan panduan yang tepat, bahwa masyarakat sepenuhnya terlibat dalam mengembangkan visi jangka panjang untuk komunitasnya dan standar komunitas, dan harapan masyarakat mengenai bagaimana fasilitas bawah tanah akan melayaninya terpenuhi.

2.4 KETERGANTUNGAN ANTAR-SISTEM

Seiring dengan semakin kompleksnya penggunaan bawah tanah, jelaslah bahwa penghormatan yang tepat terhadap interaksi antara permukaan dan bawah tanah diperlukan selama semua fase siklus hidup infrastruktur. Contoh-contoh dampak negatif serius dari buruknya pengelolaan infrastruktur permukaan atau bawah tanah diberikan di seluruh laporan ini, tetapi tidak disajikan untuk menunjukkan bahwa hal tersebut merupakan norma dalam praktik rekayasa.

Kotak 2.3, misalnya, menunjukkan dampak kegagalan struktural penahan beban di bawah tanah selama konstruksi yang membahayakan fasilitas permukaan. Selama konstruksi, infrastruktur sering kali lebih rentan terhadap kegagalan struktural karena tanah mungkin tidak sepenuhnya stabil hingga konstruksi selesai. Stabilitas infrastruktur permukaan bergantung pada stabilitas bawah permukaan. Banyak saling ketergantungan lainnya yang kurang jelas. Banyak dari saling ketergantungan ini mungkin sangat penting bagi keamanan nasional.

Komisi Kepresidenan tentang Perlindungan Infrastruktur Kritis mendefinisikan sistem infrastruktur yang vital bagi negara kita dan secara prospektif melihat infrastruktur kritis sebagai subjek dari tindakan yang direncanakan untuk melindungi aset dari kerusakan atau kehancuran. Mempertahankan negara dan cara hidup kita dianggap bergantung pada layanan sistem infrastruktur ini yang berkelanjutan dan tanpa gangguan. Lebih dari satu dekade kemudian dan setelah serangan 11 September 2001 (9/11), daftar infrastruktur yang ditetapkan sebagai penting oleh PCCIP masih berlaku, tetapi dengan urgensi yang lebih besar dan memerlukan lebih banyak masalah, bahaya, dan tingkat perlindungan.

Karena peristiwa 9/11 dan pemadaman listrik regional yang signifikan selama sehari-hari, saling ketergantungan sistem infrastruktur telah meningkat menjadi masalah nasional. Mungkin sebagian karena perhatian yang ditimbulkan oleh serangan 9/11, jaringan infrastruktur penting sekarang diakui sebagai sistem yang saling bergantung. Sistem tersebut meliputi sistem yang menyediakan air minum, pengumpulan dan pembuangan air limbah dan air hujan, tenaga listrik, distribusi bahan bakar, telekomunikasi, dan konektivitas serta komunikasi televisi digital dan internet (termasuk aset satelit yang mengorbit), serta sistem transportasi seperti jalan raya, jalan tol, jembatan, terowongan, fasilitas transit dan kereta api, serta bandara dan pelabuhan.

Sistem infrastruktur lainnya juga menyediakan layanan darurat, ruang tinggal dan kerja, gereja dan tempat berkumpul, rumah sakit dan sekolah, taman dan area rekreasi, ruang

terbuka, dan fasilitas lainnya. Sebagai sistem, sistem tersebut dicirikan sebagian oleh kompleksitas yang terkait dengan fakta bahwa sistem tersebut dimiliki dan dikendalikan oleh banyak individu, kemitraan dan perusahaan, serta pemerintah daerah, negara bagian, dan nasional.

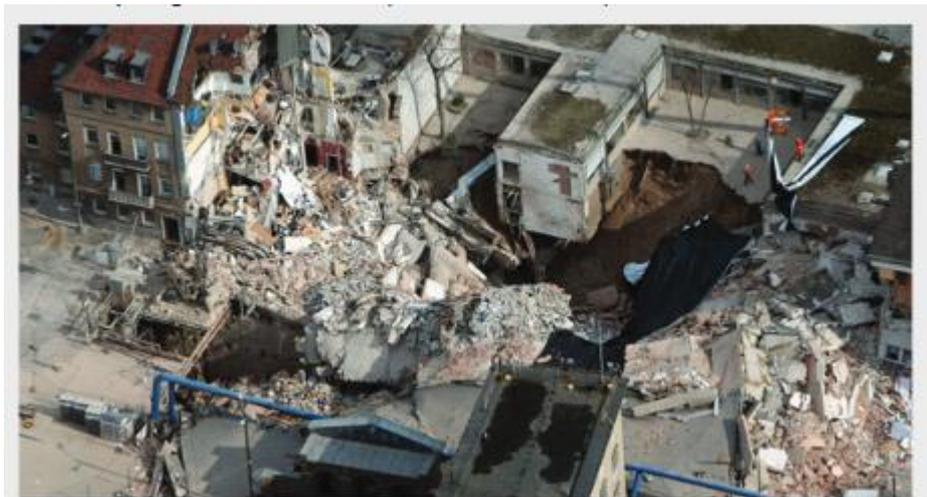
Model kepemilikan yang kompleks ini menyebabkan kebingungan mengenai, misalnya, tanggung jawab untuk mendanai dan melakukan inspeksi berkala yang penting, pemeliharaan, dan perbaikan elemen atau sistem infrastruktur individual. Tidak ada pemahaman yang jelas atau konsisten tentang siapa yang melakukan apa, di bawah pedoman dan anggaran apa, dan dengan ketentuan apa.

KOTAK 2.3

Jalur Metro di Cologne, Jerman, 2009

Pembangunan Jalur Metro Utara-Selatan sepanjang 3,8 km di Cologne, Jerman (dengan terowongan untuk tujuh stasiun bawah tanah) dimulai pada tahun 2004 dan selesai pada musim panas 2008. Pembangunan stasiun, dua terowongan darurat, dan jalan keluar bawah tanah (kedalaman 28 m) mencakup penggunaan metode penggalian dan penambangan dengan pembekuan tanah.

Pada tanggal 3 Maret 2009, gedung Arsip Sejarah Cologne setinggi tujuh lantai (lima di atas tanah dan dua di bawah tanah), yang terletak di dekat lubang terbuka jalan keluar bawah tanah, runtuh bersama dengan bangunan-bangunan, termasuk rumah-rumah, yang terletak di kedua sisinya.



Gambar 2.2 Runtuhnya Beberapa Bangunan Akibat Keruntuhan Akibat Penggalian.

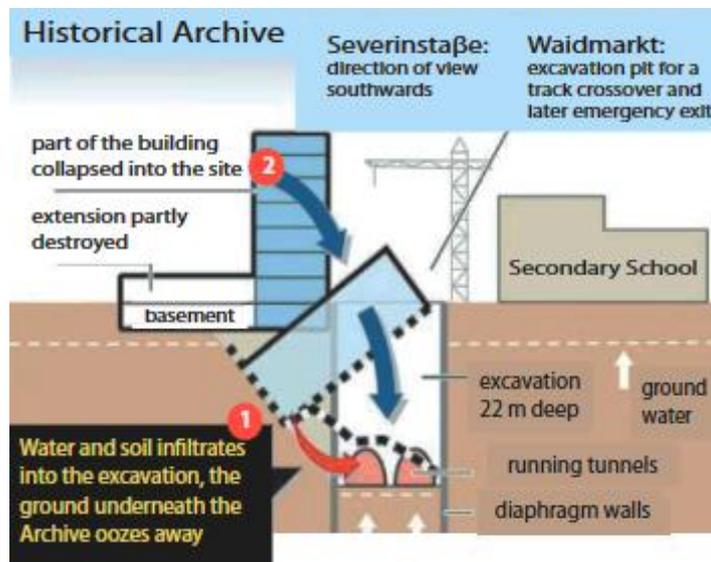
Sumber: AP Images.

Disebabkan oleh masuknya air tanah dan material tanah, keruntuhan tersebut mengakibatkan hilangnya nyawa dan kerusakan parah pada catatan sejarah yang sangat banyak dan berharga dari Kota Cologne, wilayah sekitarnya, dan Jerman. Puing-puing dan tanah mengendap di dalam bangunan, langit-langit baja sementara dan sistem pembuangan air rusak, beton retak, dan tanah di sekitarnya kendur dan bergeser. Ada spekulasi bahwa

keruntuhan itu disebabkan oleh pemisahan lokal yang disebabkan oleh pembuangan tanah oleh sistem pembuangan air atau kegagalan struktur dinding diafragma.

Dua orang di rumah yang runtuh meninggal. Empat puluh lima lainnya (30 di Arsip dan 15 warga) diselamatkan. Kemarahan publik dan ancaman bahwa massa yang marah akan menuntut pembatalan seluruh proyek, spekulasi intens tentang apa yang telah terjadi, dan "kekosongan rincian resmi" dilaporkan setelah kecelakaan (Wallis, 2009). Tanggapan politik awal adalah bahwa rencana konstruksi di Cologne (atau di kota yang dibangun dengan padat) seharusnya tidak disetujui.

Menurut laporan teknik September 2010, penyebabnya masih dalam penyelidikan oleh kantor jaksa penuntut umum. Pakar independen yang ditunjuk oleh pengadilan sedang meninjau insiden tersebut. Gema kecelakaan Cologne meluas ke Amsterdam di mana jalur metro sedang direncanakan untuk area dengan karakteristik geologi yang sama. Pada tahun 2008, terjadi dua kali kerusakan akibat kebocoran dinding beton lubang konstruksi untuk stasiun metro masa depan di Vijzelgracht, Amsterdam, dan akibatnya, rumah-rumah penunun abad ke-17 di sekitarnya terendam banjir dan tidak layak huni.



Gambar 2.3 Diagram Yang Mengilustrasikan Dugaan Penyebab Kecelakaan.

Kegagalan Berjenjang pada Sistem

Ketergantungan antarsistem infrastruktur sering kali tidak sepenuhnya dipahami. Kegagalan pada satu elemen sistem dapat menyebabkan gangguan pada satu atau banyak sistem lainnya, dan kegagalan sistem bawah tanah dapat terjadi sebagai akibat dari kegagalan sistem di permukaan. Gangguan dapat menyebar ke sistem di kota, negara bagian, dan negara lain. Misalnya, kegagalan berjenjang pada infrastruktur bawah tanah yang saling bergantung terjadi sebagai akibat dari serangan 9/11 pada infrastruktur permukaan di Kota New York.

Pipa air utama jebol membanjiri terowongan rel, stasiun komuter, dan fasilitas yang menampung semua kabel untuk apa yang digambarkan sebagai simpul telekomunikasi terbesar di dunia. Perdagangan di Bursa Efek New York berhenti selama enam hari sebagai akibat dari kegagalan infrastruktur komunikasi. Oleh karena itu, stabilitas keuangan

internasional dikaitkan dengan pecahnya pipa air utama di satu lokasi. Kegagalan sistem komunikasi dapat mengakibatkan kegagalan beruntun pada pembangkit, sistem, dan peralatan bertenaga listrik.

Sistem tenaga listrik lebih sering dikontrol dari jarak jauh dari stasiun operasi pusat, melalui jaringan telepon nirkabel atau sewaan, Internet, atau melalui sistem kontrol pengawasan dan akuisisi data (SCADA). Sistem SCADA biasanya menggunakan perangkat lunak arsitektur terbuka tanpa perlindungan keamanan, sehingga rentan terhadap peretas. Akses ke sistem SCADA dapat memberikan peluang untuk menimbulkan masalah pada fungsionalitas sistem termasuk membebani jaringan transmisi secara berlebihan.

Sistem SCADA juga dapat mengalami malfungsi saat daya listrik berfluktuasi atau menjadi tidak stabil, seperti yang ditunjukkan oleh ledakan jaringan pipa gas alam tahun 2010 di San Bruno, California. Contoh lain dari kegagalan beruntun infrastruktur yang saling bergantung terjadi pada bulan Agustus 2003 ketika jaringan transmisi listrik utilitas Ohio yang kelebihan beban mengalami gangguan, mematikan sebagian jaringan transmisi, yang menyebabkan kegagalan jaringan transmisi listrik dan pemadaman listrik di delapan negara bagian di Amerika Serikat bagian Timur Laut dan Kanada bagian Tenggara.

Lima puluh juta orang kehilangan daya listrik hingga dua hari. Cleveland, Ohio, tidak memiliki daya listrik untuk memompa air publik ke 1,5 juta warga, dan situasi serupa dilaporkan di tempat lain. Kehilangan daya listrik mematikan kontrol lalu lintas dan penerangan jalan, membuat perjalanan di jalan raya dan jalan tol berbahaya, terutama di malam hari. Dampak dari kegagalan tersebut sangat luas. Pendinginan untuk makanan tidak mungkin dilakukan, dan tindakan darurat diperlukan, misalnya, untuk melindungi persediaan susu anak-anak.

Stasiun pengisian bahan bakar tidak dapat memompa bahan bakar, dan orang-orang meninggalkan kendaraan di mana pun mereka kehabisan bensin. Efek berjenjang yang cepat pada layanan penting lainnya juga diamati. Kegagalan berjenjang infrastruktur yang saling bergantung dapat terjadi ketika infrastruktur bawah tanah yang ada terganggu oleh pemasangan atau perbaikan layanan lain. Undang-undang "Telepon sebelum menggali" (CBYD)⁵ telah diberlakukan di banyak daerah untuk mengurangi kemungkinan ini. Perhatian yang lebih besar perlu diarahkan pada sumber daya yang terkubur, yang dalam banyak kasus, berada tepat di bawah permukaan.

Pemilik dan pengelola properti berkepentingan untuk mengetahui lokasi, kondisi, dan status perbaikan elemen infrastruktur yang melayani properti mereka. Pemerintah daerah, berdasarkan mandat keselamatan dan kesehatan publik, memiliki peran dalam memastikan bahwa inspeksi dan pemeliharaan infrastruktur vital terjadi dan didokumentasikan serta tersedia. Pemerintah negara bagian memiliki tanggung jawab yang sama untuk jaringan listrik, jaringan pipa transmisi, dan sistem pasokan air minum.

Cara yang tidak terlalu padat karya untuk memetakan utilitas bawah tanah, melakukan dan melaporkan inspeksi layanan vital penting, dan memahami implikasi interkoneksinya terhadap pengguna lokal dapat mengarah pada pendekatan sistem yang lebih baik untuk perencanaan, konstruksi, operasi, dan pemeliharaan dalam jangka panjang untuk

meningkatkan umur infrastruktur penting dan menghindari kegagalan sistem yang berjenjang. Komite menyarankan penelitian potensial di bidang ini di Bab 7.

2.5 DAMPAK PERENCANAAN YANG TIDAK LENGKAP

Komite studi memulai dengan asumsi bahwa pembangunan berkelanjutan bergantung pada kemampuan perencana untuk mempertimbangkan kebutuhan masa depan. Masa manfaat infrastruktur penting bergantung pada layanan yang dipasang dan ditentukan selama proses desain dan spesifikasi material. Layanan utilitas yang terkubur diharapkan beroperasi selama 50 tahun; terowongan dan bangunan transit dan saluran pembuangan selama 100 tahun. Sering kali sulit untuk memprediksi cara terbaik untuk mengakomodasi operasi dan pemeliharaan infrastruktur jangka panjang sambil secara bersamaan mengakomodasi populasi yang tumbuh atau berubah, kebutuhan infrastruktur yang berubah, dan teknologi baru.

Sangat sulit untuk memprediksi apa yang mungkin menjadi kebutuhan masyarakat akan infrastruktur dalam 50 hingga 100 tahun. Metode praktis untuk menentukan sisa masa manfaat utilitas dan layanan diperlukan. Bagian berikutnya menyoroti masalah yang diakibatkan oleh perencanaan yang buruk atau tidak lengkap dan bagaimana masalah ini berhubungan dengan masalah yang terkait dengan infrastruktur yang menua dan pilihan fondasi bangunan.

Menua dengan Tidak Begitu Anggun sambil Memenuhi Permintaan

Ada sekitar 76 juta orang di Amerika Serikat pada awal abad ke-20, dan ada sekitar 310 juta orang saat ini. Biro Sensus AS memperkirakan populasi AS akan menjadi sekitar 439 juta pada tahun 2050, yang merupakan pertumbuhan sebesar 42 persen dalam 40 tahun ke depan. Masyarakat mengharapkan penyediaan kualitas hidup tertentu melalui infrastruktur fisik, dan pertumbuhan tersebut akan menciptakan tekanan finansial dan fisik untuk memperluas semua sistem infrastruktur sekaligus mengidentifikasi cara untuk memperpanjang masa manfaat dan keandalan sistem yang ada.

Tuntutan yang berbeda dan bahkan lebih besar pada infrastruktur kemungkinan akan muncul seiring dengan berkembangnya teknologi dan dikembangkannya teknologi baru serta penyediaannya menjadi hal yang diharapkan. Ketergantungan infrastruktur kemungkinan akan menjadi lebih kompleks, dan, seiring bertambahnya usia sistem infrastruktur, sistem sistem tersebut kemungkinan akan menjadi kurang andal. Ini bukanlah skenario yang baik untuk keberlanjutan.

Dilaporkan bahwa sebagian besar infrastruktur bawah tanah di Amerika Serikat telah mencapai atau melampaui masa manfaat yang diproyeksikan. Badan-badan yang bertanggung jawab mencari cara yang efektif untuk meregangkan anggaran yang menipis dan belanja modal untuk mengatasi masalah yang terkait dengan infrastruktur yang menua, tetapi ada kesenjangan antara dana yang dialokasikan dan pengeluaran yang diperlukan untuk pembaruan infrastruktur.

Pada tahun 2002, Badan Perlindungan Lingkungan AS (EPA) memperkirakan kesenjangan tahunan sebesar Rp. 80 Triliun selama periode 20 tahun (2000-2019) untuk infrastruktur air yang menua di negara itu saja. American Society of Civil Engineers (ASCE)

memperkirakan bahwa pipa air yang bocor mengakibatkan hilangnya 7 miliar galon air minum bersih per hari di seluruh negeri.

Lebih lanjut, ASCE menjelaskan bahwa jaringan pipa air limbah yang rusak membocorkan miliaran galon limbah ke saluran air nasional setiap tahun. Keselamatan dan kesehatan pribadi dan ekonomi dapat menghadapi risiko yang lebih besar akibat ketidakmampuan mengurangi kegagalan sistem infrastruktur yang diproyeksikan membahayakan warga secara langsung dan fisik.

KOTAK 2.4

Kegagalan Pipa Air Utama

Kegagalan pipa air utama beton prategang sepanjang 66 inci pada tahun 2008 mengakibatkan perlunya penyelamatan sembilan orang yang terdampar dalam mobil mereka sementara sekitar 150.000 galon air per menit mengalir deras di jalan utama dekat Potomac, Maryland. Pipa tersebut, 15 kaki di bawah permukaan, mulai beroperasi pada tahun 1964. Investigasi forensik menunjukkan bahwa korosi dan pelemahan pipa disebabkan oleh pemasangan pipa langsung di atas batu.

Pipa tersebut terakhir kali diperiksa secara internal pada tahun 1998, tetapi inspeksi internal biasanya tidak mengungkap korosi berbasis kimia eksternal yang terjadi. Sebuah lubang berukuran 50x30 kaki tercipta akibat kekuatan retakan, beberapa pohon besar dan tiang listrik tumbang, dan sebagian jalan hancur. Sekolah dan jalan di daerah tersebut ditutup sementara. Sebagai hasil dari peristiwa ini, instansi yang bertanggung jawab segera menerapkan program pemantauan aktif dan waktu nyata untuk sebagian besar sistem pipa air berdiameter besar.

KOTAK 2.5

Kegagalan Pipa di San Bruno, California, dan Carmichael, Mississippi

Kegagalan pipa baru-baru ini di San Bruno, California, dan Carmichael, Mississippi, menunjukkan risiko yang tidak umum tetapi signifikan terhadap infrastruktur permukaan, terutama di daerah yang padat penduduk. Ledakan dan kebakaran pipa gas alam San Bruno, California, pada tahun 2010 menggambarkan potensi risiko yang terkait dengan pipa gas yang terkubur. Pipa tersebut dipasang pada tahun 1956 di bawah tanah yang kemudian dikembangkan menjadi lingkungan perumahan yang berkembang pesat. Pipa ini mengandalkan sistem SCADA khusus untuk mengendalikan aliran dan tekanan gas.

Delapan orang terluka parah, dan lebih dari 50 rumah rusak atau hancur akibat ledakan pipa gas baja berdiameter 30 inci tersebut. Laporan awal dari Badan Keselamatan Transportasi Nasional (NTSB) menunjukkan bahwa kerusakan terjadi setelah kegagalan daya pada saluran listrik yang menyalurkan sistem SCADA dan mengakibatkan peningkatan tekanan pada saluran tersebut. Semua faktor ini mengarah pada pencarian cara yang lebih baik untuk mengembangkan, mengoperasikan, dan memelihara sistem infrastruktur kita. Pada tahun 2007, pecahnya jaringan pipa yang mengangkut propana cair di pedesaan Mississippi melepaskan lebih dari 10.000 barel (sekitar 430.000 galon) propana.

Propana membentuk awan gas dan terbakar, menciptakan bola api besar yang mengakibatkan dua orang meninggal, tujuh orang cedera, dan empat rumah hancur. Sekitar 70 hektar padang rumput dan hutan terbakar, dan lebih dari \$3 juta kerusakan properti diklaim hilang oleh perusahaan pipa. NTSB menetapkan bahwa di antara beberapa masalah keselamatan yang berkontribusi terhadap insiden tersebut adalah ketidakcukupan regulasi dan pengawasan yang dilakukan oleh Administrasi Keselamatan Pipa dan Bahan Berbahaya terhadap program pendidikan publik dan penjangkauan responden darurat operator pipa. Peristiwa seperti itu relatif jarang terjadi. NTSB mencantumkan 17 insiden pipa signifikan yang diselidiki di Amerika Serikat dalam 10 tahun terakhir.

Pondasi Bangunan dan Penggunaan Bawah Tanah di Masa Depan

Pondasi bangunan merupakan penggunaan utama ruang bawah tanah perkotaan, menyediakan dukungan bangunan yang diperlukan, dan dapat menambah nilai dan ruang pada properti. Namun, pondasi bangunan jarang dirancang dengan mempertimbangkan bagaimana ruang di bawah atau di sekitar pondasi dapat digunakan di masa depan. Pondasi tiang pancang yang dalam pada beberapa bangunan, misalnya, dapat mempersulit untuk mengakomodasi infrastruktur seperti terowongan angkutan umum dan jalan yang memiliki batasan penyesuaian horizontal dan vertikal yang signifikan.

Beberapa desain pondasi dapat membatasi hak jalan umum. Pemasangan jangkar tanah horizontal atau "paku" menyediakan dukungan lateral untuk pondasi dan dinding yang dalam terhadap tekanan tanah dan air tanah di sekitarnya, tetapi memerlukan penempatan pengikat di lubang di sisi galian yang dapat memanjang 30 hingga 35 kaki ke dalam tanah atau batu yang berdekatan. Meskipun pengikat umumnya tidak memiliki fungsi struktural pascakonstruksi, pengikat sering kali dibiarkan di tempatnya dan dapat membahayakan penggunaan bawah tanah lainnya di lokasinya.

Desain dan konstruksi pondasi dapat mencakup praktik berkelanjutan seperti penggunaan jangkar yang dapat dilepas, jika memungkinkan. Pendekatan jangka panjang untuk desain pondasi mungkin mencakup desain pondasi sehingga lebih mudah digunakan kembali atau digunakan kembali setelah infrastruktur permukaan melewati masa manfaatnya. Praktik rekonstruksi saat ini sering kali mencakup pembongkaran struktur permukaan dan pondasi saat konstruksi baru terjadi. Pendekatan visioner untuk desain pondasi memerlukan pertimbangan keberlanjutan perkotaan secara holistik.

Ini memperhitungkan dampak kolektif dari keputusan desain dan konstruksi individu pada penggunaan bawah tanah perkotaan di masa depan. Desain dapat mempertimbangkan perencanaan jangka panjang untuk area perkotaan secara keseluruhan, misalnya, menghindari desain khusus di area yang dikategorikan untuk transportasi bawah tanah di masa depan. Pendekatan ini akan lebih berhasil ketika bawah tanah perkotaan dimasukkan ke dalam rencana pertumbuhan perkotaan sebagai bagian dari sistem sistem yang berfungsi dan berkembang. Perencanaan yang optimal terkadang memerlukan pelestarian bawah tanah untuk penggunaan di masa mendatang.

Manajemen Kelembagaan Ruang Bawah Tanah

Sebagaimana telah dijelaskan, keputusan yang terkait dengan elemen infrastruktur bawah tanah individual jarang dibuat menggunakan pendekatan manajemen sistem di mana infrastruktur di atas dan di bawah tanah, digabungkan, membentuk sistem terpadu. Tata kelola dan manajemen kelembagaan ruang bawah tanah perkotaan yang memandu pengambilan keputusan di Amerika Serikat terfragmentasi, dan bahkan tidak ada sama sekali. Kebijakan publik yang mengatur penggunaan bawah tanah perkotaan, dengan beberapa pengecualian, tidak terbentuk dengan baik.

Fokus utama perencanaan perkotaan adalah penyediaan layanan di bawah batasan hak permukaan dan udara yang tersedia serta pengembangan sumber daya. Tantangan besar bagi tata kelola adalah bahwa kepemilikan utilitas, layanan, dan struktur bawah tanah dipegang oleh berbagai pihak publik dan swasta. Hal ini dan kurangnya kerangka kerja untuk penilaian ruang bawah tanah oleh kotamadya merupakan beberapa masalah yang menghambat perencanaan dan manajemen bawah tanah perkotaan yang lebih baik. Kotamadya biasanya mengizinkan operasi bawah tanah di yurisdiksi mereka melalui proses perizinan, tetapi tidak memiliki kewenangan untuk mengatur.

Izin untuk memotong jalan yang sudah ada untuk tujuan apa pun, misalnya, mungkin memerlukan izin, tetapi izin tersebut biasanya tidak mencakup ketentuan khusus untuk utilitas atau layanan yang sedang dipasang. Lebih jauh, penyerahan catatan pemasangan yang sudah dibangun mungkin tidak diperlukan. Pemetaan menyeluruh lokasi utilitas dan layanan yang terkubur jarang tersedia, dan catatan pemasangan yang sudah dibangun dari fasilitas bawah tanah yang ada mungkin tidak tersedia untuk umum atau tidak akurat. Oleh karena itu, sulit untuk merencanakan pemasangan baru tanpa mengganggu layanan terkubur yang ada. Menurut Common Ground Alliance,⁷ sebuah utilitas tertabrak atau rusak di Amerika Serikat setiap 60 detik.

Teknologi yang tersedia untuk mendeteksi dan memetakan infrastruktur bawah tanah guna meminimalkan benturan dan kerusakan pada sistemnya selama aktivitas konstruksi tidak cukup sering digunakan. Nomor nasional 811 jalur "hubungi sebelum menggali" 8 diluncurkan pada tahun 2007 untuk menjangkau 62 pusat panggilan yang terhubung dengan pihak-pihak yang memiliki layanan terkubur di area jangkauan mereka. Ini adalah langkah pertama dalam mengembangkan manajemen kelembagaan ruang bawah tanah perkotaan. Hasil positif dari CBYD adalah berbagi data utilitas dan layanan oleh pihak-pihak yang berkepentingan. Kesenjangan tata kelola dapat mulai ditutup ketika kebijakan publik mengharuskan akuntansi untuk penggunaan dan optimalisasi ruang perkotaan bawah tanah untuk kepentingan masyarakat, ekonomi, dan pembangunan berkelanjutan.

2.6 PERENCANAAN DAN TATA KELOLA UNTUK KEBERLANJUTAN

Beberapa kota di seluruh dunia telah membuat kemajuan yang lebih besar dalam perencanaan dan tata kelola ruang bawah tanah. Helsinki, Finlandia, contoh yang menonjol, telah mengidentifikasi dan melindungi sumber daya batuan dekat permukaan utamanya dan telah mengembangkan terowongan utilitas umum yang dalam yang membatasi gangguan

dengan infrastruktur bawah tanah yang lebih dangkal dan berorientasi pada manusia, seperti yang digunakan untuk angkutan umum, koneksi pejalan kaki, dan parkir. Strategi ini menjauh dari praktik yang lebih umum dalam menempatkan utilitas langsung di bawah permukaan.

Montreal, Kanada, telah menetapkan kerangka kerja yang dengannya jaringan koneksi pejalan kaki bawah tanah yang sebagian besar bersifat privat di area pusat kota telah mengubah kota beriklim utara menjadi kota dalam ruangan yang luas yang nyaman dan dapat diakses dalam cuaca musim dingin yang paling keras. Mungkin perencanaan bawah tanah yang paling ambisius pada saat penulisan ini sedang dilakukan oleh Negara Kota Singapura. Kekurangan lahan dan sumber daya alam yang ekstrem di negara kepulauan ini menjadikan pemanfaatan ruang bawah tanah sebagai komponen penting dari keseluruhan perencanaan.

Penggunaan ruang bawah tanah yang efektif di Singapura melestarikan ruang permukaan untuk penggunaan lain, termasuk rekreasi. Platform Teknologi Konstruksi Eropa mempromosikan konsep kota multidimensi di mana orang bergerak secara vertikal di atas dan di bawah tanah serta secara horizontal. Kotak 2.6 menunjukkan pengakuan Uni Eropa atas pentingnya ruang bawah tanah perkotaan dan visinya terhadap dampak pada kelayakan hidup kota yang mungkin terjadi dengan perencanaan sumber daya ruang terpadu.

Peningkatan populasi perkotaan telah mengakibatkan pembangunan lahan marjinal (yaitu, tanah yang lemah dan lunak) dan fasilitas industri dan komersial yang kurang dimanfaatkan serta kondisi lingkungan yang buruk terkait (misalnya, polusi, limbah berbahaya, dan tanah yang terkontaminasi). Pembangunan bawah tanah juga dapat merambah lahan marjinal, dan pengembang serta kontraktor harus menangani masalah seperti pembuangan atau remediasi limbah berbahaya.

Hal ini memerlukan pertimbangan yang cermat dan mendalam oleh pemilik, perencana kota, pengembang, dan masyarakat tentang masalah geoteknik dan geo-lingkungan yang terkait dengan semua konstruksi perkotaan, tentang pengembangan ruang bawah tanah secara khusus, dan tentang penilaian eksplisit ruang bawah tanah sebagai sumber daya. Keputusan investasi infrastruktur dan perencanaan yang efektif mengharuskan administrator dan perencana yang relevan menerima kebutuhan dan tanggung jawab untuk perencanaan jangka panjang yang terpadu, dan pengarsipan informasi diperlukan untuk memastikan sumber informasi tersedia dalam bentuk yang bermanfaat.

Ini menyiratkan bahwa catatan geologis dan tiga dimensi yang andal dari berbagai sumber struktur yang ada di bawah tanah perlu dikembangkan, didaftarkan ke referensi spasial umum, dan dipelihara. Visualisasi untuk perencanaan bawah tanah diperlukan khususnya dalam geologi yang rumit, dengan variasi topografi yang signifikan, dan ketika beberapa tingkat fasilitas bawah tanah dipertimbangkan. Kemampuan untuk mengarsipkan, mencari, mengelola, dan menampilkan basis data tiga dimensi yang kompleks pada tingkat kompleksitas yang sesuai untuk tugas perencanaan dan desain terperinci akan sangat membantu kemampuan untuk merencanakan penggunaan ruang bawah tanah perkotaan secara efektif.

Beberapa aspek dari basis data dan perangkat lunak yang diperlukan untuk melakukan tugas ini ada, tetapi masih banyak komplikasi dalam hal izin untuk mengakses data utilitas pribadi yang terperinci dan untuk mengelola ketidakpastian dan kualitas data yang tersedia

yang bervariasi. Pembahasan ini dilanjutkan secara lebih rinci di Bab 6. Untuk mempertimbangkan biaya-manfaat eksplisit dalam keputusan infrastruktur, penting untuk menetapkan metodologi guna mengukur nilai peluang ruang bawah tanah sebagai sumber daya di lingkungan perkotaan. Ini akan memungkinkan perbandingan nilai ruang bawah tanah yang setara dengan sumber daya perkotaan lainnya, misalnya yang terkait dengan peningkatan nilai pasar properti tanah permukaan.

Nilai untuk penggunaan di masa mendatang juga akan mencakup fakta bahwa sifat penggunaan sebelumnya (misalnya, infrastruktur yang ada) dapat memaksa sistem infrastruktur baru ditempatkan di kondisi tanah yang semakin sulit, menghadirkan masalah bagi para insinyur dan konstruktor, dan menciptakan kesulitan tambahan yang terkait dengan penjadwalan dan pengendalian biaya. Perencanaan dan tata kelola yang efektif dapat membantu mengoptimalkan penggunaan sumber daya bawah tanah secara efisien dan memperoleh nilai paling besar dari sumber daya bawah tanah untuk jangka panjang. Pendekatan tata kelola mencakup zonasi ruang vertikal dan horizontal bawah tanah, memesan koridor untuk sistem transportasi utama, dan mengoordinasikan persyaratan penggunaan ruang utilitas di hak jalan umum.

KOTAK 2.6

Agenda Riset Strategis untuk Sektor Konstruksi Eropa

Platform Teknologi Konstruksi Eropa (ECTP) mengembangkan agenda riset strategis untuk sektor konstruksi bawah tanah selama 25 tahun ke depan yang memperhitungkan inovasi yang didorong oleh pasar dan visi masyarakat jangka panjang. Menurut ECTP, model masa depan untuk perencanaan kota harus menggabungkan cara baru untuk berpikir tentang ruang bawah tanah dan konsep konstruksi sehingga penggunaan ruang bawah tanah dapat diperluas ke bawah sejauh imajinasi dan teknologi memungkinkan. Infrastruktur bawah tanah akan lebih menarik jika dihubungkan secara langsung dan mudah ke ruang permukaan yang lebih baik dan ke sistem transportasi berkapasitas tinggi yang merupakan alternatif yang efisien untuk transportasi permukaan.

Gambar tersebut adalah skema dari apa yang disebut platform sebagai kota multidimensi. ECTP menyarankan bahwa semua aspek konstruksi (misalnya, organisasi rantai pasokan, pengaturan kontrak, industri jasa, arsitektur bawah tanah, kendaraan khusus, teknologi untuk penggalian, bisnis sosial, dan industri keselamatan dan keamanan) harus ditinjau dan diubah untuk meningkatkan pekerjaan dalam lingkungan bawah tanah dan untuk memberikan pengawasan dan melindungi terhadap bahaya.



Kota Multidimensi Baru Seperti Yang Dibayangkan Oleh Area Fokus Konstruksi Bawah Tanah Dari Platform Teknologi Konstruksi Eropa. Sumber: ECTP, 2005, Hlm. 9.

Agenda penelitian ECTP mencakup visi dan prioritas penelitian jangka pendek dan jangka panjang yang dimaksudkan untuk memenuhi kebutuhan klien (misalnya, melalui penggunaan bawah tanah yang efisien dan meningkatkan pemahaman dan kemampuan kita untuk mengendalikan tanah itu sendiri), memungkinkan kota menjadi berkelanjutan (mengurangi konsumsi sumber daya, dampak lingkungan dan antropogenik, meningkatkan keselamatan dan keamanan, dan meningkatkan kualitas hidup), dan menyebabkan transformasi di sektor konstruksi itu sendiri (melalui peningkatan daya saing, proses konstruksi berbasis pengetahuan baru yang didorong oleh klien, teknologi informasi dan komunikasi dan otomatisasi, bahan konstruksi canggih, dan lingkungan kerja yang menarik).

2.7 MANAJEMEN JANGKA PANJANG BAWAH TANAH

Ada banyak keberhasilan yang tersohor dalam infrastruktur bawah tanah (misalnya, sistem kereta bawah tanah New York City dan Boston) dan keberhasilan yang lebih baru dalam pengembangan infrastruktur bawah tanah Metro Washington, D.C., Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority, dan Chicago Transit Authority. Catatan pencapaian meluas hingga pembuatan sistem utilitas bawah tanah. Namun, warisan infrastruktur bawah tanah yang terbengkalai atau tidak terpetakan selama lebih dari satu abad juga menghadirkan masalah besar.

Posisi utilitas yang terbengkalai, fondasi, tangki, dan puing konstruksi atau pembongkaran tidak dicatat atau catatannya dibuang. Posisi utilitas aktif dapat tidak pasti atau tidak dicatat dengan benar. Situasi ini tidak unik di Amerika Serikat, dan beberapa bagian dunia memiliki warisan infrastruktur terkubur yang terbengkalai lebih lama. Langkah yang wajar

menuju praktik perencanaan yang berkelanjutan adalah pengembangan basis data sistem informasi geografis dengan informasi tentang lokasi infrastruktur dan artefak bawah tanah.

Program penelitian selama 10 tahun sedang berlangsung di Inggris untuk mengembangkan prototipe alat radar penetrasi tanah multisensor yang akan menemukan dan memetakan utilitas dan layanan yang terkubur. Peta tiga dimensi kemudian akan dibuat bersama dengan British Geological Survey. Mendokumentasikan semua hal di bawah tanah dengan lebih andal dalam sistem basis data yang dapat dicari yang mencakup alat untuk visualisasi dan mendokumentasikan layanan lain yang tidak terekam yang ditemukan selama konstruksi bawah tanah akan sangat meningkatkan kemampuan perencana untuk memaksimalkan penggunaan bawah tanah sambil meminimalkan biaya pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur bawah tanah.

Dari tahun 1972 hingga 1994, Komite Nasional AS tentang Teknologi Terowongan dalam Dewan Riset Nasional berfungsi sebagai organisasi nasional untuk merangsang kemajuan dalam teknologi terowongan dan penggunaan bawah permukaan (lihat Lampiran C). Komite tersebut tidak memiliki tanggung jawab pengawasan, tetapi berfungsi untuk membentuk teknologi, praktik, serta pendidikan dan pelatihan. Keanggotaannya mencakup perwakilan dari pemerintah, industri, dan akademisi. Tujuannya adalah untuk mempromosikan koordinasi berbagai kegiatan, termasuk penilaian, penelitian, pengembangan, pendidikan, pelatihan, dan penyebaran informasi.

Lembaga ini juga bertindak sebagai mitra AS untuk International Tunneling Association. Tidak ada badan serupa sejak saat itu, dan pada tahun 2012 tidak ada badan resmi di Amerika Serikat yang mengemban tanggung jawab untuk mengawasi dan menyetujui penggunaan bawah tanah untuk mengelolanya dengan cara yang paling berkelanjutan. Kurangnya perencanaan untuk penggunaan bawah tanah yang sistematis dan berkelanjutan mengakibatkan biaya tambahan yang signifikan dan kesulitan jadwal karena layanan baru dipasang di ruang bawah tanah perkotaan yang sangat padat. Amerika Serikat membayangkan pemasangan sistem Kereta Api Berkecepatan Tinggi (HSR), beberapa di antaranya di bawah tanah, seperti yang dibangun di bagian lain dunia.

Sistem pergerakan barang yang dipisahkan berdasarkan tingkat permukaan (misalnya, rel kereta api dan jalan raya truk) juga dapat ditempatkan di bawah tanah sebagai bagian dari pembangunan perkotaan yang berkelanjutan. Biaya infrastruktur bawah tanah ini atau infrastruktur masa depan apa pun di lingkungan perkotaan akan meningkat karena ketidakmampuan untuk merencanakan secara efektif di sekitar infrastruktur yang ada. Peluang penelitian untuk mengembangkan kerangka kerja dan pendekatan manajemen terhadap perencanaan, mendokumentasikan kondisi yang ada, menetapkan persyaratan penggunaan lahan, dan menerbitkan izin untuk penggunaan bawah tanah perkotaan yang disetujui dapat ditemukan di Bab 7.

BAB 3

KONTRIBUSI REKAYASA BAWAH TANAH PADA PERKOTAAN

Dua bab pertama laporan ini membahas atribut umum ruang bawah tanah. Bab ini mengkaji bagaimana penggunaan ruang bawah tanah mendukung keberlanjutan jangka panjang wilayah perkotaan, penelitian tambahan apa yang mungkin diperlukan untuk meningkatkan praktik rekayasa bawah tanah, dan perkembangan apa dalam rekayasa bawah tanah yang akan lebih mendukung keberlanjutan perkotaan. Laporan ini tidak mengembangkan argumen untuk pendekatan pembangunan perkotaan berkelanjutan tertentu; melainkan, laporan ini mengkaji bagaimana bawah tanah dapat mendukung atau berkontribusi pada pendekatan yang ditunjukkan atau disarankan sebagai berkelanjutan dan bagaimana penggunaan bawah tanah secara langsung memengaruhi isu keberlanjutan yang teridentifikasi.

Beberapa aspek utama mengenai keberlanjutan masyarakat perkotaan akan dieksplorasi secara singkat. Bab ini membahas lingkungan perkotaan sebagai sistem dari sistem, dan hubungan terluas antara penggunaan ruang bawah tanah dan elemen penting untuk keberlanjutan perkotaan. Kualitas fisik infrastruktur yang terkait dengan transportasi, tempat tinggal, makanan, air, dan sumber daya material utama yang berkontribusi terhadap keberlanjutan atau membuatnya rentan terhadap bahaya dijelaskan.

Bab selanjutnya berfokus pada hubungan yang lebih langsung dalam hal mempertahankan komunitas yang langgeng dan layak huni serta meningkatkan mitigasi risiko melalui penggunaan fasilitas bawah tanah yang direncanakan dan dirancang dengan tepat. Bab 4, 5, dan 6 membahas kemajuan dalam masalah keselamatan manusia, teknik analitis untuk penilaian biaya siklus hidup fasilitas bawah tanah dan analisis "tiga hal utama" yang lebih luas (kinerja finansial, ekonomi, dan sosial), dan kemajuan teknologi spesifik yang terkait dengan peningkatan keberlanjutan.

3.1 LINGKUNGAN PERKOTAAN SEBAGAI SISTEM DARI SISTEM

Keberlanjutan bergantung pada lebih dari sekadar ketersediaan air bersih, makanan, dan barang-barang material yang cukup. Seiring dengan pertumbuhan wilayah perkotaan, pertumbuhan strategis sistem infrastruktur juga diperlukan untuk memungkinkan penyediaan layanan air dan pembuangan limbah, makanan, energi, barang-barang industri dan komersial, serta informasi yang efisien dan berkelanjutan. Produk atau layanan yang dibuat secara lokal perlu diangkut atau diekspor, barang-barang lainnya perlu diimpor, dan limbah perlu dibuang.

Oleh karena itu, sistem infrastruktur fisik sangat penting bagi sistem perkotaan dan mendukung ekonomi dan kualitas hidup yang berkelanjutan. Bagaimana pertumbuhan populasi perkotaan, perluasan lahan perkotaan, dan fasilitas serta infrastruktur terkaitnya meningkatkan atau menghambat penyediaan bahan dan layanan penting serta penciptaan masyarakat perkotaan yang stabil, berkelanjutan, dan diinginkan secara sosial? Apa peran

bawah tanah? Seperti yang dijelaskan dalam Bab 1 dan 2, bawah tanah sebaiknya dianggap sebagai sumber daya yang dirancang dan dikelola menggunakan pendekatan sistem untuk mencapai solusi yang paling berkelanjutan.

Infrastruktur merupakan kekuatan pembentuk yang substansial dalam pembangunan perkotaan dan regional. Di daerah yang sudah maju, infrastruktur bawah tanah dapat menawarkan salah satu dari sedikit cara yang dapat diterima untuk mendorong atau mendukung pengalihan pembangunan perkotaan ke pola yang lebih berkelanjutan karena infrastruktur pendukung baru dapat ditambahkan secara relatif tanpa mengganggu. Infrastruktur bawah tanah yang terawat dengan baik, tangguh, dan berkinerja memadai sangat penting bagi keberlanjutan kota di masa depan. Akan tetapi, banyak hal yang dapat dilakukan untuk meningkatkan aspek keberlanjutan fasilitas bawah tanah itu sendiri.

Keberlanjutan perkotaan akan lebih mungkin terwujud jika menjadi harapan di antara para perencana dan pengelola perkotaan bahwa lingkungan perkotaan mencakup sumber daya ruang baik di atas maupun di bawah tanah, dan keduanya berkontribusi pada fungsi kota yang sehat. Bab ini membahas beberapa sumber daya perkotaan dan peran potensialnya dalam penghitungan holistik sistem perkotaan; bagian berikut secara khusus menyoroti penggunaan bawah tanah perkotaan tertentu yang sangat berkontribusi pada keberlanjutan perkotaan.

Pemanfaat

Perencanaan keberlanjutan memerlukan pemikiran ke depan mengenai masalah operasi dan pemeliharaan untuk seluruh siklus hidup infrastruktur. Memberikan kemudahan akses untuk pemeliharaan, perbaikan, dan peningkatan merupakan cara untuk memastikan bahwa pekerjaan tersebut dapat diselesaikan dengan biaya yang lebih rendah. Pengalaman dari konstruksi kereta bawah tanah dan pekerjaan bawah tanah besar lainnya telah menyebabkan minat di antara beberapa penyedia utilitas bawah tanah dalam menggabungkan layanan utilitas dalam terowongan utilitas umum yang sering disebut "utilidor" (atau "galeri" di Eropa; lihat Kotak 1.4, Gambar 2 untuk contoh utilidor).

Utilidor menyediakan akses pemeliharaan berkelanjutan ke utilitas tanpa perlu menggali di jalan, dirancang untuk meminimalkan perpindahan bawah permukaan dan pengaruh lain yang dapat menyebabkan kerusakan pada fasilitas yang terkubur dan di atas tanah, dan merupakan penggunaan ruang bawah tanah yang lebih efisien daripada utilitas yang terkubur secara terpisah. Sebuah studi oleh para peneliti di Spanyol menemukan manfaat ekonomi yang jelas dari penempatan layanan di terowongan bersama ketika nilai bawah tanah dimasukkan dalam perhitungan selama pembangunan Jalan Lingkar Barcelona.

Faktanya, terowongan utilitas bersama sering dibangun di Eropa, di mana hak jalan yang sempit dan pengambilan keputusan terpusat yang kuat telah mendukung penggunaannya. Telah terbukti sulit untuk mengembangkan utilitas secara ekstensif di Amerika Serikat. Kendalanya meliputi kebutuhan untuk meninggalkan investasi dalam infrastruktur layanan yang ada, kekhawatiran tentang kewajiban operasional dan risiko

dalam lingkungan utilitas bersama atau yang berlokasi bersama (misalnya, saluran air atau gas di terowongan yang sama dengan saluran listrik), dan masalah administratif yang terkait dengan akses ke saluran utilitas oleh orang lain.

Selain itu, biaya koneksi awal mungkin lebih tinggi daripada biaya untuk utilitas gali dan tempatkan. Masalah operasional seperti risiko dan masalah keamanan untuk utilitas, jika dipasang di utilitas, dapat dielakkan dengan sistem sensor dan keamanan yang lebih baik. Kelayakan, nilai, dan manfaat utilitas dapat dikomunikasikan secara efektif dengan (1) pengembangan skenario yang dapat dilaksanakan untuk fasilitas multi-utilitas yang aman; (2) pengembangan skenario yang dapat dilaksanakan untuk transisi yang efektif dari konfigurasi saat ini; (3) analisis biaya-manfaat siklus hidup yang membandingkan koridor utilitas yang terpisah dan gabungan; dan (4) proyek demonstrasi.

Di Amerika Serikat, utilitas biasanya dibangun sebagai bagian dari pembangunan besar lama dan baru atau perbaikan transportasi bawah tanah (misalnya, Disney World di Orlando, Florida, dengan "kota" layanan bawah tanahnya yang luas dan jaringan terowongan barang Chicago). Jika Amerika Serikat ingin meningkatkan keberlanjutan layanan utilitas perkotaannya dan melestarikan ruang bawah tanah untuk peluang keberlanjutan yang lebih hemat biaya bagi layanan masa depan, maka kebuntuan ini perlu mendapat perhatian baru.

Fasilitas Transportasi Bawah Tanah

Keberlanjutan jangka panjang wilayah perkotaan dipengaruhi secara positif oleh ketersediaan sistem transportasi bawah tanah. Kota-kota seperti Singapura telah diuntungkan oleh rencana induk yang dirancang berdasarkan sistem transportasi (Hulme dan Zhao, 1999). Sistem transportasi bawah tanah yang direncanakan dengan baik cenderung mengurangi perluasan kota, menyelamatkan lanskap dan melindungi keanekaragaman hayati, dan dapat berdampak positif pada penggunaan lahan dan keputusan pembangunan.

Mereka menyediakan transportasi yang aman dan efisien serta mengurangi kebutuhan dan penggunaan mobil, mengurangi kemacetan dan waktu tempuh, yang pada gilirannya mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan emisi. Aset transportasi bawah tanah dapat mengatasi berbagai tantangan terkait pertumbuhan di wilayah perkotaan, tetapi masih banyak tantangan yang harus diatasi (lihat Kotak 3.1). Saat ini, banyak kota memiliki sistem kereta bawah tanah transit perkotaan, jalan arteri dan jalan raya ekspres bawah tanah, dan koridor pergerakan barang khusus yang dipisahkan untuk rel kereta api atau truk. Layanan Kereta Cepat (HSR) yang mencakup komponen di atas dan di bawah tanah umum di Eropa dan Asia.

Setiap sistem memiliki karakteristik unik yang sesuai dengan tujuan dan lokasinya. Semua kemungkinan akan meningkatkan kualitas hidup dan manfaat keberlanjutan jangka panjang bagi pusat kota yang dilayani. Transportasi bawah tanah, seperti yang dijelaskan di bagian berikutnya, dapat berfungsi untuk meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap banyak bencana alam atau buatan manusia termasuk gempa bumi dan tindakan perang

daripada transportasi permukaan. Kotak 3.2 memberikan contoh kinerja infrastruktur transportasi yang melintasi Teluk San Francisco pascagempa bumi Loma Prieta tahun 1989. Berbagai jenis elemen dan sistem transportasi bawah tanah serta perannya dalam pembangunan perkotaan berkelanjutan dijelaskan.

KOTAK 3.1

Tantangan dan Peluang Khusus untuk Sistem Transportasi

Sistem transportasi bawah tanah akan sangat diuntungkan oleh kemajuan teknis seperti yang dibahas dalam laporan ini. Dalam desain dan konstruksi, misalnya, teknologi pelapisan dan konstruksi bawah tanah baru diperlukan untuk mengurangi penggunaan material dan meningkatkan kinerja fasilitas jangka panjang. Namun, sistem transportasi bawah tanah di kota-kota besar biasanya merupakan elemen infrastruktur utama yang sangat penting dalam hal mobilitas perkotaan yang menopang ekonomi dan menyediakan kualitas hidup dan karenanya memiliki kepentingan khusus dalam hal penggunaan ruang bawah tanah.

Karena merupakan investasi publik yang besar dan tunduk pada banyak kendala kebijakan dan pendanaan, sistem transportasi bawah tanah mungkin tidak dirancang, dioperasikan, dan dirawat untuk kontribusi maksimalnya terhadap keberlanjutan perkotaan secara keseluruhan. Pembangunan proyek transportasi bawah tanah utama sering kali memerlukan relokasi utilitas bawah tanah in-situ yang signifikan di sepanjang hak jalan umum. Namun, pekerjaan penggalian besar dan kebutuhan relokasi proyek memberikan peluang utama untuk memperbaiki dan merasionalisasi penyediaan utilitas di suatu area untuk menyediakan pemeliharaan sistem tersebut di masa mendatang dengan lebih mudah.

Meskipun ini merupakan beban tambahan pada proyek transportasi, hal ini dapat memberikan manfaat menyeluruh bagi masyarakat perkotaan dengan menggunakan analisis sistem-dari-sistem daripada analisis proyek per proyek. Lebih jauh lagi, dalam contoh konteks perencanaan, keberlanjutan jangka panjang sistem transportasi bawah tanah ditingkatkan ketika desain sistem memungkinkan fleksibilitas sebanyak mungkin, dengan mempertimbangkan penggunaan di masa mendatang, potensi jalur transportasi tambahan, dan koneksi antarmoda. Hal ini sekali lagi dapat meningkatkan biaya awal tetapi memberikan keberlanjutan jangka panjang yang lebih baik.

Jalan Raya dan Jalan Raya Perkotaan Bawah Tanah

Jalan raya permukaan perkotaan yang kelebihan beban dan padat dapat dipindahkan ke jalur udara atau bawah tanah untuk memperoleh pemisahan tingkat (misalnya, rute transportasi pada beberapa elevasi) dan hak jalan eksklusif. Hal ini dapat mengurangi kepadatan lalu lintas, kebisingan, polusi udara, dan kemacetan di permukaan. Beberapa tingkat transportasi yang disediakan oleh terowongan dapat memungkinkan jalan raya arteri yang tidak berfungsi diganti dengan jalan permukaan yang berfungsi yang

meningkatkan kualitas hidup penduduk lingkungan dan mobilitas transportasi bagi kota.

Hambatan fisik dan kerusakan visual yang mungkin ditimbulkan oleh jalan raya arteri yang ditinggikan dapat dihilangkan. Lingkungan yang berdekatan yang pernah dipisahkan oleh jalan raya mungkin dapat bersatu kembali sebagai sebuah komunitas. Memindahkan lalu lintas ke terowongan juga dapat menghasilkan lingkungan yang lebih cerah dan lebih tenang, peluang penggunaan lahan baru, dan peningkatan nilai properti lingkungan semua indikator lingkungan yang lebih layak huni dan berkelanjutan. Jalan raya dan jalan raya bawah tanah perkotaan biasanya melintasi bagian dalam kota dari portal di setiap ujung yang terhubung ke jaringan jalan layanan yang ada.

Dengan membuat terowongan dalam, terowongan tidak perlu membangun fondasi dan layanan lain yang sudah ada, dan menyisakan ruang yang lebih dekat ke permukaan untuk pemasangan di masa mendatang. Dalam kebanyakan kasus, terowongan yang dibangun di kedalaman akan menjadi yang paling murah di antara solusi bawah tanah alternatif jika analisis biaya siklus hidup disiapkan dan kondisi geologis dipatuhi. Penghalang arus lalu lintas yang lancar dapat dilewati, waktu tempuh dipersingkat, dan emisi karbon dikurangi untuk jarak yang sama yang ditempuh melalui jalan permukaan.

Lebih jauh lagi, pengalihan lalu lintas dari jalan memungkinkan lingkungan yang lebih ramah pejalan kaki di kota. Namun, keputusan untuk membangun jalan bawah tanah, terlepas dari manfaatnya, sering kali diperdebatkan (misalnya di Seattle, Washington; lihat Kotak 3.3). Keputusan untuk melanjutkan sering kali memerlukan suara rakyat dan pertemuan perwakilan kota, kabupaten, negara bagian, dan federal untuk mencapai kesepakatan. Proses ini seringkali memakan waktu dan dapat mengakibatkan peningkatan biaya proyek.

Subway Angkutan Umum

Angkutan umum merupakan bagian penting dari banyak wilayah perkotaan dan bagian integral dari lingkungan perkotaan yang berkelanjutan. Angkutan cepat memfasilitasi pergerakan yang efisien bagi orang-orang dari setiap kelas ekonomi dan kelompok etnis ke dan dari rumah, sekolah, tempat kerja, layanan kesehatan, tempat ibadah, bandara, kegiatan rekreasi, dan fasilitas lain yang tersedia bagi kehidupan perkotaan. Angkutan umum menyediakan mobilitas yang dibutuhkan bagi mereka yang tidak memiliki mobil, dan menghubungkan serta menyatukan lingkungan dan komunitas agar dapat berfungsi lebih lancar dan memanfaatkan layanan masyarakat.

Banyak kota menyediakan angkutan umum dalam bentuk sistem bus. Seiring dengan pertumbuhan populasi antara 1 juta dan 3 juta, wilayah dapat melihat keuntungan dalam angkutan kereta listrik (light rail) yang memungkinkan angkutan yang lebih cepat bagi lebih banyak orang. Sistem tersebut dapat beroperasi di jalan yang digunakan oleh lalu lintas normal, di jalur khusus dengan akses terbatas, dan jalur khusus dengan pemisahan sebidang tanah (misalnya, jalan layang atau bawah tanah seperti yang dikembangkan untuk sistem angkutan Muni di San Francisco, California, dan sistem angkutan MAX di Portland, Oregon).

Sistem angkutan massal yang disebut sistem "rel berat" diperlukan saat populasi meningkat hingga lebih dari 3 juta. Sistem ini dipisahkan berdasarkan tingkatan, sering kali di kereta bawah tanah seperti sistem BART yang dibangun pada tahun 1962 di wilayah Teluk San Francisco, dan Sistem Transit Kota New York, yang dibangun mulai tahun 1900. Angkutan cepat kereta bawah tanah menyediakan transportasi yang aman, ramah lingkungan, cepat, murah, dan nyaman bagi semua orang yang menggunakannya. Telah disebutkan sebelumnya bahwa memilih angkutan kereta bawah tanah karena kenyamanannya yang relatif, penghematan waktu dan uang, atau prediktabilitas perjalanan mengurangi jumlah penumpang di jalan raya.

Penumpang yang menggunakan angkutan cepat setiap hari daripada mengendarai kendaraan pribadi mengurangi jejak karbon mereka secara signifikan, dan dapat memperoleh manfaat kesehatan pribadi melalui meminimalkan stres yang terkait dengan lalu lintas, kecelakaan, dan kemacetan. Dari perspektif regional, stasiun sistem transit regional menarik pembangunan pusat kota komunitas kota kecil karena akses ke area kota menjadi daya tarik utama bagi mereka yang pindah ke wilayah tersebut. Lokasi dan layanan yang mendukung pembangunan yang lebih padat dan kompak di sekitar stasiun transit dibandingkan dengan pembangunan perluasan kota dapat memengaruhi keseluruhan biaya bagi pembayar pajak dalam hal penyediaan layanan penting seperti sekolah, polisi, pemadam kebakaran dan perlindungan EMS, rumah sakit, air, saluran pembuangan, listrik, gas alam, makanan, dan sumber pasokan lainnya, semua atribut yang diperlukan untuk mengembangkan lingkungan kota yang berkelanjutan.

Kemampuan untuk memperbarui dan mengganti komponen sistem kereta bawah tanah seperti saluran, kabel listrik dan serat optik, saluran air, saluran air limbah, komponen sistem ventilasi, penerangan, rambu, eskalator dan lift, dan sistem informasi membuatnya masuk akal untuk mengharapkan layanan terowongan kereta bawah tanah yang bermanfaat selama lebih dari 100 tahun. Terowongan transit yang dibangun pada tahun 1860-an di London masih beroperasi hingga saat ini. Umur komponen bawah tanah yang panjang cenderung mengurangi biaya siklus hidup dan juga mengurangi permintaan akan sumber daya terbarukan dan tak terbarukan. Semua karakteristik ini berkontribusi pada keberlanjutan dan membenarkan pembangunan kereta bawah tanah cepat baru dari sudut pandang analisis siklus hidup.

KOTAK 3.2**Kinerja Infrastruktur Transportasi Pasca Gempa Bumi Loma Prieta, 1989**

Sistem transportasi bawah tanah dapat tetap beroperasi selama, atau segera melanjutkan operasi setelah, kejadian alam yang membahayakan seperti gempa bumi, tornado, petir, dan kabut tebal atau kondisi debu. Menurut tinjauan beberapa studi yang mendokumentasikan kerusakan akibat gempa bumi, terowongan bawah tanah berdiameter besar secara historis mengalami lebih sedikit kerusakan daripada struktur permukaan. Sistem San Francisco Bay Area Rapid Transit (BART) beroperasi melalui

terowongan potong-tutup dan terowongan tambang dan melayani beberapa tujuan termasuk San Francisco dan Oakland, California, melalui terowongan tabung bawah air sepanjang 5,5 kilometer yang terendam di antara kedua kota.

Sistem ini meningkatkan ketahanan bencana untuk wilayah perkotaan ini setelah gempa bumi Loma Prieta pada tahun 1989 dengan memungkinkan ekonomi masyarakat ini terus berfungsi. Gempa bumi Loma Prieta adalah peristiwa berkekuatan 6,9 skala Richter yang menyebabkan kerusakan fisik serius pada infrastruktur lokal termasuk kerusakan pada sambungan, bantalan, dan anggota Jembatan Teluk San Francisco-Oakland, yang memaksa penutupan selama lebih dari sebulan. Bagian jalan raya 5 jalur sepanjang 15 meter jatuh dari dek jalan raya timur atas ke dek barat bawah (lihat Gambar), menewaskan satu orang.

BART melintasi Teluk San Francisco di bawah tanah hampir tepat di bawah alinyemen Jembatan Teluk. Itu ditutup sementara oleh gempa bumi, tetapi tidak ada penumpang yang terluka, dan layanan dilanjutkan dalam waktu setengah hari setelah pemeriksaan kerusakan dan pemulihan daya. Jumlah penumpang BART meningkat pesat dari rata-rata 218.000 penumpang per hari menjadi lebih dari 308.000, dan layanan terus berlanjut sepanjang waktu, tujuh hari seminggu hingga Jembatan Bay dibuka kembali lebih dari sebulan kemudian. Perekonomian Bay Area, meskipun rusak akibat gempa bumi, pulih lebih cepat daripada yang seharusnya terjadi tanpa BART bawah tanah karena sejumlah besar orang dapat berangkat kerja.



Gambar 3.1 Bagian Jembatan Teluk San Francisco-Oakland Yang Ambruk Setelah Gempa Bumi Loma Prieta Tahun 1989. Jembatan Tersebut Ditutup Selama Lebih Dari Sebulan Sementara Terowongan Kereta Bawah Tanah BART Yang Terletak Hampir Tepat Di Bawah Jembatan Tersebut Masih Beroperasi Dalam Waktu Sehari Setelah Gempa Bumi.

Demikian pula, bagian atas jalan raya sepanjang 2 kilometer dari Jembatan Jalan Cypress di wilayah Teluk San Francisco jatuh ke bagian bawah jalan raya, menewaskan 42 orang dan melukai ratusan lainnya.

Rel Barang Bawah Tanah dan Terpisah

Menggabungkan lalu lintas permukaan dan barang biasa, khususnya pergerakan unit peti kemas yang ada di mana-mana, dapat mengakibatkan lalu lintas yang padat, khususnya di kota-kota pelabuhan. Pengemudi mungkin menghadapi antrean panjang yang menunggu kereta barang melewati perlintasan sebidang atau truk dalam antrean panjang yang menunggu melewati persimpangan dengan lampu lalu lintas. Polusi udara yang signifikan dari knalpot kereta api dan truk, serta dari lalu lintas yang menunggu untuk lewat, dapat menurunkan kualitas udara dan berpotensi berdampak negatif pada kualitas hidup dan ekonomi lingkungan sekitar.

Pergerakan barang yang terpisah dari jalan permukaan merupakan bagian dari solusinya. Parit terbuka yang menyediakan ventilasi alami untuk gas buang diesel telah menjadi solusi yang lebih disukai di tempat-tempat seperti California selatan untuk kereta barang yang ditenagai oleh penggerak utama diesel-listrik. Di California bagian selatan, investasi signifikan dalam infrastruktur pemisahan jalan merupakan hasil kerja sama antara pelabuhan, sejumlah kota yang terkena dampak, pemerintah daerah, negara bagian, dan federal, serta rel kereta api. Beberapa masalah lalu lintas dapat diatasi dengan jalan permukaan khusus dan bersinyal atau jalan layang terpisah untuk pergerakan barang dengan truk selama waktu selain jam sibuk.

Terowongan juga dapat digunakan untuk menyediakan jalur khusus atau jalur pilihan untuk pergerakan barang dengan truk. Misalnya, di Miami, Florida, terowongan yang digerakkan oleh mesin bor di bawah Teluk Biscayne sedang dibangun untuk menciptakan koneksi langsung dari Pelabuhan Miami ke jalan raya lokal dan mengurangi lalu lintas di area pusat kota. Di wilayah metropolitan New York yang lebih luas, perencanaan sementara telah dimulai lagi pada terowongan khusus angkutan barang yang akan melewati sebagian New Jersey Timur, Sungai Hudson, Pulau Manhattan, dan sebagian Brooklyn, New York, yang mungkin menyediakan pergerakan kereta barang dan truk antara sekitar New Jersey Turnpike dan Long Island Expressway.

Rencana ambisius tersebut menunjukkan semakin disadarinya bahwa tidak ada cukup luas permukaan untuk memenuhi kebutuhan dan layanan yang dibutuhkan agar tetap kompetitif di pasar global. Terowongan pemisah jalan akan menjadi bagian dari jawabannya, dan manfaat keberlanjutan akan menjadi salah satu manfaat yang dianalisis oleh para perencana untuk membenarkan fasilitas tersebut. Ada minat yang terus-menerus dan berulang pada jaringan pipa bawah tanah untuk mengangkut paket atau barang, misalnya penggunaan jaringan pipa pneumatik yang luas di Paris, Prancis, Wina, Austria, Berlin, Jerman, dan Praha (sekarang Republik Ceko), sejak paruh kedua akhir tahun 1800-

an.

Sistem semacam itu melibatkan pengangkutan barang dalam kapsul, yang digerakkan oleh cairan (pipa kapsul hidrolik) atau gas (pipa kapsul pneumatik) melalui jaringan pipa. Pipa kapsul pneumatik digunakan di bekas Uni Soviet, dan sistem komersial sudah ada di Jepang untuk pengangkutan bahan bangunan, batu kapur, dan komoditas serupa. Sistem lain telah dipelajari di tempat lain di dunia, khususnya di area pelabuhan. Rencana khusus untuk sistem tabung barang AS telah dipelajari tetapi belum dilaksanakan karena persaingan biaya dari moda transportasi barang lain dan berbagai masalah lingkungan.

KOTAK 3.3

Penggantian Jembatan Layang Alaskan Way, Seattle, Washington

Pengalaman terkini di Seattle, Washington, dalam merencanakan penggantian Jembatan Layang Alaskan Way (AWV) yang rusak akibat gempa bumi menggambarkan betapa sulitnya keputusan untuk mengubah rute ke bawah tanah. AWV saat ini adalah jalan tol perkotaan bertingkat dua (lihat Gambar 1 dan 2) yang membentang di sepanjang tepi laut Seattle. Desain dan konstruksinya mirip dengan Jembatan Layang Cypress Street dan Jalan Bebas Embarcadero di Wilayah Teluk San Francisco era 1950-an yang keduanya rusak akibat gempa bumi Loma Prieta tahun 1989. AWV mengalami kerusakan yang tidak dapat diperbaiki akibat gempa bumi Nisqually tahun 2001 (PNSN, 2002) dan sekarang harus diganti.

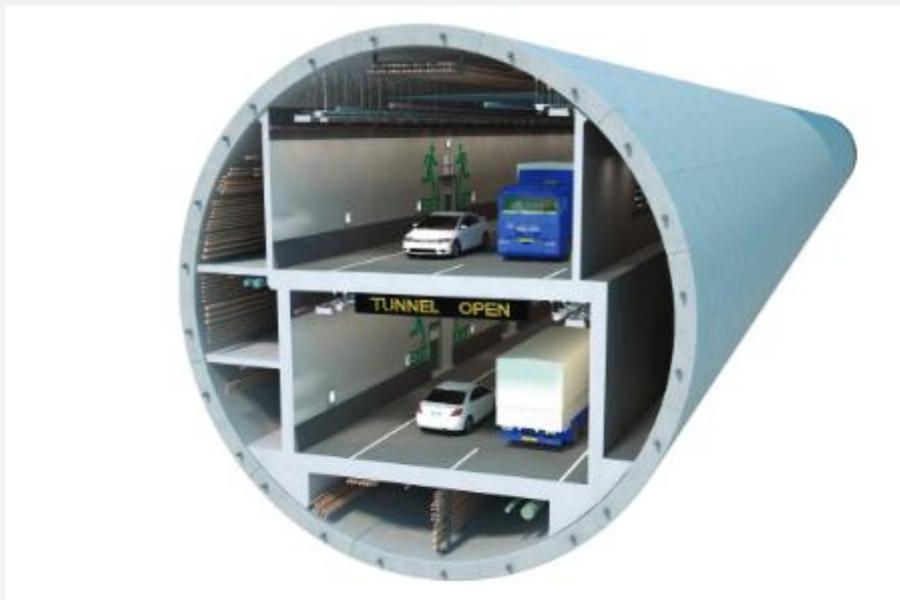
Solusi alternatif mencakup jalan layang dua tingkat yang baru dan lebih lebar pada lintasan yang sama, penggantian jalan layang dengan jalan permukaan yang lebar yang membawa lalu lintas dalam jumlah besar, relokasi jalan raya pada jembatan atau terowongan di atas atau di bawah Elliott Bay, dan alternatif "tidak melakukan apa-apa" yang dimaksudkan untuk membatasi pertumbuhan lalu lintas dan menciptakan permintaan untuk angkutan umum yang lebih baik melalui kemacetan jalan yang terus-menerus dan lebih mengganggu. Alternatif-alternatif tersebut dipelajari dan didiskusikan secara publik. Langkah-langkah pemungutan suara untuk menentukan solusi yang lebih disukai diperdebatkan secara intens di tingkat lokal, kota, dan negara bagian.



Gambar 3.2 Alaskan Way Viaduct Di Seattle, Washington Adalah Jalan Tol Bertingkat Dua Di Sepanjang Tepi Laut Kota.



Gambar 3.3 (Kiri) Pemandangan Udara Tepi Laut Seattle, Washington, Dan Jembatan Layang Alaskan Way Yang Menonjol Dan (Kanan) Konsep Awal Usulan Jalan Alaskan Way Baru Di Area Yang Sama. Konsep Baru Ini Meningkatkan Akses Pejalan Kaki Ke Tepi Laut Dan Meningkatkan Akses Umum Ke Perusahaan Komersial Yang Berdekatan.



Gambar 3.4 Konsep Awal Usulan Terowongan State Road 99. Sumber: WSDOT.

Pada akhirnya, keputusan diambil untuk mengebor jalan tol bawah tanah perkotaan, menyingkirkan jalan layang yang rusak, dan memulihkan tepi laut yang indah dan dapat diakses. Terowongan jalan pintas empat jalur sepanjang 3,2 kilometer akan ditempatkan cukup dalam di bawah kota untuk menghindari terowongan kereta api Burlington Northern Santa Fe yang berusia seabad yang digunakan setiap hari, saluran pembuangan interseptor besar, dan fondasi bangunan yang ada. Seattle akan memulihkan pemandangan Elliott Bay, Puget Sound, dan pegunungan saat jalan layang tersebut disingkirkan.

Gangguan besar pada pola lalu lintas menuju dan melalui pusat kota Seattle akan dihindari. Jalan raya dengan lanskap di tepi laut direncanakan, mirip dengan yang dibangun di San Francisco setelah kegagalan Embarcadero Freeway. Dampak negatif dari jembatan layang lama terhadap kota tidak sepenuhnya disadari hingga perdebatan untuk penggantian terjadi. Para pendukung rencana tersebut berpendapat bahwa pusat kota Seattle akan diuntungkan dengan ruang terbuka dan zona hijau yang lebih baik.

KOTAK 3.4

Pemisahan Muatan Berdasarkan Tingkat di Wilayah Los Angeles Raya

Di wilayah Los Angeles Raya, Pelabuhan Los Angeles dan Long Beach telah berkembang menjadi, jika digabungkan, terminal peti kemas terbesar di negara ini. Pelabuhan-pelabuhan tersebut menyediakan gerbang utama untuk barang-barang yang dikontainerkan ke dalam dan ke luar Asia. Moda transportasi utama peti kemas dari pelabuhan ke seluruh wilayah negara adalah kereta api.

Tiga jalur kereta api utama Southern Pacific, Union Pacific, dan Burlington Northern Santa Fe (BNSE) memiliki jalur ke pelabuhan dari persimpangan jalur nasional mereka. Secara historis, jalur kereta api memiliki hak jalan di atas lalu lintas yang melintas, dan begitu banyak pergerakan barang di jalur yang datar menyebabkan lalu lintas di sebagian besar wilayah selatan Los Angeles County terhenti beberapa kali setiap hari karena kereta barang sepanjang 200 gerbong bergerak perlahan melalui tiga jaringan rel terpisah untuk bergabung dengan jaringan jalur nasional mereka di sebelah timur wilayah perkotaan.

Kekhawatiran atas kemacetan dan polusi udara yang terkait menyebabkan pengembangan Proyek Koridor Alameda, sebuah rencana untuk membangun jalur kereta barang ekspres sepanjang 32 kilometer (20 mil) termasuk parit terbuka dengan penyangga atas sepanjang 16 kilometer (10 mil), lebar 15 meter dan kedalaman 10 meter dengan ruang di lantainya untuk tiga jalur dan jalan layanan yang disebut "Parit Tengah Koridor." Otoritas Transportasi Koridor Alameda (ACTA) diusulkan, diorganisasikan, dan disahkan oleh undang-undang. ACTA memiliki kewenangan untuk mengumpulkan dana, menerima hibah pemerintah, memiliki dan menerima properti, mengontrak konstruksi

dan operasi, dan melakukan hal-hal yang diperlukan untuk melaksanakan rencana tersebut.

Pada tahun 1994, dengan pembelian jalur dan hak jalan Koridor Alameda milik Southern Pacific Railroad, proyek koridor dimulai dengan sungguh-sungguh. Kedalaman 10 meter (33 kaki) dari Parit Koridor Tengah dengan mudah menyediakan kemampuan BNSF Railway dan Union Pacific Railroad, melalui hak lintasan mereka, untuk memindahkan gerbong datar kereta barang kontainer bertumpuk ganda, 200 gerbong sekaligus, di kedua arah, pada kecepatan 40 mph dari pelabuhan ke koneksi sistem kereta api nasional masing-masing. Operasi pertama dimulai pada tahun 2002, dan lebih dari 200 perlintasan kereta api sebidang tempat mobil dan truk sebelumnya menunggu kereta lewat telah diganti dengan jembatan yang melintasi parit, memulihkan sirkulasi lalu lintas dan menjaga lingkungan sekitar tetap terhubung.

Hasilnya termasuk manfaat keberlanjutan bagi wilayah tersebut, dan peningkatan operasional untuk pelabuhan dan rel kereta api, memulihkan sebagian keunggulan kompetitif mereka dengan mengurangi waktu pengiriman barang. Pergerakan puncak dicapai dengan 60 pergerakan kereta per hari pada bulan Oktober 2006. Manfaat bagi kualitas udara berasal dari rute kereta api yang lebih langsung yang ditempuh dengan kecepatan lebih tinggi, pengurangan emisi kendaraan di perlintasan sebidang, dan peningkatan jumlah kargo yang dapat diangkut dengan kereta api alih-alih truk. ACTA sedang merancang dan akan segera membangun proyek Alameda Corridor East, dengan desain parit yang lebih kuat dan proyek konstruksi senilai Rp. 5 Miliar untuk memisahkan kereta barang yang panjang dari perlintasan sebidang di seluruh bagian kota San Gabriel.



Gambar 3.5 Kereta Kontainer Dari Jalur Angkutan Barang Koridor Alameda Di California. Kereta Berjalan Di Parit Terbuka Yang Menyediakan Ventilasi Untuk Mesin Dan Pemisahan Tingkat Untuk Lalu Lintas Kontainer.

Kereta Cepat

Manfaat keberlanjutan yang lebih luas dapat diperoleh ketika sistem transportasi kereta regional bersaing dengan maskapai penerbangan dalam hal waktu tempuh dan biaya. Kereta cepat (HSR), misalnya, dapat mengangkut banyak orang dalam jarak jauh dengan jejak karbon yang jauh lebih kecil. Sistem HSR beroperasi di Jepang, Prancis, Jerman, Italia, Tiongkok, dan Taiwan, dan mengakomodasi perjalanan pulang-pergi dari rumah ke kantor dengan menyediakan transportasi jarak jauh dari satu titik ke titik lain dengan jadwal yang dapat diandalkan.

Di Amerika Serikat, pemilih California meloloskan penerbitan obligasi pada tahun 2008 yang memungkinkan pembangunan HSR dari Los Angeles ke San Francisco (lihat Kotak 3.5). HSR biasanya direncanakan dengan tingkat vertikal tidak lebih dari 1,0 hingga 1,5 persen untuk mempertahankan kecepatan maksimum, dan kurva vertikal dan horizontal radius sangat panjang untuk mengakomodasi kecepatan tanah tinggi hingga 220 mph.² Tingkat yang lebih tinggi dan radius belokan yang lebih kecil dapat diakomodasi dengan teknologi yang umum digunakan, misalnya tingkat 3,5 hingga 4,0 persen pada beberapa jalur HSR di Eropa, tetapi kecepatannya mungkin terganggu.

Kecepatan ini mengharuskan hak jalan menjadi eksklusif dan dilindungi dari akses ke kendaraan lain, orang, atau hewan besar, dan untuk mencapai HSR tersebut memanfaatkan jembatan layang, parit terbuka, dan terowongan. Ketika HSR mendekati kota tujuan, ia melambat dan menyelip di bawah tanah untuk menembus pusat kota di bawah infrastruktur yang ada. Satu atau lebih ruang bawah tanah besar terletak di bawah pusat kota untuk menampung stasiun, fasilitas pendukung, dan personel yang diperlukan untuk mengirimkan produk layanan. Sistem pengiriman vertikal mengangkat penumpang dan barang bawaan ke permukaan jalan. Namun, HSR sangat mahal dan sering kali disubsidi.

KOTAK 3.5

Kereta Cepat di Amerika Serikat: Contoh California

Kereta cepat (HSR) mungkin akan menjadi kenyataan di Amerika Serikat dalam dua dekade mendatang. HSR dapat menjadi layak secara ekonomi di antara wilayah metropolitan utama yang berjarak 160-800 kilometer, dengan jumlah penduduk yang cukup (50.000 jiwa dan lebih) dan produktivitas ekonomi serta pasar perjalanan yang nyata. Dukungan, pendanaan, dan pembiayaan negara bagian dan federal perlu disertai dengan minat lokal dalam layanan HSR.

Perencanaan, pernyataan dampak lingkungan dan langkah-langkah mitigasi, perolehan hak jalan, dan desain serta komitmen terhadap upaya konstruksi akan menjadi signifikan, dan investigasi serta laporan teknik, geoteknik, historis, dan arkeologi akan menjadi penting untuk pengembangan proyek yang tepat waktu. Banyak pekerjaan investigasi dan analisis ilmu bumi dan seismik akan diperlukan untuk mendukung solusi desain, terutama mengingat kebutuhan untuk bertahan dan tetap beroperasi setelah peristiwa seismik yang signifikan.

Pada tahun 2008, pemilih California meloloskan obligasi senilai \$10 miliar untuk

memungkinkan pembangunan sistem HSR antara Los Angeles dan San Francisco, California, yang pada akhirnya akan diperpanjang ke selatan hingga San Diego dan ke utara hingga Sacramento. Sistem ini berada pada tahap awal desain konseptual, mengerjakan desain alternatif, bagian demi bagian, dan mengajukan laporan dampak lingkungan negara bagian. Total panjang lintasan diperkirakan mencapai 2.775 kilometer, dengan sebagian besar jalur akan berupa dua jalur.

Direncanakan terowongan sepanjang antara 160 dan 200 kilometer lintasan. Stasiun San Francisco dan Los Angeles akan dicapai melalui terowongan dalam, yang akan mengantarkan penumpang ke Terminal Transbay di San Francisco dan ke Stasiun Union di Los Angeles. Desain terowongan sedang dikembangkan untuk kecepatan kereta 350 kilometer per jam (217 mil per jam). Untuk menyediakan hak jalan yang dibutuhkan di daerah berpenduduk lainnya, penggunaan signifikan sistem struktur kotak beton bertulang terbuka, terbuka, dan bertulang untuk dua jalur operasi dan jalan layanan sedang dipertimbangkan. Penampang melintang serupa dengan yang digunakan pada Proyek Koridor Alameda.

Perumahan

Tempat tinggal di daerah perkotaan di Amerika Serikat berkisar dari pembangunan rumah keluarga tunggal dengan kepadatan rendah hingga properti apartemen dan kondominium dengan kepadatan tinggi. Pembangunan dengan kepadatan rendah menawarkan kemungkinan keberlanjutan yang mandiri dalam hal pengumpulan energi di lokasi, produksi pangan, dan pengelolaan lokal serta daur ulang beberapa limbah yang dihasilkan oleh penghuninya.

Namun, pengeluaran energi untuk transportasi di daerah perkotaan dengan kepadatan rendah jauh melebihi pengeluaran di daerah perkotaan dengan kepadatan tinggi karena jarak tempuh yang lebih jauh dan terbatasnya pilihan transportasi umum. Menyediakan layanan terpusat untuk pembangunan dengan kepadatan rendah memerlukan peningkatan durasi layanan utilitas dibandingkan dengan populasi yang sama yang dilayani di daerah dengan kepadatan tinggi. Perumahan dengan kepadatan tinggi meningkatkan ketergantungan penghuni pada layanan terpusat, tetapi meningkatkan pilihan untuk gaya hidup perkotaan yang tidak berbasis mobil, karena transportasi umum dapat disediakan dengan lebih ekonomis dan peluang belanja dasar dapat dicapai dengan berjalan kaki bagi banyak penduduk.

Tren pembangunan perkotaan di Amerika Serikat menunjukkan peningkatan berkelanjutan dalam perluasan kota, tetapi juga tren peningkatan kepadatan populasi di pusat kota, yang sebagian dimotivasi oleh keinginan untuk pengalaman hidup yang lebih urban tanpa perjalanan panjang dan mahal dengan mobil. Kebanyakan orang tidak memilih untuk tinggal di bawah tanah. Penggunaan bawah tanah perkotaan yang terkait dengan perumahan adalah dalam bentuk layanan utilitas dan transportasi bagi penduduk,

penyimpanan, atau ruang hidup yang diperluas (misalnya, ruang bawah tanah).

Dalam pembangunan perumahan sub-perkotaan dan pedesaan dengan kepadatan rendah, beberapa struktur yang ditutupi tanah atau berbunga tanah telah dibangun karena atribut ekologis, isolasi, dan energinya, tetapi biaya awal, masalah pengendalian kelembaban, penerimaan, dan masalah penjualan kembali membatasi pembangunannya yang meluas.



Gambar 3.6 Rumah Yang Terlindung Dari Tanah Sebagian Berada Di Bawah Tanah, Sehingga Lebih Kuat Dan Hemat Energi.

Fasilitas Komersial, Industri, dan Kelembagaan Perkotaan

Kawasan perkotaan yang berkelanjutan harus menyediakan infrastruktur komersial, industri, dan kelembagaan yang diperlukan untuk mendukung dan mengelola ekonomi yang layak, menyediakan lapangan kerja, dan memberikan dukungan termasuk pendidikan dan layanan sosial. Hubungan antara kepadatan perkotaan dan harga tanah cenderung menciptakan pasar untuk bangunan komersial dan kelembagaan yang besar, bertingkat, di pusat-pusat kepadatan tinggi wilayah perkotaan, dan bangunan yang lebih rendah di wilayah perkotaan dan pinggiran kota di sekitarnya.

Seperti yang dibahas di tempat lain dalam laporan ini, dalam keadaan tertentu, mungkin diinginkan untuk menempatkan berbagai jenis fasilitas komersial, industri, dan kelembagaan di bawah tanah. Namun, ini bukan satu-satunya penggunaan bawah tanah yang penting di pusat kota. Peningkatan ukuran dan kepadatan bangunan di pusat kota memerlukan peningkatan kapasitas utilitas perkotaan dan layanan transportasi, baik di pusat kota maupun di wilayah pinggiran yang terhubung secara sosial dan ekonomi.

Meningkatnya ketergantungan pada sistem tersebut berarti bahwa sistem tersebut harus kuat dan andal. Bawah tanah dapat menawarkan perlindungan bagi sistem ini, menjaganya tetap dekat dengan populasi yang dilayaninya, dan memungkinkan penyediaan layanan jalur kehidupan penting dan respons darurat semuanya sambil melestarikan real

estat di atas tanah untuk penggunaan lain.

Produksi dan Distribusi Pangan Berkelanjutan

Lahan pertanian utama sedang ditutupi oleh pembangunan pinggiran kota berdensitas rendah di banyak bagian Amerika Serikat. Ada kecenderungan historis bagi populasi untuk terkonsentrasi di daerah dengan potensi pertanian, perdagangan, atau transportasi yang baik, sering kali di sepanjang sungai atau garis pantai. Oleh karena itu, ketika kota berkembang, mereka sering kali menyebar keluar dari pusat populasi dan menggantikan lahan pertanian yang baik.

Banyak infrastruktur dan praktik perpajakan yang ada sebenarnya mendorong perluasan kota dengan mendukung pembangunan infrastruktur regional baru yang dibutuhkan untuk melayani daerah pinggiran kota yang berkembang. Kekuatan pasar yang mendasari konversi lahan pertanian menjadi lahan yang dikembangkan merupakan masalah jangka panjang yang penting yang berpotensi berdampak pada biaya, ketersediaan, dan dampak pasokan pangan.

Meninggalkan lahan pertanian yang baik di dekat pasar dan mengembangkan lahan pertanian yang lebih buruk di tempat yang lebih jauh harus diimbangi dengan peningkatan efisiensi jika keberlanjutan regional ingin dicapai. Menempatkan fasilitas di bawah tanah mengurangi klaim atas lahan permukaan, yang dapat berdampak pada pelestarian lahan pertanian. Perencanaan perkotaan holistik yang cermat dan penempatan fasilitas bawah tanah dapat berfungsi untuk mengarahkan pertumbuhan perkotaan dengan cara yang paling berkelanjutan.

Perencanaan holistik tidak hanya mempertimbangkan bagaimana lahan pertanian yang produktif dapat dilestarikan, tetapi juga bagaimana makanan dibuat mudah diakses oleh penduduk perkotaan melalui infrastruktur transportasi, fasilitas penyimpanan dengan suhu terkontrol, sarana distribusi dan penjualan, dan energi yang diperlukan untuk mengoperasikan setiap bagian dari rantai pengiriman/penyimpanan.

Manfaat keberlanjutan maksimum tercapai jika semua persyaratan infrastruktur ini dianggap sebagai bagian dari keseluruhan sistem perkotaan. Fasilitas semacam itu tidak harus berada di bawah tanah, tetapi fasilitas bawah tanah memang memberikan beberapa keuntungan termal yang melekat dalam hal penyimpanan dan pergudangan makanan. Gudang dan gerai makanan eceran, misalnya, biasanya merupakan fasilitas tanpa jendela yang tidak perlu menempati permukaan, terutama ketika ruang permukaan terbatas.

Pelestarian dan Distribusi Sumber Daya Air

Air sangat penting bagi kelangsungan hidup manusia, dan hilangnya pasokan air yang higienis memengaruhi kelangsungan hidup dan dapat menyebabkan penyebaran penyakit lebih cepat daripada hilangnya pasokan makanan. Daerah perkotaan biasanya mengambil air dari air permukaan (sungai, danau, dan waduk) atau sumber air tanah. Sumber daya air sebagian besar dikendalikan oleh siklus hidrologi, tetapi dapat rusak oleh praktik yang buruk terkait dengan pengembangan lahan.

Seiring dengan pertumbuhan daerah perkotaan dan pasokan air permukaan dan air

tanah yang andal dan higienis tidak lagi memadai untuk memenuhi permintaan, penggunaan air yang efisien, penggunaan kembali air "abu-abu" (air limbah dari kegiatan domestik seperti mandi dan mencuci) dan air "hitam" (limbah), dan penciptaan pasokan air baru menjadi lebih penting. Kota-kota, terutama yang berada di wilayah kering, terpaksa mencari pasokan air yang semakin jauh atau lebih dalam seiring dengan pertumbuhan populasi perkotaan dan peningkatan permintaan air.

Infrastruktur pasokan air yang menua atau tidak terawat dengan baik membuat pasokan air perkotaan rentan terhadap kebocoran³ dan gangguan. Terdapat pula persaingan yang semakin ketat untuk mendapatkan air antara wilayah perkotaan dan wilayah pertanian tempat irigasi dilakukan dalam skala luas. Jika dipikirkan secara holistik, ekspor produk pertanian dari suatu wilayah dapat dianggap sebagai hilangnya sumber daya air meskipun hal itu dapat menjadi keuntungan bagi ekonomi regional. Keberlanjutan perkotaan jangka panjang menyiratkan bahwa wilayah perkotaan telah menyeimbangkan kemungkinan pasokan airnya. Jika air tanah merupakan sumber daya air yang penting, pasokan air yang berkelanjutan tidak akan terkuras (misalnya, karena ekstraksi berlebihan), tercemar, atau dialihkan dengan cara yang merugikan.

Aktivitas konstruksi dapat menghasilkan limpasan dengan sedimen dan polutan, seperti patogen dan logam, yang dapat berdampak negatif pada kualitas atau kuantitas air. Praktik pertanian juga dapat berdampak jangka panjang pada kualitas air dan lingkungan regional. Misalnya, peningkatan salinitas air permukaan dan air tanah yang disebabkan oleh penguapan dan pelarutan dan perubahan habitat flora dan fauna yang menyertainya, dapat menjadi akibat langsung dari praktik penggunaan air.

Pengelolaan sumber daya air bawah tanah yang baik dapat mencakup penggunaan air bawah tanah untuk pembangunan perkotaan karena lanskap alam yang lebih alami dapat dilestarikan untuk pengisian ulang air tanah. Fasilitas distribusi air dapat ditempatkan di bawah tanah, yang memungkinkan lahan dikembangkan dengan cara yang meningkatkan kualitas hidup di kota-kota yang padat.

Namun, analisis yang cermat serta pendekatan konstruksi dan operasi diperlukan untuk menghindari perubahan yang merugikan pada tingkat air tanah, pola aliran, dan polusi. Polusi air tanah dapat menjadi masalah besar; warisan polusi dari tangki penyimpanan bensin bawah tanah di stasiun pengisian bahan bakar merupakan contoh yang dikenal baik, seperti halnya pembersihan superfund di lokasi polusi industri utama.

KOTAK 3.6

Aliran Air Tanah di Bawah Tanah Duisburg (Jerman)

Stasiun trem bawah tanah di Duisburg, Jerman, dirancang untuk perluasan lalu lintas di masa mendatang dengan dua tingkat peron dan pergantian lintas peron di setiap arah. Pada tahun 2000, perpanjangan terowongan Stadtbahn sepanjang 3,6 kilometer dari utara di bawah sungai Ruhr ke Meiderich dibuka. Ketika jalur Duisburg dibangun, dinding lumpur (diafragma) terbawa ke lapisan tanah liat aquaclude (lapisan kedap air)

dan akan secara permanen menghambat aliran air ke utara di bawah kota, yang menyebabkan penumpukan permukaan air di sisi hulu (selatan) dan penurunan permukaan air di sisi hilir (utara).

Potensi perubahan kondisi air tanah ini tidak dapat diterima. Pemerintah Kota Duisburg dan kontraktor utama merancang sistem yang kedap air selama konstruksi dan kemudian dapat ditembus air setelah konstruksi. Bubur bentonit (tanah liat) yang padat akan mengisi dan menyangga sisi-sisi parit hingga beton cor di tempat atau panel beton menggantikannya. Celah sekitar 1,3 meter dibangun di antara panel dinding diafragma kedap air cor di tempat sepanjang 5,4 meter. Celah-celah tersebut dibekukan sebelum penggalian untuk dukungan tanah yang diperlukan, sehingga menciptakan penghalang kedap air. Pipa pembeku dilepas saat konstruksi selesai dan bubur mencair, sehingga air tanah dapat mengalir di bawah terowongan.

Dalam keadaan ini, masalah di luar konstruksi dipertimbangkan, dan solusi untuk masalah yang berpotensi serius diterapkan. Namun, contoh ini menggambarkan masalah berskala besar yang berpotensi terjadi selama konstruksi bawah permukaan tanpa kepekaan yang tepat terhadap dampak desain, konstruksi, dan operasi bawah tanah pada seluruh sistem perkotaan.

Sumber Daya Material Utama

Pemanfaatan sumber daya tak terbarukan secara berkelanjutan tampaknya kontradiktif, tetapi dalam praktiknya, pemanfaatan berkelanjutan dapat dianggap sebagai pertanyaan tentang laju pemanfaatan sumber daya dalam skala waktu yang bermakna. Sumber daya material utama yang berasal dari material bumi, dalam pembahasan ini, terbagi dalam kategori sumber energi cair dan gas (terutama minyak dan gas), sumber energi dalam bentuk padat (misalnya, batu bara, serpih minyak, pasir tar, kayu, dan gambut), mineral industri (misalnya, bijih besi dan bauksit), mineral strategis bernilai tinggi atau penting (misalnya, emas, uranium, unsur tanah jarang), dan material konstruksi (misalnya, kerikil, pasir, batu bangunan, semen Portland, dan tanah liat berkualitas bata).

Pertimbangan tentang saling ketergantungan sumber energi dan mineral, cadangan yang tersedia, masalah strategis, dan dampak lingkungan berada di luar cakupan dokumen ini. Namun, isu-isu yang muncul dalam interaksi antara pembangunan perkotaan, energi dan ekstraksi mineral, serta penggunaan ruang bawah tanah perkotaan dibenarkan untuk dibahas dalam laporan ini, dan uraian singkat dan umum dari beberapa isu diberikan. Perkiraan bervariasi untuk berapa lama cadangan minyak, gas, dan energi dunia lainnya akan bertahan mengingat tingkat konsumsi saat ini.

Tingkat penggunaan dan tingkat aksesibilitas cadangan yang terbukti sebagian bergantung pada harga satuan sumber daya. Minyak dan gas merupakan bahan baku penting bagi industri plastik dan kimia, yang mempersulit interaksi harga dan kebijakan. Ketika alternatif tersedia, mungkin ada insentif yang lebih kuat untuk beralih ke sumber

daya alternatif. Energi angin, energi surya (misalnya, tenaga termal, pemanas surya pasif, dan energi listrik fotovoltaik), biomassa (misalnya, sumber bahan bakar hidrokarbon yang dapat diisi ulang dengan cepat dan pembakaran langsung untuk pembangkitan tenaga listrik), panas bumi (baik aplikasi tenaga batu panas maupun sistem pertukaran panas yang terhubung ke tanah), dan sistem penangkapan energi gelombang merupakan beberapa opsi yang paling sering dibahas.

Mempertimbangkan opsi-opsi ini dalam jangka panjang sangat penting dalam pembangunan perkotaan, termasuk menyediakan sarana untuk menanggapi permintaan energi yang terus meningkat seiring dengan perubahan sumber energi dan teknologi. Mineral industri mencakup berbagai jenis bijih dan metode ekstraksi. Sebagian besar pasar sensitif terhadap harga, dan banyak bijih industri ditambang di luar Amerika Serikat. Globalisasi semacam itu telah mengakibatkan penutupan banyak tambang di AS dan, akibatnya, lebih sedikit opsi untuk mendidik insinyur pertambangan di Amerika Serikat (lihat Bab 7 untuk pembahasan tambahan tentang topik ini). Pengeluaran sumber daya yang lebih besar untuk mengekstrak mineral dengan kepentingan strategis yang tinggi dapat dibenarkan, tetapi sumber dalam negeri sering kali diabaikan demi sumber luar negeri yang lebih murah.

Bahan bangunan sebagian besar dibatasi untuk ekstraksi, transportasi, dan penggunaan lokal karena potensinya yang besar dan harga yang rendah. Namun, bahan bangunan penting untuk pembangunan infrastruktur dan pembangunan perkotaan. Ketersediaan lokal yang buruk dapat meningkatkan biaya konstruksi secara signifikan dan menghambat pembangunan. Sumber daya alam yang penting mungkin secara bertahap menjadi tidak dapat diakses sebagai akibat dari pembangunan perkotaan pada dasarnya menjadi terkurung di bawah wilayah perkotaan yang meluas. Teknologi baru mungkin diperlukan untuk ekstraksi yang berhasil dan aman di wilayah yang sudah dikembangkan.

Misalnya, sumber daya agregat lokal sering kali diperoleh dari lubang kerikil terbuka atau tambang batu terbuka di dekatnya. Ketika wilayah perkotaan merambah sumber daya tersebut, penggalian terbuka menjadi gangguan yang semakin meningkat berupa kebisingan, debu, getaran, persaingan untuk kapasitas transportasi jalan, dan gangguan lainnya. Peningkatan nilai tanah juga dapat mendorong penjualan tanah untuk pembangunan. Alternatif untuk meninggalkan sumber daya tambang batu adalah perubahan ke pemulihan sumber daya melalui penambangan bawah tanah.

Dengan kombinasi yang tepat antara kualitas batuan dan kondisi ekonomi, pasokan agregat dapat dipertahankan dan ruang bawah tanah yang baru dibuat di gua-gua besar yang ditambang dapat memberikan suhu alami yang stabil dan tingkat pemisahan yang tinggi dari penggunaan perkotaan atau rekreasi lainnya di permukaan tanah di atasnya. Area Kansas City adalah contoh utama dari apa yang dapat dikembangkan. Sekitar dua pertiga dari ruang industri di area Kansas City terletak di gua-gua batu kapur besar yang ditambang.

Ruang-ruang tambang lainnya di seluruh dunia telah digunakan sebagai fasilitas

untuk menyimpan segala sesuatu mulai dari arsip kertas dan elektronik; energi, limbah, dan produk pertanian; makanan beku; dan udara bertekanan. Ruang-ruang tersebut juga telah digunakan sebagai museum dan fasilitas pariwisata, fasilitas olahraga, fasilitas pendidikan, rumah sakit, laboratorium, dan untuk berbagai keperluan ritel, kantor, dan manufaktur. Tentu saja, penambangan tersebut harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan stabilitas jangka panjang dari permukaan dan ruang bawah tanah.

Ada banyak contoh di seluruh dunia tentang kota-kota yang tumbuh di atas bekas tambang yang tidak digali dengan mempertimbangkan stabilitas jangka panjang. Tambang semacam itu dapat menimbulkan bahaya keruntuhan dan penurunan tanah bagi pembangunan permukaan, serta menyediakan jalur degradasi air tanah di suatu daerah melalui pencucian bahan kimia berbahaya dari bekas tambang.

KOTAK 3.7

Pusat Perdagangan Bawah Tanah: Mengubah Penggalian Tambang Menjadi Sumber Daya Komersial Baru

Pengembang di lokasi AS seperti Lawrence County, Pennsylvania, dan Kansas City, Missouri, telah mengubah penggalian bawah tanah mereka menjadi gudang, kantor, pabrik, dan ruang pendidikan. Penambangan batu kapur dimulai di Kansas City pada akhir tahun 1800-an. Pada pertengahan tahun 1900-an, pemilik tambang secara strategis menggali untuk memanfaatkan ruang yang tersisa. "SubTropolis" mencakup sekitar 7,62 juta meter persegi ruang yang dapat disewa. Pada tahun 2010, 55 bisnis berlokasi di fasilitas bawah tanah yang mencakup jaringan rel kereta sepanjang 3,2 kilometer dan jalan beraspal sepanjang 9,7 kilometer.

Suhu bawah tanah yang konstan menghasilkan penghematan 50 hingga 70 persen dalam total biaya energi. Tidak ada biaya pemanas yang dikeluarkan di musim dingin, dan sangat sedikit energi yang dibutuhkan untuk pendinginan dan pengendalian kelembapan di musim panas. Penggunaan ruang semakin beragam karena perusahaan mengembangkan pusat data seluas 61.000 meter persegi dengan sistem daya dan pendinginan redundan serta perlindungan dari bencana alam.

Pada tahun 1991, fasilitas tersebut mengalami kebakaran besar yang sulit dikendalikan yang berlangsung selama berminggu-minggu di area penyimpanan yang besar meskipun petugas pemadam kebakaran berupaya mengendalikannya. Kebakaran di bawah tanah terlalu berbahaya untuk dipadamkan langsung oleh petugas pemadam kebakaran, dan tidak ada sistem pencegah kebakaran tetap seperti alat penyiram yang tersedia saat itu. Senyawa pembersih, pestisida, barang-barang kertas, dan minyak goreng berkontribusi terhadap kebakaran yang mencapai suhu 1.100°C (2.000°F).

Masalah serupa ditemukan di fasilitas bawah tanah lain yang terletak di Louisville, Kentucky. Akibat kebakaran tersebut, National Fire Protection Association membentuk Komite Teknis Ruang Bawah Tanah, dan standar perlindungan kebakaran baru dikembangkan terkait jarak dan jumlah pintu keluar, ventilasi, komunikasi di bawah

tanah, dan penunjuk jalan bawah tanah. Sejak saat itu, Kansas City telah mengadopsi bahasa keselamatan baru ke dalam kode untuk ruang bawah tanah yang menetapkan persyaratan keselamatan minimum. SubTropolis dan fasilitas bawah tanah lainnya kini menyertakan sistem pencegah kebakaran dan praktik keselamatan.



Gambar 3.7 Ruang Gudang Bawah Tanah Di Gua Batu Kapur Yang Ditambang Sekitar 100 Kaki Di Bawah Kansas. Jalan Dan Fasilitas Dapat Menampung Lalu Lintas Truk Gandeng.

Pelestarian Lingkungan Alam dan Perkotaan Lokal

Selain memiliki makanan, air, tempat tinggal, ekonomi yang layak, dan pasokan sumber daya utama, lingkungan perkotaan yang berkelanjutan mengharuskan proses alami dipelihara secara memadai untuk menjaga keseimbangan ekologis dalam jangka panjang. Lingkungan perkotaan yang berkelanjutan dan sehat pada dasarnya terkait dengan lingkungan alam yang berkelanjutan dan sehat. Lingkungan alam yang memburuk dapat berdampak langsung dan merugikan pada pasokan makanan dan air, dan pada akhirnya menurunkan kualitas hidup dan kesehatan ke tingkat yang tidak dapat diterima.

Parameter lingkungan utama untuk kualitas hidup perkotaan yang berkelanjutan meliputi standar kualitas udara dan air yang dipertimbangkan dengan cermat, pengendalian kebisingan, serta standar keselamatan dan sanitasi. Standar hidup dasar bahkan di lingkungan termiskin perlu dipenuhi agar sistem perkotaan secara keseluruhan dapat berkelanjutan. Bercita-cita melampaui tingkat dasar pelestarian lingkungan berarti menciptakan lingkungan perkotaan yang dihargai oleh semua warga negara dan yang menawarkan berbagai peluang sosial, budaya, dan rekreasi dengan akses mudah ke lingkungan alam.

Seperti yang telah dibahas, fasilitas bawah tanah dapat memiliki banyak dampak khusus pada pelestarian lingkungan permukaan di lokasi fasilitas, atau di sepanjang jaringan transportasi. Secara umum, menempatkan fasilitas di bawah tanah memungkinkan pelestarian lebih banyak ruang alami untuk kepentingan masyarakat. Konstruksi bawah tanah dibandingkan dengan konstruksi permukaan atau layang dapat mengurangi kebisingan dan getaran serta dapat menawarkan kontrol kualitas udara yang lebih baik dan penggunaan kembali bahan konstruksi limbah yang bermanfaat, termasuk tanah dan batu

yang dikeluarkan dari lokasi.

Di sisi lain, untuk berkontribusi pada sistem lingkungan perkotaan-alam yang berkelanjutan, infrastruktur yang ditempatkan di bawah tanah perlu dibangun dengan mempertimbangkan masalah yang terkait dengan kualitas air, aliran air tanah, potensi perubahan geokimia tanah, atau perubahan suhu bawah tanah atau aliran panas yang dapat memengaruhi lingkungan alami dan buatan. Untuk membatasi polusi di masa mendatang, praktik pemantauan air tanah, tanah, dan infrastruktur saat ini untuk wilayah perkotaan mungkin perlu diintensifkan untuk mengidentifikasi dan mengatasi masalah potensial secara lebih efektif. Praktik berkelanjutan menunjukkan bahwa masalah lingkungan perlu dilihat secara komprehensif dan berdasarkan risiko-biaya-imbalance yang sama.

3.2 BAHAYA, KEAMANAN, DAN KETAHANAN WILAYAH PERKOTAAN

Bentuk dan pengoperasian wilayah perkotaan secara teratur merespons risiko yang diketahui. Pada masa lampau, ancaman serangan mengakibatkan pembangunan kota bertembok dan pasokan air serta makanan yang aman yang dapat bertahan selama berbulan-bulan. Kebakaran besar, seperti Kebakaran Besar London pada tahun 1666, menyebabkan perubahan dalam praktik konstruksi dan desain jalan di kota-kota besar dan perhatian terhadap peningkatan pasokan air dan sanitasi di era modern terjadi ketika hubungan antara kebersihan dan penyakit ditetapkan.

Kondisi atau fenomena bawah tanah alami seperti ada atau tidaknya gas, radiasi (radon), suhu yang terlalu tinggi atau rendah, dan air dapat menimbulkan bahaya bagi infrastruktur bawah tanah dan orang-orang yang berada di dalamnya atau yang bergantung padanya. Misalnya, gas seperti metana, sulfur, dan karbon dioksida secara alami ada di bawah tanah dan dapat mengancam kesehatan manusia dalam konsentrasi atau paparan tertentu. Kurangnya oksigen yang terjadi secara alami juga merupakan bahaya. Oleh karena itu, hunian manusia di bawah tanah memerlukan ventilasi terus-menerus dari permukaan dalam sistem pengiriman yang aman.

Air juga menimbulkan bahaya bagi infrastruktur bawah tanah dan penghuninya, serta dapat dengan cepat menggenangi dan merusak struktur bawah tanah dan sistem keselamatan (lihat Kotak 3.8). Risiko tersebut dapat diminimalkan dan dikelola pada tingkat yang dapat diterima, tetapi hanya jika diidentifikasi, dipahami, dan ditanggapi. Strategi manajemen risiko yang berhasil adalah strategi yang terintegrasi erat dengan proses desain dan operasi. Diperlukan sistem pemantauan yang kuat untuk memastikan kinerja secara keseluruhan, dan diperlukan kapasitas manusia dan teknologi yang dapat merancang, mengoperasikan, dan menanggapi kinerja di bawah standar saat ditemui.

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai jenis bahaya baru telah dikenali di lingkungan perkotaan dan memerlukan perhatian yang lebih besar. Beberapa terkait dengan masalah perkotaan yang sedang berlangsung seperti kualitas udara, keselamatan pribadi, dan keamanan; yang lain terkait dengan sistem infrastruktur perkotaan yang rentan

dan memburuk. Jenis bahaya lainnya terkait dengan peristiwa ekstrem termasuk yang terkait dengan perang, tindakan teroris, dan bencana alam.

Sumber daya data yang ada terlalu sedikit untuk memungkinkan pemahaman menyeluruh tentang respons sistem yang kompleks terhadap peristiwa ekstrem atau memungkinkan pemodelan dan prediksi perilaku yang andal. Peristiwa ekstrem dapat menjadi peluang untuk demonstrasi berskala besar, respons dapat diamati, dan desain serta prediksi kinerja melalui simulasi komputasional dapat ditingkatkan. Hal ini memerlukan pra-organisasi dan persiapan (termasuk identifikasi pendanaan) serta identifikasi tim lintas sektor yang dapat dimobilisasi dengan cepat untuk melakukan investigasi setelah suatu peristiwa.

Tim dimobilisasi untuk menyelidiki akibat gempa bumi besar di seluruh dunia, tetapi fokus yang diusulkan di sini adalah pada pemahaman dan validasi model saling ketergantungan. Kebutuhan keamanan juga telah berubah secara nyata bahkan sejak 10 tahun lalu, dan para perencana serta teknisi perlu mengurangi bahaya dan risiko yang sebelumnya tidak diperiksa sambil mempertahankan harapan masyarakat akan kesejahteraan dan kualitas hidup. Lebih jauh, fasilitas, material, dan penggunaan ruang telah berubah selama siklus hidup infrastruktur yang diharapkan.

Beberapa kode dan peraturan telah dikembangkan untuk aplikasi khusus pada fasilitas bawah tanah, dan lebih sedikit lagi yang mengakomodasi perubahan kebutuhan keamanan. Kebijakan diperlukan dalam pemilihan kode, peraturan, dan metrik baru untuk mengukur keberhasilan. Keberlanjutan bergantung pada kemampuan para perencana dan insinyur untuk mengantisipasi dan bersikap fleksibel terhadap berbagai isu, teknologi, dan ekspektasi masyarakat yang muncul selama dan setelah siklus hidup infrastruktur yang mereka rancang, bangun, dan operasikan. Mereka perlu mengakomodasi lingkungan perkotaan yang terus berkembang.

KOTAK 3.8

Banjir Besar Chicago Tahun 1992

“Banjir Besar Chicago Tahun 1992” terjadi pada pagi hari tanggal 13 April 1992, sebagai akibat dari penempatan pilar penyangga di dasar Sungai Chicago selama pekerjaan konstruksi. Langit-langit terowongan kuno yang terletak di bawah sungai rusak, dan banjir besar membahayakan nyawa manusia dan merusak infrastruktur distrik bisnis Chicago. Terowongan tersebut merupakan bagian dari sistem yang kedalamannya berkisar antara 6 hingga 15 meter di bawah sungai; 946 juta liter (250 juta galon) air membanjiri ruang bawah tanah pusat kota.

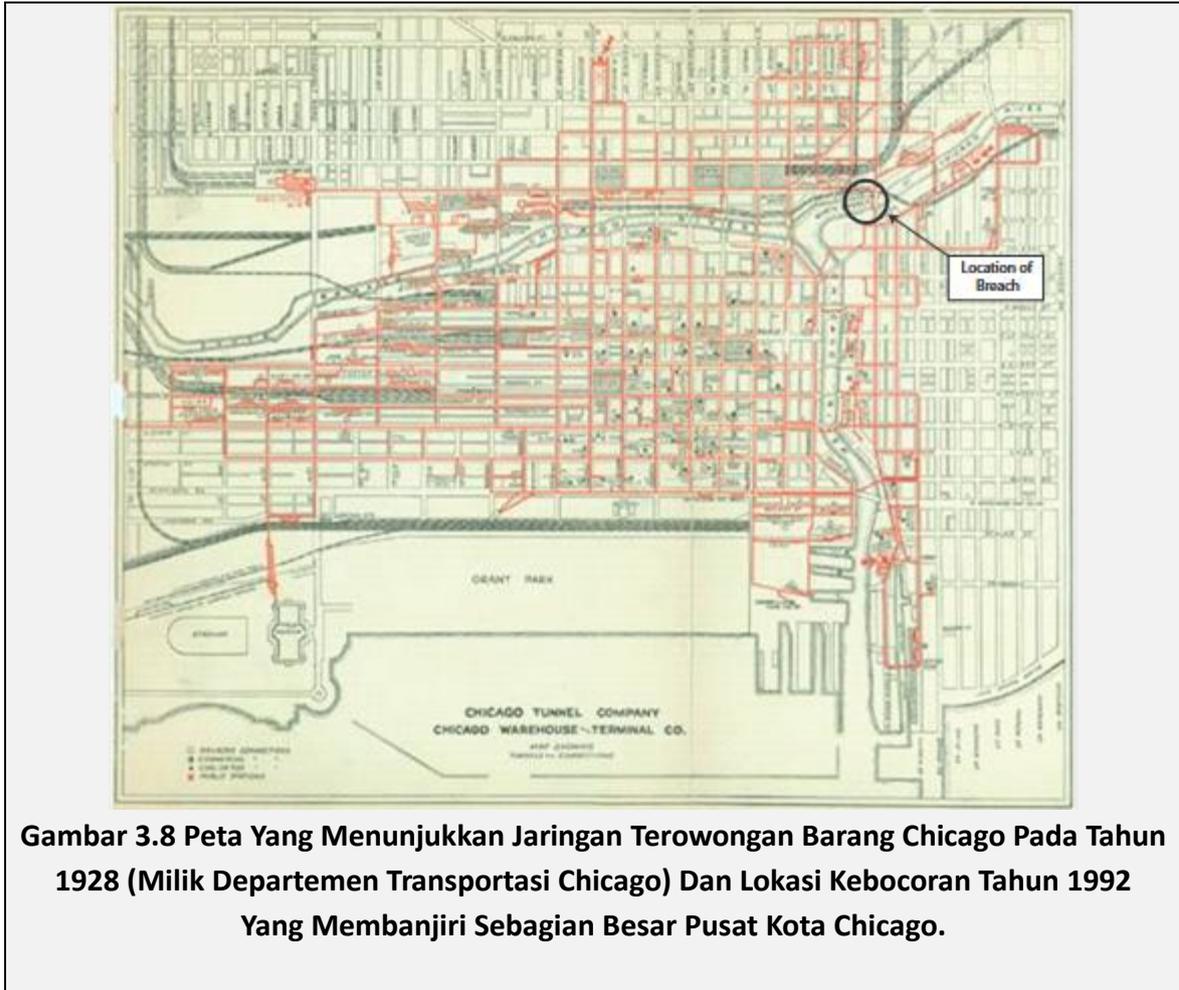
Setelah upaya yang gagal oleh pekerja kota dan kontraktor untuk menutup lubang tersebut, Wali Kota Daley meminta Presiden Bush untuk menyatakan Chicago Loop sebagai daerah bencana nasional. Pada tanggal 15 April, Badan Manajemen Darurat Federal ditugaskan untuk menangani bencana tersebut, dan Korps Insinyur mulai bekerja sama dengan para kontraktor untuk melaksanakan operasi penutupan. Pekerjaan

tersebut selesai 37 hari kemudian.

Dimaksudkan untuk menyalurkan kabel dan kawat telepon dan telegraf, sistem terowongan barang sepanjang 100 kilometer yang dibangun dengan tangan pada awal tahun 1900-an digunakan untuk mengangkut barang dagangan dan membuang limbah padat dari lebih dari 80 bangunan hingga tidak layak lagi. Terowongan tersebut sekarang digunakan untuk menyimpan kabel listrik dan serat optik. Sungai membanjiri jaringan terowongan yang “melintasi pusat kota Chicago dan menghubungkan ke ruang bawah tanah gedung”.

Para peneliti mereplikasi kegagalan terowongan dalam model geoteknik dan menjelaskan peningkatan beban yang dramatis, pelanggaran, dan banjir. Abutmen tenggara jembatan sebelumnya dilindungi oleh dua kelompok tiang pancang dolphin (kelompok tiang pancang yang rapat). Selama renovasi, tumpukan-tumpukan tersebut dipindahkan dan kerusakan itu disebabkan oleh pemasangan tumpukan-tumpukan baru sejauh 1 meter ke selatan dan lebih dekat ke terowongan. Kerusakan itu ditemukan sebelum banjir mulai terjadi, dan perbaikan terowongan pun direncanakan. Banjir tertunda oleh rembesan air yang lebih lambat melalui tanah yang relatif kedap air, tetapi tanah tersebut akhirnya tergeser ketika tumpukan-tumpukan tersebut dipindahkan. Sebuah saluran terbentuk antara dasar sungai dan terowongan.

Laporan-laporan bervariasi tentang biaya ekonomi dan manusia dari banjir besar tersebut. Total biaya kontrak untuk "pengurusan air" dan perbaikan struktural dilaporkan sekitar Rp. 55 Miliar. Banjir tersebut menutup Loop, pusat keuangan dan ritel utama serta kantor pemerintahan Chicago, dengan perkiraan biaya antara Rp. 10 Triliun dan Rp. 19.5 Triliun. Dilaporkan bahwa Bursa Dagang Chicago merugi Rp. 250 Triliun dalam perdagangan. Ribuan orang terkena dampak karena orang-orang harus dievakuasi, kereta bawah tanah ditutup, gedung-gedung dan bisnis tidak mendapatkan aliran listrik (beberapa selama beberapa hari), dan banjir menghancurkan segalanya mulai dari barang dagangan dan persediaan makanan restoran hingga catatan-catatan pemerintah. Lantai bawah gedung Art Institute juga rusak. Delapan pejabat kota, termasuk komisaris sementara Departemen Transportasi, yang mengundurkan diri atau pensiun, dimintai pertanggungjawaban karena mereka tahu sebelumnya bahwa masalah yang berpotensi serius telah berkembang di lokasi kebocoran.



Gambar 3.8 Peta Yang Menunjukkan Jaringan Terowongan Barang Chicago Pada Tahun 1928 (Milik Departemen Transportasi Chicago) Dan Lokasi Kebocoran Tahun 1992 Yang Membanjiri Sebagian Besar Pusat Kota Chicago.

Mengidentifikasi Bahaya pada Infrastruktur

Untuk meningkatkan keamanan dan ketahanan wilayah perkotaan, manfaat, kekurangan, dan interaksi elemen infrastruktur perlu dievaluasi dengan tepat menggunakan pendekatan yang mempertimbangkan risiko. Semua bahaya perlu diidentifikasi, data yang sesuai dikumpulkan, dan model serta metodologi dikembangkan untuk memungkinkan analisis komprehensif guna memahami risiko. Kompleksitas sistem infrastruktur kita meningkat seiring dengan meningkatnya permintaan infrastruktur dan semakin banyak infrastruktur yang ditempatkan di bawah tanah.

Dimungkinkan untuk memodelkan sistem individual dan fungsinya, tetapi hanya ada sedikit kepastian bahwa model tersebut sesuai dengan kenyataan. Ketidakpastian dalam perilaku sistem yang saling bergantung relatif tinggi, dan model sistem yang terintegrasi dan tervalidasi belum dikembangkan. Sistem kita kehilangan ketahanan karena sistem yang ada dioperasikan lebih sering dan mendekati kapasitas penuh. Akibatnya, terjadi perlambatan atau penghentian infrastruktur yang lebih sering (misalnya, kemacetan lalu lintas, pemadaman listrik atau pemadaman listrik).

Meskipun jumlah penginderaan dan kontrol telah meningkat (misalnya, melalui sistem kontrol pengawasan dan akuisisi data [SCADA]), sistem ini lebih rentan terhadap

serangan yang disengaja, kegagalan yang tidak terduga, dan hilangnya layanan. Manajer sektor infrastruktur dapat terkejut dengan evolusi masalah yang berjenjang di seluruh sektor. Dengan meningkatnya apresiasi terhadap kerentanan sistem SCADA dan kontrol ini, strategi antisipatif perlu dikembangkan untuk menyelidiki kejadian dan bahaya.

Masalah diperburuk karena masyarakat kurang berinvestasi dalam rehabilitasi sistem infrastruktur yang ada, yang menyebabkan kerusakan, kapasitas yang tidak memadai, dan kurangnya adaptasi terhadap tuntutan dan tantangan baru semuanya mengarah pada peningkatan kerentanan. Hanya ada sedikit studi sistematis tentang risiko terintegrasi yang ditimbulkan oleh sistem infrastruktur bawah tanah, atau kontribusi terhadap risiko yang ditimbulkan oleh peningkatan penggunaan bawah tanah untuk penempatan sistem kritis.

Agar wilayah perkotaan dapat berkelanjutan, desain sistem infrastruktur perlu memperhitungkan keberhasilan penggunaan dan layanan jangka panjang serta respons kritis berkala dan jangka pendek terhadap potensi kejadian alam atau manusia yang ekstrem. Ketika peristiwa ekstrem terjadi, insinyur dan perencana perlu dididik dan dilatih untuk menganggapnya sebagai tempat pengujian untuk memahami perilaku sistem yang kompleks, saling ketergantungan di antara sistem dalam sistem, dan validasi model komputasi kinerja sistem.

Bahaya Seismik

Keberlanjutan infrastruktur bawah tanah dan masyarakat luas bergantung, sebagian, pada kemampuan untuk menjadi tangguh terhadap risiko yang terkait dengan bahaya alam termasuk gempa bumi dan banjir. Struktur bawah tanah yang terletak di daerah yang aktif secara seismik, misalnya, rentan terhadap guncangan tanah dan dapat mengalami kegagalan jika tidak dirancang dengan benar.

Secara umum, struktur bawah tanah berfungsi dengan baik selama kejadian seismik karena amplitudo getaran yang lebih rendah yang dialami oleh fasilitas yang terkubur dan kekokohan desain dan konstruksi struktur. Namun, beberapa karakteristik seperti kedalaman dan sifat batuan atau tanah dapat membuat struktur bawah tanah lebih atau kurang rentan terhadap kerusakan. Hashash dan lainnya (2001) mengamati bahwa terowongan dalam tampaknya kurang rentan terhadap guncangan daripada terowongan dangkal dan bahwa fasilitas yang dibangun di atas batuan yang kompeten mengalami lebih sedikit kerusakan daripada yang dibangun di atas tanah.

Namun, gempa bumi besar masih dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada struktur bawah tanah, terutama di dekat episentrum gempa. Upaya signifikan telah diarahkan pada pengembangan teknologi desain untuk mengevaluasi kinerja seismik struktur bawah tanah. Namun, di lingkungan perkotaan yang semakin meningkat, diperlukan pemahaman yang lebih lengkap tentang interaksi seismik antara infrastruktur di atas dan di bawah tanah serta efek seismik pada konfigurasi fasilitas bawah tanah yang kompleks.

Bahaya Banjir

Banjir yang disebabkan oleh hujan lebat, badai, dan tsunami menjadi perhatian di daerah pesisir dan banyak daerah dataran rendah. Misalnya, badai di Kota New York saat air pasang dapat menyebabkan banjir di sebagian sistem kereta bawah tanah, sehingga diperlukan perlindungan titik akses permukaan terhadap kenaikan muka air. Satu badai, jika terjadi dalam kondisi yang tepat, dapat mengakibatkan gelombang badai yang berkelanjutan beberapa kaki di atas permukaan air pasang normal dan menyebabkan banjir parah serta masuknya air asin ke dalam pekerjaan bawah tanah, seperti yang terjadi saat Badai Sandy pada tanggal 30 Oktober 2012.

Peristiwa seperti ini menggarisbawahi perlunya pemahaman risiko terhadap semua bahaya. Pemulihan dari peristiwa ini juga dapat berfungsi sebagai laboratorium yang dapat menginformasikan pengembangan infrastruktur dan perencanaan serta upaya pemulihan di masa mendatang. Insinyur bawah tanah dan perencana kota memiliki kesempatan unik untuk membuat katalog temuan mereka saat melakukan upaya pemulihan, dan mereka memiliki kesempatan untuk membangun kembali dan meningkatkan sistem infrastruktur agar lebih tangguh dan berkelanjutan. Banjir dapat terjadi sebagai akibat dari peristiwa atau keadaan lain.

Gempa bumi zona subduksi berkekuatan besar, seperti yang terjadi di beberapa bagian Amerika Serikat bagian barat, dapat menyebabkan naiknya permukaan air laut yang mengancam infrastruktur. Tsunami juga dapat menimbulkan dampak yang menghancurkan pada bangunan dan infrastruktur di wilayah pesisir seperti yang terjadi pada gempa bumi dan tsunami Samudra Hindia tahun 2004 dan gempa bumi dan tsunami tahun 2011 di Jepang. Menariknya, struktur bawah tanah lebih terlindungi dari tekanan air dan dampak puing-puing akibat banjir yang bergerak jika pintu masuk dilindungi dan ditutup sebelum terjadi bencana.

Wilayah yang secara historis tidak mengalami banjir mungkin tidak dikembangkan untuk mengurangi dampak banjir, dan bahkan beberapa wilayah yang rawan banjir memiliki infrastruktur bawah tanah yang berisiko. Dampak banjir pada infrastruktur bawah tanah memerlukan penelitian dan studi lebih lanjut. Bahaya Terkait Perubahan Iklim dan Kenaikan Muka Air Laut. Perubahan lingkungan yang meluas seperti badai yang lebih sering dan lebih dahsyat, perubahan muka air laut, dan banjir yang diperkirakan sebagai akibat dari perubahan iklim akan memengaruhi banyak wilayah perkotaan.

Keberlanjutan bergantung pada kemampuan untuk menanggapi dan beradaptasi dengan perubahan tersebut. Meskipun perdebatan tentang ilmu perubahan iklim bukan fokus laporan ini, penting untuk menyoroti cara-cara pengembangan dan penggunaan ruang bawah tanah yang dapat mengurangi potensi dampak perubahan iklim. Rekayasa bawah tanah dapat memengaruhi pendorong perubahan iklim (misalnya, penggunaan lahan, emisi gas rumah kaca), dan dapat meningkatkan kemampuan masyarakat perkotaan untuk beradaptasi dengan perubahan kondisi iklim.

Perubahan iklim mengacu pada variasi yang signifikan secara statistik baik dalam

keadaan rata-rata iklim atau variabilitasnya selama periode yang panjang, biasanya puluhan tahun atau lebih lama, yang dapat dikaitkan dengan penyebab alami atau aktivitas manusia. Dewan Riset Nasional telah melaporkan konsekuensi perubahan iklim terhadap infrastruktur dan pengoperasian sistem transportasi AS dan mengidentifikasi lima perubahan iklim yang sangat penting termasuk peningkatan jumlah dan frekuensi hari yang sangat panas dan gelombang panas, peningkatan suhu kutub, naiknya permukaan air laut, peningkatan kejadian curah hujan lebat, dan peningkatan intensitas badai.

Risiko umum terhadap infrastruktur akibat perubahan iklim telah terdokumentasi dengan baik; namun, menangani konsekuensi perubahan iklim melalui penggunaan ruang bawah tanah yang lebih baik untuk masa depan yang lebih berkelanjutan belum dipelajari secara ekstensif. Lebih jauh, dampak perubahan iklim akan bervariasi secara regional sebagai akibat dari variabilitas faktor alam dan antropogenik, sehingga tidak ada solusi untuk masalah yang muncul yang dapat diterapkan secara universal.

Masalah mungkin termasuk perlunya mendesain ulang sistem pembuangan air limbah pesisir, perlindungan yang lebih baik terhadap banjir untuk sistem jalan dan rel bawah tanah, dan perlindungan yang lebih baik untuk brankas dan terowongan utilitas bawah tanah. Membuat adaptasi yang diperlukan untuk desain sistem baru dan secara terencana untuk sistem yang ada akan menjadi penting untuk fungsi sistem ini yang terus efektif. Risiko yang diketahui dan cara untuk mengurangi, mengurangi, atau mentransfer risiko perlu dipertimbangkan. Pilihan seperti relokasi atau migrasi pusat kota dari area yang rentan terhadap perubahan lingkungan dapat dipertimbangkan tetapi tidak dibahas dalam laporan ini.

Memikirkan kembali penempatan layanan penting seperti generator darurat dan bahan bakar di ruang bawah tanah atau area yang rawan banjir akan menjadi tindakan yang bijaksana. Konsekuensi lain dari perubahan iklim mungkin tidak diketahui dan perlu dieksplorasi. Misalnya, dapatkah dampak kenaikan permukaan laut pada infrastruktur bawah tanah mencakup peningkatan kejadian penyakit yang ditularkan melalui air atau ketidakmampuan untuk menyediakan air dengan tekanan yang cukup untuk memadamkan kebakaran selama bencana?

Beberapa masalah mungkin muncul dari penempatan infrastruktur di bawah tanah, tetapi bawah tanah dapat menawarkan beberapa solusi. Pertanyaan yang terkait dengan konstruksi bawah tanah, misalnya, meliputi

- (a) Dapatkah konstruksi bawah tanah, misalnya, melalui pengurangan konsumsi bahan bakar fosil dan emisi karbon, menjadi sarana untuk mengurangi kontribusi manusia terhadap perubahan iklim?
- (b) Dapatkah konstruksi bawah tanah mengurangi kerusakan atau risiko dari perubahan lingkungan yang diakibatkan oleh perubahan iklim?

Pertanyaan pertama melibatkan serangkaian evaluasi nasional atau global yang kompleks, termasuk perhitungan efisiensi energi bersih siklus hidup dan jejak karbon infrastruktur bawah tanah dibandingkan dengan infrastruktur permukaan.

Pertanyaan kedua mengenai mitigasi kerusakan dan risiko berkaitan dengan penggunaan ruang bawah tanah sebagai sarana fisik untuk melindungi dari beberapa konsekuensi perubahan iklim, seperti badai besar, banjir, dan kenaikan permukaan laut. Meskipun fasilitas bawah tanah yang tidak terlindungi dapat terendam banjir, fasilitas tersebut menawarkan perlindungan yang lebih baik terhadap kerusakan struktural yang disebabkan oleh gelombang air dan dampak puing.

Perubahan gaya struktural pada fasilitas yang terkubur selama badai atau banjir dapat diprediksi dan dapat diakomodasi selama desain. Banjir dapat dihindari dengan meninggikan atau melindungi pintu masuk untuk menyingkirkan kemungkinan masuknya air. Kenaikan muka air laut yang terkait dengan perubahan iklim menimbulkan risiko yang signifikan terhadap infrastruktur bawah tanah. Muka air laut global diproyeksikan akan naik 8-23 cm pada tahun 2030 dibandingkan dengan tingkat tahun 2000, dan 50-140 cm pada tahun 2100. Beberapa sistem yang sedang dibangun sedang dirancang untuk mengantisipasi muka air di masa mendatang.

Namun, kesulitan melindungi seluruh kota dataran rendah dari kenaikan muka air laut sangat besar, contohnya dapat ditemukan di Belanda dan New Orleans, Louisiana. Titik terendah tanah di Belanda dan New Orleans masing-masing adalah 6,8 m dan 1,5-3 m di bawah muka air laut rata-rata. Fasilitas bawah tanah mungkin memerlukan, antara lain, desain khusus (misalnya, pintu masuk) agar sesuai dengan kondisi kenaikan muka air laut.

Pemanfaatan rekayasa potensial lain dari bawah tanah yang memerlukan evaluasi lebih lanjut adalah isolasi produk limbah terkait energi dalam fitur geologi. Penyuntikan karbon dioksida ke dalam fitur geologi untuk tujuan penyerapan karbon dan isolasi limbah radioaktif tingkat tinggi adalah metode yang sedang dipelajari untuk keandalan, potensi risiko bagi manusia dan lingkungan dalam jangka pendek dan panjang, dan gangguan pada aplikasi bawah tanah potensial lainnya.

Penyerapan karbon dioksida dimaksudkan untuk mengurangi jumlah karbon dioksida gas rumah kaca yang dilepaskan ke atmosfer. Isolasi bawah tanah limbah nuklir tingkat tinggi yang dihasilkan dari listrik yang dihasilkan oleh fisi nuklir dapat secara tidak langsung mengurangi emisi gas rumah kaca karena produksi energi tersebut tidak secara langsung menghasilkan emisi gas rumah kaca. Jika isu politik dan teknis seputar isolasi limbah di bawah tanah dapat diselesaikan, atau jika pembangkit nuklir bawah tanah yang berdiri sendiri (masing-masing dengan penyimpanan bawah tanah jangka panjang) mampu meminimalkan faktor politik, transportasi, dan risiko yang terkait dengan pembangkit nuklir dan penyimpanan limbah, penilaian ulang perencanaan yang berkaitan dengan perubahan iklim dapat dibenarkan. Isu-isu tersebut belum ditangani tetapi berada di luar cakupan laporan ini.

Sampai ketinggian berapa kenaikan permukaan laut yang praktis untuk melindungi kota dengan tembok dan tanggul? Apakah masuk akal bagi kota-kota yang terancam untuk mempertimbangkan meninggalkan lantai dasar yang ada, pada dasarnya menaikkan "permukaan tanah" satu lantai seperti yang telah dilakukan karena berbagai alasan di

beberapa bagian Seattle, Washington? Jika ini terjadi, maka permukaan tanah yang ada dapat menjadi tingkat baru ruang bawah tanah semu, seperti yang telah dicapai di La Defense dan La Rive Gauche di Paris, Prancis dan Tsukuba Science City di Jepang untuk menciptakan infrastruktur layanan yang lebih baik yang dipadukan dengan lingkungan yang lebih ramah bagi pejalan kaki.

Mengingat skenario seperti itu, teknologi rekayasa bawah tanah dapat menilai apakah jaringan pipa dan kabel bawah tanah yang ada dapat menahan kedalaman tambahan penguburan atau beban tekanan banjir, bagaimana ruang bawah tanah bangunan yang ada dapat diperkuat terhadap peningkatan beban tersebut, dan potensi peningkatan korosi, di antara karakteristik lainnya. Dampak potensial perubahan iklim pada kota-kota dan masyarakat pedalaman juga bisa signifikan. Misalnya, peristiwa bencana alam yang disebabkan oleh perubahan iklim yang menciptakan aktivitas curah hujan dengan intensitas tinggi akan memerlukan desain sistem yang menangkap dan menyalurkan volume air yang lebih besar untuk mengurangi atau menghindari kerusakan akibat banjir dan kerugian ekonomi.

Perubahan curah hujan tahunan kemungkinan akan memengaruhi muka air tanah regional, yang menyebabkan perubahan pada persediaan air tanah yang tersedia. Dampak pada struktur bawah tanah dan permukaan yang ada yang disebabkan oleh perubahan tingkat air tanah dan perubahan yang dihasilkan dalam sifat-sifat tanah, batu, dan bahan yang digunakan dalam konstruksi bawah tanah juga mungkin terjadi. Pandangan jangka panjang dan regional tentang pengelolaan air kemungkinan akan menjadi elemen kunci dalam membangun ketahanan bagi daerah-daerah lokal dari dampak perubahan iklim tersebut, seperti halnya pemahaman yang lebih lengkap tentang perubahan perilaku tanah, batu, dan bahan konstruksi yang disebabkan oleh perubahan kondisi air tanah.

Asuransi dan reasuransi, sebagai komponen manajemen risiko peristiwa perubahan iklim untuk sistem bawah tanah, kemungkinan akan diperlukan karena, meskipun beberapa peristiwa mungkin memiliki probabilitas kejadian yang rendah, konsekuensi dari kejadiannya dapat memiliki dampak ekonomi spasial (geografis) dan temporal yang luas. Persyaratan kinerja dan pemeliharaan infrastruktur jangka pendek dan jangka panjang harus dipahami untuk meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan.

KOTAK 3.9

Pelajaran Awal dari Badai Sandy

Badai Sandy, badai Atlantik terbesar yang pernah tercatat, menghantam Amerika Serikat bagian timur dari Carolina hingga Massachusetts pada tanggal 30 Oktober 2012. Youssef Hashash, anggota komite studi, memimpin tim Geotechnical Extreme Events Reconnaissance yang disponsori National Science Foundation untuk meneliti perilaku infrastruktur bawah tanah dan pesisir selama dan setelah Badai Sandy di Manhattan, Queens, Staten Island, dan Rockaway Beach di New York, dan di New Jersey. Laporan tim GEER akan dirilis secara daring tetapi Dr. Hashash menyampaikan pengamatan awal

kepada komite mengenai beberapa dampak di Manhattan.

Gelombang badai setinggi 13 kaki membanjiri Manhattan bagian bawah dan menghancurkan atau merusak parah infrastruktur permukaan dan meluburkan pintu masuk ke kereta bawah tanah dan infrastruktur bawah tanah lainnya yang tidak dirancang untuk melindungi dari permukaan air yang tinggi. Kedelapan terowongan kereta bawah tanah di bawah sungai terendam banjir. Meskipun semua infrastruktur bawah tanah terendam, banyak bangunan berhasil dipompa dan dikeringkan dalam beberapa hari, sehingga memungkinkan akses bagi tim GEER.

Integritas struktural bangunan-bangunan ini tampak kokoh, tetapi sistem bantu dan pendukung kehidupan (misalnya, daya dan ventilasi) terpapar air laut yang sangat korosif dan konduktif untuk waktu yang lama. Untuk memastikan keselamatan, sistem kelistrikan tidak dapat diuji atau digunakan hingga diperiksa oleh personel yang berkualifikasi. Banyak bangunan yang "ditandai kuning", yang menunjukkan pemilik infrastruktur masih menunggu pemeriksaan kelistrikan; dengan demikian, pada saat pengintaian, tingkat kerusakan sebenarnya tidak dapat diketahui.

Ada lebih dari 100 kematian di Amerika Serikat akibat Badai Sandy. Meskipun banyak yang terkait dengan tenggelam, tidak ada korban tenggelam yang dilaporkan ditemukan di infrastruktur bawah tanah public. Dengan cara ini, infrastruktur bawah tanah dikelola dengan baik untuk menghindari lebih banyak korban meskipun sedikit yang dapat dilakukan untuk menghindari kerusakan infrastruktur. Pemilik dan operator infrastruktur bawah tanah publik menilai bahaya dan risiko yang akan datang yang terkait dengan badai dan mengambil tindakan yang tepat untuk membersihkan bawah tanah dari penghuni.

Sebagian besar Manhattan pulih karena layanan sedang dipulihkan. Layanan kereta bawah tanah dipulihkan ke Manhattan bagian bawah pada 3 Desember 2012, tetapi, pada 10 Desember 2012, layanan terowongan dari Manhattan ke Brooklyn belum dipulihkan. Terowongan kereta bawah tanah yang paling parah banjir (Montague) dipenuhi air laut dari "rel ke langit-langit" sejauh hampir satu mil. Butuh beberapa hari untuk membersihkan lumpur dan puing-puing dari terowongan setelah air dapat dipompa. Tim inspeksi menemukan kerusakan pada relai sinyal, sakelar rel, motor penghenti, dan kabel.

Puing-puing terbawa ke dalam terowongan, beberapa di antaranya cukup kuat hingga membengkokkan logam, menurut MTA. Ini adalah banjir pesisir parah pertama di wilayah Amerika Serikat yang sangat padat penduduknya dan sangat bergantung pada infrastruktur bawah tanah. Komite tidak membuat keputusan tentang apakah peristiwa ini merupakan respons terhadap perubahan global dalam pola iklim; namun, komite mengakui bahwa badai yang lebih sering terjadi atau lebih dahsyat telah diprediksi sebagai akibat dari perubahan iklim yang diperkirakan. Genangan air laut yang dialami selama badai ini juga berfungsi sebagai pengingat akan kenaikan permukaan laut yang diperkirakan terjadi di banyak bagian dunia.

Pengamatan dan pelajaran yang dipetik dari Badai Sandy dapat dikumpulkan untuk menginformasikan keputusan keberlanjutan perkotaan di masa mendatang saat isu-isu yang muncul diidentifikasi dan ditangani. Karena banyak daerah perkotaan besar terletak di sepanjang pantai dan infrastrukturnya sudah ada, lebih banyak pemikiran harus dicurahkan untuk bagaimana meningkatkan ketahanan daerah perkotaan untuk memastikan keberlanjutan prospek yang sulit mengingat usia dan kerusakan sebagian besar infrastruktur ini. Ketahanan dan keberlanjutan sistem dan infrastruktur perkotaan dalam menghadapi semua bahaya dan risiko tentu akan menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan selama proses pengambilan keputusan.

Perencana kota harus memahami bahwa mungkin saja untuk mengurangi atau memitigasi risiko yang terkait dengan badai berkekuatan tinggi dan kenaikan permukaan laut, tetapi tidak mungkin untuk menghilangkan semua risiko. Insinyur perlu memasukkan ketahanan dan peningkatan kemampuan untuk pemulihan bencana (misalnya, merancang komponen listrik yang dapat menahan paparan air laut dalam waktu lama) ke dalam pengambilan keputusan teknis mereka. Semua perlu berkolaborasi untuk memahami bahaya apa yang dapat diakomodasi oleh infrastruktur dengan aman.

KOTAK 3.10

Banjir di New Orleans Pasca Badai Katrina

Dampak Badai Katrina di New Orleans memberikan pelajaran terkini mengenai ketahanan dan dibahas secara rinci di tempat lain. Banjir akibat kegagalan sistem tanggul memicu kegagalan berjenjang dan kerusakan parah pada sistem fisik dan sosial yang belum sepenuhnya pulih di kota tersebut bertahun-tahun kemudian. Karena stasiun pompa yang digunakan untuk memompa air hujan tidak terlindungi dari banjir, stasiun tersebut harus ditutup, dikeringkan, dan dikeringkan sebelum operasi dapat dimulai.

Rumah-rumah dan jaringan infrastruktur yang terkubur menjadi mengapung selama banjir, dalam banyak kasus menyebabkan pemutusan layanan utilitas yang terkubur (terutama gas dan air) di titik-titik masuk ke dalam gedung. Hal ini menyebabkan begitu banyak kebocoran pada sistem pasokan air dan gas sehingga tekanan pasokan hilang dan sistem perpipaan terisi dengan air yang tidak bersih dan asin. Hilangnya pasokan air memengaruhi kemampuan pemadaman kebakaran dan sangat memperlambat pemulihan kondisi kehidupan normal.

Banjir pada sistem distribusi gas bertekanan rendah menyebabkan korosi pada katup dan meteran dan memerlukan penggantian yang ekstensif. Saluran utilitas yang terkubur dangkal rusak oleh sistem akar pohon ketika pohon-pohon dewasa tumbang selama badai. Peralatan pembersihan berat sering merusak hidran yang tersembunyi oleh puing-puing, dan utilitas yang terkubur dangkal sering terdorong oleh peralatan tersebut, menyebabkan keruntuhan atau kerusakan pada utilitas tersebut. Kurangnya catatan yang baik atau dapat diakses tentang saluran utilitas, katup penutup, dan lokasi

elemen infrastruktur lainnya menghambat respons utilitas dan layanan darurat.

Selain itu, banyak penanda normal untuk menemukan layanan hancur oleh kerusakan akibat badai dan banjir. Pemulihan diperlambat oleh hilangnya layanan perkotaan seperti listrik, air bersih, dan sanitasi orang-orang tidak dapat dengan mudah kembali ke lingkungan mereka bahkan setelah banjir surut. Tanpa penduduk di sana untuk membersihkan, banyak masalah administratif dan hukum muncul mengenai hubungan antara tanggung jawab layanan tanggap darurat dan pribadi.

Meningkatkan Ketahanan

Sebagaimana dibahas dalam Bab 1, ketahanan merupakan kemampuan untuk menanggapi dan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan. Dalam pembahasan ini, ketahanan mencakup kemampuan masyarakat perkotaan untuk mengurangi intensitas dan distribusi spasial kerusakan yang disebabkan oleh peristiwa ekstrem atau perubahan lingkungan jangka panjang (misalnya, resesi ekonomi, perubahan iklim).

Kemampuan untuk menanggapi dan memberikan fungsionalitas layanan dengan cepat setelah peristiwa ekstrem, dan untuk mengurangi dampak ekonomi yang disebabkan oleh peristiwa tersebut, merupakan contoh ketahanan. Membangun ketahanan berlaku untuk semua jenis bahaya yang telah dibahas dan memerlukan penghapusan atau meminimalkan kerentanan dalam sistem penting yang menempatkan sistem tersebut pada risiko.

Hal ini memerlukan pendekatan sistem dari sistem dan pertimbangan saling ketergantungan lintas sistem untuk menghindari kegagalan beruntun dari masing-masing sistem. Bencana seperti Badai Katrina (lihat Kotak 3.10) dapat menghasilkan sesuatu yang baik jika masyarakat dapat belajar dari pengalaman. Misalnya, bagaimana infrastruktur bawah tanah dapat dirancang untuk mengurangi dampak daya apung seperti yang terjadi selama banjir di New Orleans? Bagaimana dampak korosi pada infrastruktur fisik dapat dihindari? Bab 2 menjelaskan aspek kegagalan berjenjang yang disebabkan oleh runtuhnya menara World Trade Center (WTC) setelah serangan teroris pada 11 September 2001.

Serangan tersebut tragis, tetapi ada pelajaran yang dapat dipelajari oleh para perencana dan responden masa depan untuk diterapkan pada desain dan pengoperasian infrastruktur bawah tanah:

- Con Edison Company of New York (penyedia listrik, gas alam, dan uap untuk Kota New York) menggunakan generator portabel yang dipasang di trailer untuk menyediakan daya listrik dan mengarahkan saluran pengumpan sementara disebut shunt di bawah tanah untuk menghubungkan jaringan aktif ke jaringan mati dan memulihkan daya.
- Redundansi pada jalur sistem kereta bawah tanah berarti bahwa akses ke sebagian besar area dipulihkan dalam beberapa hari.
- Sistem tangga inti di menara World Trade Center mengakibatkan rute evakuasi dari

atas menara terputus atau terputus (rute evakuasi infrastruktur bawah tanah juga dapat mengalami hal serupa).

- Bahaya debu pada kualitas udara dan air tidak segera disadari dan akhirnya terbukti membahayakan kesehatan bagi petugas tanggap darurat.
- Kurangnya informasi teknik yang tersedia terkait dengan menara dan fondasi World Trade Center menghambat kemampuan untuk menilai potensi keruntuhan bangunan dan stabilitas sistem dinding fondasi.

Pentingnya ketahanan sistem individual terhadap ketahanan secara keseluruhan disorot oleh contoh-contoh di atas. Mungkin yang lebih penting, saling ketergantungan di antara seluruh sistem sosial, ekonomi, informasi, dan fisik terungkap. Ketahanan desain perkotaan bergantung pada pendekatan multibahaya terhadap persiapan bencana dan desain sistem terpadu. Pendekatan multi-sistem mengharuskan perencanaan untuk skenario risiko yang paling mungkin terjadi dan mencakup fleksibilitas yang cukup untuk mengakomodasi hal-hal yang tidak terduga.

Perencanaan sistem yang terpadu dan terkoordinasi mencakup kebutuhan untuk merencanakan redundansi kritis dalam sistem yang, misalnya, memungkinkan respons dan pemulihan yang memadai ketika bagian dari suatu sistem gagal. Aset infrastruktur permukaan dan bawah permukaan perlu dirancang dan dioperasikan sebagai sistem terpadu dengan mempertimbangkan pemeliharaan siklus hidup, risiko, keandalan, dan respons waktu nyata. Perencana dan insinyur perkotaan memerlukan pendekatan yang tepercaya dan tervalidasi berdasarkan risiko untuk perencanaan dan desain proyek yang dapat menyeimbangkan kebutuhan proyek dalam hal pemberian layanan, biaya awal, ketahanan terhadap kejadian ekstrem, dan pemeliharaan serta operasi yang efektif sehingga kinerja keseluruhan masa pakai memuaskan.

Melalui penerapan jenis pendekatan ini untuk ruang bawah tanah dan infrastruktur (yang ditempati atau tidak), konsekuensi dari kejadian ekstrem dapat dikurangi secara signifikan dan, sebagai hasilnya, masyarakat akan sangat menghargai bawah tanah sebagai sumber daya yang semakin andal dan aman serta bagian dari masyarakat yang berkelanjutan.

BAB 4

KESEHATAN DAN KESELAMATAN BAWAH TANAH

“Penting untuk memperhatikan pentingnya perilaku manusia terhadap keselamatan terowongan. Hasil akhir dari beberapa insiden mungkin lebih bergantung pada reaksi cepat dan tepat dari individu daripada pada tingkat keselamatan teknis di terowongan”. Kita merancang, membangun, dan mengoperasikan semua jenis infrastruktur bawah tanah, tetapi hal itu harus dilakukan dengan mempertimbangkan kemampuan dan perilaku operator dan penghuni infrastruktur bawah tanah untuk meminimalkan risiko dan meningkatkan efisiensi.

George Bugliarello menjelaskan perlunya menyeimbangkan unsur manusia dan mekanis dalam kehidupan perkotaan untuk menciptakan lingkungan yang modern, berkelanjutan secara lingkungan, dan memuaskan secara emosional. Keselamatan juga merupakan bagian penting dari visi ini. Sistem infrastruktur bawah tanah itu rumit dan memiliki elemen yang mirip dengan apa yang Bugliarello gambarkan sebagai sistem biosome sistem yang mencakup komponen biologis (individu yang membuat, mengelola, atau menggunakan sistem), sosial (aspek organisasi), dan mesin (artefak yang direkayasa).

Bugliarello mengakui bahwa antarmuka elemen-elemen ini dalam sistem transportasi merupakan titik-titik kerentanan yang pada akhirnya memengaruhi ketahanan system. Komite ini berpendapat bahwa hal yang sama dapat dikatakan secara lebih umum saat manusia pindah ke bawah tanah di mana infrastruktur akan sangat penting untuk mendukung pergerakan ini. Dengan membawa gagasan ini lebih jauh, dapat dikatakan bahwa keberlanjutan perkotaan sangat bergantung pada aktivitas, ide, dan perilaku manusia seperti halnya pada kekokohan dan ketahanan infrastruktur fisik.

Ketahanan masyarakat terkait dengan ketahanan infrastruktur fisik, tetapi pemahaman oleh orang-orang yang merancang, mengoperasikan, menggunakan, atau mendapatkan manfaat dari infrastruktur bawah tanah tentang peran setiap struktur dan elemen sistem dalam berfungsinya sistem perkotaan dengan baik penting untuk mengatasi kekokohan, ketahanan, dan keberlanjutan sistem perkotaan. Bahaya dan risiko nyata bagi manusia di bawah tanah memang ada, dan para insinyur sebagian besar telah berhasil mengatasi banyak di antaranya.

Bab-bab sebelumnya dari laporan ini membahas bagaimana utilitas dan sistem perkotaan sangat terintegrasi dan karenanya saling bergantung. Bab ini membahas hubungan manusia-sistem teknis, respons manusia terhadap bahaya yang dihadapi di bawah tanah, dan bahaya serta risiko yang terkait dengan penggunaan ruang bawah tanah oleh manusia. Bab ini mengenali orang-orang di bawah tanah dan mempertimbangkan rekayasa yang diperlukan untuk menjaga mereka tetap sehat sekaligus berkontribusi pada keberlanjutan. Ada atau tidaknya fenomena yang terjadi secara alami di bawah tanah dapat menimbulkan risiko bagi manusia.

Gas, radiasi, suhu, air, dan kekurangan oksigen termasuk di antara bahaya yang melekat pada hunian bawah tanah manusia. Bahaya lain bagi manusia atau infrastruktur dapat

diakibatkan oleh aktivitas manusia yang menciptakan, menambah, atau mengintensifkan risiko yang terjadi secara alami. Ini termasuk risiko yang terkait dengan kebakaran dan asap, bahan berbahaya, ledakan yang disengaja atau tidak disengaja, kegagalan struktural, kegagalan manusia, dan kejadian ekstrem.

Penting untuk memahami sepenuhnya bahaya dan risiko karena bagian yang sangat penting dari keberhasilan jangka panjang (yaitu, keberlanjutan) bawah tanah adalah kemampuan untuk mengatur konstruksi dan aktivitas bawah tanah untuk memastikan keselamatan minimum. Meskipun ada berbagai standar yang mengatur, terutama, keselamatan kebakaran untuk transportasi bawah tanah dan fasilitas bangunan dan industri, ada kebutuhan untuk pendekatan yang lebih komprehensif terhadap keselamatan terhadap semua bahaya untuk semua jenis fasilitas bawah tanah. Sisa bab ini membahas kebutuhan ini.

4.1 REKAYASA FAKTOR MANUSIA

Untuk menciptakan sistem perkotaan yang berfungsi dan berkelanjutan yang secara efektif menghubungkan elemen sosial, teknis, dan tata kelolanya, hubungan antara teknologi, orang-orang yang membangun, mengoperasikan, dan menggunakan teknologi tersebut, dan struktur sosial yang mengaturnya harus dipahami. Dalam bidang manufaktur, bidang penelitian ini disebut dengan beberapa nama termasuk faktor manusia, rekayasa manusia, psikologi rekayasa, dan ergonomi.

Licht dan lainnya menganalisis berbagai definisi untuk istilah dan bidang studi yang terkait dengan atau sinonim dengan penelitian "faktor manusia" dan menemukan bahwa sebagian besar definisi menyiratkan pendekatan multidisiplin termasuk konsep yang terkait dengan ilmu perilaku; kapasitas kinerja manusia; tenaga kerja, personel, dan pelatihan; dan biologi, fisiologi, dan kedokteran.

Informasi yang diperoleh melalui studi faktor manusia dapat diterapkan pada "desain alat, mesin, sistem, tugas, pekerjaan, dan lingkungan untuk penggunaan manusia yang aman, nyaman, dan efektif" sehingga kita dapat "mengoptimalkan hubungan antara teknologi dan manusia". Penerapan Sistem Adaptif Kompleks dari rekayasa Sistem seperti yang dibahas dalam Bab 2 tentu akan mempertimbangkan hubungan antara manusia dan infrastruktur bawah tanah.

Militer telah lama menyadari pentingnya mengintegrasikan elemen sistem manusia dan teknologi untuk membuat operasi seefektif, seefisien, seaman, dan berkelanjutan mungkin, dan telah mengumumkan konsep-konsep ini melalui arahan dan bimbingan. Misalnya, arahan Departemen Pertahanan (DOD) dari tahun 1988 mengharuskan pertimbangan tenaga kerja, personel, pelatihan, dan keselamatan dalam proses akuisisi sistem pertahanan untuk tujuan meningkatkan "semua aspek antarmuka manusia-mesin".

Pada tahun 2007, Dewan Riset Nasional menerbitkan laporan atas permintaan Laboratorium Riset Angkatan Darat, Laboratorium Riset Angkatan Udara, dan DOD untuk membahas pendekatan dalam menciptakan "metodologi desain sistem manusia yang terintegrasi, multidisiplin, dan dapat digeneralisasi". Laporan itu menguraikan prinsip-prinsip yang dianggap penting untuk pengembangan dan evolusi sistem manusia termasuk yang

terkait dengan perlunya konsensus pemangku kepentingan tentang hasil yang diinginkan, penilaian ulang rencana secara berkala berdasarkan pelajaran yang dipelajari, dan manajemen risiko.

Banyak aplikasi rekayasa faktor manusia terkait dengan interaksi manusia dengan satu barang atau teknologi manufaktur. Sistem bawah tanah sebagai bagian dari lingkungan perkotaan secara keseluruhan lebih kompleks, dan kebutuhan untuk memahami, merancang, mengatur, dan mengoperasikan hubungan manusia-teknologi menjadi lebih kuat. Dampak kegagalan komponen infrastruktur utama termasuk manusia dan atau sistem dapat merusak fungsi lingkungan perkotaan yang berkelanjutan.

Perilaku manusia tidak selalu dapat diprediksi dalam menghadapi peristiwa yang merugikan dan ekstrem, dan terlepas dari seberapa tangguh infrastruktur bawah tanah dan sistem keselamatan terhadap bahaya, kegagalan infrastruktur dan sistem dapat memiliki konsekuensi negatif yang signifikan. Semua bentuk rekayasa bawah tanah tidak hanya harus mempertimbangkan pelatihan dan pedoman keselamatan apa yang diperlukan untuk kelancaran fungsi infrastruktur dalam keadaan terbaik, tetapi juga harus mengantisipasi perilaku penghuni bawah tanah selama skenario operasi normal dan terburuk.

Desain harus holistik dan menciptakan lingkungan terintegrasi yang memungkinkan orang untuk secara intuitif memahami cara tetap aman jika kondisi buruk muncul. Keberlanjutan tatanan perkotaan bergantung pada optimalisasi hubungan manusia-teknis dengan cara yang memberikan setidaknya keamanan minimum sambil tetap konsisten dengan visi masyarakat jangka panjang. Industri juga menangani keselamatan dalam infrastruktur bawah tanah. Asosiasi Terowongan Internasional (ITA), misalnya, membentuk Komite Keselamatan Operasional Fasilitas Bawah Tanah (COSUF) untuk menangani masalah operasional keselamatan dan keamanan dalam struktur bawah tanah.

COSUF telah mengembangkan pedoman penilaian risiko dan, dengan kelompok kerja ITA tentang kesehatan dan keselamatan, berfokus pada peningkatan praktik keselamatan selama konstruksi. Platform Teknologi Konstruksi Eropa (ECTP) mengakui bahwa keselamatan dan keamanan harus dirancang dalam setiap elemen infrastruktur, termasuk antarmuka antara setiap elemen, dengan mempertimbangkan seluruh siklus hidup infrastruktur.

4.2 MENGELOLA KESELAMATAN MELALUI REGULASI

Bisa jadi diharapkan bahwa keselamatan di infrastruktur bawah tanah akan sama dengan infrastruktur permukaan, dan jika tidak, maka harapannya adalah bahwa seseorang sepenuhnya mengetahui potensi risikonya. Akan tetapi, meskipun para insinyur telah berhasil mengurangi berbagai jenis risiko yang terkait dengan penggunaan ruang bawah tanah, risiko di infrastruktur bawah tanah belum menerima tingkat pengawasan regulasi yang sama seperti risiko yang terkait dengan infrastruktur permukaan, dan tingkat risiko tertentu mungkin tidak dipahami dengan baik.

Kode yang ada cenderung bersifat preskriptif meresepkan prosedur atau bahan tertentu tetapi ruang bawah tanah menimbulkan tantangan keselamatan yang berbeda yang tidak dirancang untuk ditangani oleh kode yang ditujukan untuk ruang permukaan. Misalnya,

kebanyakan orang tahu bahwa meninggalkan gedung yang terbakar sudah cukup untuk mencapai keselamatan. Keluar dari gedung tinggi saat keadaan darurat, misalnya, biasanya mengharuskan penghuninya untuk menuruni beberapa anak tangga daripada menggunakan lift atau eskalator.

Namun, membiarkan bangunan bawah tanah terbakar hanya akan memindahkan penghuni ke ruang bawah tanah lain yang juga terkontaminasi asap, dan penghuni mungkin harus keluar melalui beberapa anak tangga tugas yang menantang secara fisik bagi sebagian orang. Bahaya yang terkait dengan lift dan eskalator sebagian ditangani oleh American Society of Mechanical Engineering Safety Code for Elevators and Escalators yang mencakup desain, konstruksi, pemasangan, pengoperasian, pemeliharaan, perubahan, inspeksi, dan pengujian lift dan eskalator.

Pedoman juga memberikan informasi tentang bagaimana persyaratan Departemen Kehakiman yang terkait dengan Americans with Disabilities Act akan dipenuhi oleh kinerja lift atau eskalator. Keselamatan terkadang perlu diciptakan secara operasional daripada melalui solusi teknis (misalnya, tidak ada bahan berbahaya kecuali jika ada alat penyiram yang sesuai atau sistem lain). Kode keselamatan paling sering ditulis sebagai respons terhadap pelajaran yang dipelajari dari insiden atau litigasi daripada sebagai respons terhadap penelitian. Strategi manajemen risiko yang bertanggung jawab mencakup mengidentifikasi dan memahami bahaya dan risiko serta menerapkan strategi mitigasi yang tepat.

Setelah dikenali, risiko bawah tanah dapat dihindari, dipindahkan, atau dikurangi hingga ke tingkat yang dapat ditoleransi. Dalam beberapa kasus, biaya mitigasi mungkin besar atau mahal, baik dalam hal biaya modal untuk konstruksi maupun biaya operasional. Ini dapat berarti proyek tidak pernah dimulai, atau sistem minimum yang diterapkan mungkin tidak terpelihara secara optimal karena biayanya. Dengan asumsi bahwa menghindari atau memindahkan risiko tidak memungkinkan, mengurangi risiko melalui peraturan keselamatan dan pendidikan yang tepat mungkin merupakan pendekatan terbaik.

Standar keselamatan untuk infrastruktur permukaan telah dikembangkan di tingkat federal, negara bagian, dan lokal serta disempurnakan dari generasi ke generasi untuk mencakup berbagai macam kegiatan. Standar tersebut memainkan peran penting dalam mencegah atau mengurangi risiko. Peraturan keselamatan tingkat federal saat ini untuk infrastruktur bawah tanah terbatas, tidak berlaku untuk penggunaan sehari-hari sebagian besar jenis fasilitas, dan sebagian besar dimaksudkan untuk mengatur keselamatan konstruksi melalui Administrasi Bahaya Keselamatan Kerja (OSHA). Termasuk peraturan OSHA yang terkait dengan konstruksi bawah tanah (29 CFR 1926.800) yang berlaku untuk konstruksi terowongan bawah tanah, poros, ruang, lorong, dan galian potong-dan-tutup yang terhubung ke konstruksi bawah tanah untuk mengurangi bahaya yang terkait dengan "berkurangnya ventilasi dan cahaya alami, akses dan keluar yang sulit dan terbatas, paparan kontaminan udara, kebakaran, banjir, dan ledakan".

Peraturan tersebut mendefinisikan terowongan sebagai galian bawah permukaan, "sumbu yang lebih panjang membentuk sudut tidak lebih dari 20 derajat terhadap horizontal." Meskipun berlaku untuk banyak jenis infrastruktur bawah tanah, peraturan tersebut hanya

dimaksudkan untuk melindungi pekerja konstruksi bawah tanah selama konstruksi dan tidak membahas masalah keselamatan setelah infrastruktur beroperasi. Setiap negara bagian di Amerika Serikat telah mengadopsi kode keselamatan kebakaran dan keselamatan jiwa untuk memastikan keselamatan dalam struktur, tetapi kode tersebut tidak sepenuhnya membahas struktur bawah tanah.

Sebagian besar negara bagian (45) telah mengadopsi kode bangunan, kebakaran, perpipaan, dan mekanik International Code Council (ICC)6. Kode ICC mengacu pada tiga standar National Fire Protection Association (NFPA) NFPA 130, NFPA 520, dan NFPA 502 yang membahas keselamatan kebakaran dan keselamatan jiwa bawah tanah dan yang memberikan panduan keselamatan untuk terowongan jalan raya dan rel penumpang serta penggunaan ruang yang diciptakan oleh penggalian bawah tanah.

Dua dari standar ini telah berlaku untuk fasilitas transportasi bawah tanah selama beberapa dekade. Namun, standar NFPA yang berlaku tidak dapat secara memadai membahas keselamatan kebakaran dan keselamatan jiwa bawah tanah untuk semua penggunaan ruang bawah tanah, dan kemungkinan akan rusak ketika menggabungkan berbagai jenis hunian dalam satu ruang bawah tanah. Selain itu, standar tersebut memiliki otoritas hukum yang terbatas kecuali diadopsi oleh negara bagian atau yurisdiksi lokal.

Ketidacukupan standar keselamatan disebabkan oleh pengembangannya tanpa mempertimbangkan pertumbuhan semua jenis dan skala besar penggunaan bawah tanah. Inovasi dalam desain dan konstruksi bawah tanah mungkin dibatasi oleh kode preskriptif (dan berpotensi tidak efektif) ketika mekanisme berbasis kinerja yang memastikan desain akan berfungsi sebagaimana mestinya benar-benar dibutuhkan. Lebih jauh, seperti yang ditekankan di seluruh laporan ini, infrastruktur bawah tanah hanyalah satu elemen dari keseluruhan sistem perkotaan yang semakin saling terhubung dan saling bergantung.

Keputusan mengenai keselamatan satu elemen infrastruktur perlu didasarkan pada dampak keputusan tersebut pada keseluruhan sistem. Permintaan untuk penggunaan ruang bawah tanah terus meningkat, dan tanpa pedoman tingkat nasional yang dipertimbangkan dengan saksama, berbasis penelitian, atau standar keselamatan yang efektif yang memperhitungkan bawah tanah sebagai bagian dari sistem perkotaan terpadu yang lebih besar, yurisdiksi lokal dibiarkan menetapkan standar keselamatan mereka sendiri yang mungkin tidak sepenuhnya terinformasi jika sumber daya dan kapasitas yang sesuai tidak tersedia.

4.3 BAHAYA BAGI KESEHATAN MANUSIA

Bagian selanjutnya membahas bahaya bagi kesehatan manusia yang terkait dengan menempati ruang bawah tanah, dengan fokus pada kurangnya ventilasi yang memadai, asap dari kebakaran, dan bahan berbahaya. Beberapa bahaya dan risiko dapat dicegah secara operasional, yang lain dapat diatasi melalui solusi rekayasa langsung ke dalam desain infrastruktur, dan yang lain dapat dikendalikan oleh sistem. Analisis yang cermat terhadap skenario darurat bawah tanah untuk semua bahaya dan risiko termasuk yang muncul sebagai akibat dari perubahan teknologi atau penggunaan dapat memastikan bahwa insiden darurat

bawah tanah tidak meningkat melampaui kemungkinan kendali atau menyebabkan kerusakan yang dapat dicegah.

Misalnya, tren saat ini menuju lebih banyak kendaraan listrik dapat dilihat dapat mengurangi risiko kebakaran di terowongan, tetapi baterai pada kendaraan listrik menghadirkan serangkaian risikonya sendiri. Armada kendaraan masa depan yang bertenaga hidrogen atau gas alam masih menghadirkan kekhawatiran yang berbeda. Redundansi dalam sistem keselamatan kebakaran dan jiwa merupakan kunci untuk mengendalikan insiden. Misalnya, karena pengelolaan asap bawah tanah sangat penting, penting untuk memastikan bahwa skenario ventilasi minimum untuk mengendalikan asap dari kebakaran beroperasi jika ada bagian dari ventilasi darurat yang gagal. Tanpa tingkat redundansi ini dalam sistem keselamatan jiwa yang penting, kegagalan mekanis sederhana dapat membahayakan penghuni, isi, dan struktur fisik di bawah tanah.

Ventilasi, Asap, dan Pengendalian Kebakaran

Rekayasa ventilasi bawah tanah mencakup penyediaan udara yang dapat dihirup bagi orang-orang di bawah tanah dan pembuangan gas berbahaya (misalnya, kelebihan karbon dioksida, gas buang, asap) dari ruang yang ditempati. Memindahkan udara dari permukaan ke bawah tanah saja mungkin tidak memadai, karena udara harus mengandung cukup oksigen agar volume orang dapat dipasok dan bebas dari kontaminan.

Gas berbahaya dapat dihilangkan dengan membersihkan udara bawah tanah atau dengan mengalirkan udara yang terkontaminasi ke permukaan dengan aman (bagi mereka yang berada di bawah tanah dan di permukaan). Standar NFPA dan ICC membahas banyak masalah ini, tetapi tidak secara eksplisit untuk ruang bawah tanah yang dibuat untuk penggunaan manusia. Risiko mungkin tidak diukur secara memadai. Salah satu bahaya terbesar bagi kesehatan dan keselamatan manusia di bawah tanah adalah asap dari kebakaran.

Sangat sesuai dengan pengetahuan teknis saat ini dan kapasitas sistem keselamatan jiwa untuk mengelola asap di hampir semua jenis struktur permukaan. Namun, mengelola asap dalam struktur bawah tanah yang kompleks struktur yang dapat menjangkau beberapa tingkat bawah tanah di beberapa blok kota, ditempati oleh ribuan orang pada waktu tertentu, dan memiliki banyak kegunaan (misalnya, pertokoan, ruang kantor, perawatan kesehatan, perumahan) dan karenanya memiliki banyak potensi bahaya dan risiko dapat menantang desain sistem ventilasi yang paling canggih.

Area bawah tanah multiguna ini dapat jauh lebih kompleks dan sulit untuk diberi ventilasi daripada, misalnya, beberapa terowongan jalan raya yang dapat dimodelkan sebagai tabung udara sederhana dengan penampang melintang yang relatif kecil, meskipun panjang. Ada perbedaan strategis yang penting dalam pengelolaan asap di gedung bertingkat tinggi dibandingkan dengan bangunan bawah tanah yang besar. Misalnya, bangunan tinggi 40 lantai yang menempati satu blok kota penuh (yang menciptakan ruang lantai setara dengan 40 blok kota dalam kesejajaran vertikal) biasanya dirancang untuk mengendalikan ventilasi, alat penyiram kebakaran, alarm, dan sistem keluar segera hingga empat lantai bangunan tempat penghuninya paling berisiko.

Pengelolaan asap biasanya terbatas pada tekanan tangga dan poros lift yang

memerlukan kipas yang relatif kecil. Penghuni di lantai lain dilindungi oleh lantai antara bangunan untuk waktu yang singkat hingga mereka dapat mengungsi dengan aman. Struktur bawah tanah dengan ukuran yang sebanding (setara dengan ruang lantai 40 blok kota) berpotensi dapat menempati ruang lateral yang lebih luas pada lebih sedikit lantai, meningkatkan paparan lateral terhadap api dan asap yang menyebar ke seluruh ruang horizontal.

Pengelolaan asap di area berskala besar seperti itu dengan sedikit, jika ada, alat kontrol yang tersedia di gedung (misalnya, jendela ke luar) memerlukan desain yang relatif lebih kompleks dan sistem ventilasi yang lebih kuat, sistem penyiram yang lebih besar, dan sistem deteksi kebakaran, alarm, dan pintu keluar yang dirancang dengan cermat untuk melindungi penghuni. Informasi alarm darurat khusus perlu dirancang untuk memberi tahu orang-orang tentang perlunya evakuasi. Sistem bangunan bertingkat tinggi hanya perlu menangani satu lantai pada satu waktu. Sistem bawah tanah tentu saja dapat menampung setara dengan 20 lantai atau lebih secara bersamaan.

Mencegah kebakaran dan menghambat pertumbuhan api dapat dilakukan melalui strategi pengelolaan termasuk konstruksi yang tidak mudah terbakar, penanggulangan kebakaran otomatis, deteksi kebakaran yang tepat, kompartementalisasi, pengendalian bahan berbahaya, keamanan yang lebih tinggi, dan pembatasan hunian yang cermat (misalnya, untuk mencegah bahaya yang dekat seperti pekerjaan pabrik yang berdekatan dengan rumah sakit).

Struktur bawah tanah mungkin memiliki beberapa keuntungan dalam hal keselamatan kebakaran dan jiwa dibandingkan dengan struktur permukaan. Struktur bawah tanah dengan ruang tertutup yang lebih kecil dapat memungkinkan pemanfaatan kabut air halus atau sistem gas untuk mengendalikan api dan asap, sehingga mengurangi kebutuhan air dan drainase yang dapat menimbulkan masalah lain di bawah tanah. Dengan memastikan bahwa penghuni menyadari bahaya kebakaran di bawah tanah, semua penghuni akan menanggung lebih sedikit risiko yang terkait dengan kebakaran.

Bahan Berbahaya

Bahan berbahaya yang digunakan dalam atau dibuat melalui proses produksi, pemrosesan, dan pengiriman menimbulkan risiko khusus di bawah tanah karena alasan yang mirip dengan risiko asap dan api: pemisahan fisik dan sistem ventilasi yang menyediakan keamanan yang memadai di atas tanah mungkin tidak memadai di bawah permukaan tanah. Di permukaan, misalnya, bengkel mesin yang menggunakan obor pemotong dapat diizinkan beroperasi di gedung di sebelah bangunan tempat tinggal asalkan ada sekat api seperti celah udara terbuka di antara dinding kedua bangunan tersebut.

Celah udara yang cukup memastikan bahwa api di bengkel mesin tidak mudah menyebar ke bangunan yang bersebelahan, dan memungkinkan pertukaran udara yang mudah ke luar sehingga gas yang digunakan dalam proses pemotongan tidak menggantikan oksigen dan menciptakan atmosfer yang kekurangan oksigen. Di sisi lain, tindakan rekayasa dan operasional mungkin diperlukan untuk memastikan keamanan di bangunan bawah tanah.

Dinding pemisah, ventilasi, dan prosedur yang tepat mungkin diperlukan untuk pemotongan yang aman di bawah tanah. Demikian pula, tumpahan cairan berbahaya di bawah

tanah dapat menimbulkan risiko kesehatan jangka panjang jika cairan tersebut bermigrasi melalui sistem ventilasi dan drainase bawah tanah atau menembus tanah dan batuan berpori yang berdekatan hingga mencemari ruang atau pasokan air lainnya.

4.4 KEAMANAN DARI KEKERASAN

Infrastruktur bawah tanah sering kali dirancang untuk membuat fasilitas bawah tanah menarik dan lebih mudah diakses dan digunakan oleh masyarakat. Bahkan utilitas publik bawah tanah, meskipun tidak dirancang untuk diakses oleh masyarakat umum, perlu dirancang untuk mengakomodasi akses pekerja dan peralatan. Desain infrastruktur sering kali mencakup elemen keamanan untuk mencegah kejahatan dan vandalisme atau untuk melindungi dari kebakaran atau keadaan darurat serupa.

Sayangnya, elemen desain yang memungkinkan warga masyarakat biasa mengakses bawah tanah dengan mudah juga memungkinkan akses bagi mereka yang memiliki niat berbahaya atau merusak. Mustahil untuk menggagalkan semua upaya kekerasan terhadap orang atau infrastruktur. Meski demikian, tren jumlah penumpang kereta bawah tanah di kota-kota besar AS telah meningkat dalam 10 tahun terakhir, yang menunjukkan bahwa kebutuhan dan kemudahan lebih penting daripada kekhawatiran langsung atas keselamatan pribadi setidaknya untuk sebagian dari populasi.

Beberapa penelitian telah mendokumentasikan pola penggunaan kereta bawah tanah setelah peristiwa teroris, tetapi penelitian tentang jumlah penumpang angkutan umum setelah pengeboman London tahun 2005, pengeboman Madrid tahun 2004, dan serangan gas Sarin tahun 1995 di Jepang mengungkapkan bahwa perilaku dipengaruhi oleh kepercayaan budaya, karakteristik serangan, faktor-faktor yang terkait dengan sistem transportasi itu sendiri, dan persepsi sosial tentang risiko.

Misalnya, jumlah penumpang kereta bawah tanah dan bus London (yang juga menjadi sasaran serangan) menurun tetapi perlahan pulih setelah insiden di sana, tetapi jumlah penumpang di Jepang tampaknya tidak berubah. Keamanan dan ketahanan terhadap kekerasan di masyarakat perkotaan dapat ditingkatkan melalui berbagai fungsi perencanaan, desain, dan operasional yang mengurangi frekuensi atau tingkat keparahan kejadian berbahaya. Bagian ini pertama-tama membahas keselamatan individu dari kekerasan pribadi dan kemudian membahas kekerasan terhadap sejumlah besar orang dan infrastruktur itu sendiri.

Keamanan dari Kejahatan

Rasa keamanan pribadi kebebasan untuk beraktivitas di kota dengan ekspektasi rendah akan serangan kekerasan terhadap diri sendiri penting bagi kelancaran fungsi masyarakat. Desain fisik dan jumlah orang yang hadir di ruang yang ditempati berkontribusi pada keamanan individu dan rasa keamanan pribadi. Jenis struktur bawah tanah tertentu, misalnya jalan bawah tanah untuk pejalan kaki, mungkin memiliki reputasi yang buruk dalam hal keamanan, mungkin karena pencahayaan yang buruk atau keterbatasan penghuni, dibandingkan dengan sistem metro yang menerapkan tingkat keamanan yang lebih tinggi untuk mengatur pengaturan penumpang (misalnya, melalui penggunaan kereta yang lebih

pendek dan penggunaan peron di malam hari untuk meningkatkan jumlah penumpang di area yang ditempati).

Penggunaan bawah tanah campuran menawarkan berbagai macam masalah. Bagaimana keamanan, misalnya, operasi ritel yang terletak di ruang tunggu transportasi umum terjamin ketika ruang ritel ditutup untuk bisnis di malam hari tetapi ketika transportasi umum masih digunakan? Bagaimana akses publik ke transportasi terjamin jika area perbelanjaan bawah tanah ditutup untuk siang hari? Solusi teknis dapat berupa pemantauan yang ditingkatkan.

Serangan terhadap Infrastruktur dan Populasi Perkotaan

Ruang bawah tanah telah lama dan masih disarankan atau digunakan untuk penahanan atau keamanan. Misalnya, ruang bawah tanah digunakan untuk melindungi keamanan kepemimpinan suatu negara. Dengan munculnya senjata pemusnah massal, banyak pekerjaan teknik dilakukan pada tahun 1950-an dan 1960-an pada fasilitas militer dan pertahanan bawah tanah di Amerika Serikat yang berfungsi untuk memajukan teknologi yang terkait dengan lingkungan, keamanan, dan proteksi kebakaran di fasilitas bawah tanah.

Contohnya termasuk fasilitas komando alternatif Cheyenne Mountain yang jauh di dalam gunung granit dan bunker di Greenbrier di Virginia Barat untuk kelangsungan pemerintahan jika terjadi serangan. Selain itu, ada minat berkelanjutan di seluruh dunia untuk menempatkan pembangkit listrik tenaga nuklir dan limbahnya di bawah tanah untuk meningkatkan isolasi bahan radioaktif serta untuk meningkatkan keamanan fasilitas. Kelayakan penyimpanan dan keamanan jangka panjang terus menjadi bidang investigasi yang aktif.

Sebagai bentuk pengakuan atas keamanan yang ditawarkan oleh bawah permukaan, Svalbard Global Seed Vault di Norwegia dibangun di sebuah gunung untuk melindungi keanekaragaman tanaman global jika terjadi bencana regional atau global yang berhubungan dengan iklim atau perang. Namun, serangan teroris 11 September 2001 (9/11) di Amerika Serikat mengubah cara penanganan keselamatan dan keamanan di negara ini, termasuk desain dan pengoperasian struktur bawah tanah. Sebelum 9/11, vandalisme dan aktivitas kriminal menjadi perhatian utama keamanan bawah tanah. Ancaman teroris terhadap orang dan infrastruktur dianggap sebagai anomali.

Infrastruktur bawah tanah, terutama sistem angkutan massal, kini dikenal sebagai target yang rentan oleh mereka yang ingin melakukan kerusakan besar pada infrastruktur atau mencelakai banyak orang. Efek ledakan, kebakaran, gas, dan racun di udara lainnya serta bahaya kesehatan dapat lebih terkonsentrasi dan merusak dalam struktur bawah tanah yang terbatas. Tindakan terorisme telah terjadi di beberapa lokasi bawah tanah dengan konsekuensi serius, misalnya, serangan tahun 1995 dengan gas saraf, Sarin, di Tokyo, Jepang, pengeboman tahun 2005 di London, Inggris, dan pengeboman tahun 2010 di Moskow, Rusia.

Semua peristiwa ini dilakukan dengan menggunakan perangkat yang dibawa dengan tangan ke infrastruktur bawah tanah. Sekitar 87 persen serangan teroris di seluruh dunia pada tahun 2003 dilakukan melalui pengeboman, yang dapat dilakukan sebagai alat peledak rakitan yang dibawa kendaraan, perangkat yang digunakan sebagai jebakan, perangkat yang

diledakkan dari jarak jauh, atau perangkat yang dikirim oleh pembom manusia. Ada juga ancaman yang mungkin terjadi dari alat peledak penembus tanah yang ditargetkan yang dikirim oleh rudal.

Namun, instalasi bawah tanah telah diakui sebagai penyedia "perlindungan fisik paling efektif yang tersedia" dan dapat dirancang sedemikian rupa sehingga elemen infrastruktur penting terlindungi dari serangan fisik dan diperkuat dari serangan elektronik. Penempatan fasilitas di bawah tanah membuat fasilitas tersebut lebih sulit rusak dari luar (misalnya, dari permukaan) dan membatasi titik masuk. Linger dan lainnya menggambarkan biaya perlindungan tersebut sebagai "kompetitif" dengan struktur di atas tanah yang diperkeras ke tingkat yang sama.

Sayangnya, klasifikasi teknologi militer telah mengakibatkan kurangnya standar atau praktik dalam infrastruktur sipil. Menyadari perlunya mengatasi bahaya tersebut, banyak organisasi telah memulai penelitian yang terkait dengan banyak aspek keamanan dan keselamatan bawah tanah. Satuan Tugas Keamanan Transportasi Asosiasi Pejabat Jalan Raya dan Transportasi Negara Bagian Amerika (AASHTO) mensponsori persiapan panduan untuk membantu para profesional transportasi saat mereka mengidentifikasi aset jalan raya penting dan mengambil tindakan untuk mengurangi kerentanannya.

Badan Riset Transportasi dari National Research Council telah merilis banyak laporan terkait keselamatan dan keamanan transportasi, termasuk banyak yang terkait dengan transportasi bawah tanah. Laporan-laporan ini memberikan panduan dan rekomendasi tentang topik-topik seperti peningkatan permanen pada infrastruktur bawah tanah yang akan meningkatkan keamanan serta masa pakai struktur bawah tanah dan sistem pendukungnya. Demikian pula, Federal Highway Administration dan AASHTO bersama-sama mensponsori sebuah panel untuk mengembangkan "strategi dan praktik untuk mencegah, mengganggu, dan mengurangi potensi serangan," merekomendasikan agar koordinasi antarlembaga dan pemangku kepentingan terjadi sehingga metodologi dan solusi penilaian keamanan konsisten dengan kebutuhan semua pihak yang terlibat dan bahwa tanggung jawab hukum tingkat federal dan negara bagian diperjelas.

Dari sudut pandang teknis, panel merekomendasikan agar jembatan dan terowongan penting diidentifikasi dan diprioritaskan, dan dana dialokasikan untuk menutupi keamanan struktur tersebut. Panel selanjutnya merekomendasikan agar keamanan harus menjadi elemen rekayasa desain dan bahwa penelitian dan pengembangan yang tepat harus menginformasikan standar teknis untuk struktur dengan mempertimbangkan ancaman keamanan.

Keamanan, seperti halnya keselamatan, ditingkatkan oleh pemikiran sistem kolaboratif di antara semua pemangku kepentingan sepanjang siklus hidup infrastruktur. Interaksi antara perencana kota dan teknisi bawah tanah selama pengembangan dan pengoperasian dapat difokuskan pada bagaimana infrastruktur bawah tanah dapat meningkatkan atau menghambat perlindungan fasilitas penting dan penghuninya. Masalah dan kebutuhan keamanan terus berubah seiring dengan perubahan teknologi, bahaya yang diketahui berhasil diatasi, atau bahaya baru berkembang.

Keberlanjutan memerlukan penerapan teknologi yang inovatif dan komprehensif, dan, seperti yang sering dijelaskan dalam bidang keamanan, teknologi harus mencakup konsep pencegahan, pencegahan, deteksi, dan penundaan, serta konsep yang terkait dengan respons, pemulihan, dan evaluasi pelajaran yang dipelajari dari insiden atau "hampir terjadi" yang memang terjadi. Kehilangan nyawa yang besar dan kerusakan struktural, ekonomi, dan bahkan politik yang parah dapat terjadi jika ancaman keamanan tidak dinilai dan ditangani dengan tepat.

Memastikan keselamatan orang dan aset fisik serta meminimalkan gangguan infrastruktur fisik, sosial, dan ekonomi dari keseluruhan sistem perkotaan harus dipertimbangkan. Namun, setiap elemen sistem bawah tanah bersifat unik dan memerlukan langkah-langkah khusus untuk mengurangi berbagai ancaman yang diantisipasi. Pengerasan pasif, pada kenyataannya, merupakan garis pertahanan terakhir dalam menyediakan fasilitas yang aman dan terlindungi, dan teknik pengerasan struktural pasif yang diterapkan untuk mengurangi kerentanan tidak akan selalu meningkatkan keberlanjutan.

Pengenalan rekayasa faktor manusia untuk mencegah kepanikan dan perilaku menyimpang serta untuk memandu pengenalan ancaman, pengambilan keputusan, dan tindakan di bawah tekanan sangat dibutuhkan. Material baru dan perilakunya untuk aplikasi ini harus dipertimbangkan (misalnya, untuk mencegah cedera akibat pecahan dan puing-puing yang beterbangan serta perkembangan racun di udara dari perubahan kimia akibat panas dan api). Selain itu, penilaian risiko perlu mencakup aspek evakuasi, penyelamatan, dan pemulihan untuk meminimalkan dampak dan membantu dalam kegiatan pascainsiden.

4.5 KODE KESELAMATAN TEROWONGAN BAWAH TANAH INTERNASIONAL

Kode dan pedoman keselamatan internasional yang berlaku untuk infrastruktur bawah tanah tidak dapat diberlakukan di Amerika Serikat, tetapi perbandingan dengan kode AS dapat membantu mengungkap kekurangan dalam praktik dan memandu praktik masa depan di Amerika Serikat. Administrasi Jalan Raya Federal AS (FHWA) berupaya mempelajari sistem, peralatan, dan prosedur bawah tanah apa yang digunakan secara internasional untuk meningkatkan keselamatan, operasi, dan respons bawah tanah dan akhirnya membuat rekomendasi untuk strategi implementasi di sembilan area di mana standar dan peraturan AS dapat ditingkatkan.

Informasi keselamatan internasional terlengkap yang terkait dengan infrastruktur bawah tanah berkaitan dengan konstruksi dan operasi terowongan jalan, dan Komisi Ekonomi Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk Eropa (UNECE) telah menemukan bahwa ada lebih sedikit kecelakaan lalu lintas di terowongan panjang daripada di bentangan jalan terbuka dengan panjang yang sama, yang disebabkan oleh perlindungan dari unsur-unsur alam dan pencahayaan yang konsisten. Namun, insiden yang terjadi di terowongan cenderung memiliki dampak yang lebih besar dalam hal bahaya bagi orang dan infrastruktur. UNECE menyatakan bahwa meningkatkan perilaku pengemudi, kendaraan mereka, efisiensi operator terowongan, dan infrastruktur itu sendiri adalah cara untuk mengurangi jumlah insiden terowongan.

Temuan UNECE diakui dalam arahan dari Uni Eropa tentang standar keselamatan

minimum untuk terowongan di jaringan jalan trans-Eropa. Asosiasi Jalan Raya Dunia (PIARC)¹⁰ adalah forum internasional lain yang mempertimbangkan serangkaian masalah jalan dan transportasi dari sudut pandang keberlanjutan. Komite teknis tentunya bertugas mengeksplorasi manajemen dan peningkatan keselamatan terowongan, memengaruhi perilaku pengguna di terowongan, dan mengevaluasi, mengatur, dan mengomunikasikan pengetahuan tentang operasi dan keselamatan terowongan. PIARC telah menghasilkan beberapa dokumen keselamatan termasuk yang terkait dengan pengendalian kebakaran dan asap di terowongan jalan, faktor manusia dan keselamatan pengguna terowongan jalan, dan pendekatan terpadu untuk keselamatan terowongan jalan.

Tantangan Tanggap Darurat

Tanggapan terhadap semua jenis keadaan darurat di bawah tanah menimbulkan tantangan tersendiri bagi petugas tanggap darurat yang biasanya mengembangkan rencana strategis dan taktis serta berlatih untuk menghadapi skenario respons. Waktu respons terhadap keadaan darurat di bawah tanah bertambah, akses dan pencarian jalan mungkin sulit, dan lingkungan yang kompleks membuat pengambilan keputusan intuitif menjadi lebih menantang. Petugas tanggap darurat memerlukan pelatihan dan praktik khusus untuk menggunakan sistem keselamatan kebakaran dan keselamatan jiwa yang lebih kompleks yang mengelola, misalnya, asap, pemadaman api, akses, keluar, dan pemberitahuan kebakaran di bawah tanah.

Waktu Respons

Layanan pemadam kebakaran dan medis diamanatkan untuk menanggapi panggilan secepat dan seaman mungkin. Misalnya, NFPA 1710 menetapkan waktu respons minimum 4 menit oleh petugas pemadam kebakaran ke "pintu depan" bangunan untuk 90 persen dari semua insiden. Namun, "pintu depan" bangunan bawah tanah bisa jadi merupakan portal akses di permukaan jalan, mungkin beberapa blok jauhnya dari lokasi darurat. Jarak tersebut akan menambah waktu bagi petugas pemadam kebakaran untuk menanggapi keadaan darurat yang sebenarnya.

Jika waktu respons yang lama tidak dapat diterima, petugas dan peralatan mungkin perlu ditempatkan di bawah tanah atau titik akses yang lebih dekat yang disertakan dalam desain. Untuk kompleks bawah tanah yang lebih besar, sumber daya darurat bawah tanah dapat mencakup peralatan darurat (mobil pemadam kebakaran, truk tangga, dan kendaraan medis) dan penegakan hukum. Mengakses kebakaran bawah tanah atau bahaya lainnya mungkin memerlukan penurunan yang sulit melalui asap yang mengepul kecuali jika rute atau metode akses alternatif dirancang, dibangun, dan dipelihara.

Aktivitas pemadaman kebakaran sulit dilakukan karena proses normal untuk penilaian visual situasi di permukaan, yang biasanya dilakukan melalui pemeriksaan setidaknya tiga sisi bangunan yang terkena insiden, mungkin tidak praktis di bawah tanah. Ventilasi darurat dengan metode vertikal atau horizontal mungkin dibatasi oleh kurangnya jendela eksterior atau akses ke eksterior melalui 'atap' tempat asap dapat dilepaskan ke luar.

Penunjuk arah

Kemampuan petugas tanggap darurat untuk mengarahkan diri mereka sendiri sangat

penting. Langkah-langkah tambahan diperlukan untuk memastikan penggunaan metodologi komprehensif yang menyediakan lokasi yang tepat dan dapat dikenali dengan cepat. Banyak departemen tanggap darurat sekarang menggunakan teknologi satelit untuk menemukan unit tanggap darurat dan menggunakan computer aided dispatch (CAD) untuk mengidentifikasi unit dengan waktu tanggap yang sesingkat mungkin.

Akan tetapi, teknologi ini bergantung pada komunikasi garis pandang dengan satelit dan tidak berfungsi di bawah tanah. Alternatif belum dikembangkan untuk penggunaan di bawah tanah, dan responden darurat harus bergantung pada teknologi lama (misalnya, peta cetak) untuk mengarahkan diri mereka di lingkungan bawah tanah. Meskipun peta merupakan alternatif yang layak, penggunaan lebih dari satu teknologi (misalnya, peta satelit dan cetak) dapat menimbulkan kebingungan bagi unit tanggap darurat.

Beberapa teknologi untuk komunikasi dan pelacakan darurat yang mungkin dapat diterapkan di infrastruktur bawah tanah sedang diteliti dan diuji melalui dukungan yang diberikan oleh National Institute for Occupational Safety and Health Office of Mine Safety and Health Research. Misalnya, lembaga tersebut mendukung penelitian untuk navigasi inersia untuk pelacakan mandiri dan komunikasi nirkabel untuk digunakan oleh penambang dan personel penyelamat. Kemajuan teknologi ini dapat mengarah pada peningkatan keselamatan infrastruktur bawah tanah.

Tanggapan terhadap peristiwa teroris di infrastruktur bawah tanah dapat menjadi tantangan tersendiri bagi petugas tanggap darurat karena petugas tanggap darurat, beserta sistem keselamatan utama (misalnya, pintu keluar), juga dapat menjadi target serangan. Infrastruktur di atas dan di bawah tanah dengan hunian rendah (kurang dari 500 orang) umumnya hanya memerlukan dua pintu keluar menurut International Building Code dan oleh karena itu memiliki akses dan jalan keluar darurat yang terbatas. Titik kemacetan dapat terjadi saat petugas tanggap darurat bergerak turun dan penghuni bergerak naik melalui jalur yang sama.

Serangan teroris yang terkoordinasi dapat mencakup rencana untuk membuat pintu keluar tidak dapat dilewati, sehingga menimbulkan masalah yang lebih besar dibandingkan dengan bangunan permukaan dengan jendela dan akses langsung ke udara segar. Informasi lebih lanjut tentang terorisme bagi petugas tanggap darurat tersedia di beberapa sumber pemerintah.

KOTAK 4.1

Rekomendasi dan Strategi Implementasi untuk Meningkatkan Keselamatan Terowongan AS dari Program Pemindaian Teknologi Internasional

Administrasi Jalan Raya Federal AS dan Asosiasi Pejabat Jalan Raya dan Transportasi Negara Bagian Amerika serta Program Penelitian Jalan Raya Kooperatif Nasional mensponsori sebuah studi untuk mengeksplorasi praktik di beberapa negara Eropa yang terkait dengan keselamatan terowongan, operasi, dan respons darurat. Berikut ini adalah rekomendasi dan beberapa strategi implementasi yang dikutip dari laporan yang dihasilkan.

1. Mengembangkan Rambu Visual, Audible, dan Tactile yang Universal, Konsisten, dan

Lebih Efektif untuk Rute Pelarian.

Rekomendasi mencakup keseragaman rambu yang dapat dipahami oleh semua orang dan meminimalkan kebingungan dalam menemukan pintu keluar jika terjadi keadaan darurat. Suara dan pesan verbal sederhana serta pesan tactile dapat membuat rambu visual lebih efektif dalam situasi cahaya redup. Pedoman National Fire Protection Association (NFPA) yang berlaku untuk desain proteksi kebakaran dan keselamatan jiwa harus ditinjau ulang, dan teknologi terkini serta hasil dari studi respons manusia harus dimasukkan ke dalam desain portal evakuasi, rute evakuasi, dan lintasan penyeberangan.

2. Mengembangkan Pedoman AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) untuk Terowongan Lama dan Baru.

Satu referensi AASHTO tunggal bagi teknisi dan operator untuk memfasilitasi kriteria AS yang konsisten yang mengoordinasikan standar dan pedoman AASHTO, FHWA, NFPA, American Public Transportation Association, dan National Research Council Transportation Research Board untuk terowongan.

3. Melakukan Penelitian dan Mengembangkan Pedoman tentang Manajemen Darurat Terowongan yang Meliputi Faktor Manusia.

Pelajari pengalaman desain faktor manusia Eropa untuk perencanaan, desain, dan respons darurat terowongan yang lebih efektif. Bekerja melalui AASHTO untuk mendanai dan mengembangkan panduan manajemen darurat terowongan. Berkolaborasi dengan akademisi untuk mempelajari respons manusia dalam insiden terowongan.



Gambar 4.1 Contoh Dari Terowongan Mont Blanc (Antara Prancis Dan Italia) Berupa Rambu Petunjuk Rute Keluar Terowongan, Yang Merupakan Ciri Khas Rambu Seragam Yang Digunakan Di Banyak Negara Di Eropa.

4. Mengembangkan Pendidikan untuk Respons Pengemudi terhadap Insiden Terowongan.

5. Mengevaluasi Efektivitas Sistem Deteksi Insiden Otomatis dan Video Cerdas untuk Terowongan.

Sistem komputer yang terhubung dengan sistem pengawasan video dapat digunakan untuk mendeteksi, melacak, dan merekam insiden serta memberi sinyal kepada operator untuk mengambil tindakan yang tepat, sehingga mengurangi waktu respons. Karena

penggunaan televisi sirkuit tertutup secara luas di Amerika Serikat tidak mudah diterima, sosialisasi yang menjelaskan manfaat dan kemungkinan teknologi ini akan diperlukan.

6. Mengembangkan Kriteria Desain Fasilitas Terowongan untuk Meningkatkan Kinerja Pengemudi yang Optimal dan Respons terhadap Insiden.

Desain terowongan yang inovatif dengan geometri yang lebih baik atau yang lebih estetik meningkatkan keselamatan pengemudi, kinerja, dan operasi lalu lintas.

7. Menyelidiki Sistem Satu Tombol untuk Memulai Respons Darurat dan Sistem Sensor Otomatis untuk Menentukan Respons.

Beberapa kesalahan manusia dan kebutuhan untuk pengambilan keputusan dalam situasi darurat dapat dihindari dengan satu tombol untuk ditekan oleh operator yang memulai beberapa tindakan respons kritis. Sistem otomatis (misalnya, menggunakan sensor opasitas) dapat membantu menentukan respons yang tepat untuk situasi tertentu. Kipas dan ventilasi dapat dikontrol dengan baik melalui sistem pengumpulan dan analisis data loop tertutup yang memantau kondisi atmosfer, kecepatan udara terowongan, dan kepadatan asap.

8. Gunakan Pendekatan Manajemen Risiko untuk Inspeksi dan Pemeliharaan Keselamatan Terowongan.

Pemantauan dan analisis data yang cerdas dapat memberikan informasi untuk memungkinkan pengambilan keputusan berbasis risiko sehubungan dengan penjadwalan inspeksi (dan frekuensi inspeksi) dan prioritas.

9. Terapkan Lampu Dioda Pemancar Cahaya untuk Jarak Kendaraan yang Aman dan Penggambaran Tepi di Terowongan.

Lampu LED biru pada interval tertentu memungkinkan pengemudi untuk lebih mudah mengukur jarak dari dinding terowongan dan kendaraan di depan dan untuk menjaga jarak berkendara yang aman.



Gambar 4.2 Beberapa Terowongan Di Eropa Menggunakan Dioda Pemancar Cahaya Yang Didistribusikan Secara Merata Untuk Membantu Pengendara Mengenal Tepi Jalan Dan Menentukan Jarak Aman Untuk Mengikuti Kendaraan.

Komunikasi

Radio permukaan sering kali menggunakan pengulang radio untuk menjangkau area

yang luas melalui udara terbuka, sebuah teknologi yang mungkin tidak berfungsi di bawah tanah. Namun, responden darurat sangat bergantung pada komunikasi radio. Ketika tidak dapat menggunakan teknologi komunikasi radio permukaan, responden bergantung pada teknologi lain termasuk pengulang radio dan kabel koaksial pengumpan bocor yang berfungsi sebagai antena yang diperpanjang. Metode ini berfungsi di bawah tanah, tetapi harus dikoordinasikan dan cukup kuat untuk memastikan jangkauan yang dapat dipahami di seluruh bawah tanah melalui, misalnya, redundansi sistem.

Interoperabilitas di antara banyak responden, berpotensi dari banyak lembaga, dan kemampuan untuk berkomunikasi pada beberapa frekuensi juga penting untuk memastikan keselamatan. Teknologi untuk berkomunikasi antara departemen responden darurat dengan sistem redundan ada saat ini, tetapi sistem ini mungkin tidak berfungsi di bawah tanah. Seperti yang disebutkan di bagian sebelumnya, industri pertambangan sedang meneliti komunikasi bawah tanah yang ditingkatkan (misalnya, penggunaan teknologi nirkabel di bawah tanah) antara mereka yang menempati bawah tanah, dan antara mereka yang berada di permukaan dan mereka yang berada di bawah tanah. Penelitian lanjutan di area ini diperlukan untuk memastikan komunikasi yang andal dalam infrastruktur bawah tanah.

4.6 MENINGKATKAN KENYAMANAN DAN MEMAKSIMALKAN KESELAMATAN

Bukti anekdotal menunjukkan bahwa banyak orang, terutama mereka yang tidak terbiasa berada di bawah tanah secara teratur, merasa tidak nyaman dengan gagasan berada di bawah tanah. Komite tidak mengetahui data yang mengukur tingkat persepsi negatif. Sikap negatif mungkin berasal dari masalah keselamatan, pengalaman pribadi yang tidak menyenangkan, atau keyakinan bahwa bawah tanah itu lembap dan berbahaya, bukan dari pengetahuan khusus tentang manfaat, risiko, dan keselamatan relatif fasilitas bawah tanah.

Agaknya, masyarakat tidak berkampanye untuk menghilangkan sistem dan layanan bawah tanah yang ada, tetapi mungkin tampak tidak antusias dengan aplikasi bawah tanah yang baru, terutama mengingat biaya awalnya. Menemukan cara untuk mengklarifikasi dan mengimbangi persepsi negatif dapat menjadi hambatan yang sama besarnya dengan tantangan keselamatan dan teknis yang paling rumit dan memerlukan fokus penelitian menyeluruh tersendiri. Lingkungan bawah tanah perkotaan dapat direkayasa dan dikelola dengan desain yang baik agar aman, menarik, merangsang, produktif, dan sehat.

Dengan perhatian yang tepat pada pencahayaan, ventilasi, isyarat visual untuk orientasi, pencegahan kebakaran dan pertimbangan keselamatan lainnya, jalan keluar darurat, dan pertimbangan estetika, ruang bawah tanah dapat sama menariknya dengan ruang permukaan yang dirancang untuk penggunaan serupa. Menciptakan ruang bawah tanah yang memungkinkan dan mendorong penggunaan yang aman, ekonomis, dan berkelanjutan dalam jangka panjang merupakan hal mendasar agar ruang tersebut menjadi bagian dari pembangunan yang berkelanjutan dan tangguh di lingkungan perkotaan.

BAB 5

SIKLUS, BIAYA, DAN MANFAAT INFRASTRUKTUR BAWAH TANAH

Pembangunan bawah tanah memberikan peluang untuk menggunakan ruang kota yang tersedia secara lebih efektif, tetapi memerlukan investasi yang signifikan dan berpotensi mahal untuk konstruksi awal dibandingkan dengan infrastruktur penggunaan serupa yang dibangun di permukaan. Bab ini merangkum pengetahuan yang ada tentang keberlanjutan siklus hidup, biaya, dan manfaat pembangunan bawah tanah. Literatur mengenai dampak infrastruktur bawah tanah terhadap keberlanjutan siklus hidup pembangunan kota relatif sedikit.

Lebih banyak yang diketahui tentang biaya dan manfaat siklus hidup moneter, sementara lebih sedikit yang diketahui tentang dampak lingkungan atau sosial jangka panjang. Bahkan studi yang terkait dengan manfaat dan biaya ekonomi terutama untuk menginformasikan penilaian alternatif untuk proyek yang diusulkan, seperti untuk Jembatan Alaska Way di Seattle. Lebih sedikit studi retrospektif telah dilakukan untuk menilai biaya dan manfaat aktual pembangunan bawah tanah.

Bab ini tidak memberikan penilaian biaya siklus hidup untuk pekerjaan bawah tanah apa pun; melainkan mengidentifikasi faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam penilaian siklus hidup dalam hal biaya dan manfaat ekonomi sepanjang masa pakai infrastruktur (konstruksi, operasi, dan renovasi) serta biaya dan manfaat lingkungan dan sosial. Penelitian yang dapat memberikan informasi penilaian siklus hidup yang lebih baik dan lebih komprehensif diidentifikasi.

5.1 PENILAIAN KEBERLANJUTAN SIKLUS HIDUP

Dalam menilai keberlanjutan siklus hidup, analisis “triple bottom line” sering diadopsi yang mempertimbangkan dampak ekonomi, lingkungan, dan sosial dari pembangunan. Elkington memperkenalkan konsep dasar pendekatan tersebut pada tahun 1994 dan mengembangkannya serta memperkenalkan istilah “triple bottom line” pada tahun 1997. Pendekatan tersebut menyediakan kerangka kerja untuk penilaian multi-objektif atas investasi yang kompleks.

“Akuntansi biaya penuh” mengejar tujuan yang sama untuk memasukkan berbagai dampak dalam pengambilan keputusan, tetapi akuntansi biaya penuh biasanya berfokus pada pengembangan estimasi moneter dari berbagai dampak. Contoh terbaru dari pendekatan ini adalah estimasi biaya eksternal yang terkait dengan produksi energi. Namun, dampak lingkungan dan sosial sulit untuk diukur secara moneter dan sering kali berada di luar pengetahuan terkini tentang pengembangan bawah tanah karena kurangnya perhatian.

Oleh karena itu, bab ini dibagi menjadi beberapa bagian yang mempertimbangkan dampak ekonomi, lingkungan, dan sosial siklus hidup dari pengembangan bawah tanah. Tinjauan tentang biaya dan manfaat siklus hidup ini konsisten dengan tugas komite untuk mengeksplorasi bagaimana penggunaan bawah tanah dapat meningkatkan keberlanjutan.

Perencanaan dan Penilaian Siklus Hidup

Pembangunan bawah tanah sering kali melibatkan siklus hidup yang relatif panjang bahkan jika dibandingkan dengan investasi infrastruktur lainnya. Misalnya, kereta bawah tanah Circle Line di London awalnya dibangun lebih dari 150 tahun yang lalu pada pertengahan abad kesembilan belas. Meskipun jalur tersebut telah diperpanjang, direnovasi, dan direhabilitasi dari waktu ke waktu, investasi awal dalam konstruksi bawah tanah masih membuahkan hasil dan menyediakan perjalanan dan manfaat lainnya.

Demikian pula, jaringan pipa bawah tanah juga dapat bertahan lebih dari 100 tahun, terutama jika inspeksi *in situ*, perlindungan katodik, dan rehabilitasi dilakukan. Namun, cakrawala perencanaan pemerintah dan swasta biasanya cukup pendek sehubungan dengan masa manfaat infrastruktur. Rencana transportasi jangka panjang metropolitan dan seluruh negara bagian, misalnya, sering kali mempertimbangkan manfaat dan biaya investasi hanya untuk cakrawala 20 tahun.

Jangka waktu perencanaan yang pendek seperti itu berarti bahwa manfaat apa pun dari pembangunan bawah tanah yang terjadi setelah 20 tahun tidak dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan investasi. Pembangunan infrastruktur bawah tanah melibatkan investasi awal untuk menciptakan ruang yang dapat digunakan yang memberikan manfaat dalam jangka waktu yang panjang. Masa pakai infrastruktur bawah tanah yang panjang dapat dikecualikan dari analisis yang dilakukan oleh mereka yang memiliki jangka waktu perencanaan yang pendek, seperti halnya biaya pemilik dan pengguna untuk merenovasi fasilitas permukaan dapat dikecualikan dari analisis biaya, meskipun biaya tersebut mungkin cukup besar.

Demikian pula, tingkat diskonto yang tinggi untuk menghitung nilai sekarang dari manfaat masa depan akan membuat manfaat tersebut kurang berharga jika diberikan dalam jangka waktu yang lama. Misalnya, tingkat diskonto uji riil tahun fiskal federal 2021 untuk jangka waktu perencanaan 30 tahun ditetapkan sebesar 2,7 persen. Dengan tingkat diskonto ini, Rp. 1.000 dari manfaat riil yang diterima 30 tahun kemudian akan memiliki nilai tahun 2021 sebesar $1.000/1,02730 = \text{Rp. } 450$, atau kurang dari setengahnya. Manfaat sebesar satu dolar yang diterima 100 tahun ke depan akan diabaikan karena berada di luar cakrawala perencanaan atau hanya akan bernilai Rp. 70,- pada tahun 2021.

Umur pakai yang panjang itu sendiri juga dapat memengaruhi perencanaan alternatif di masa mendatang. Pengembangan bawah tanah tertentu dapat menghalangi penggunaan lain atau membuatnya lebih mahal untuk diterapkan. Misalnya, terowongan transportasi bawah tanah seperti proyek Boston Central Artery memerlukan pembangunan kembali dan relokasi utilitas bawah tanah yang ada di jalur terowongan. Fondasi bangunan dapat membuat penggunaan kembali lokasi bawah tanah menjadi sangat mahal, sehingga menghalangi parkir bawah tanah baru, terowongan, atau penggunaan lain di lokasi tersebut.

Akibatnya, konstruksi bawah tanah dapat meningkatkan biaya dan mengurangi fleksibilitas opsi untuk penggunaan alternatif di masa mendatang. Karena sebagian besar fasilitas bawah tanah dibiarkan di dalam tanah bahkan setelah masa manfaatnya berakhir, biaya tambahan atau kesulitan untuk menggunakan kembali ruang tersebut terus berlanjut hampir tanpa batas. Upaya perencanaan yang komprehensif akan mengakui bahwa ruang

bawah tanah adalah sumber daya yang harus digunakan dengan cara sebaik mungkin, daripada membiarkan penggunaan awal menghalangi penggunaan selanjutnya.

Kesimpulan serupa telah diambil sehubungan dengan pembatasan ruang angkasa di orbit di sekitar Bumi yang dapat mencegah penggunaan orbit tersebut untuk tujuan lain. Selain menilai siklus hidup infrastruktur bawah tanah itu sendiri, keberlanjutan menyarankan agar dampak infrastruktur juga dipertimbangkan untuk seluruh siklus hidup suatu proyek. Penilaian siklus hidup “mempelajari aspek lingkungan dan dampak potensial sepanjang masa pakai suatu produk (yaitu, dari awal hingga akhir) dari perolehan bahan baku hingga penggunaan produksi dan pembuangan”.

Gambar 5.1 mengilustrasikan siklus hidup rantai pasokan generik. Untuk infrastruktur bawah tanah, rantai pasokan akan mencakup berbagai bahan dan proses yang terlibat dalam konstruksi serta masukan seperti energi untuk penerangan dan ventilasi selama pengoperasian fasilitas. Biaya penutupan dan penghentian operasional akan dimasukkan dalam fase pembuangan pada Gambar 5.1. Fase penimbunan sampah diharapkan mencakup biaya penyediaan tempat pembuangan sampah yang direkayasa untuk pembuangan atau biaya apa pun yang terkait dengan bangunan lama di bawah tanah.



Gambar 5.1 Siklus Hidup Produk Generik Dari Awal Hingga Akhir. SUMBER: Dimodifikasi Dari Hendrickson Et Al., 2006.

Metrik yang digunakan dalam menilai pembangunan berkelanjutan secara keseluruhan, serta untuk menilai dampak ekonomi, lingkungan, dan sosial tertentu, masih menjadi subjek perdebatan luas bahkan tanpa mempertimbangkan keadaan khusus pembangunan bawah tanah. Dampak ekonomi biasanya dinyatakan dalam satuan moneter, tetapi berbagai dampak dapat dipertimbangkan untuk dampak lingkungan dan sosial. Misalnya, Reijnders menyarankan agar dampak lingkungan yang luas dipertimbangkan dalam menyiapkan penilaian siklus hidup termasuk:

- Dampak pada sumber daya (misalnya, penggunaan sumber daya terbarukan dan tak terbarukan, pencemaran sumber daya);
- Dampak langsung pada alam dan lanskap, seperti melalui perubahan lanskap yang tidak diinginkan;
- Polusi udara dan kontribusinya terhadap perubahan iklim, kabut asap, endapan asam, bau, dan kerusakan lapisan ozon;
- Polusi tanah, seperti limbah padat yang ditambahkan ke tanah, melalui eutrofikasi,

- penambahan racun, dan kontribusi terhadap pencemaran air tanah;
- Dampak air permukaan, termasuk pembuangan biologis atau kimia dengan kebutuhan oksigen, pembuangan beracun, pemanasan air permukaan, dan kontribusi terhadap eutrofikasi;
- Kebisingan;
- Radiasi atau medan elektromagnetik; dan
- Radiasi pengion.

Dalam banyak studi penilaian siklus hidup lingkungan, estimasi dampak lingkungan dibatasi hanya pada beberapa kategori dampak kritis, seperti emisi gas rumah kaca dan polutan konvensional. Menilai saling ketergantungan sistem selama siklus hidup infrastruktur bawah tanah juga merupakan bagian penting dan menantang dari penilaian risiko. Berbagai alat analitik tersedia untuk membantu penilaian risiko sistem dan interaksi infrastruktur individual.

Ini termasuk jaringan Bayesian, simulasi Monte Carlo, dan pohon keputusan. Menerapkan alat-alat tersebut dapat menginformasikan pengambilan keputusan dengan mengurangi beberapa tingkat ketidakpastian yang tinggi yang terkait dengan berbagai jenis risiko, terutama ketika berhadapan dengan interaksi sistem yang kompleks. Dalam bab ini, komite mengumpulkan pengetahuan yang ada tentang dampak pembangunan bawah tanah, dengan menyadari adanya banyak kesenjangan pengetahuan, terutama karena studi sebelumnya umumnya mengambil pandangan yang lebih sempit tentang manfaat dan biaya daripada yang diperlukan untuk perspektif keberlanjutan siklus hidup.

Ada juga variasi dan ketidakpastian yang cukup besar dalam kinerja pembangunan bawah tanah, terutama yang berkaitan dengan peristiwa ekstrem seperti gempa bumi atau banjir. Selain itu, keuntungan dan kerugian umum fasilitas bawah tanah yang dijelaskan dalam Bab 3 memerlukan evaluasi khusus untuk setiap jenis penggunaan dan keadaan lokasi.

5.2 MANFAAT DAN BIAYA EKONOMI SIKLUS HIDUP

Peningkatan populasi, konsumsi, kepadatan, globalisasi, komunikasi, dan tren lainnya menunjukkan meningkatnya kompleksitas bagi masyarakat manusia. Penerapan kemajuan teknologi dapat memiliki dampak positif dan negatif. Penting bahwa proses untuk menyediakan infrastruktur bawah tanah yang berkelanjutan dirancang dengan cermat untuk membatasi dampak negatif sekaligus memperoleh manfaat maksimal. Dampak tidak langsung dari kemajuan teknologi juga harus dipertimbangkan.

Pengembangan ruang bawah tanah memberikan peluang untuk menggunakan ruang permukaan untuk tujuan lain seperti ruang hijau untuk taman atau pengembangan di atas tanah lainnya di dalam atau di dekat pusat kota, tetapi kuantifikasi peluang tersebut sulit dilakukan. Desain sistem infrastruktur berdampak rendah yang mengurangi dampak lingkungan dan biaya transportasi kini sedang dimasukkan ke dalam pengembangan perkotaan.

Tren kota kompak mendukung konsep pengembangan bawah tanah yang mencakup berbagai fasilitas bawah tanah yang berkontribusi pada lingkungan yang efisien tetapi sangat layak huni. Dalam hal ini, manfaat ekonomi yang melekat diperoleh dari pemanfaatan bawah

permukaan sebagai bagian dari penyediaan perumahan, transportasi, komersial, industri, dan fasilitas utilitas.

Pembangunan Intensif dan Kota Kompak

Telah terjadi perdebatan panjang tentang manfaat dan biaya pembangunan intensif dalam bentuk kota kompak dibandingkan dengan pembangunan yang tersebar dan perluasan wilayah perkotaan. Kota kompak dibedakan berdasarkan kepadatan penduduk yang tinggi per satuan luas lahan, campuran penggunaan lahan dalam lingkungan sekitar, satu atau lebih pusat pekerjaan dengan kepadatan tinggi, dan pengaturan spasial atau kesinambungan penggunaan lahan yang cermat.

Kritikus kota kompak mencatat efek buruk dari pembangunan yang lebih intensif, termasuk kemacetan lalu lintas yang meningkat, perumahan yang kurang terjangkau, dan biaya konsumen yang lebih tinggi. Sebuah studi NRC baru-baru ini menemukan bahwa kota kompak cenderung mengurangi jarak tempuh kendaraan dan konsumsi energi langsung dan tidak langsung serta emisi gas rumah kaca. Pengalaman di Eropa serupa.

Shammin dan yang lainnya memperkirakan bahwa total penggunaan energi sekitar 17 persen lebih rendah bagi penduduk daerah perkotaan dibandingkan penduduk daerah pedesaan atau daerah dengan kepadatan rendah, bahkan jika semua barang dan jasa yang dibeli diperhitungkan. Hingga taraf tertentu, manfaat yang diharapkan dari kota-kota kompak ini mungkin muncul dari pilihan sendiri penduduk yang ingin mengurangi penggunaan kendaraan, tetapi bahkan jika faktor sikap diperhitungkan, jarak tempuh kendaraan yang ditempuh di kota-kota kompak lebih sedikit. Pembangunan kompak juga dapat mengurangi biaya infrastruktur dan tekanan pembangunan pada ruang terbuka hijau.

Namun, kepadatan perkotaan yang lebih tinggi tampaknya berkorelasi langsung dengan tingkat pembangunan ruang bawah tanah yang lebih tinggi. Banyak perencana percaya bahwa pembangunan dan penggunaan ruang bawah tanah dapat meningkatkan manfaat bersih dari pembangunan intensif. Penggunaan ruang bawah tanah dapat mengurangi kemacetan lalu lintas dan biaya konsumen yang dicatat oleh para pengkritik kota-kota kompak sekaligus mencapai pengurangan perjalanan dan energi yang diidentifikasi oleh para pendukung kota kompak.

Gambar 5.2 menunjukkan Boston Central Artery, yang awalnya dibangun sebagai bangunan layang melalui pusat kota Boston tetapi dipindahkan ke bawah tanah dalam proyek Big Dig, sehingga menghasilkan koridor ruang terbuka. Manfaat bersih dan dampak tidak langsung pada pembangunan jangka panjang mungkin signifikan meskipun sulit untuk dinilai berdasarkan proyek per proyek.



Gambar 5.2 Arteri Pusat Boston Sebagai Struktur Layang Dan Jalan Bawah Tanah

Manfaat dan Biaya Ekonomi Tahap Konstruksi

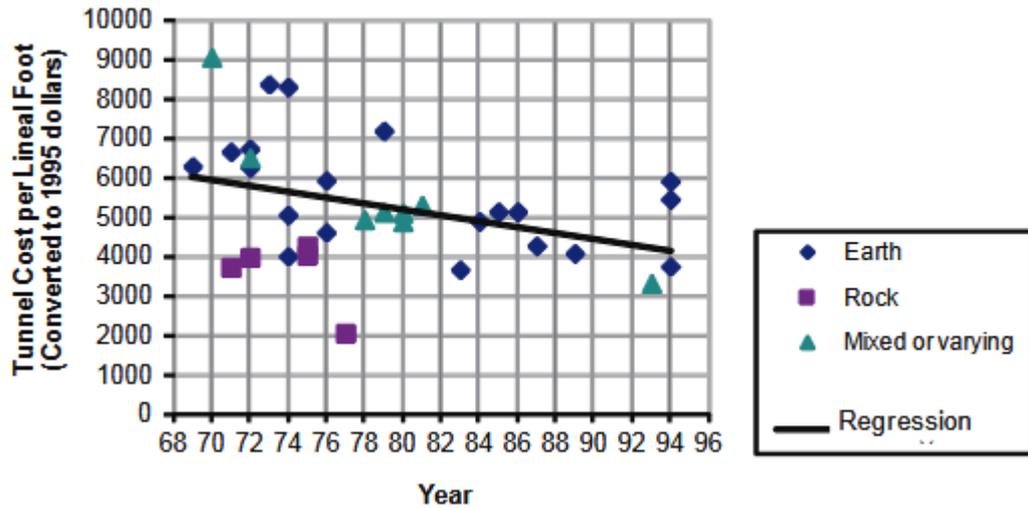
“Lingkungan binaan kita saat ini meliputi bangunan, pekerjaan teknik, dan infrastruktur seperti jalan, instalasi pengolahan air limbah dan air, sistem pengelolaan air hujan, fasilitas pembangkit listrik, rel kereta api, jembatan, dan bahkan sistem alam seperti sungai dan pelabuhan”. Pembangunan bawah tanah menyediakan peluang untuk menempatkan banyak fasilitas ini di ruang yang tersedia real estat di bawah permukaan yang ada. Sterling menjelaskan pentingnya perencanaan ruang bawah tanah perkotaan.

Biaya awal untuk pembangunan bawah tanah meliputi biaya yang terkait dengan karakterisasi lokasi geologi dan pengelolaan kondisi geologi, pencarian dan relokasi utilitas, potensi gangguan pada infrastruktur yang ada karena pemogokan utilitas, persyaratan untuk pengurangan kembali yang direkayasa, dan pengendalian lalu lintas di sepanjang alinyemen horizontal. Ada upaya nasional untuk menggunakan praktik terbaik dalam pekerjaan bawah tanah demi kepentingan keselamatan publik. Namun, di daerah perkotaan, struktur yang ada membatasi desain praktis fasilitas bawah tanah.

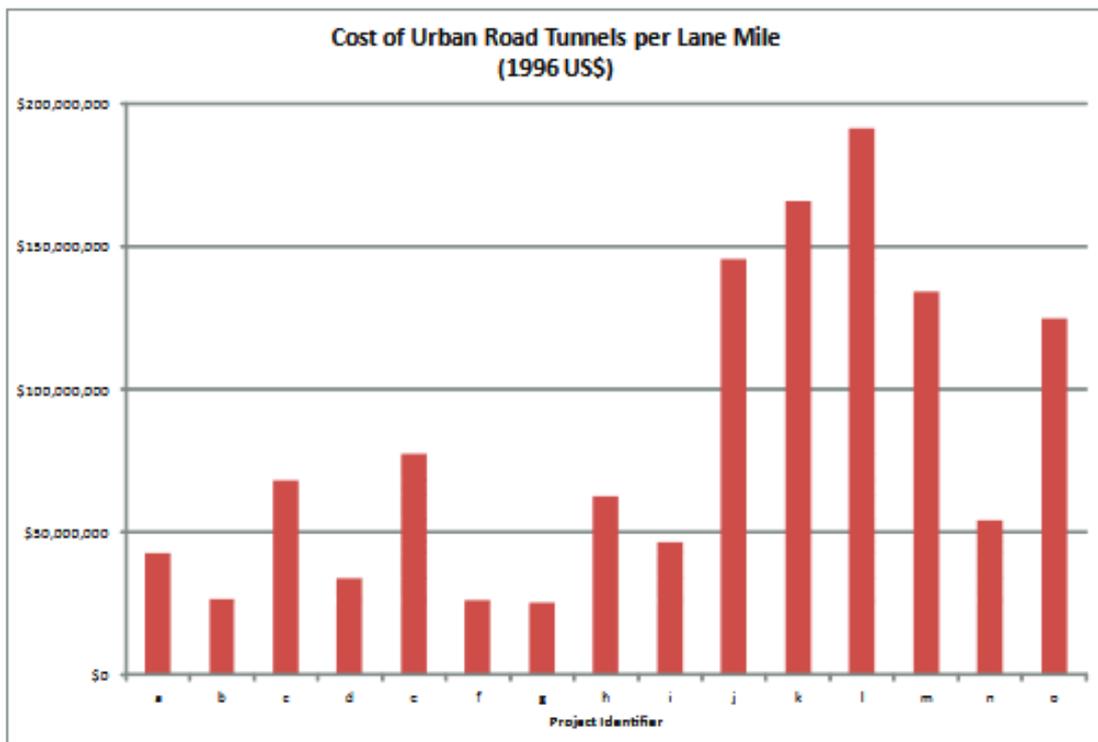
Fasilitas bawah tanah harus mengakomodasi pembatasan desain fasilitas dan ketersediaan lahan atau hak guna untuk konstruksi. Waktu yang terkait dengan pemenuhan persyaratan yang terkait dengan peraturan lingkungan dan keselamatan juga harus diperhitungkan dalam biaya konstruksi. Gambar 5.3, berdasarkan data dari konstruksi Metro Washington dari tahun 1969 hingga 1994, menunjukkan garis tren penurunan untuk biaya konstruksi terowongan mentah dan, yang sama pentingnya, penyempitan rentang biaya selama periode 25 tahun ini.

Meskipun biaya proyek sangat bergantung pada keadaan tertentu, misalnya, kesulitan pemasangan bagian tertentu, grafik ini dapat menunjukkan bahwa akumulasi pengetahuan dan manajemen risiko, investasi dalam penelitian, dan adopsi teknologi dan praktik kontrak

yang lebih baik selama periode tersebut menghasilkan pengurangan biaya untuk konstruksi terowongan yang sebenarnya.



Gambar 5.3 Biaya Penambangan Dan Pelapisan Terowongan Berdiameter Sekitar 20 Kaki Untuk Metro Washington



Gambar 5.4 Variabilitas Biaya Terowongan Jalan Perkotaan Berdasarkan Data Dari Australia, Prancis, Jepang, Swedia, Dan Amerika Serikat. Setiap Huruf Pada Sumbu X Mewakili Proyek Berbeda Yang Data Biayanya Disediakan.

Apakah pengurangan biaya ini terlihat dalam total biaya proyek konstruksi bawah tanah yang lebih baru? Jawabannya mungkin "tidak," karena tuntutan untuk standar keselamatan yang lebih tinggi dan pengurangan risiko konstruksi serta dampak lingkungan untuk proyek yang lebih baru telah meningkat. Selain itu, perubahan biaya teknis tersebut dapat ditutupi oleh rentang luas dalam total biaya proyek yang terlihat dalam proyek-proyek di seluruh dunia.

Sebagai ilustrasi, Gambar 5.4 menggambarkan data yang dikumpulkan selama studi tentang biaya dan manfaat fasilitas transportasi bawah tanah yang dilakukan oleh Kelompok Kerja 13 Asosiasi Terowongan dan Ruang Bawah Tanah Internasional (ITA). Data biaya terowongan jalan dari 30 kota di 19 negara dihimpun dari tanggapan kuesioner dan dikonversi ke basis umum dalam bentuk dolar AS tahun 1996 untuk biaya per mil lajur jalan. Meskipun biaya-biaya ini bervariasi karena apa yang dihitung dalam biaya setiap proyek, variasi yang diamati di antara negara-negara dalam membangun satu kilometer lajur jalan menunjukkan bahwa akan bermanfaat untuk menyelidiki alasan biaya yang lebih rendah di beberapa negara dibandingkan dengan yang lain.

Meskipun geologi lokal mungkin berperan, itu tidak diharapkan menjadi satu-satunya alasan signifikan untuk variasi yang diamati. Perbedaan dalam standar desain, proses peninjauan administratif, keterlibatan publik, dan perampingan proses desain dan konstruksi mungkin semakin penting. Memahami alasan untuk berbagai biaya penting agar hasil proyek yang dikembangkan di negara lain dapat dinilai menurut standar selain biaya tinggi dan agar faktor-faktor yang berkontribusi terhadap biaya tinggi dapat diidentifikasi dan ditingkatkan.

Berbagai perkiraan panjang pipa air, saluran pembuangan, dan air hujan di Amerika Serikat dapat ditemukan dalam literatur. Tabel 2.1 mencantumkan total sekitar 3,7 juta mil pipa termasuk transmisi, distribusi, dan koneksi layanan swasta. Lebih dari 480.000 km utilitas bawah tanah diperkirakan terpasang di seluruh dunia setiap tahunnya, termasuk air, saluran pembuangan, gas, listrik, televisi kabel, dan telepon. Sebagian besar infrastruktur ini terkubur di bawah permukaan beraspal di lingkungan perkotaan. Akibatnya, pemasangan dan rehabilitasi jaringan utilitas yang luas ini secara lebih efisien dan efektif akan memberikan manfaat ekonomi yang signifikan karena biaya langsung yang lebih rendah dan gangguan minimal pada lingkungan permukaan ini.

Penutupan jalur karena konstruksi permukaan dan pengalihan jalur selanjutnya menyebabkan penundaan lalu lintas dan berdampak pada biaya bahan bakar. Dampaknya dapat diminimalkan melalui pemilihan peralatan konstruksi yang sesuai. Penghematan lebih lanjut untuk peralatan modal awal dapat diwujudkan, misalnya, dengan metode tanpa parit, terutama dalam konstruksi horizontal karena berkurangnya penggunaan peralatan konstruksi. Sebaliknya, penggalian terbuka memerlukan penggunaan berbagai peralatan termasuk ekskavator, bulldoser, pemadat permukaan, dan kendaraan pengangkut.

Kini, mekanisme kontrak alternatif diterapkan dalam pekerjaan bawah tanah yang menyediakan cara inovatif untuk mengalokasikan risiko proyek guna mengurangi dampaknya terhadap jumlah penawaran. Pendekatan ini mencakup pendekatan seperti desain-bangun, desain-bangun-miliki-operasikan-transfer, dan manajer konstruksi yang berisiko. Selain itu, spesifikasi berbasis kinerja digunakan untuk mendorong kreativitas kontraktor dan

mengurangi biaya konstruksi. Namun, ketidaklengkapan spesifikasi berbasis kinerja dapat berdampak negatif pada produk akhir.

Ada sedikit perbandingan biaya konstruksi bawah tanah versus di atas tanah. Analisis biaya siklus hidup mempertimbangkan biaya langsung, sosial, dan lingkungan serta biaya untuk item khusus seperti sistem pemanas, ventilasi, dan pendingin udara selama siklus hidup. Karena sangat penting bagi fungsionalitas infrastruktur dan harus dipilih serta dipasang dengan hati-hati selama konstruksi awal, biaya operasional ini dan biaya lainnya biasanya digabungkan dengan biaya modal langsung dalam memilih alternatif konstruksi terbaik.

Bahaya dan risiko keselamatan melekat pada semua proyek konstruksi dan perlu dinilai selama fase desain. Pendekatan penilaian dampak keselamatan berbasis risiko diadopsi untuk pembangunan jalur kereta bawah tanah di Seoul, Korea. Konstruksi terbuka juga dievaluasi untuk tujuan perbandingan. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi dan mengurangi, sebelum konstruksi, risiko yang terkait dengan item desain yang dapat menyebabkan kecelakaan konstruksi. Ini penting karena konstruksi bawah permukaan dilakukan "di luar pandangan," sehingga membutuhkan tingkat keterampilan yang tinggi dan pengalaman yang luas pada bagian perancang (sering kali secara kontrak diwajibkan untuk memberikan inspeksi kontrol kualitas penuh waktu) dan konstruktor. Desain dan konstruksi infrastruktur bawah permukaan merupakan skenario unik di mana fungsi desain, inspeksi, dan konstruksi tidak dapat dengan mudah dipisahkan.

Manfaat Ekonomi dan Biaya Siklus Hidup Fase Operasi

Seperti yang disebutkan sebelumnya, manfaat biaya yang diperoleh dari pengoperasian sistem infrastruktur apa pun sulit diukur. Manfaatnya dapat mencakup peningkatan kualitas hidup, pengurangan waktu tempuh dan perjalanan, serta peningkatan produktivitas. Namun, ada manfaat inheren yang terkait dengan pengoperasian infrastruktur bawah tanah. Johnson menemukan bahwa konversi jaringan listrik di atas tanah yang tidak sedap dipandang menjadi jaringan bawah tanah mengakibatkan peningkatan nilai properti dan peningkatan estetika di lingkungan sekitar.

Manfaat ekonomi sosial siklus hidup lainnya mencakup berkurangnya pemadaman, kehilangan transmisi, dan gas rumah kaca; berkurangnya biaya pemeliharaan jaringan; lebih sedikit sengatan listrik; dan lebih sedikit tabrakan kendaraan bermotor dengan tiang listrik. Biaya rata-rata untuk mengubur jaringan listrik yang ada diperkirakan sebesar \$1 juta per mil, yang hampir 5 hingga 6 kali atau 10 kali biaya jaringan listrik baru. Namun, biaya pemeliharaan dan pengoperasian jaringan listrik bawah tanah dilaporkan sekitar sepersepuluh dari biaya jaringan di atas tanah karena berkurangnya kerugian transmisi selama siklus hidup. Selain itu, kabel bawah tanah juga dapat meningkatkan kapasitas transmisi daya.

Bab 4 menjelaskan masalah keamanan yang terkait dengan infrastruktur bawah tanah tetapi menunjukkan bahwa ada manfaat keamanan yang melekat dengan menempatkan infrastruktur di bawah tanah. Sistem bawah tanah memiliki risiko kegagalan bencana yang lebih rendah akibat gempa bumi, badai, tornado, badai tropis, hujan salju lebat, angin muson, dan bencana alam, tetapi sistem ini mungkin rentan terhadap banjir. Risiko yang lebih rendah ini dapat mengakibatkan berkurangnya premi asuransi selama siklus hidup aset.

Fase Renovasi dan Penggantian Manfaat dan Biaya Ekonomi Siklus Hidup

Renovasi infrastruktur (yaitu, pelestarian aset) sering kali meningkatkan operasi dengan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan penggantian penuh. Akibatnya, metode renovasi seperti pelapisan atau pemasangan grouting pipa dan perbaikan eksterior bangunan lebih disukai jika infrastruktur yang ada masih dapat diterima secara struktural tetapi memerlukan pembaruan ke kondisi "seperti baru". Penggantian mungkin dianggap perlu karena usang, desain yang tidak fleksibel, atau tidak dapat diperbaikinya infrastruktur yang ada.

Infrastruktur permukaan dapat diganti dengan relatif mudah dibandingkan dengan infrastruktur bawah tanah; namun, frekuensi kebutuhan untuk perbaikan dan renovasi mungkin lebih sedikit untuk infrastruktur bawah tanah karena perlindungan yang disediakan oleh bawah tanah. Di sisi lain, jika infrastruktur bawah tanah menjadi usang misalnya, sistem terowongan bawah tanah yang sebagian besar terbengkalai di bawah pusat kota Chicago mungkin sulit untuk menggunakan kembali ruang tersebut untuk penggunaan lain. Perencanaan yang cermat untuk penggunaan bawah tanah untuk masa mendatang dapat meminimalkan tingkat keusangan infrastruktur.

Misalnya, perusahaan utilitas (dijelaskan dalam Bab 3), memberikan fleksibilitas untuk mengganti atau menambah utilitas jika ditentukan oleh keusangan, kerusakan, atau masalah kapasitas. Pemanfaat utilitas memperlancar hak guna utilitas dan memberikan akurasi yang lebih baik dalam menemukan utilitas yang terkubur, yang menguntungkan untuk pemeliharaan dan penggantian jaringan. Canto-Perello dan lainnya menemukan bahwa pemanfaatan utilitas meminimalkan potensi dilema gangguan timbal balik antara utilitas dan jaringan transportasi. Selain itu, menempatkan utilitas di pemanfaatan utilitas menghasilkan meminimalkan kerusakan fisik pada permukaan jalan akibat pemotongan trotoar yang terus-menerus saat memasang, memeriksa, memelihara, memperbaiki, atau mengganti jaringan.

5.3 MANFAAT DAN BIAYA LINGKUNGAN SIKLUS HIDUP

Sejak tahun 1970, Undang-Undang Perlindungan Lingkungan Nasional (NEPA) telah mewajibkan "lembaga federal untuk mengintegrasikan nilai-nilai lingkungan ke dalam proses pengambilan keputusan mereka dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dari tindakan yang diusulkan dan alternatif yang wajar untuk tindakan tersebut". Hasilnya, pernyataan dan analisis dampak lingkungan telah diselesaikan untuk berbagai pengembangan bawah tanah. Namun, pernyataan dampak ini bersifat prospektif untuk menginformasikan keputusan perencanaan, bukan penilaian retrospektif dampak lingkungan aktual dari proyek yang dibangun.

Misalnya, sementara banyak analisis dampak lingkungan sebelumnya tidak mencakup efek emisi gas rumah kaca, pernyataan dampak lingkungan baru-baru ini membahas temuan seperti temuan tahun 2009 oleh Administrator EPA bahwa emisi gas rumah kaca (karbon dioksida, metana, nitrogen oksida, hidrofluorokarbon, perfluorokarbon, dan sulfur heksafluorida) mengancam kesehatan masyarakat dan kesejahteraan generasi sekarang dan

mendatang sebagai akibat dari efek perubahan iklim. Terakhir, pernyataan dampak lingkungan biasanya tidak menyertakan rantai pasokan atau dampak lingkungan tidak langsung dalam analisis dan oleh karena itu tidak memberikan penilaian siklus hidup yang lengkap.

Untuk memperkirakan jejak karbon atau emisi gas rumah kaca, emisi tidak langsung ini disebut emisi Tier 3 dan sering kali signifikan untuk penyediaan barang dan jasa. Secara khusus, produksi semen yang digunakan dalam konstruksi bawah tanah umumnya menghasilkan emisi gas rumah kaca yang signifikan. Metode konstruksi memainkan peran utama dalam emisi gas rumah kaca. Sihabuddin dan Ariaratnam membandingkan emisi udara dari penggantian pipa tanpa parit versus pipa terbuka pada proyek yang sama dan menemukan bahwa pipa tanpa parit mengurangi polusi sekitar 80 persen. Beberapa penelitian telah melihat dampak infrastruktur bawah tanah selama seluruh siklus hidupnya atau telah membandingkan penilaian siklus hidup infrastruktur atas dan bawah tanah yang memberikan layanan yang sama.

KOTAK 5.1

Perbandingan Siklus Hidup Lingkungan Distribusi Daya Udara dan Bawah Tanah

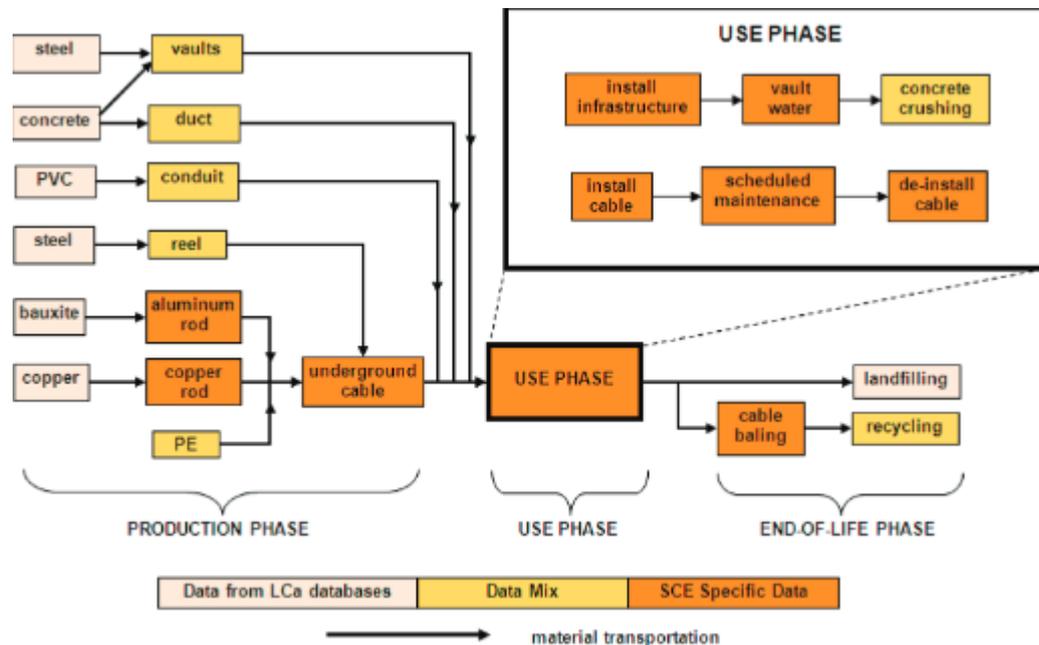
Bumby membandingkan distribusi daya terpendam dan bawah tanah menggunakan desain Southern California Edison untuk kabel tegangan menengah menggunakan penilaian siklus hidup berbasis proses per pedoman dari Organisasi Internasional untuk Standardisasi. Gambar tersebut menunjukkan berbagai langkah proses yang terlibat dalam siklus hidup untuk rakitan distribusi daya bawah tanah.

Penilaian mereka menunjukkan bahwa rakitan distribusi udara seperti yang dirancang oleh Southern California Edison memiliki emisi keseluruhan yang lebih rendah. Nilai-nilai tersebut sangat dipengaruhi oleh masukan material tambahan yang diperlukan untuk pembuatan kabel rakitan distribusi bawah tanah. Faktor sekunder meliputi perkiraan umur kabel bawah tanah yang lebih pendek karena efek pemanasan bawah tanah dan hilangnya penyerapan karbon karena produksi kayu karena karbon diserap dalam pertumbuhan pohon.

Studi ini juga memperkirakan dampak indikator ekologi yang umum di Eropa, termasuk potensi penipisan abiotik, potensi pengasaman, potensi eutrofikasi, ekotoksitas akuatik air tawar, potensi toksisitas manusia, potensi penciptaan ozon fotokimia, dan potensi ekotoksitas terestrial. Karena alasan yang mirip dengan emisi gas rumah kaca, desain di atas tanah memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dalam kategori ini. Studi ini menghilangkan beberapa kategori yang memerlukan penelitian lebih lanjut.

Kabel bawah tanah memiliki resistansi yang lebih rendah, sehingga kehilangan daya transmisi mungkin lebih rendah di bawah tanah. Studi ini tidak mempertimbangkan dampak penggunaan lahan dan penggunaan energi sistem perkotaan bersih atau efek lingkungan yang diberikan baik di atas tanah maupun di bawah tanah. Keuntungan material konstruksi untuk kabel listrik mungkin tidak ada untuk struktur di atas tanah yang digunakan untuk keperluan lain seperti mengangkut kendaraan. Selain itu, penempatan saluran transmisi listrik di atas tanah sering kali sulit karena alasan estetika. Studi ini menunjukkan kesulitan

dalam memperoleh hasil yang komprehensif tetapi ketat dari analisis tiga dasar utama. Analisis semacam itu hanya dapat mencakup isu-isu yang datanya tersedia dan tidak dapat mengatasi isu kinerja, ketahanan, sosial, atau lingkungan yang lebih luas.



Gambar Diagram Alir Proses Untuk Perakitan Distribusi Daya Bawah Tanah. Warna Menunjukkan Sumber Data Sebagai Basis Data Penilaian Siklus Hidup Komersial (Merah Muda), Southern California Edison (Oranye), Atau Campuran Dari Kedua Sumber Ini (Kuning). Sumber: Bumby Dkk., 2010. Dicetak Ulang Dengan Izin Dari American Chemical Society.

5.4 MANFAAT DAN BIAYA SOSIAL

Bagian ini merangkum beberapa manfaat dan biaya sosial yang terkait dengan penggunaan ruang bawah tanah dan membahas data tambahan atau perubahan apa dalam praktik penilaian yang mungkin berguna untuk membuat keputusan investasi dan operasional yang tepat. Seperti yang dijelaskan di bagian sebelumnya, kerangka kerja untuk penilaian siklus hidup ekonomi dan lingkungan dari alternatif proyek cukup dipahami dengan baik termasuk cara mengelola secara konseptual kombinasi perbandingan kuantitatif dan subjektif.

Salah satu tantangan untuk analisis biaya siklus hidup adalah bahwa beberapa keuntungan terkuat dari struktur bawah tanah cenderung lebih berjangka panjang dan kualitatif (termasuk manfaat bagi kualitas hidup atau ketahanan perkotaan), sementara kerugian cenderung lebih mudah diidentifikasi dan diukur. Tantangan lainnya adalah bahwa hanya sedikit orang yang diharapkan menyatakan preferensi untuk berada di fasilitas bawah tanah daripada fasilitas permukaan untuk jangka waktu yang lama.

Dalam banyak kasus, manfaat berasal dari apa yang diizinkan oleh fasilitas bawah tanah dalam hal lingkungan permukaan, mobilitas, atau layanan yang lebih baik daripada dari atribut superior fasilitas itu sendiri. Penggunaan ruang bawah tanah, jika direncanakan dengan baik,

memungkinkan pilihan yang sangat baik untuk transportasi perkotaan dan penyediaan layanan utilitas, bersama dengan berbagai fasilitas lain yang diinginkan, semuanya berdampak rendah pada lingkungan permukaan, warisan, dan, berpotensi, ekologi.

Dengan kata lain, konstruksi bawah tanah yang direncanakan dengan baik mendukung lingkungan perkotaan yang kompak, berfungsi dengan baik, layak huni, dan berkelanjutan. Perlindungan dan ketahanan struktur bawah tanah dapat menguntungkan pemilik proyek, tetapi jika itu memengaruhi kemampuan masyarakat untuk berfungsi secara efektif, misalnya, setelah bencana, maka itu memiliki dampak sosial yang jauh lebih luas. Demikian pula, masyarakat semakin menolak gangguan yang disebabkan oleh konstruksi dari proyek infrastruktur baru.

Pemilik proyek dapat membayar beberapa biaya yang disebabkan oleh gangguan tersebut seperti kerugian bisnis tetapi pemilik tidak membayar biaya keterlambatan lalu lintas dan berkurangnya kelayakan huni lingkungan karena kebisingan konstruksi, getaran, debu, dan kualitas udara yang menurun. Menangkap semua biaya yang tepat saat membandingkan alternatif proyek tetap menjadi tantangan dan topik untuk penelitian di masa mendatang. Beberapa makalah mengidentifikasi isu-isu yang perlu dipertimbangkan berkenaan dengan proyek utilitas dan memberikan contoh kasus penerapan biaya sosial dan tidak langsung pada pengambilan keputusan proyek.

Namun, biasanya hanya beberapa biaya sosial atau tidak langsung utama yang dipertimbangkan karena kurangnya data dampak atau kurangnya biaya yang diterima untuk dampak gangguan. Makalah yang menjelaskan analisis berbagai biaya biasanya menemukan bahwa biaya keterlambatan lalu lintas merupakan biaya sosial terpenting di daerah perkotaan dan dapat menyaingi atau melampaui biaya konstruksi itu sendiri untuk beberapa pekerjaan utilitas jalan. Di daerah pinggiran kota atau pedesaan, keterlambatan lalu lintas biasanya tidak terlalu parah kecuali pada rute arteri utama. Penolakan lokal terhadap suatu proyek biasanya didasarkan pada biaya sosial dan tidak langsung yang diharapkan sebagai akibat dari konstruksi dan operasi proyek.

Seringkali, biaya-biaya ini dapat dikurangi melalui metode konstruksi yang tidak terlalu mengganggu (misalnya, teknologi tanpa galian untuk konstruksi dan perbaikan utilitas, dan terowongan bor alih-alih terowongan potong dan tutup untuk proyek jalan dan rel) dan pembatasan atau modifikasi praktik kerja (misalnya, batasan jam kerja, kebisingan, dan getaran). Karena praktik kerja terbatas diadopsi untuk mengakomodasi pertentangan lingkungan, biaya sosial yang tidak dibayar menjadi biaya konstruksi yang sulit dan berpotensi meningkatkan risiko konstruksi.

Metode konstruksi yang paling tidak mengganggu lebih mungkin dipilih, menghindari kebutuhan untuk menghitung biaya sosial. Masalah lain yang perlu diperhatikan adalah bahwa dampak konstruksi dan operasi dari proyek infrastruktur besar merupakan target yang bergerak dalam hal kompromi yang dapat diterima untuk membatasi dampak pada lingkungan. Diskusi tentang mengubah proyek transportasi permukaan atau layang menjadi alinyemen bawah tanah, atau mengubah dari konstruksi potong dan tutup menjadi konstruksi terowongan bor, biasanya mempertimbangkan dampak kebisingan dan kualitas udara di portal

terowongan.

Secara umum, perpindahan ke bawah tanah mempertahankan mobilitas bagi banyak orang di daerah perkotaan dan mengurangi dampak lingkungan pada sebagian besar daerah yang dilaluinya. Namun, getaran konstruksi (misalnya, dari peledakan) dan kebisingan serta emisi kualitas udara menjadi lebih terlokalisasi membuatnya lebih mengganggu bagi mereka yang berada di sekitar, tetapi juga lebih dapat dikendalikan. Kelemahannya adalah bahwa standar yang semakin tinggi yang dapat diterapkan pada proyek bawah tanah meningkatkan biaya mereka relatif terhadap alternatif permukaan atau layang.

Keputusan penting mengenai inisiatif infrastruktur utama untuk wilayah perkotaan bergantung pada masalah tersebut. Kemampuan untuk membandingkan secara memadai alternatif infrastruktur yang sangat berbeda (termasuk alternatif "tidak melakukan apa-apa") yang berpotensi mengubah wajah kota menjadi lebih baik atau lebih buruk tetap menjadi tantangan yang menakutkan. Dalam banyak kasus, keputusan politik yang kuat akhirnya dibuat dalam menghadapi pendapat yang sangat berbeda dan analisis biaya-manfaat yang saling bertentangan.

Mengakomodasi isu-isu sosial dan faktor manusia serta meningkatkan desain bawah tanah bukan sekadar proyek teknis yang bersifat formal. Bagaimana isu-isu ini ditangani dalam desain dan konstruksi proyek dapat berdampak besar pada biaya, penerimaan publik, dan dampaknya selama siklus hidupnya. Tidak ada satu jawaban terbaik, tetapi penting untuk memahami berbagai konsekuensinya. Metro Stockholm (Swedia) memiliki desain stasiun individual yang dihias oleh seniman untuk menciptakan lingkungan yang sangat berbeda di setiap stasiun.

Stasiun Metro Washington, DC, memiliki tampilan serupa yang menciptakan keakraban untuk kemudahan penggunaan. Gua stasiun yang besar sering digunakan untuk menciptakan ruang publik yang mengesankan di bawah tanah, tetapi dengan biaya dalam hal konstruksi awal dan mungkin juga dalam pengoperasian. Memungkinkan variasi dalam pendekatan desain berdasarkan pemahaman yang lebih baik tentang cara menciptakan ruang bawah tanah yang menarik dan menyenangkan tanpa peningkatan besar dalam biaya atau persyaratan ruang tetap menjadi tantangan, seperti halnya mengukur biaya dan manfaat sosial selama siklus hidup infrastruktur.

5.5 KEBUTUHAN PENELITIAN UNTUK BIAYA DAN MANFAAT SIKLUS HIDUP

Seperti yang dibahas sebelumnya, banyak faktor yang dimasukkan ke dalam analisis biaya siklus hidup penuh. Pertimbangan faktor-faktor tersebut dapat mengubah persepsi kelayakan penggunaan ruang bawah tanah dari yang mahal dan berisiko, menjadi yang bijaksana dan paling hemat biaya dalam jangka panjang. Yang sangat dibutuhkan adalah pemahaman yang lebih baik tentang aspek-aspek perencanaan, desain, konstruksi, dan operasi proyek yang paling berkontribusi terhadap biaya proyek dan manfaat serta kinerja jangka panjang.

Sasaran analisis biaya siklus hidup adalah untuk mengurangi biaya jika memungkinkan melalui peningkatan teknologi dan perubahan desain dan administrasi, serta untuk

mengartikulasikan manfaat jangka panjang bagi wilayah perkotaan dengan lebih baik dalam istilah moneter jika memungkinkan tetapi, setidaknya melalui contoh-contoh yang terdokumentasi dengan baik tentang dampak positif dan negatif dari proyek bawah tanah. Mengingat banyaknya proyek jalan dan rel bawah tanah yang sangat terkenal, sungguh mengejutkan bahwa dokumentasi yang komprehensif sulit ditemukan.

Studi perencanaan tersedia, tetapi tidak memiliki penilaian retrospektif tentang biaya dan manfaat aktual. Ada bukti anekdotal atau parsial tentang dampak positif lingkungan dan finansial dari penggantian struktur transportasi di atas tanah dengan jalur bawah tanah di lingkungan sekitar di seluruh dunia. Misalnya, Boston Globe melaporkan pada tahun 2004 (Palmer, 2004): Menurut tinjauan mendalam catatan penilaian pajak Kota Boston oleh Globe, dalam 15 tahun sejak proyek terowongan Central Artery dimulai, nilai properti komersial di sepanjang jalur sepanjang satu mil yang tahun ini akan menjadi Rose Kennedy Greenway meningkat menjadi \$2,3 miliar, naik 79 persen.

Itu hampir dua kali lipat dari peningkatan 41 persen di seluruh kota dalam nilai properti komersial yang dinilai dalam periode yang sama. Jika disesuaikan dan diagregasi di seluruh jalur Central Artery, peningkatan nilai tanah bisa jadi sama besarnya dengan biaya proyek yang sulit dan mahal tersebut. Yang tampaknya kurang dalam contoh ini dan contoh lainnya adalah studi yang cermat dan dapat dipertanggungjawabkan tentang perubahan finansial dan lingkungan selama, katakanlah, satu dekade setelah penyelesaian proyek. Diperlukan studi retrospektif dan komparatif tentang biaya dan dampak berbagai jenis proyek konstruksi bawah tanah. Agar bermanfaat, studi ini harus dilakukan secara komprehensif dan ilmiah serta harus mempertimbangkan dampak ekonomi, lingkungan, dan sosial.

BAB 6

REKAYASA BAWAH TANAH UNTUK PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN

Geoteknologi dan bidang sains dan rekayasa terkait memungkinkan penggunaan ruang bawah tanah untuk mendukung kota yang layak huni, tangguh, dan berkelanjutan. Aplikasi geoteknik telah mendukung desain dan konstruksi fasilitas bawah tanah, dan akan terus menjadi penting untuk penyediaan fasilitas bawah tanah dengan biaya dan risiko awal yang lebih rendah, serta kinerja siklus hidup yang lebih baik. Untuk berkontribusi pada masa depan yang lebih tangguh dan berkelanjutan, geoteknologi perlu lebih mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu yang terkait dengan investigasi lokasi, desain, konstruksi, operasi, dan manajemen risiko fasilitas bawah tanah.

Pemahaman yang lebih baik tentang keberlanjutan penggunaan bawah tanah misalnya, meminimalkan kerusakan, meningkatkan ketahanan, membuat keputusan holistik mengenai lingkungan hidrogeologi dan termal bawah permukaan juga akan diperlukan. Peningkatan teknologi bawah tanah telah memungkinkan langkah besar dalam pembangunan perkotaan dalam beberapa dekade terakhir, tetapi kompleksitas dan ketidakpastian yang masih melekat dalam konstruksi bawah tanah merupakan indikasi bahwa masih banyak tantangan yang tersisa.

Bab ini memberikan gambaran singkat tentang keadaan terkini dalam berbagai teknologi yang mendukung konstruksi bawah tanah dan pengoperasian fasilitas. Yang disorot adalah teknologi yang memberikan peluang untuk peningkatan signifikan dalam penyediaan kinerja siklus hidup yang hemat biaya untuk fasilitas bawah tanah, berkontribusi pada peningkatan penggunaan ruang bawah tanah, dan berkontribusi pada solusi perkotaan yang tangguh dan berkelanjutan.

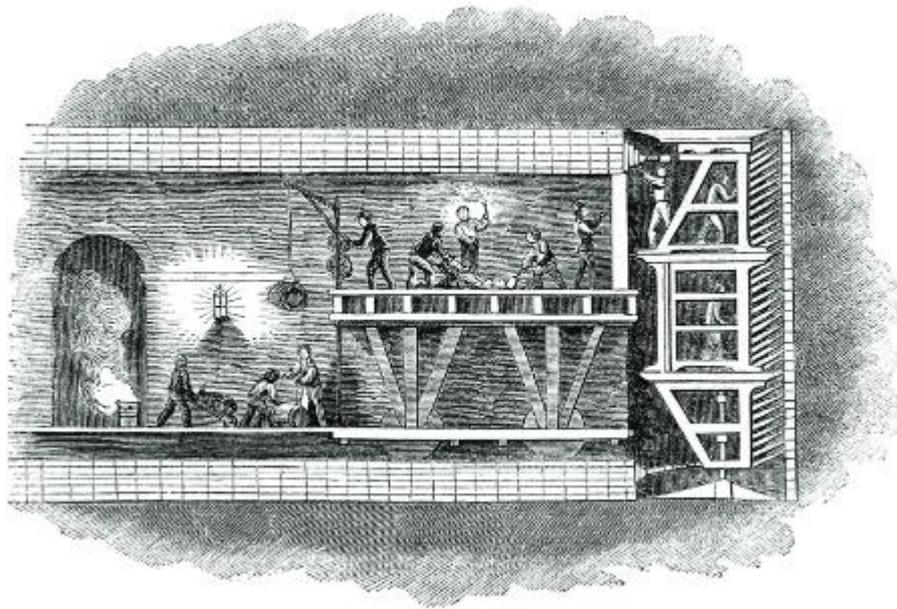
6.1 EVOLUSI TEKNOLOGI

Inovasi teknologi dapat memajukan praktik rekayasa dan meningkatkan daya tarik ruang bawah tanah. Kemajuan teknologi dan rekayasa selalu penting bagi pengembangan bawah tanah yang efisien dan ekonomis. Banyak perkembangan teknologi yang dimotivasi oleh tantangan praktis yang dihadapi selama pembangunan proyek (misalnya, pengembangan pelindung terowongan oleh Brunel), dan industri pembuatan terowongan telah berkontribusi atau berperan penting dalam banyak hal ini.

Mesin bor terowongan modern yang sangat otomatis adalah contoh pengembangan yang dipimpin oleh industri, seperti halnya teknologi perbaikan tanah dan kedap air yang telah diperkenalkan dan dipopulerkan. Dalam kemitraan yang erat dengan akademisi, industri telah mengembangkan banyak alat analisis dan desain (misalnya, metode analisis elemen hingga). Sejak zaman Firaun, terowongan telah dibangun dengan metode konstruksi potong-dan-tutup. Penemuan perisai terowongan yang menopang tanah yang tidak dilapisi untuk mengurangi

risiko keruntuhan, Sir Marc Isambard Brunel dan putranya Isambard Kingdom Brunel berhasil menggali terowongan di bawah Sungai Thames (London) antara tahun 1825 dan 1843 (lihat Gambar 6.1 untuk gambar perisai Brunel).

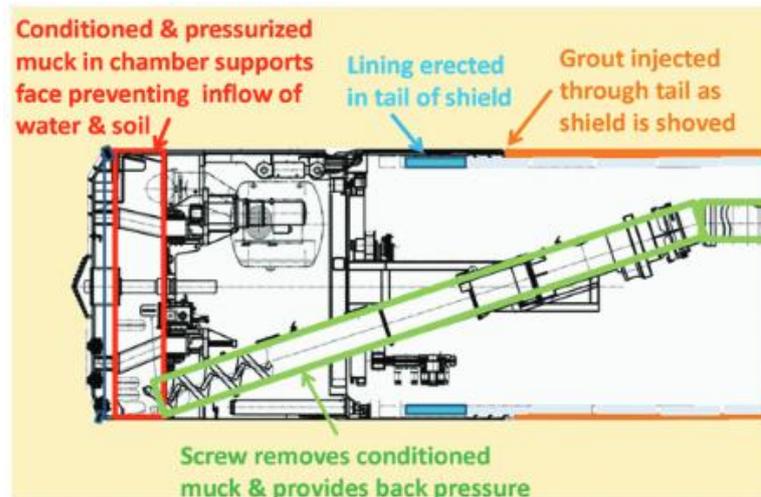
Proyek-proyek sebelumnya yang melibatkan pengeboran terowongan di tanah lunak dan jenuh sangat sulit atau tidak mungkin diselesaikan. Terowongan tersebut menciptakan koneksi penting antara tepi utara dan selatan Sungai Thames yang masih digunakan hampir 170 tahun kemudian. Penerapan teknologi baru ini menandai dimulainya era pembuatan terowongan perisai. Lokomotif bertenaga listrik menandai dimulainya era sistem kereta bawah tanah modern sekitar pergantian abad kedua puluh. Elektrifikasi mengurangi kekhawatiran tentang asap diesel atau batu bara yang berbahaya dan memungkinkan perjalanan kereta bawah tanah jarak jauh. Inovasi dalam sistem ventilasi skala besar memungkinkan pengembangan jalan bawah tanah. Sistem kontrol iklim, pencahayaan yang lebih baik, dan rambu-rambu yang lebih efektif membuat lingkungan bawah tanah lebih ramah, nyaman, dan menarik untuk fungsi ritel dan transportasi massal.



Gambar 6.1 Pelindung Terowongan Brunel. Marc Isambard Brunel Mengembangkan Teknologi Pelindung Terowongan Ini Untuk Membangun Terowongan Bawah Air Pertama Di Bawah Sungai Thames (1821-1825). Dinding Bata Dibangun Di Permukaan Terowongan Dan Ditahan Di Tempatnya Sementara Pelindung Alternatif Didorong Maju Sejauh 6 Inchi. Terowongan Yang Telah Selesai Memiliki Lebar 38 Kaki Dan Dapat Dilalui Oleh Dua Jalur Lalu Lintas.

Kemajuan dalam teknologi material, ilmu komputer, teknologi konstruksi robotik, dan panduan laser telah memungkinkan penggalian bawah permukaan yang lebih baik menggunakan pelindung lumpur modern dan mesin bor keseimbangan tekanan tanah (Gambar 6.2) dan mesin bor terowongan batu (Gambar 6.3). Teknologi tersebut

memungkinkan pembangunan terowongan yang panjangnya melebihi 50 kilometer dan dengan diameter mendekati 20 meter, dan untuk membuat terowongan di bawah kondisi geologi yang menantang (misalnya, di tanah yang mengalir lunak atau batuan yang sangat retak di bawah tekanan tanah dan air yang tinggi).



Gambar 6.2 Penampang Melintang Mesin Bor Terowongan Penyeimbang Tekanan Tanah. Teknologi Pembuatan Terowongan Ini Ideal Untuk Tanah Lunak Yang Homogen. Konveyor Sekrup Digunakan Untuk Mengangkut Tanah Dari Permukaan Dan Membantu Mengendalikan Tekanan Dengan Gerakan Maju Mesin Yang Terkoordinasi. Ruang Galian Diisi Untuk Menopang Permukaan Dan Memungkinkan Mesin Bereaksi Terhadap Tekanan Tanah Dan Air Tanah.

Teknologi modifikasi tanah misalnya, menyuntikkan agen semen untuk memperkuat dan mengurangi permeabilitas tanah dan batu, atau membekukan sementara material yang mengandung air (Gambar 6.4) memperluas kondisi geologi dan hidrologi di mana konstruksi bawah tanah dapat terjadi. Pengeboran arah horizontal merevolusi pemasangan banyak utilitas dan sangat mengurangi kebutuhan untuk menutup jalan bagi lalu lintas dan mengganggu kehidupan di situasi perkotaan.

Banyak teknologi yang dijelaskan di atas menyebabkan perubahan dalam praktik rekayasa, dan dalam beberapa kasus, paradigma baru dalam perencanaan perkotaan. Demikian pula, perkembangan rekayasa dan teknologi saat ini akan sangat penting bagi lingkungan perkotaan yang dibangun secara ekonomis, fungsional, menarik, hemat energi, dan berkelanjutan. Bab ini dikelompokkan ke dalam tema-tema berikut:

- Teknologi untuk karakterisasi lokasi bawah tanah, termasuk tatanan geologi, sifat batuan dan tanah, serta infrastruktur bawah tanah yang ada;
- Teknologi untuk desain dan analisis teknologi bawah tanah;
- Teknologi untuk konstruksi ruang bawah tanah;
- Teknologi untuk manajemen aset yang efektif; dan
- Teknologi yang mendukung keberlanjutan dan ketahanan.

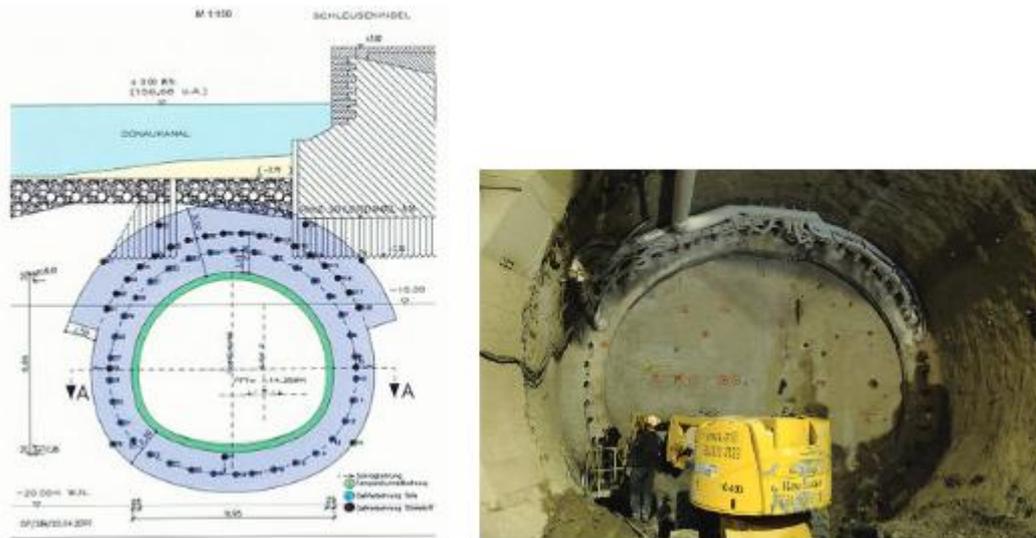


Gambar 6.3 Kepala Pemotong Mesin Bor Terowongan Batu Yang Digunakan Untuk Menggali Terowongan Chattahoochee. Pemotong Cakram Memotong Alur Dengan Jarak Sekitar 4 Inchi Dalam Contoh Ini. Sumber: E.J. Cording.

Tema-tema ini tidak selalu berurutan atau independen. Pengamatan yang dilakukan selama penerapan masing-masing tema dapat menginformasikan pengambilan keputusan selama setiap fase pengembangan atau pengoperasian. Desain infrastruktur dapat mengidentifikasi kebutuhan karakterisasi lokasi lebih lanjut, dan kondisi tak terduga yang ditemui selama konstruksi dapat memerlukan revisi dalam desain.

Pemantauan dan karakterisasi idealnya harus dilakukan sepanjang siklus hidup infrastruktur. Pengamatan dapat mengarah pada jenis pengambilan keputusan yang terinformasi yang disebut metode observasional (misalnya, Peck, 1969; Institute for Civil Engineers yang dapat meningkatkan ekonomi dan keselamatan. Banyak insinyur geoteknik merujuk pada kerangka kerja untuk metode ini yang berasal dari Peck dan dijelaskan dalam sebuah publikasi oleh Nicholson dan lainnya.

Pembahasan dalam setiap tema menggambarkan teknologi yang digunakan atau yang memiliki potensi signifikan untuk masa depan. Berdasarkan sifatnya, teknologi yang mengganggu sulit diantisipasi, tetapi pada dasarnya dapat mengubah cara ruang bawah tanah dikembangkan dan digunakan. Banyak teknologi yang dijelaskan dalam bab ini bergantung pada penggunaan metode observasional untuk pengambilan keputusan yang efektif. Disarankan teknologi untuk analisis yang memungkinkan peningkatan penerapan metode observasi.



Gambar 6.4 Pembekuan Tanah Buatan Diterapkan Pada Penggalian Yang Membentang Di Bawah Sungai Danube. Pembekuan Air Tanah Di Sekitar Penggalian Meningkatkan Kapasitas Daya Dukung Tanah Dan Memberikan Dukungan Sementara Selama Konstruksi. (Kiri) Diagram Penampang Melintang Dengan Lokasi Pipa Pembekuan Yang Ditunjukkan.

6.2 TEKNOLOGI UNTUK KARAKTERISASI LOKASI BAWAH TANAH

Rekayasa ruang bawah tanah perkotaan memerlukan pengetahuan terperinci tentang geologi yang mendasarinya dan sejarah geologi dan pembangunan manusia dari suatu lokasi, alinyemen, dan area yang berdekatan yang dapat memengaruhi atau dipengaruhi oleh pembangunan yang diusulkan. Karakterisasi bawah permukaan yang lebih baik mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik. Meminimalkan kondisi tanah yang tidak diantisipasi dapat memungkinkan desain yang optimal dan penggunaan sumber daya yang lebih bijaksana selama konstruksi.

Pemahaman terperinci tentang bagaimana lokasi tersebut berhubungan dengan sistem alam dan perkotaan yang lebih luas memungkinkan pemahaman yang lebih lengkap tentang tantangan rekayasa yang ada dan menginformasikan lokasi dan alinyemen infrastruktur bawah tanah, desain, pilihan metode dan alat konstruksi, dan pengoperasian fasilitas dan struktur yang berdekatan dalam jangka panjang. Aktivitas karakterisasi lokasi sering kali dimulai melalui studi data yang ada dan informasi yang dipublikasikan.

Saat ini, informasi yang relevan harus dikumpulkan dari banyak sumber dan mungkin tidak memberikan informasi yang memadai atau akurat tentang pengaturan geologi atau struktur bawah tanah yang ada. Kemajuan yang terus-menerus dalam kemampuan komputasi (misalnya, sistem basis data besar, penambangan data) dan georeferensi data (misalnya, sistem penentuan posisi global tingkat survei dan sistem informasi geografis) dapat sangat berguna di masa mendatang. Isu-isu ini akan dibahas lebih lanjut nanti dalam bab ini.

Mengkarakterisasi Geologi, Sifat Material Geologi, Kontaminasi, dan Bahaya Alam

Perspektif geologi dalam karakterisasi lokasi diperlukan untuk menghargai, mengukur, dan mengelola ketidakpastian dan variabilitas sifat dan perilaku tanah dan batuan (misalnya,

komposisi, perilaku tegangan-regangan, permeabilitas, abrasivitas, konduktivitas termal) dan kondisi air tanah, yang pada akhirnya meminimalkan biaya atau menghindari desain yang terlalu konservatif.

Pekerjaan lapangan dan laboratorium awal mendukung desain proyek awal dan perencanaan konstruksi, tetapi karakterisasi lebih lanjut mempersempit ketidakpastian dan memberikan detail tentang fitur geologi penting (misalnya, batas unit geologi, zona patahan), mendukung desain pekerjaan bawah tanah tertentu (misalnya, poros, ruangan), dan memberikan informasi yang terkait dengan persyaratan khusus lainnya (misalnya, menghindari kontaminasi lingkungan atau evaluasi tegangan in situ). Lingkungan bawah tanah alami tidak homogen, anisotropik, dan sangat bervariasi dalam rentang spasial yang pendek.

Volume material geologi yang besar sering kali harus dikarakterisasi dengan sangat rinci untuk mendeteksi perubahan stratigrafi dan diskontinuitas yang penting untuk memprediksi respons tanah terhadap konstruksi. Berbagai macam teknologi dan alat invasif dan noninvasif tersedia untuk melakukan investigasi lapangan in situ, tetapi alat penilaian yang ada tidak dapat memberikan cakupan spasial yang lengkap, zonasi yang akurat, dan sifat material in situ. Pada skala proyek, material berbahaya yang ditemukan selama konstruksi bawah tanah dapat menambah biaya yang besar dan tak terduga pada suatu proyek dan menunda penyelesaian proyek.

Mengkarakterisasi material berbahaya alami dan antropogenik (misalnya, kontaminasi kimia dan radiasi) dan dampaknya pada lingkungan alam dan buatan untuk kegiatan konstruksi dan operasi tertentu sangatlah penting. Memahami material berbahaya apa pun yang mungkin dilepaskan atau diangkut sebagai akibat dari konstruksi dan operasi penting untuk keberlanjutan dan ketahanan jangka panjang. Demikian pula, mengidentifikasi pendekatan desain yang memadai untuk melindungi infrastruktur bawah tanah dari bahaya alam seperti gempa bumi atau banjir sangat penting untuk fasilitas bawah tanah yang tangguh dan berfungsi dengan baik. Karena topik-topik ini memiliki hubungan luas dengan keberlanjutan dan ketahanan, karakterisasinya dibahas kemudian dalam bab ini.

Masalah lingkungan yang meluas hingga penyimpanan dan pembuangan di bawah tanah juga perlu dipertimbangkan. Misalnya, masyarakat bergulat dengan risiko yang terkait dengan teknologi penyerapan karbon dioksida yang sedang berkembang. Seiring dengan semakin banyaknya penyerapan karbon dioksida yang direncanakan, kebutuhan untuk memeriksa dampak potensialnya terhadap kemampuan untuk mengembangkan ruang bawah tanah menjadi semakin besar, karena, misalnya, karbon dioksida dapat meresap ke dalam ruang bawah tanah.

Oleh karena itu, penyelesaian satu masalah secara tidak sengaja dapat mengakibatkan masalah lain. Laporan NRC baru-baru ini mengeksplorasi risiko yang terkait dengan seismisitas yang diinduksi sebagai akibat dari penangkapan dan penyimpanan karbon dan memberikan rekomendasi penelitian khusus yang terkait dengan, misalnya, faktor-faktor selain tekanan pori yang memengaruhi seismisitas, dan pengembangan model fisikokimia dan mekanika fluida untuk injeksi karbon dioksida ke dalam reservoir penyimpanan bawah tanah yang potensial.

Pilihan alat karakterisasi bergantung pada sejumlah faktor termasuk kedalaman yang

diinginkan dan kondisi tanah (misalnya, tanah versus batu; jenuh versus jenuh sebagian). Baik teknologi in situ tradisional (misalnya, pengukuran langsung) maupun teknologi noninvasif (misalnya, geofisika) dapat digunakan untuk mengkarakterisasi fitur alami dan buatan manusia. Beberapa sektor konstruksi memberikan panduan tentang pilihan teknologi karakterisasi lokasi melalui daftar alat dan teknik yang lengkap. Namun, pelatihan dan pengalaman dalam penggunaan alat yang tepat biasanya sama pentingnya dengan pilihan teknologi itu sendiri.

Teknologi Invasif

Alat uji in situ menyediakan pengukuran fisik langsung terhadap sifat material. Misalnya, pada tanah, uji penetrasi standar dan uji penetrometer kerucut (misalnya, alat listrik, piezocone, dan seismik) digunakan untuk mengambil sampel atau menguji lapisan tanah secara langsung dengan mengebor atau menusukkan alat pengambilan sampel ke dalam tanah. Pengambilan sampel dan pengujian batuan dapat dilakukan berdasarkan lubang bor atau dilakukan pada inti yang telah diangkat.

Pengeboran digunakan untuk mengkarakterisasi sifat-sifat seperti kekuatan tanah, kekakuan, kecepatan gelombang geser dinamis, dan sifat serta kualitas air tanah, serta geologi di lokasi lubang bor. Pengeboran individual mungkin atau mungkin tidak mewakili bawah permukaan hanya dalam jarak pendek mengingat potensi variasi geologi. Lubang bor yang miring dan horizontal serta alat penyelidikan berorientasi juga dapat digunakan untuk menyelidiki fitur-fitur tertentu atau distribusi material.

Penyelidikan horizontal memungkinkan eksplorasi bawah permukaan sepanjang lintasan terowongan atau infrastruktur lainnya. Penggunaan alat eksplorasi berorientasi, meskipun umum dalam industri eksplorasi energi, kurang umum untuk pengembangan struktur bawah tanah sipil. Hal ini mungkin disebabkan oleh biaya, tetapi mungkin juga karena kurangnya pengetahuan tentang teknik tersebut di kalangan profesional investigasi lokasi. Dapat dikatakan bahwa insentif untuk efisiensi kurang terlihat bagi para insinyur dibandingkan bagi kontraktor dan pemilik yang menyadari penghematan dari efisiensi.

Perkembangan terkini dalam teknologi pengeboran mencakup kemampuan pengeboran kriogenik untuk pengeboran pada material yang sulit dan sistem pengukuran saat pengeboran (MWD) yang memberikan informasi awal tentang material yang berguna untuk memandu pengeboran di masa mendatang dan merencanakan program pengujian yang efisien. Profesi ini belum mengadopsi teknik ini secara luas.

Teknologi Noninvasif

Alat karakterisasi lokasi noninvasif meliputi penginderaan jarak jauh (misalnya, deteksi dan pengukuran cahaya satelit dan terestrial (LIDAR), fotogrametri digital, teknologi radiometrik, dan metode interferometri) dan teknik geofisika tanah (misalnya, refraksi dan refleksi seismik, analisis spektral gelombang permukaan (SASW), tomografi lubang silang, metode geolistrik, elektromagnetik, dan medan potensial [gravitasi, magnetik]) yang menyediakan data yang dapat digunakan untuk menyimpulkan kondisi bawah permukaan.

Teknik noninvasif paling baik digunakan dalam kombinasi dengan teknik invasif untuk memberikan pemahaman yang lebih lengkap tentang kondisi bawah tanah. Keuntungan dari

teknologi noninvasif adalah kecepatan penggunaannya dan volume bawah permukaan yang lebih besar dapat dikarakterisasi. Kerugiannya adalah bahwa data umumnya harus dikurangi dari bentuk mentahnya pemodelan inversi sering kali diperlukan untuk mengevaluasi zonasi tanah dan sifat material. Model-model tersebut tidak unik (misalnya, satu set data tunggal dapat menghasilkan model tak terbatas), dan karenanya diperlukan keterampilan dan pengetahuan khusus untuk mengurangi dan menginterpretasikan data.

Biaya beberapa metode ini juga bisa tinggi, tetapi karena metode menjadi lebih umum dan teknologi terus meningkat (misalnya, pemindaian laser), biaya akuisisi dan analisis data akan turun. Ada peluang signifikan untuk meningkatkan pengumpulan data yang terkait dengan sifat tanah dan keberadaan serta lokasi struktur yang ada menggunakan teknologi noninvasif, tetapi ada keterbatasan fisik dalam hal skala objek yang akan dikarakterisasi dan perbedaan sifat material yang dapat diidentifikasi relatif terhadap kedalaman investigasi yang memungkinkan.

Misalnya, ada batasan praktis untuk deteksi pipa menggunakan radar penembus tanah (GPR) berbasis permukaan, yang dilaporkan sebagai rasio sekitar 12:1 untuk kedalaman deteksi terhadap diameter pipa yang dapat dideteksi, bahkan dalam kondisi tanah yang baik. Ini berarti bahwa pipa berdiameter 1 kaki hanya dapat dideteksi jika berada dalam jarak 12 kaki dari permukaan, dan pipa 1 inci hanya dapat dideteksi hingga kedalaman 1 kaki. Penelitian tentang penggabungan data multisensor yang memungkinkan teknologi noninvasif untuk mengakomodasi berbagai kondisi tanah dan meningkatkan kemampuannya dalam mengatasi sifat-sifat tanah dan keberadaan serta lokasi objek yang terkubur sedang berlangsung baik di Amerika Serikat maupun di luar negeri. Demikian pula, penelitian oleh militer tentang pendeteksian ranjau darat dan terowongan rahasia yang dalam dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam aplikasi teknik sipil yang lebih luas.

Mengkarakterisasi Infrastruktur yang Ada dan Material Konstruksi Lama

Gagal menemukan infrastruktur yang ada sebelum memperbaiki yang ada atau memasang infrastruktur baru merupakan sumber potensial kecelakaan. Material konstruksi lama, termasuk tumpukan, fondasi, atau tieback yang ditinggalkan dan tidak dipetakan yang pernah memberikan dukungan selama konstruksi sebelumnya, sering ditemukan selama konstruksi bawah tanah. Mengidentifikasi dan mengkarakterisasi artefak ini merupakan bagian penting dari karakterisasi lokasi.

Catatan historis yang ditemukan di departemen perencanaan dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi beberapa material lama, tetapi catatan tersebut sering kali tidak lengkap, tidak akurat, atau hilang, sehingga memerlukan ketergantungan yang lebih besar pada teknologi eksplorasi, terutama yang noninvasif, untuk karakterisasi. Infrastruktur bawah tanah yang tidak dipetakan atau dipetakan secara tidak akurat menimbulkan potensi bahaya dan risiko bagi pekerja konstruksi bawah tanah, lokasi konstruksi, infrastruktur lain, dan orang lain di sekitarnya. Menemukan infrastruktur yang tidak terduga dapat memerlukan perencanaan atau perbaikan konstruksi yang direvisi.

Infrastruktur yang ada atau yang sudah ada dapat dihindari, tetapi terkadang harus dilindungi dengan dukungan yang dirancang untuk menghindari pemindahan atau kerusakan

pada infrastruktur yang ada atau yang direncanakan. Komite mencatat bahwa setiap penggalian terbuka, pengeboran, atau terowongan merupakan kesempatan untuk menilai dan mendokumentasikan sifat dan struktur tanah yang ditemukan untuk aplikasi saat ini dan masa mendatang. Ratusan ribu penggalian terbuka untuk pekerjaan utilitas yang dilakukan setiap hari di Amerika Serikat, misalnya, menawarkan kesempatan berulang untuk mengumpulkan dan mengarsipkan data tersebut.

Namun, ketepatan teknik non-ilusi untuk mengidentifikasi infrastruktur bawah permukaan perlu ditingkatkan. Selain itu, teknologi investigasi perlu diintegrasikan dengan alat fisik dan struktur administratif baru untuk menangkap jenis informasi ini. Mekanisme yang memungkinkan pengarsipan dinamis (misalnya, pembaruan dan modifikasi berkelanjutan) dari data ini sangat penting untuk keberlanjutan infrastruktur perkotaan.

Menafsirkan dan Mengintegrasikan Data Karakterisasi Situs

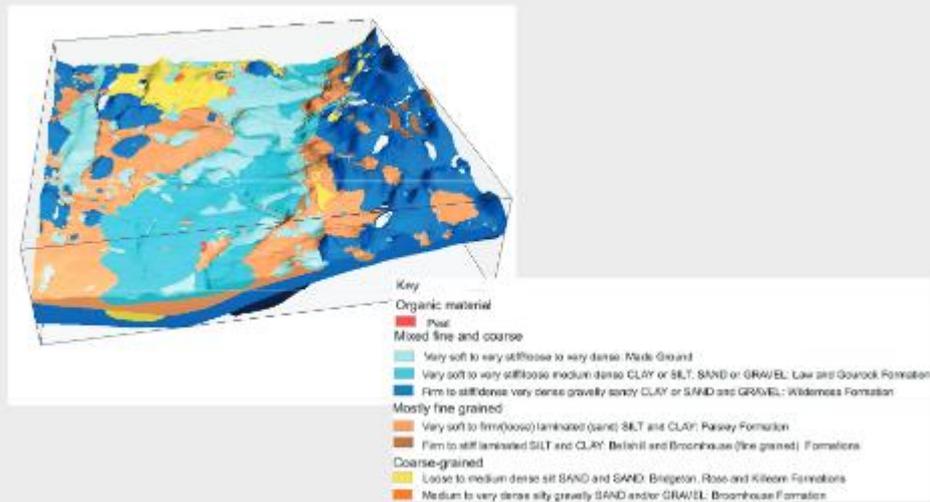
Informasi dan data karakterisasi situs harus diproses dan dievaluasi untuk mengembangkan model geologi interpretatif dan untuk menghasilkan parameter teknik yang akan digunakan dalam desain fasilitas bawah tanah. Banyak teknik lapangan yang digunakan untuk klasifikasi properti awal telah diterapkan selama beberapa dekade dan rentan terhadap perbedaan interpretasi yang besar. Biasanya, klasifikasi lapangan tidak dapat menggantikan verifikasi laboratorium.

Banyak alat yang membantu interpretasi, misalnya, klasifikasi batuan termasuk prosedur berbasis empiris seperti sistem Q (untuk klasifikasi kualitas batuan) sistem Rock Mass Rating, dan Geological Strength Indeks. Skema klasifikasi untuk karakteristik seperti kekuatan dan kekakuan juga digunakan untuk menetapkan masukan untuk prosedur analisis numerik tingkat lanjut.

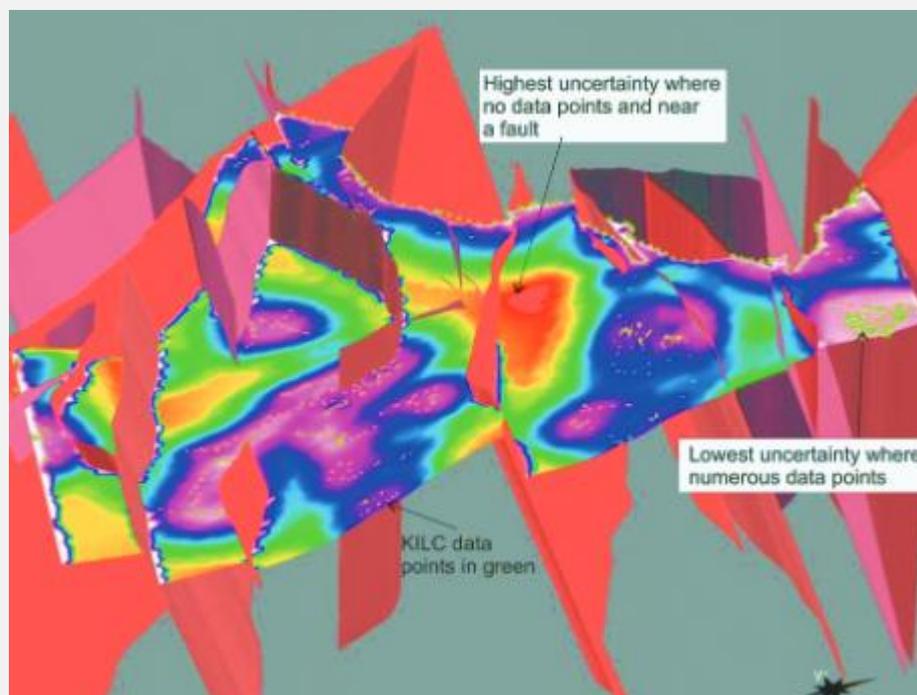
KOTAK 6.1

Pemodelan Geologi Tiga Dimensi

Pemodelan tiga dimensi kondisi tanah yang menggabungkan data geo-teknis dan geofisika dilakukan secara ekstensif di Amerika Serikat untuk kegiatan pembangunan termasuk eksplorasi dan ekstraksi sumber daya serta pembangunan infrastruktur.



Gambar 6.5 Contoh Pemodelan Geologi Teknik Tiga Dimensi Yang Digunakan Oleh British Geological Survey Untuk Memvisualisasikan Variabilitas Dalam Material Geologi Dan Sifat Fisiknya.



Gambar 6.6 Peta Keyakinan Batuan Dasar Yang Dibuat Untuk Suatu Area Di Glasgow, Skotlandia. Titik-Titik Hijau Mewakili Titik Data Aktual; Bidang Vertikal Yang Kasar Mewakili Patahan. Kontur Mewakili Tingkat Ketidakpastian Berdasarkan Kepadatan Data Dan Kompleksitas Geologis Permukaan Yang Dimodelkan (Merah Menunjukkan Ketidakpastian Yang Tinggi). Peta-Peta Tersebut Memberikan Wawasan Berharga Mengenai Di Mana Data Tambahan Mungkin Diperlukan. Sumber: Reeves, 2010. Direproduksi Dengan Izin Dari British Geological Survey. © NERC. Semua Hak Dilindungi Undang-Undang. CP12/073.

Teknik pemodelan serupa dapat diterapkan pada perencanaan infrastruktur perkotaan,

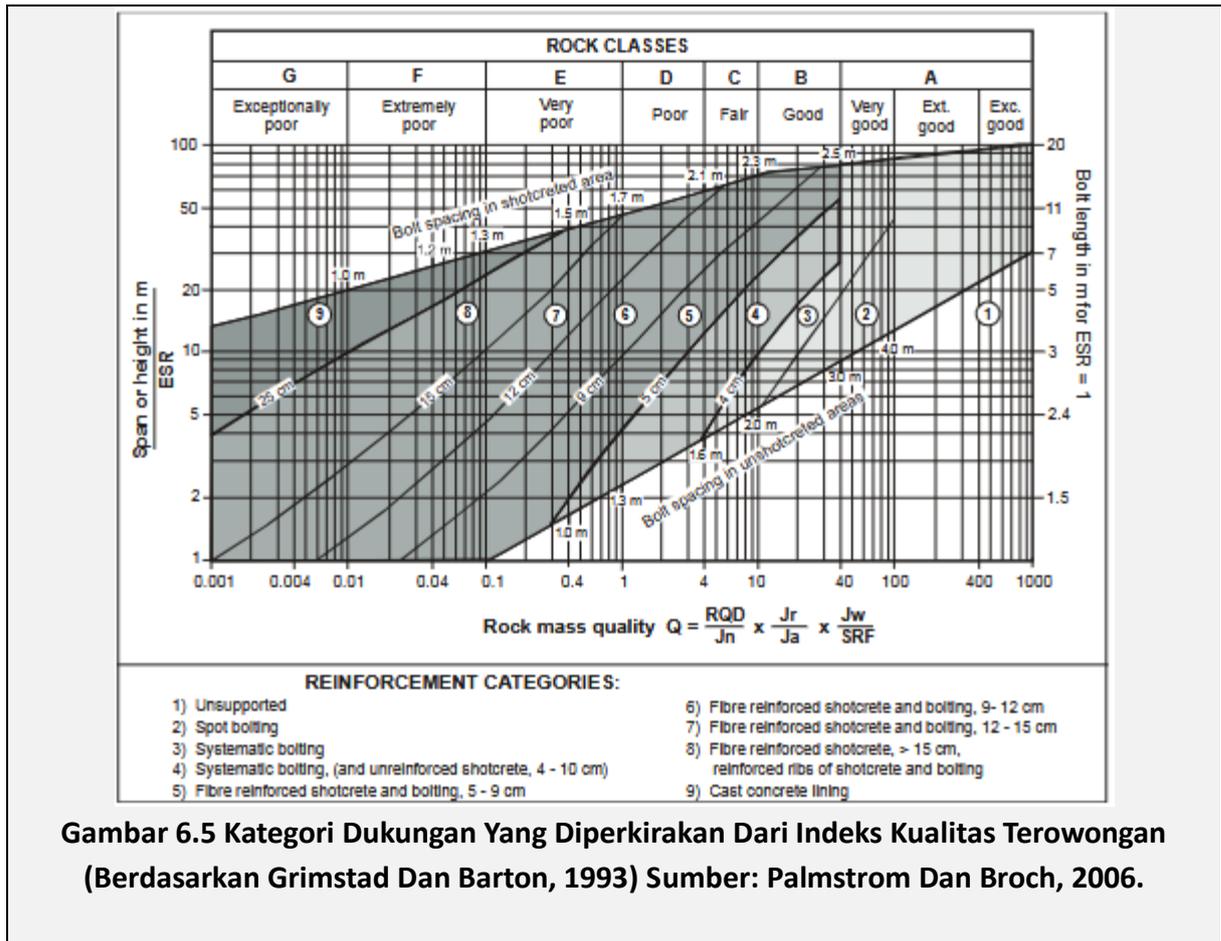
pemodelan risiko, dan pengelolaan sumber daya seperti yang dilakukan oleh Survei Geologi Inggris. Model tersebut dapat memberikan beberapa "tampilan" (misalnya, orientasi), "diuraikan" (misalnya, lapisan dapat dipisahkan secara visual untuk mengisolasi fitur atau unit tertentu), dan dimanipulasi untuk mengidentifikasi sifat fisik yang diprediksi di kedalaman, lokasi struktur antropogenik, kerentanan akuifer, dan kualitas lainnya.

Pandangan data yang komprehensif tersebut dapat meningkatkan pengambilan keputusan dan membantu mengukur ketidakpastian yang secara historis menjadi sumber kesulitan dalam kontrak dan litigasi. Peta kepercayaan dapat dibuat berdasarkan kepadatan data dan kompleksitas geologi yang menunjukkan area dengan ketidakpastian rendah atau tinggi dalam model. Mengingat variabilitas kondisi geologi dan keterbatasan spasial alat karakterisasi bawah tanah, informasi tentang bawah tanah sering kali terbatas dan mencakup ketidakpastian yang signifikan.

Namun, dari perspektif yang lebih luas, penggunaan semua klasifikasi dan pengujian material yang dilakukan pada ribuan proyek individual yang terjadi di kota berukuran sedang hingga besar setiap tahunnya masih kurang memadai. Pengumpulan dan integrasi data tersebut tetap sulit karena, agar bermanfaat, data tersebut harus didokumentasikan dengan cermat dan dirujuk terkait lokasi, kedalaman, properti lain, dan silsilah (misalnya, sumber data, pengujian apa yang dijalankan, dan apakah peralatan pengujian dikalibrasi dengan benar).

Selain itu, dan mungkin yang paling jelas, adalah disinsentif yang signifikan bagi pemilik proyek dan konsultan mereka untuk merilis data karena kekhawatiran terkait dengan tanggung jawab dan hilangnya pengetahuan kepemilikan. Meskipun demikian, ada peraturan, misalnya, yang mengharuskan operasi pengeboran sumur untuk menyerahkan catatan pengeboran mereka ke survei geologi negara bagian. Langkah-langkah untuk menangkap lebih banyak data geoteknik yang dihasilkan secara bermanfaat merupakan cara penting untuk membantu memungkinkan keberlanjutan bawah tanah perkotaan dan wilayah yang dilayaninya.

Untuk bergerak menuju praktik rekayasa yang konsisten dengan tujuan keberlanjutan tersebut, data yang terkait dengan pengembangan infrastruktur bawah tanah perlu diarsipkan dalam format dan dengan alat yang membuatnya dapat diambil dan diakses selama siklus hidup infrastruktur dan seterusnya (untuk memperhitungkan artefak infrastruktur yang masih ada setelah penutupan atau penghentian operasional). Masalah ini akan dibahas di bagian selanjutnya terkait tantangan kritis dalam pengarsipan data terkait infrastruktur.



Gambar 6.5 Kategori Dukungan Yang Diperkirakan Dari Indeks Kualitas Terowongan (Berdasarkan Grimstad Dan Barton, 1993) Sumber: Palmstrom Dan Broch, 2006.

6.3 TEKNOLOGI UNTUK DESAIN

Keberlanjutan sebagai bagian integral dari desain adalah konsep yang relatif baru. Isu-isu sosial-politik dan ekonomi, yang dibahas dalam bab-bab sebelumnya, memengaruhi desain infrastruktur, mungkin dengan mengorbankan keberlanjutan. Desain dan analisis infrastruktur bawah tanah sering kali sangat terfokus pada pembukaan dan dukungan langsung ruang bawah tanah; isu-isu jangka panjang yang terkait dengan pemeliharaan dan penggunaan berkelanjutan sering kali diabaikan, seperti halnya kontribusi siklus hidup infrastruktur terhadap masyarakat.

Kendala proyek seperti hak jalan dan akses dapat memengaruhi pemilihan alinyemen proyek, dan kendala fisik seperti yang terkait dengan sistem gravitasi pengangkutan air (misalnya, kemiringan, jumlah stasiun pengangkat, panjang jalan masuk), tingkat kemiringan maksimum (untuk konstruksi dan operasi), dan lokasi poros juga dapat memengaruhi pilihan desain. Teknologi atau kebijakan baru yang mengurangi dampak buruk dari kendala fisik tersebut dapat mengurangi biaya pengembangan ruang bawah tanah.

Seperti yang dibahas dalam Bab 4, kode dan standar memandu desain dan operasi, terutama jika keselamatan publik terpengaruh. Meskipun kode bangunan dapat melindungi kesehatan dan keselamatan mereka yang membangun, mengoperasikan, atau menggunakan infrastruktur, kode bangunan bersifat statis dan, oleh karena itu, dapat mengurangi tujuan keberlanjutan dan menyisakan sedikit ruang untuk fleksibilitas atau evolusi teknologi.

Kendala yang disebabkan oleh keterbatasan alat desain, atau oleh keterbatasan mereka yang menggunakan alat tersebut, juga membatasi kemampuan untuk merancang infrastruktur bawah tanah secara optimal dan mengurangi biaya siklus hidup. Desain infrastruktur bawah tanah dapat memperoleh manfaat dari analisis desain berulang terutama desain inovatif dalam lingkungan virtual. Kinerja desain dalam kondisi tanah yang sulit dapat diprediksi menggunakan model numerik, dan hasil analisis dapat menginformasikan modifikasi desain infrastruktur yang memenuhi kendala dan parameter yang diinginkan.

Proses ini dapat diulang sesering yang diperlukan hingga respons model yang diinginkan dan desain optimal tercapai. Paket perangkat lunak komersial tersedia untuk analisis semacam ini, tetapi penggunaannya hanya berhasil jika keterbatasannya dikenali. Yang dibutuhkan dalam desain geoteknik adalah konsistensi yang lebih besar dalam penggunaan pemodelan numerik, validasi desain proyek, dan integrasi pemodelan dengan komponen analisis lainnya (skala) untuk menghasilkan desain yang lebih berkelanjutan.

Hal ini memerlukan peningkatan perangkat lunak, khususnya berkenaan dengan interaksi antarmuka pengguna grafis, pemeriksaan kesalahan, dan pelatihan pengguna. Tantangan lainnya adalah kurangnya masukan model perilaku tanah yang sesuai. Data uji lapangan dan laboratorium sering kali tidak sesuai untuk masukan dalam analisis lanjutan atau verifikasi model. Diperlukan keterkaitan yang lebih kuat dan lebih langsung antara data investigasi lapangan dan pengembangan model (misalnya, Hashash et al., 2009). Kombinasi yang tepat antara teknologi, pelatihan, dan keterampilan sangat penting untuk desain rekayasa yang baik.

Desain fasilitas bawah tanah yang berkelanjutan adalah proses yang kompleks dan berulang yang tentu saja merupakan upaya tim, seperti yang dijelaskan dalam Bab 3. Komunikasi berkelanjutan antara teknisi, pemilik, dan pihak ketiga yang berkepentingan diperlukan untuk mengembangkan desain optimal yang memenuhi persyaratan khusus pemilik dan tujuan keberlanjutan sosial.

Masukan dari berbagai pemangku kepentingan yang lebih luas membantu menciptakan infrastruktur yang terintegrasi ke dalam sistem sistem yang mencakup pembangunan perkotaan. Desainer perlu mempertimbangkan bagaimana ruang tersebut sesuai dengan infrastruktur yang ada, dampak jangka panjangnya terhadap lingkungan perkotaan secara keseluruhan, dan ketahanannya dari waktu ke waktu. Bagian selanjutnya menjelaskan masukan utama yang umum untuk desain proyek bawah tanah.

Mengintegrasikan Desain dan Analisis

Desain rekayasa yang baik mencakup analisis kinerja sistem sebagai bagian dari pengembangan desain. Banyak alat yang tersedia untuk merancang detail struktur bawah tanah misalnya, ketebalan penyangga atau ukuran dan lokasi poros ventilasi yang sesuai. Metode, ide, dan prosedur desain empiris dan analitis yang didasarkan pada pengalaman, kode bangunan, dan paket perangkat lunak analitis dan komputasional semuanya berkontribusi pada desain struktur bawah tanah yang optimal. Namun, efektivitasnya berkorelasi langsung dengan kualitas masukan data dan basis pengetahuan serta pengalaman mereka yang menerapkan alat tersebut.

Pengalaman

Kurangnya pendidikan dan pelatihan yang memungkinkan rekayasa sistem bawah tanah yang baik menjadi perhatian yang berkembang di Amerika Serikat dan pada akhirnya akan memengaruhi ketahanan infrastruktur bawah tanah dan keberlanjutan pembangunan perkotaan. Kurang dari lima lembaga pendidikan tinggi AS menyediakan peluang bagi mahasiswa dalam konstruksi bawah tanah, dan bakat teknik diimpor dari luar negeri. Demikian pula, sangat penting bagi industri konstruksi bawah tanah untuk mengembangkan mekanisme yang memungkinkan transfer pengalaman yang relevan dari personel senior ke insinyur muda.

Alat Desain Empiris

Metode desain empiris bergantung pada pendekatan kuasi-kuantitatif terhadap karakterisasi material yang sebagian besar didasarkan pada penilaian berdasarkan pengalaman. Metode tersebut tidak selalu didasarkan pada mekanisme dasar perilaku tanah dan struktur. Misalnya, sistem klasifikasi tanah dan batuan didasarkan pada perbandingan perilaku material yang diamati dari lokasi infrastruktur dengan pengamatan serupa yang dilakukan di tempat lain.

Perilaku diprediksi berdasarkan perbandingan tersebut, tetapi alasan yang mendasari perilaku tersebut mungkin tidak dipahami dengan baik. Meskipun demikian, klasifikasi tanah dan batuan berdasarkan karakterisasi empiris sering kali menginformasikan persyaratan dukungan dan spesifikasi desain. Dalam beberapa kasus, karakterisasi empiris mungkin didasarkan pada sejumlah besar pengamatan sebelumnya, dan kesimpulan yang dihasilkan mungkin kuat.

Dalam kasus lain, hanya sedikit data yang tersedia untuk memungkinkan perbandingan, dan karakterisasi empiris mungkin lebih mirip dengan "tebakan terbaik". Kesimpulan berbasis empiris dapat dianggap sebagai estimasi orde pertama, dan pengamatan lebih lanjut mungkin diperlukan untuk mengonfirmasi atau menyempurnakan estimasi tersebut. Dengan kata lain, kesimpulan tersebut dapat digunakan untuk menginterpolasi tetapi tidak mengekstrapolasi. Penggunaan alat empiris yang tidak tepat dapat mengakibatkan bahaya keselamatan, kinerja yang buruk, atau biaya yang tidak perlu. Mendidik para profesional tentang keterbatasan metode empiris adalah salah satu cara untuk meningkatkan penggunaannya. Memperbaiki basis data pengamatan dan metode untuk perluasannya adalah cara lainnya.

Metode Analisis dan Komputasional

Metode analisis terutama solusi matematika bentuk tertutup yang tidak memerlukan penggunaan computer untuk menghitung tegangan, regangan, pergerakan tanah, aliran air tanah, dan sifat-sifat lainnya sangat penting untuk meningkatkan pemahaman perilaku struktur bawah tanah yang berkaitan dengan lingkungan tanah. Metode ini menyediakan data tentang respons struktur bawah tanah untuk kondisi batas ideal dan perilaku material tertentu.

Metode analisis adalah alat utama untuk membangun pengetahuan dan penilaian mengenai perilaku geoteknik, untuk melaksanakan studi desain awal (atau desain lengkap dengan konfigurasi yang sesuai), dan untuk membandingkan keluaran model komputasional

yang kompleks untuk mengukur keandalan. Namun, metode ini tidak dapat menangkap kompleksitas penuh dari sebagian besar struktur bawah tanah dan kondisi geologis. Metode komputasional seperti metode elemen hingga, metode perbedaan hingga, dan metode elemen diskrit digunakan untuk memperkirakan perilaku tanah, batuan, atau struktur rekayasa ketika sejumlah informasi terperinci yang cukup tersedia misalnya, untuk menyempurnakan desain berdasarkan respons tetapi dapat berguna ketika ada pengalaman sebelumnya yang terbatas dalam bekerja dalam kondisi tertentu. Perilaku dapat diprediksi menggunakan program perangkat lunak komputer.

Metode komputasi dapat digunakan untuk memperkirakan, misalnya, interaksi dan deformasi struktur-tanah, perubahan lingkungan tanah (misalnya, perubahan termal dan aliran air tanah serta kontaminasi), dan penyebaran api dan asap di ruang bawah tanah yang ditempati. Semua metode komputasi, baik yang didasarkan pada diskritisasi (misalnya, diferensial versus integral) atau asumsi kontinuitas (misalnya, kontinum, blok batuan diskrit, atau beberapa hibrida), memerlukan pengetahuan tentang informasi spasial dan sifat material (misalnya, material utuh, diskontinuitas, dan sifat fluida).

Dalam banyak hal, perkembangan pesat metode komputasi selama beberapa dekade terakhir telah melampaui kemampuan saat ini untuk mengumpulkan data yang cukup rinci untuk mengisi model atau memvalidasi keluaran model yang kompleks (misalnya, perilaku) sebelum informasi model dimasukkan ke dalam desain. Kemampuan seorang desainer untuk membandingkan hasil dari berbagai pendekatan analitis dan simulasi dan untuk mengakses data riwayat kasus yang relevan dapat ditingkatkan secara signifikan.

Untuk memperoleh manfaat lebih sepenuhnya dari kemajuan dalam metode komputasi, model informasi tanah dapat dihubungkan secara dinamis dengan data dari peralatan penggalian, sistem pendukung, dan simulasi yang diperbarui untuk menyediakan umpan balik yang bermanfaat. Informasi tersebut dapat digunakan selama konstruksi untuk memvalidasi model prediktif yang digunakan dalam desain, meningkatkan karakterisasi tanah, dan memperbarui respons tanah dan struktur yang diharapkan. Demikian pula, pengumpulan data dari lingkungan tanah dan infrastruktur bawah tanah itu sendiri sepanjang siklus hidup infrastruktur akan meningkatkan pemahaman tentang implikasi keberlanjutan dari struktur (misalnya, dampak terhadap dan dari lingkungan sekitar).

Amerika Serikat telah menjadi pemimpin dalam pengembangan perangkat lunak simulasi numerik untuk rekayasa geoteknik selama beberapa dekade, tetapi keunggulan itu terancam oleh kemajuan dalam pendekatan simulasi di negara lain. Beberapa paket perangkat lunak yang sekarang digunakan dalam praktik geoteknik telah dikembangkan di luar Amerika Serikat. Kotak 6.2 menjelaskan beberapa kebutuhan yang terkait dengan pengembangan model analitis dan komputasi.

KOTAK 6.2

Pengembangan Model Analisis dan Komputasional

Data yang lebih banyak dan lebih baik saja tidak cukup. Model yang lebih baik diperlukan untuk menyelidiki perilaku sistem infrastruktur adaptif dan terhubung yang

kompleks, termasuk

- Model analisis dan komputasional yang memprediksi dan mempelajari kinerja sistem, mengidentifikasi kerentanan, dan menyediakan platform untuk menyelidiki peluang guna meningkatkan keamanan, ketahanan, daya tahan, kapasitas dan efisiensi, serta efektivitas biaya;
- Elemen dan algoritme keterkaitan yang memungkinkan simulasi dan eksplorasi interaksi dan saling ketergantungan lintas sektor; dan
- Alat untuk memvisualisasikan dan mengomunikasikan keluaran simulasi tingkat lanjut ini.

Teknik analisis yang ditingkatkan perlu diterapkan dalam kondisi operasi rutin, dan juga perlu menangkap kondisi dan perilaku operasi yang muncul akibat interaksi sistem yang kompleks dan tekanan internal atau eksternal yang tidak rutin (misalnya, gempa bumi, badai besar, perubahan permukaan laut, aktivitas teroris). Model yang tervalidasi dapat menyediakan platform untuk memahami cara terbaik untuk

- mengintegrasikan dan mengoperasikan fasilitas infrastruktur di atas dan di bawah tanah untuk penyediaan layanan yang andal dan berkelanjutan;
- menangkap potensi teknologi dan material baru untuk meningkatkan kinerja sistem yang ada dan untuk mendapatkan wawasan tentang perubahan keseimbangan antara atribut sistem terpusat dan terdesentralisasi;
- merancang dan menyebarkan jaringan penginderaan untuk secara efisien dan ekonomis menangkap perilaku sistem yang kompleks dan meningkatkan operasi dan keamanan sistem;
- mengembangkan tempat uji penelitian jangka panjang untuk penyebaran sensor di lingkungan nyata;
- memungkinkan keamanan data yang andal untuk data yang dikirim dan disimpan dan mengembangkan arsitektur sistem tangguh yang dapat mendeteksi data yang dimanipulasi; dan
- mengeksplorasi konsep baru dalam desain, operasi, dan pemeliharaan sistem yang mengurangi kerentanan dan memberikan fleksibilitas dan ketahanan.

6.4 TEKNOLOGI UNTUK KONSTRUKSI BAWAH TANAH

Perkembangan teknologi yang terkait dengan penggalian, modifikasi tanah, perbaikan, dukungan, pengeboran terowongan, dan penggunaan material galian penting untuk mengembangkan ruang bawah tanah secara lebih efisien, hemat biaya, dan dalam kondisi tanah yang semakin sulit. Pengembangan teknologi bawah tanah dan kemajuan teknik didorong oleh persyaratan konstruksi bawah tanah di seluruh dunia, dan oleh kebutuhan untuk tetap kompetitif di pasar internasional untuk kontrak konstruksi bawah tanah.

Pentingnya pengembangan infrastruktur bawah tanah yang berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan kini mulai diakui. Keberlanjutan lingkungan perkotaan sebagian bergantung pada meminimalkan gangguan terhadap hasil ekonomi daerah berpenduduk

selama konstruksi (dan kemudian pemeliharaan) infrastruktur bawah tanah. Proyek bawah tanah sering kali membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk diselesaikan, dan selama waktu itu peralatan dipindahkan ke dan dari lokasi penggalian dan sejumlah besar tanah dan batu galian (lumpur) harus dipindahkan.

Jalanan dapat diblokir untuk waktu yang lama, dan pergerakan truk di jalan permukaan dapat mengganggu dan mencemari. Karena setiap proyek dan lingkungan bersifat unik, tidak ada solusi rekayasa tunggal yang meminimalkan gangguan, penggunaan sumber daya yang tidak dapat diperbarui, dan biaya untuk semua proyek bawah tanah. Namun, teknologi tersedia jika ada kemauan untuk mengeluarkan biaya awal tambahan.

Kemajuan dalam teknologi seperti mesin bor terowongan (TBM) baru dan teknologi tanpa parit dapat meminimalkan gangguan, misalnya dengan memungkinkan penggalian di kondisi tanah yang sulit tanpa penggalian parit terbuka. Bagian berikutnya memberikan contoh teknologi yang digunakan dalam konstruksi ruang bawah tanah, termasuk penggalian dan pembuatan terowongan potong-dan-tutup, pembuatan terowongan dan dukung tanah di bebatuan dan tanah, perbaikan tanah, dan pemantauan.

Penggalian dan Pembuatan Terowongan Potong-dan-Tutup

Penggalian terbuka adalah teknik yang umum dan terbukti untuk membangun terowongan dangkal (misalnya, kedalaman kurang dari 150 kaki [50 meter]), bangunan yang ditutupi tanah, dan ruang bawah tanah serta fondasi bangunan. Penggalian utilitas juga umumnya menggunakan penggalian parit terbuka. Bahkan terowongan yang dibor atau bagian terowongan tabung yang terbenam akan menggunakan penggalian terowongan potong-dan-tutup untuk akses, struktur pendukung, dan peluncuran mesin bor.

Teknologi penggalian terbuka mungkin optimal secara ekonomi untuk area dengan sedikit kendala pada penggunaan permukaan, tetapi dapat cukup mengganggu di area berpenduduk. Penggalian terbuka dapat mengakomodasi perubahan lebar terowongan dan bentuk yang tidak seragam dan sering diadopsi untuk konstruksi ruang dan stasiun. Pemilihan di antara teknik konstruksi yang tersedia seperti cor di tempat, dari bawah ke atas, atau dari atas ke bawah, bergantung pada kondisi tanah, ruang yang tersedia, dan persyaratan lingkungan. Penggalian biasanya ditopang dan terbuka ke permukaan dengan penimbunan kembali berikutnya atau konstruksi struktur vertikal yang berkelanjutan.

Di jalan umum dan saat menggunakan metode dari atas ke bawah, penggalian dapat ditutup pada tahap awal konstruksi untuk memungkinkan arus lalu lintas berlanjut atau untuk memungkinkan konstruksi lantai atas bangunan sementara penggalian ruang bawah tanah berlanjut. Metode potong dan tutup juga dapat digunakan di terowongan bawah laut. Proyek-proyek besar metode potong dan tutup di daerah perkotaan memberikan peluang untuk memperbaiki fasilitas bawah tanah lainnya di sekitarnya. Misalnya, utilitas dapat dimasukkan dalam proyek transportasi, dan jaringan pejalan kaki bawah tanah dalam pembangunan kembali pusat kota (seperti yang terjadi di Montreal dan Toronto) dapat dibangun. Dampak langsung dan tidak langsung dari konstruksi metode potong dan tutup di jalan umum dibandingkan dengan pendekatan konstruksi yang kurang mengganggu seperti terowongan bor dan teknologi tanpa parit tidak selalu dipahami dengan cukup baik untuk

menginformasikan pengambilan keputusan.



Gambar 6.6 Penggalian Dengan Penyangga Untuk Bagian Terowongan Potong Dan Tutup Dari Boston Central Artery.

Teknologi Pembuatan Terowongan dan Dukungan Tanah pada Batuan

Penggalian batu diperlukan untuk semua jenis penggunaan bawah tanah termasuk terowongan gunung, operasi penambangan, dan gua bawah tanah besar tempat batu berada di atau dekat permukaan. Pada masa lalu, penggalian batu sangat lambat, bergantung pada peralatan tangan atau bahkan kejutan termal³ untuk menghancurkan batu. Pengenalan teknologi peledakan pada abad keenam belas dan ketujuh belas merevolusi kecepatan penggalian batu dan meningkatkan jangkauan proyek yang dapat dilakukan dengan biaya yang efektif.

Dalam setengah abad terakhir, TBM batu keras telah menemukan aplikasi yang luas untuk membuat terowongan dengan panjang sedang hingga panjang. Penggalian batu juga diuntungkan oleh munculnya mekanika batu sebagai cabang tersendiri dari rekayasa geoteknik pada tahun 1950-an. Studi tentang fragmentasi batu, pemahaman tentang perilaku kekuatan pasca-puncak batu, dan karakterisasi pengaruh diskontinuitas batu pada perilaku massa batu merupakan beberapa hasil penting dari penelitian dalam mekanika batu.

Teknologi Pengeboran dan Peledakan

Dalam penggalian dengan pengeboran dan peledakan, bahan peledak dan detonator yang diatur waktunya ditempatkan ke dalam lubang bor, peledakan dilakukan, lubang diberi ventilasi, sisa galian diangkut menjauh dari permukaan galian, dan proses dimulai lagi hingga lubang yang diinginkan diperoleh. Peledakan biasanya merupakan solusi yang lebih disukai dari perspektif biaya untuk terowongan batu pendek dan untuk penggalian fondasi dan gua batu.

Namun, peledakan dapat menjadi tantangan tersendiri di lingkungan perkotaan karena getaran amplitudo yang lebih tinggi (dan karenanya, guncangan tanah), material galian

berukuran lebih besar, dan kebutuhan yang lebih besar untuk dukungan terowongan primer daripada, misalnya, yang diakibatkan oleh penggunaan TBM. Kecepatan penggalian relatif lambat, prosesnya berisik, dan overbreak (penggalian material yang terlalu banyak) mungkin terjadi.

Alternatif untuk teknologi pengeboran dan peledakan konvensional dimungkinkan. Misalnya, penyebaran rekahan dari lubang bor di batu menggunakan ekspansi gas yang terkendali dapat memungkinkan penggalian berkelanjutan tanpa melepaskan energi berlebih yang menyebabkan getaran dan batu beterbangan. Aplikasi komersial dari teknologi tersebut sejauh ini terbatas pada aplikasi khusus yang tidak memungkinkan dilakukannya peledakan konvensional.

Desain peledakan (misalnya, pola dan urutan peledakan) dapat lebih efektif dengan model komputasi pengeboran, peledakan, getaran, dan pemindahan yang lebih baik. Desain yang meminimalkan kebisingan dan getaran, misalnya, dapat memungkinkan peledakan dilakukan kapan saja, sehingga meningkatkan produktivitas, meminimalkan gangguan pada lingkungan sekitar, dan meminimalkan kerusakan pada infrastruktur di sekitarnya. Seiring dengan semakin padatnya pembangunan kota dan semakin banyaknya penggunaan ruang bawah tanah, pendekatan peledakan yang terbukti meminimalkan kerusakan dan gangguan akan dibutuhkan.

Teknologi Mesin Bor Terowongan untuk Penggalian Batu

Variasi awal TBM untuk batuan lunak dikembangkan pada akhir tahun 1800-an. Kemajuan awal dalam desain TBM dilakukan oleh Robbins Company di Seattle, Washington, yang tetap menjadi pemimpin dunia dalam desain dan pembuatan TBM selama beberapa dekade. Namun, selama dekade terakhir, pembuatan TBM semakin didominasi oleh perusahaan-perusahaan non-AS.

Penggalian terowongan dengan mesin di batuan yang lebih keras tetap menjadi tantangan karena inefisiensi dan keausan yang cepat pada pemotong batu tipe pick yang digunakan saat itu. Dengan munculnya desain mesin full-face dan pemotong cakram untuk batu dan bukti nilai pendekatan TBM (misalnya, Rencana Terowongan dan Waduk Chicago), TBM batuan keras yang menggunakan pemotong cakram secara bertahap menggantikan teknologi pengeboran dan peledakan untuk terowongan yang lebih panjang.

Tingkat kemajuan menggunakan TBM di batuan lunak dapat melebihi 100 kaki per hari. Namun, penggalian terowongan adalah proses produksi sistematis dan industri yang hanya dapat berjalan pada kecepatan elemen paling lambat dalam sistem. Dengan demikian, kemajuan teknologi yang meningkatkan kecepatan fragmentasi batuan tidak dapat diterapkan sepenuhnya sampai sistem pengangkutan lumpur yang membuang material galian dapat dirancang untuk mengimbangnya. Tingkat kemajuan untuk penggalian batuan juga dapat ditingkatkan dengan metode pemasangan penyangga dan penguatan yang lebih efisien.

Langkah-langkah pengendalian tanah untuk mencegah hilangnya kurungan dan karenanya menghadapi ketidakstabilan, cerobong asap, penyumbatan kepala pemotong, dan keruntuhan terowongan di tanah yang padat dan sangat retak dapat ditingkatkan. Metode yang lebih baik untuk memprediksi dan mengurangi fraktur batuan yang spontan, energik, dan

terkadang berbahaya (ledakan batuan) pada batuan kompeten yang sangat tertekan dapat meminimalkan risiko dan menghasilkan praktik konstruksi yang lebih dapat diulang, produk kerja yang lebih konsisten, dan pengendalian waktu dan biaya konstruksi yang lebih baik.

Hal ini sejalan dengan kebutuhan akan kemajuan mendasar dalam pemahaman kita tentang mekanika batuan dan perilaku batuan, termasuk mekanika rekahan batuan tiga dimensi. Dengan kuantifikasi interaksi batuan dan alat penggalian yang lebih baik, dapat terjadi peningkatan penggunaan sistem yang merasakan kemajuan dan fungsinya sendiri (sistem pintar), lebih banyak otomatisasi dalam konstruksi bawah tanah (misalnya, robotika) untuk mengurangi risiko bagi pekerja, dan peningkatan kemampuan untuk menyelidiki di depan permukaan galian untuk mendeteksi perubahan pada sifat material. TBM modern adalah mesin berteknologi tinggi yang dikendalikan komputer yang menggunakan sistem panduan laser dan sensor untuk memperoleh informasi waktu nyata tentang kinerja sistem. Data yang diperoleh selama penggalian dapat digunakan dalam putaran umpan balik untuk menyesuaikan secara optimal, misalnya, kecepatan dorong dan putaran.

Teknologi Penerobosan dan Dukungan Tanah di Tanah

Batuan yang terindurasi mungkin lebih sulit untuk difragmentasi saat penerowongan, tetapi penerowongan di tanah (material yang tidak terkonsolidasi) menghadirkan tantangan yang terkait dengan dukungan tanah, pembuangan lumpur, dan efek yang disebabkan penggalian pada tanah di sekitarnya (misalnya, penurunan tanah, penurunan muka air tanah). Meningkatkan pengendalian deformasi akibat pembuatan terowongan di tanah merupakan kunci untuk membatasi kerusakan pada infrastruktur yang ada dan meningkatkan kapasitas untuk mengembangkan ruang bawah tanah secara berkelanjutan di sebagian besar wilayah perkotaan.

Pelapisan terowongan juga merupakan area di mana efisiensi dapat meningkatkan keberlanjutan. Biaya, misalnya, dapat dikurangi ketika dukungan awal dan permanen (misalnya, dukungan konstruksi dan pelapisan akhir) diintegrasikan, atau ketika ketebalan pelapisan dikurangi melalui penggunaan material baru yang lebih kuat. Kemajuan bermanfaat lainnya dapat mencakup peningkatan teknik untuk mengurangi pemotongan berlebih selama penambangan, meningkatkan pengendalian arah selama penambangan untuk mengurangi kelonggaran untuk kesalahan penyalarsan, dan mengembangkan bekisting yang lebih efisien dan cepat digunakan untuk pelapisan cor di tempat.

Mesin Bor Terowongan di Tanah

Perkembangan teknologi terkini untuk pembuatan terowongan di tanah meliputi TBM yang seimbang dengan tekanan tanah dan TBM pelindung lumpur. Keduanya menggali dan menyangga permukaan terowongan secara bersamaan dengan menciptakan ruang terpisah (sekat) yang menutup permukaan dari bagian terowongan lainnya. Teknologi canggih ini sangat mengurangi risiko pembuatan terowongan di tanah jenuh termasuk yang terkait dengan tanah yang mengalir di permukaan, penurunan yang signifikan di tanah yang buruk, dan tekanan air yang berlebihan.

Di masa lalu, pembuatan terowongan dengan mesin tidak memungkinkan untuk terowongan dalam dengan tekanan air yang tinggi tanpa menggunakan udara bertekanan di

dalam terowongan proses yang mahal dengan masalah keselamatan dan risiko yang signifikan. Secara komparatif, teknologi tekanan tanah dan lumpur sangat meminimalkan penurunan dan kerusakan terkait, meningkatkan kecepatan penggalian, dan mengurangi biaya. Hasilnya, terowongan yang semakin besar menjadi aman dan ekonomis untuk dibangun di kondisi tanah yang buruk dan memungkinkan pembuatan terowongan tersebut berkontribusi pada solusi yang lebih berkelanjutan untuk kebutuhan transportasi dan infrastruktur lainnya.

Metode Penggalian Berurutan

Metode penggalian berurutan (SEM) mencakup beberapa aplikasi seperti Metode Terowongan Austria Baru dan Metode Lapisan Beton Semprot yang mengandalkan pengintegrasian batuan atau tanah yang digali ke dalam struktur pendukung terowongan. Desain SEM mencakup pengurangan tekanan secara sengaja dengan memobilisasi tanah di sekitar terowongan semaksimal mungkin melalui deformasi yang terkendali. Metode ini melibatkan komitmen terhadap filosofi desain dan metode konstruksi yang sebagian besar bergantung pada metode observasi.

Dukungan primer awal terowongan dirancang dengan mempertimbangkan karakteristik deformasi beban yang sesuai dengan kondisi tanah yang ada; kecepatan pemasangan yang diperlukan didasarkan pada besarnya dan kecepatan deformasi tanah yang terjadi. Lapisan primer memberikan dukungan awal selama konstruksi, mencegah keruntuhan atap. Instrumentasi dipasang untuk memantau deformasi pada sistem pendukung awal dan untuk menginformasikan perubahan yang diperlukan dalam desain dukungan dan urutan penggalian. Terowongan digali dan didukung secara berurutan, dan urutan penggalian dapat bervariasi. Dukungan permanen biasanya (tetapi tidak selalu) berupa lapisan beton cor di tempat.

SEM dapat diterapkan pada penggalian dangkal dan dalam, tetapi dalam kedua kasus tersebut, efek deformasi pada struktur di sekitarnya dan permukaan perlu dipertimbangkan. Dukungan tanah dalam SEM dapat dipilih atau dioptimalkan secara langsung agar sesuai dengan kondisi tanah yang ditemukan selama penggalian. Fitur ini dimaksudkan untuk mendukung kondisi yang paling tidak menguntungkan yang ditemui dalam penyelarasan dan berbeda dengan sistem pendukung yang telah dipilih sebelumnya yang tidak mengakomodasi variasi kondisi di sepanjang penyelarasan.

Dengan demikian, jumlah dan biaya material yang dibutuhkan untuk dukungan tanah dapat dikurangi. Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan: mengubah skema dukungan secara terus-menerus dapat mengurangi produktivitas kru konstruksi dan menunda konstruksi proyek. Lebih jauh, proses pengambilan keputusan yang digunakan dalam SEM bergantung pada informasi yang tidak tersedia secara umum (misalnya, yang terkait dengan kondisi tanah, respons tanah, dan pergerakan). Penelitian diperlukan di area ini untuk meningkatkan penerapan SEM dan kontribusi terhadap pengembangan ruang bawah tanah yang lebih berkelanjutan.

Teknologi Tanpa Penggalian

Banyak teknologi konstruksi dan perbaikan utilitas bawah tanah baru telah muncul dalam 40 tahun terakhir yang memungkinkan pemasangan, penggantian, atau perbaikan

utilitas atau saluran bawah tanah tanpa menggali parit terus-menerus dari permukaan. Meskipun "tanpa penggalian" juga berlaku untuk terowongan bor yang lebih besar, istilah tersebut biasanya merujuk pada teknologi skala utilitas perkotaan daripada pemasangan terowongan kereta api, metro, atau jalan raya. Teknologi tanpa penggalian memperkenalkan solusi baru untuk meminimalkan gangguan permukaan dalam perencanaan, desain, dan pengoperasian sistem bawah tanah jangka pendek dan jangka panjang.

Hal ini akan menjadi kenyataan terutama karena teknik tersebut menjadi lebih umum digunakan. Deskripsi teknologi tanpa parit dapat ditemukan dalam buku dan laporan beberapa prosiding konferensi, jurnal dan majalah. Gambar 6.7 mengilustrasikan teknologi dan aplikasi tanpa parit utama. Karena banyak kemajuan teknologi berpusat pada peralatan yang lebih baik atau proses baru, pemahaman lengkap tentang proses dari perspektif desain dan aplikasi telah tertinggal dari adopsi di lapangan. Banyak informasi tentang teknologi diperoleh langsung dari kontraktor instalasi, produsen, pemasok, atau melalui asosiasi perdagangan.



Gambar 6.7 Mesin Pelindung Lumpur Untuk Proyek Akses Sisi Timur, Queens, New York. (Kiri) Perakitan Dua Mesin Bor Terowongan (TBM) Dan Roda Gigi Penariknya Di Lubang Peluncuran. (Kanan) Tampilan Dekat Kepala Pemotong TBM. Sumber: Y. Hashash.

Potensi kurangnya komunikasi antara perancang teknik dan kontraktor konstruksi ini bermasalah. Selain itu, kemampuan yang relatif baru untuk memasang utilitas dengan biaya rendah di bawah utilitas dangkal yang ada tanpa gangguan besar pada utilitas atau lalu lintas memberikan kemampuan dan bahkan insentif untuk memperdalam tata letak utilitas yang ada seperti yang digambarkan pada Gambar 6.7.

Namun, hal ini dapat mengganggu penempatan infrastruktur transportasi atau air dan saluran pembuangan utama di masa mendatang. Dengan kata lain, teknologi konstruksi tersebut meningkatkan kebutuhan untuk menangani perencanaan jangka panjang dan kemampuan untuk memilih penggunaan ruang bawah tanah perkotaan yang paling berkelanjutan dan terbaik.

Teknologi Peningkatan Tanah

Sering kali diperlukan atau produktif untuk mengubah sifat tanah atau air tanah secara sementara atau permanen selama konstruksi bawah tanah guna memudahkan desain, konstruksi, atau pengoperasian fasilitas. Misalnya, pembekuan tanah dapat mengubah tanah yang lemah dan jenuh untuk sementara menjadi material yang padat dan hampir kedap air; pengeringan dapat meringankan masalah konstruksi baik dari segi aliran air maupun stabilitas tanah; dan grouting dapat digunakan untuk memperkuat atau mengubah permeabilitas tanah.



Gambar 6.8 Teknik Utama Yang Dikelompokkan Dalam “Teknologi Tanpa Galian.” CIPP Menunjuk Pipa Yang Diawetkan Di Tempat. Sumber: Raymond Sterling. Dicitak Ulang Dengan Izin Dari Penulis.

Teknik modifikasi tanah dan pengembangan material baru yang digunakan untuk aplikasi geoenvironmental dan geomekanik merupakan bidang penelitian dan aplikasi lapangan yang aktif. Memajukan penerapan metode yang sudah mapan (misalnya, grouting jet dan grouting

kompensasi), serta mengembangkan pendekatan dan material baru, menawarkan potensi pengurangan biaya dan peningkatan kinerja. Namun, untuk teknologi tanpa galian, penerapan teknologi perbaikan tanah baru dapat melampaui pemahaman teoritis tentang metode tersebut, yang berarti bahwa penerapan teknik ini dalam desain mungkin tidak optimal.

Penelitian dan pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan metode yang ada, meningkatkan pemahaman tentang penerapannya, dan memungkinkan rekayasa yang lebih baik dengan, misalnya, bioteknologi in situ, nanoteknologi, dan teknik perbaikan dan pemulihan tanah lainnya yang dapat mengurangi penggunaan sumber daya dan lebih ramah lingkungan daripada metode konstruksi yang lebih tradisional.

Pemantauan Selama Konstruksi

Program pemantauan geoteknik dan konstruksi menyediakan dasar untuk memahami respons tanah terhadap penggalian dan dampak konstruksi pada struktur yang ada dan lingkungan alam. Pemantauan untuk konstruksi mungkin lebih intensif daripada pemantauan untuk operasi infrastruktur, tetapi biasanya durasinya lebih pendek (seringkali kurang dari lima tahun). Instrumen pemantauan mungkin terpapar pada kondisi yang keras selama konstruksi dan harus lebih kuat.

Pemantauan perilaku fasilitas bawah tanah dan lingkungan sekitar selama konstruksi membantu memastikan keselamatan, menilai kinerja, memvalidasi desain, dan menginformasikan perubahan desain yang diperlukan. Gambar 6.8, misalnya, menunjukkan tingkat detail yang memungkinkan penggunaan pemindaian laser untuk memantau kemajuan penggalian. Perubahan pada gambar dari waktu ke waktu memberikan informasi tentang kemajuan pekerjaan tetapi juga dapat memberikan informasi tentang dampak penggalian pada, misalnya, infrastruktur di dekatnya.

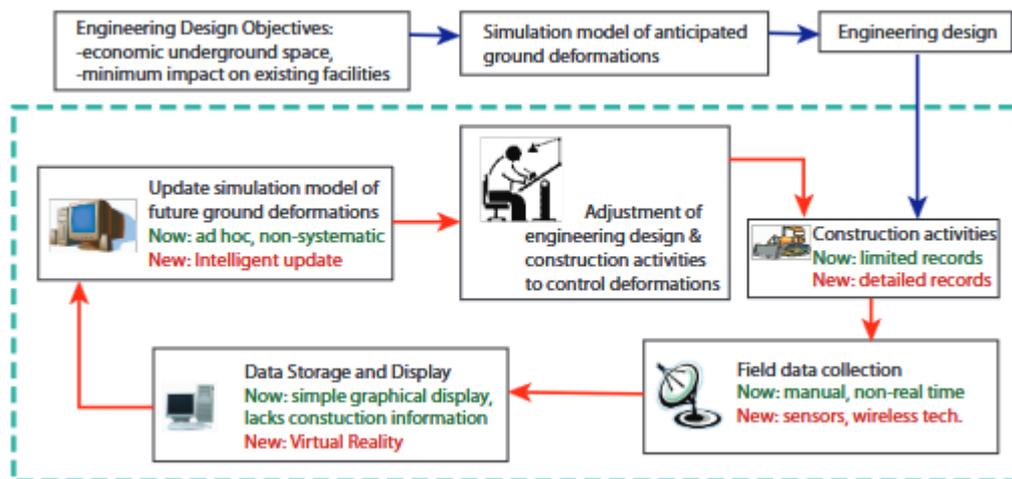
Pemantauan volume dan tekanan air serta kualitas air dan udara membantu melindungi sumber daya air tanah dan kualitas udara di atas dan di bawah permukaan. Kontraktor biasanya memantau dan menganalisis proses dan operasi konstruksi (misalnya, pemanfaatan shift, waktu henti peralatan, perbaikan atau penggantian, pemasangan dukungan tanah, volume lumpur, dan pengambilan nat) untuk mengidentifikasi peluang guna meningkatkan efisiensi. Kontraktor juga terus memantau gas tanah (misalnya, metana, karbon monoksida, hidrogen sulfida) dalam penggalian.

Penggunaan sensor untuk mengukur perpindahan geoteknik dan struktural dari masing-masing struktur, proyek, atau operasi telah mapan dalam praktik dan para insinyur terus meningkatkan kemampuan mereka untuk menggunakan teknologi tersebut dengan cara yang semakin inovatif. Namun, premis utama laporan ini adalah perlunya pendekatan sistem dari sistem, yang menyiratkan perlunya menciptakan sistem terintegrasi yang dapat memantau kondisi sistem perkotaan. Informasi mengenai semua elemen sistem dapat ditangkap selama semua fase siklus hidupnya, yang memungkinkan pengamatan dampak perubahan yang diamati dalam satu elemen sistem pada elemen sistem lainnya.

Data dari sistem bawah tanah mahal untuk dikumpulkan sebagai tugas yang terpisah, dan karenanya akan lebih baik untuk mengumpulkan data yang berguna setiap kali pekerjaan bawah tanah memberikan peluang seperti itu. Dekade terakhir telah menyaksikan revolusi

dalam pengembangan sensor, teknologi sensor, dan infrastruktur teknologi informasi untuk memungkinkan sistem pemantauan terintegrasi yang memberikan umpan balik tepat waktu kepada para desainer. Gambar 6.9 menunjukkan seperti apa bentuk umpan balik tersebut.

Peluang untuk memajukan pemantauan konstruksi mencakup sarana untuk mengumpulkan dan menganalisis data pemantauan waktu nyata yang terperinci selama pengoperasian peralatan konstruksi. Misalnya, data pengoperasian kepala pemotong (misalnya, torsi, daya, daya dorong, penetrasi per putaran, gaya pemotong cakram, kecepatan putar, suhu bantalan, dan lokasi cakram) meningkatkan pengetahuan tentang proses penggalian, khususnya kondisi geologis.



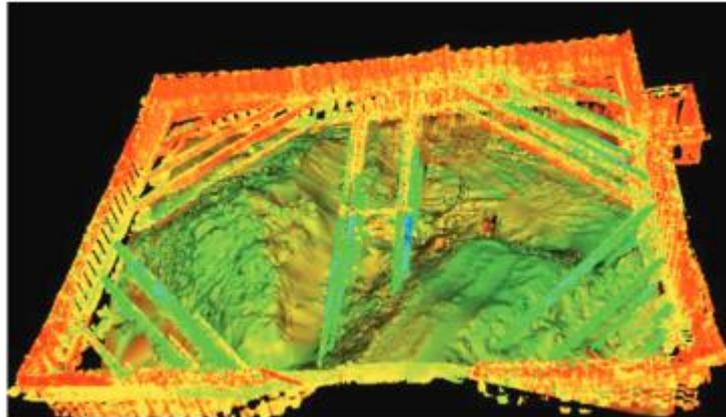
Gambar 6.9 Data Pemantauan Terus-Menerus Dimasukkan Kembali Ke Dalam Desain Dan Konstruksi Yang Disempurnakan. Sumber: Dimodifikasi Dari Hashash Dan Finno, 2008. Digunakan Dengan Izin Dari ASCE, ©2008.

Dengan cara yang sama, pengukuran berkelanjutan terhadap volume, berat, dan laju kemajuan tanah yang dibuang merupakan indikator penting dari pengendalian perpindahan dan penurunan tanah. Manfaat melakukan hal ini telah diketahui selama beberapa waktu, tetapi kemampuan untuk menerapkan dengan cara praktis data yang dikumpulkan masih muncul. Peluang lain datang dari kemajuan dalam pencitraan permukaan dan pemrosesan gambar. Pergeseran permukaan seluruh permukaan galian dari waktu ke waktu, misalnya, dapat direkam menggunakan sistem pencitraan fotografi, berbasis laser, atau alternatif. Beberapa fitur geologi dapat diidentifikasi secara otomatis dari pemindaian.

Data visual tersebut dapat diintegrasikan dengan data metode numerik konvensional untuk mengembangkan rencana dan spesifikasi yang dibangun untuk tujuan pengarsipan. Sebagai tren umum, kemajuan dalam pemantauan konstruksi beralih dari pengukuran fisik pada sejumlah titik terbatas, ke jaringan sensor yang terhubung secara nirkabel dan terdistribusi luas, dan ke teknik pemindaian areal. Data ini memungkinkan kontraktor untuk mengoptimalkan proses konstruksi dan meningkatkan keselamatan di tempat kerja.

Mengintegrasikan data dari beberapa proyek dapat memfasilitasi peningkatan desain

peralatan, prediksi kinerja, dan pemahaman tentang zonasi dan sifat material geologi. Pemantauan untuk peningkatan keselamatan juga menjadi lebih penting karena fasilitas infrastruktur berdiameter lebih besar dan lebih dangkal (misalnya, terowongan dan stasiun) semakin banyak diusulkan untuk lokasi perkotaan.



Gambar 6.10 Contoh Pemindaian Laser Untuk Memantau Kemajuan Penggalian. Gambar Milik Y. Hashash.

6.5 TEKNOLOGI UNTUK MANAJEMEN ASET YANG EFEKTIF

Kemampuan untuk mengoperasikan dan memelihara infrastruktur bawah tanah dalam jangka panjang sangat penting bagi keberlanjutannya dan bagi sistem yang lebih besar yang menjadi bagiannya. Semua sistem yang dibangun memerlukan dan perlu mengakomodasi pemeliharaan, terutama yang dioperasikan selama beberapa dekade atau abad. Memelihara infrastruktur bawah tanah, dalam beberapa hal, dianalogikan dengan memelihara armada pesawat yang menua melalui penggunaan metode evaluasi dan perbaikan yang tidak merusak.

Sistem infrastruktur yang berkelanjutan perlu dirancang untuk memungkinkan fleksibilitas dan mengakomodasi teknologi yang berubah dengan cepat, standar keselamatan dan kesehatan baru, dan kebutuhan serta tuntutan budaya yang berubah dengan kata lain, keberlanjutan bergantung pada kemampuan untuk mengakomodasi evolusi teknologi dan sosial. Misalnya, saluran bawah tanah dapat digunakan kembali jika ukuran, kondisi, dan keselarasannya sesuai dengan kebutuhan baru.

Sistem gas buatan bertekanan rendah dapat diubah menjadi sistem gas alam bertekanan tinggi, misalnya, dengan menyelipkan pipa baru di dalam pipa lama. Sistem perpipaan bawah tanah yang ada dari berbagai jenis dapat (dan telah) diadaptasi untuk memberikan sambungan serat optik ke rumah dan bisnis. Dalam jangka pendek, pengoperasian dan pemeliharaan infrastruktur bawah tanah merupakan investasi tahunan yang cukup besar. Banyak bentuk infrastruktur bawah tanah yang sulit atau mahal untuk diperiksa.

Sebagian besar perpipaan bawah tanah, misalnya, tidak memperbolehkan orang masuk untuk pemeriksaan langsung, dan penghentian layanan pipa bertekanan (misalnya, untuk gas, minyak, atau air) untuk pemeriksaan akan mengakibatkan gangguan besar dan

hilangnya pendapatan. Infrastruktur rel bawah tanah (terutama sistem metro yang banyak digunakan) menghadirkan tantangan khusus terkait akses untuk pemeriksaan dan rehabilitasi. Dibandingkan dengan bentuk infrastruktur bawah tanah lainnya, terowongan jalan mungkin terawat dengan baik karena bagian dalamnya mudah terlihat—masalah dapat diidentifikasi lebih cepat.

Namun, banyak infrastruktur bawah tanah dapat kurang terawat selama beberapa dekade. Banyak kerusakan, pemeliharaan, dan masalah operasional di fasilitas bawah tanah berasal dari, misalnya, intrusi air tanah ke dalam fasilitas atau korosi yang disebabkan oleh air tanah pada struktur fasilitas. Material baru untuk menyegel struktur bawah tanah atau menutup sendiri kebocoran atau retakan akan membantu mencegah air tanah masuk ke dalam struktur, dan desain inovatif dapat memasukkan air drainase ke dalam konsep estetika atau energi untuk fasilitas tersebut.

Perlu juga dicatat bahwa peningkatan manajemen aset bukan sekadar masalah pengumpulan lebih banyak data melainkan pengumpulan data yang berharga dan hemat biaya yang kemudian dianalisis secara efektif untuk memperoleh informasi berguna yang memandu keputusan tentang pemeliharaan, rehabilitasi, dan penggantian. Pemeliharaan yang tidak memadai akhir-akhir ini mendapat perhatian publik berkat berbagai laporan tentang status infrastruktur Amerika.

Meningkatnya perhatian terhadap masalah yang disebabkan oleh infrastruktur yang memburuk telah menghasilkan beberapa investasi dalam teknologi yang lebih baik untuk inspeksi dan rehabilitasi. Banyak pekerjaan inspeksi sekarang dapat dilakukan dari jarak jauh menggunakan robot dalam pipa, "babi" inspeksi, atau bahkan perangkat yang mengambang bebas yang melewati pipa untuk "mendengarkan" kebocoran atau kantong gas dan yang dapat memberikan informasi tentang laju aliran dan sifat pipa seperti lokasi katup dan sambungan pipa.

Deteksi kesalahan jarak jauh melalui kabel listrik dan serat optik dapat mengidentifikasi posisi dan sifat beberapa cacat. Konsep pemantauan diambil lebih jauh dengan meningkatnya minat pada "struktur pintar", di mana sensor nirkabel ditempatkan untuk memantau kesehatan struktural dan kinerja jangka panjang dari berbagai aspek suatu struktur. Namun, tantangan penggunaan sensor selama beberapa dekade tetap berat. Lingkungan yang keras di bawah tanah dapat menyebabkan kerusakan yang cepat dalam waktu yang relatif singkat.

Konektivitas radio dan daya bawah tanah yang terbatas juga dapat menjadi masalah bagi jaringan sensor nirkabel, dan perkembangan teknologi yang cepat di bidang sensor nirkabel dapat membuat sensor yang ada hampir usang dalam waktu kurang dari satu dekade. Perkembangan yang signifikan diperlukan di area ini untuk sepenuhnya mencapai visi struktur bawah tanah yang cerdas. Mengatasi defisit pemeliharaan yang sangat besar sangat penting bagi keberlanjutan sistem perkotaan dan memerlukan pendekatan yang beragam.

Insentif yang signifikan untuk berinvestasi dalam inspeksi, rehabilitasi, dan penggantian infrastruktur, serta untuk mengembangkan teknologi yang menyediakan cara yang hemat biaya untuk melakukannya sambil meminimalkan gangguan terhadap kehidupan kota dan perdagangan, diperlukan. Fasilitas bawah tanah baru harus dirancang dan dibangun dengan

perhatian lebih besar pada analisis biaya siklus hidup (lihat Bab 5) yang memperhitungkan cara pemeriksaan dan perbaikan, keberlanjutan, ketahanan, dan pertimbangan akhir masa pakai.

Teknologi baru yang mengurangi biaya operasi dan pemeliharaan fasilitas bawah tanah, membuatnya lebih aman, dan memperpanjang masa manfaatnya dapat berdampak besar pada biaya masa depan dan keandalan operasional fasilitas bawah tanah. Kebutuhan penelitian dasar terletak pada pemahaman yang lebih baik tentang korosi dan mekanisme kerusakan lainnya baik untuk bahan yang sedang digunakan maupun untuk bahan baru dan dalam pengembangan pendekatan pengujian non-destruktif yang lebih baik.

Kebutuhan penelitian terapan mencakup peningkatan berkelanjutan dari teknologi inspeksi, penilaian, rehabilitasi, dan penggantian termasuk cara untuk meningkatkan fasilitas bawah tanah yang ditempati untuk memenuhi harapan kesehatan, keselamatan, dan kenyamanan saat ini. Pilihan desain dan perencanaan yang lebih baik untuk penggunaan kembali infrastruktur perkotaan yang ada dan menciptakan opsi multi guna untuk masa depan (misalnya, konsep desain baru untuk fasilitas yang lebih mudah direhabilitasi atau dipasang kembali untuk meningkatkan masa pakai atau penggunaan kembali) juga akan meningkatkan kemungkinan untuk keberlanjutan.

KOTAK 6.3

Pemantauan Konstruksi di Sistem Rel Crossrail, Inggris Raya

Sistem terowongan rel tabung ganda sepanjang 21 km sedang dibangun di bawah London (Inggris Raya) untuk memperluas sistem rel jaringan yang ada. Pemantauan data waktu nyata yang ekstensif dan manajemen data terpusat merupakan bagian penting dari pengendalian risiko dan proses untuk, misalnya, memantau kemajuan konstruksi dan pengendalian pergerakan tanah, penurunan permukaan, dan kehilangan volume. Misalnya, untuk mengendalikan ekstraksi dan mengoordinasikan laju pembangunan lapisan, sistem pengukuran menentukan berat ekstraksi limbah pada konveyor limbah tetap yang berjalan di sepanjang TBM, dan pemindaian video dan laser limbah pada konveyor dipantau sebagai metode penimbangan tambahan (tetapi kurang dapat diandalkan).

Sistem Manajemen Informasi Konstruksi Bawah Tanah (UCIMS) menyatukan semua data dari instrumentasi dan pemantauan geoteknik dan konstruksi ke dalam sumber daya terpusat. Kontrak mungkin memerlukan pengeboran lubang uji selama penggalian, yang darinya laju pengeboran, volume aliran air, dan tekanan dapat dievaluasi dan masalah geologi dapat diperkirakan. Dalam beberapa kasus, pengujian geofisika sebelum permukaan penggalian digunakan untuk memperkirakan kondisi yang bermasalah.

KOTAK 6.4

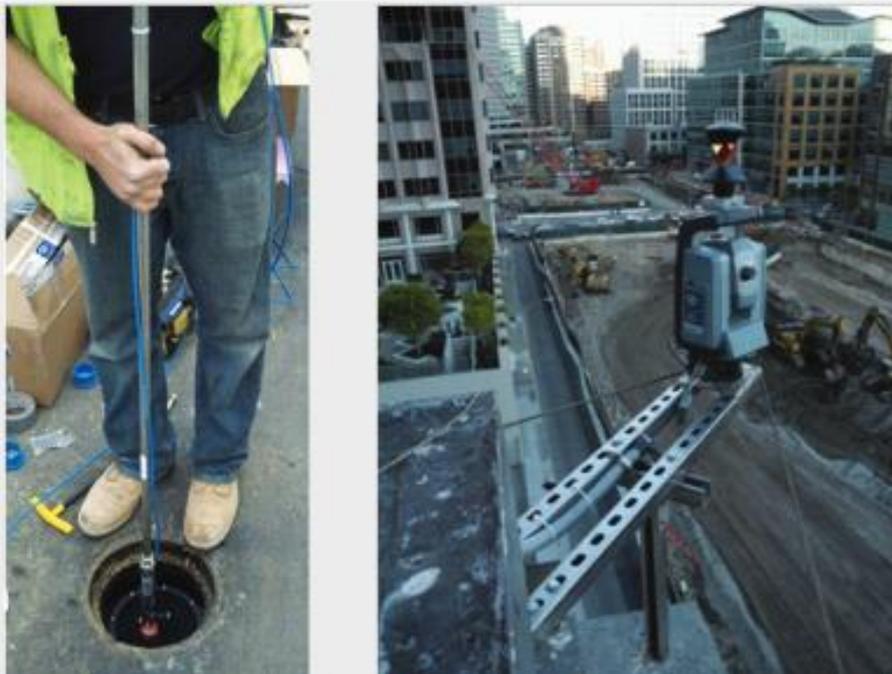
Instrumentasi Jaringan untuk Pusat Transit Transbay, San Francisco, California

Pusat Transit Transbay (TTC; lihat <http://transbaycenter.org>) adalah proyek senilai Rp. 20 Triliun untuk mengganti terminal Transbay yang ada di pusat kota San Francisco dengan hub transit regional modern yang akan menghubungkan 11 sistem transit regional

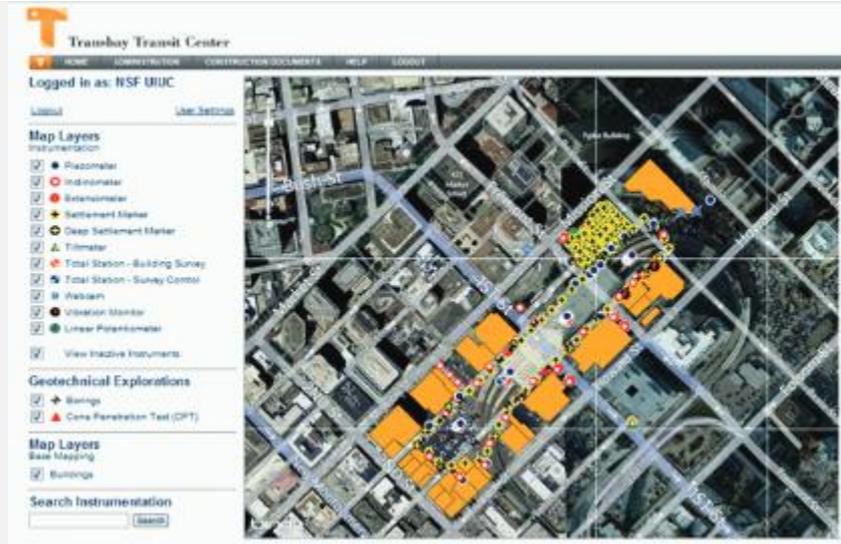
dan kota dan akan menjadi titik akhir untuk Kereta Cepat dari Los Angeles. Pembangunan TTC memerlukan penggalian terbuka sedalam 60 kaki, lebar 185 kaki, dan panjang 1.500 kaki di tanah yang relatif lunak yang berdekatan dengan beberapa gedung tinggi dan rendah termasuk salah satu gedung tertinggi di San Francisco.

Penggalian ini belum pernah terjadi sebelumnya dalam skala di Pantai Barat AS dan mencakup program pemantauan yang ekstensif untuk membantu meminimalkan gangguan pada fasilitas di sekitarnya. Proyek ini menggunakan sensor canggih yang ditempatkan di tempat pada kedalaman tanah di bawahnya, serta pada bangunan, utilitas, dan infrastruktur lain di sekitarnya. Sensor mengukur respons tanah dan infrastruktur terhadap aktivitas konstruksi. Kamera digunakan untuk terus-menerus menangkap gambar konstruksi. Mikrofon segera mengarahkan kamera ke arah sumber kebisingan tiba-tiba.

Data untuk semua sensor dan peralatan pencitraan dialirkan secara nirkabel ke penyimpanan awan dan diakses dari mana saja di dunia melalui antarmuka berbasis web yang dilindungi kata sandi yang disebut Global Analyzer. Global Analyzer mensintesis semua aliran data dan mengeluarkan peringatan otomatis melalui email dan pesan teks seluler jika salah satu instrumen melampaui ambang batas yang telah ditentukan sebelumnya. Informasi ini dilengkapi dengan umpan Twitter tempat personel kontraktor dan insinyur tim desain memposting deskripsi singkat tentang aktivitas konstruksi dengan demikian mengembangkan catatan konstruksi yang dapat dirujuk nanti.



Gambar 6.A (Kiri) Penempatan Inklinometer Di Tempat Dengan Jaringan Nirkabel. (Kanan) Stasiun Total Otomatis Dengan Kamera Dan Hotspot/Simpul Nirkabel Khusus Untuk Terus Mengukur Pergerakan Target Yang Ditempatkan Pada Infrastruktur Di Sekitar Lokasi (Foto milik GeoInstruments).



Gambar 6.B Antarmuka Data Sensor Dan Dokumentasi Berbasis Cloud Global Analyzer Untuk TTC. Dirancang Dan Diimplementasikan Oleh Arup North America Ltd. Untuk Transbay Joint Powers Authority, San Francisco, California.



Gambar 6.C Jaringan Nirkabel Proyek TTC Untuk Data Langsung Dan Transmisi Gambar Konstruksi. Total Station Otomatis, Ditunjukkan Dengan Warna Hijau Digunakan Sebagai Node Nirkabel Untuk Jaringan Nirkabel Proyek Khusus. Dirancang Dan Diimplementasikan Oleh Arup North America Ltd. Untuk Transbay Joint Powers Authority, San Francisco, California.

Teknologi Data

Bagian ini membahas isu yang lebih luas tentang pengintegrasian operasi sistem bawah

tanah dengan keseluruhan infrastruktur dan tatanan sosial suatu wilayah. Jika dilaksanakan dengan benar, integrasi ini dapat mengoptimalkan penggunaan fasilitas, memastikan bahwa kebutuhan operasi dan pemeliharaan terpenuhi, dan meningkatkan penyampaian harapan masyarakat. Misalnya, pengintegrasian sistem transportasi bawah tanah dan permukaan dapat memastikan kelancaran arus kendaraan, penumpang, dan kargo untuk seluruh wilayah.

Demikian pula, sistem terowongan pengangkutan air limbah yang efisien beroperasi bersamaan dengan siklus harian penggunaan air di suatu kota. Kesadaran situasional untuk pengembangan, operasi, pemeliharaan, dan manajemen terpadu sistem perkotaan sangat penting. Masyarakat semakin bergantung pada sistem sensor elektronik, otomatis, jarak jauh, dan jaringan untuk memantau interaksi dan menginformasikan sistem keputusan otomatis atau manusia dalam lingkaran; namun, sistem pengumpulan data tersebut tidak sepenuhnya aman.

Berbagai sistem sensor telah dikembangkan untuk mengukur berbagai faktor fungsi lingkungan dan ruang bawah tanah, semuanya dalam upaya untuk menginformasikan pengambilan keputusan tentang operasi bawah tanah dan keselamatan misalnya dalam sistem rel kereta bawah tanah dan sistem distribusi air. Faktor-faktor seperti kualitas udara dan air, tingkat kebisingan, beban lalu lintas, suhu, integritas struktural sistem pendukung, baut longgar pada pelapis, korosi beton bertulang, rembesan air, arus lalu lintas, sinyal kontrol, dan perubahan yang disebabkan oleh peristiwa ekstrem (misalnya, gempa bumi, ledakan, kebakaran) adalah beberapa faktor yang dapat dipantau.

Kemampuan untuk memantau faktor-faktor tersebut sangat penting bagi keberlanjutan dan ketahanan infrastruktur, tetapi upaya pemantauan saat ini tidak dapat diterapkan secara cukup luas untuk memberikan gambaran yang memadai tentang kinerja sistem infrastruktur yang lengkap. Karena sistem transmisi data operasional dianggap "permanen", ada insentif untuk berinvestasi dalam sistem yang kuat. Meskipun sensor dan infrastruktur teknologi informasi pendukung akan dirancang untuk memerlukan perawatan yang relatif terbatas dengan kemampuan terbaik saat ini, mereka juga harus andal dan akurat, mengkalibrasi sendiri, berukuran kecil, harga terjangkau, mudah dioperasikan dan dirawat, dan ditingkatkan secara berkala.

Sistem sensor diharapkan dapat menyediakan data sepanjang waktu selama bertahun-tahun dan tahan terhadap debu, polutan, kelembapan, dan arus liar, dan dalam kasus yang paling berguna, memberikan pemberitahuan segera tentang kegagalan. Sistem yang berkelanjutan mengharuskan kegagalan sensor individual tidak merusak seluruh sistem. Daya untuk mengoperasikan sensor harus diperoleh melalui paket daya yang dapat diganti atau diperoleh dari jarak jauh saat pengukuran dilakukan (misalnya, sensor pasif), atau dengan "memulung" energi dari lingkungan sensor (misalnya, getaran lokal, aliran fluida).

Selain itu, sensor perlu dikeraskan terhadap vandalisme atau kerusakan yang tidak disengaja. Namun, umur panjang banyak sistem sensor tidak diketahui. Pengambilan data yang memungkinkan penerimaan dan interpretasi data secara real-time atau mendekati real-time penting untuk pengambilan keputusan operasional. Banyak tantangan yang sama yang ada untuk mengirimkan data konstruksi juga ada untuk mengirimkan data operasional. Sistem

transmisi data kabel yang memerlukan jalur khusus dapat diandalkan tetapi dapat mahal (terutama di terowongan panjang), dan tidak cocok di mana-mana.

Jumlah sensor yang digunakan terbatas pada berapa banyak sensor yang dapat dihubungkan dengan kabel. Penggunaan transmisi data nirkabel baru-baru ini meningkat, didorong oleh kemajuan dalam akses protokol Internet nirkabel, jaringan area lokal (LAN) nirkabel, dan proliferasi layanan telepon seluler berbasis seluler. Transmisi data nirkabel menghindari biaya pemasangan kabel, tetapi transmisi data memburuk secara signifikan di ruang bawah tanah dan terbatas, terutama di terowongan panjang. Transmisi data nirkabel rentan terhadap pelanggaran keamanan yang dapat membahayakan operasi sistem.

Informasi berbasis lokasi (misalnya, data sistem penentuan posisi global [GPS]) dapat menyediakan lokasi elemen sistem yang memerlukan perbaikan, menyampaikan informasi waktu nyata mengenai kondisi di ruang bawah tanah, dan memetakan lokasi perangkat penginderaan dan pemeliharaan otomatis, tetapi sinyal GPS dan seluler sulit diterima di bawah tanah. Selain operator infrastruktur, beberapa pengguna infrastruktur bawah tanah (misalnya, penumpang kereta api) mungkin sangat bergantung pada layanan berbasis lokasi dan terbiasa dengan aksesibilitas yang mudah.

Pengembangan lebih lanjut dari teknologi berbasis lokasi yang memungkinkan transisi yang mulus dari atas tanah ke bawah tanah dapat mendorong penggunaan bawah tanah oleh mereka yang tidak ingin kehilangan fungsionalitas tersebut. Lebih jauh, informasi pelancong waktu nyata (misalnya, informasi kedatangan dan keberangkatan) pada layar datar di bisnis kecil di dalam atau di dekat sistem angkutan umum, atau melalui pesan teks dan peringatan email ke perangkat seluler, dapat membantu mengurangi kemacetan di dalam dan di sekitar stasiun angkutan umum.

Masih banyak peluang lain untuk mengembangkan sensor baru dan sistem terintegrasi untuk meningkatkan pengoperasian sistem transportasi bawah tanah. Misalnya, teknologi yang menggunakan gambar kamera keamanan untuk evaluasi struktural mungkin terbukti bermanfaat. Kereta api atau kendaraan pemeliharaan terpilih dapat dilengkapi dengan kamera kecepatan tinggi atau pemindai laser untuk dokumentasi berkala kondisi terowongan dan dibandingkan menggunakan algoritma penalaran gambar untuk mengevaluasi perubahan dalam struktur.

Menghubungkan Data dan Manajemen Aset serta Kemampuan Analisis

Aliran data numerik dan visual yang berkelanjutan dapat memberikan informasi untuk operasi, pemeliharaan, dan prediksi harian kinerja infrastruktur jangka panjang serta program operasi. Namun, menafsirkan aliran besar data gambar numerik dan visual secara langsung atau hampir langsung dapat dengan mudah membuat operator kewalahan. Informasi penting yang memerlukan tindakan mungkin terlewatkan. Metode dan sistem otomatis untuk menafsirkan data ini dan melaporkan masalah kepada operator akan meningkatkan operasi dan pemeliharaan sistem bawah tanah yang optimal.

Teknologi manajemen data yang ditingkatkan dapat membantu pemahaman kinerja infrastruktur bawah tanah sebagai bagian dari sistem perkotaan yang lebih besar dan memungkinkan perencana untuk mengantisipasi saling ketergantungan dan gangguan yang

memengaruhi fungsionalitas dan kualitas layanan. Teknologi manajemen data seperti proses Building Information Modeling (BIM) memungkinkan evaluasi yang lebih rinci mengenai dampak konstruksi baru terhadap instalasi sistem yang ada, mengevaluasi dampak sistem yang ada terhadap konstruksi proyek baru, dan merancang sistem penginderaan yang disesuaikan untuk sistem baru dan yang direhabilitasi sebagai bagian dari sistem sistem perkotaan yang terintegrasi.

Namun, meskipun metode ini sangat penting, teknologi yang digunakan mungkin sudah ketinggalan zaman, dan keterbatasan anggaran membuat pembaruan data yang diperlukan dan aksesibilitas menjadi tantangan. Beberapa data mungkin perlu tetap aman. Kolaborasi swasta-publik mungkin diperlukan untuk menghubungkan, menganalisis, mengelola, dan mengakses data di seluruh sistem. Dokumentasi sistematis dan terstandarisasi dari riwayat kasus yang terkait dengan infrastruktur bawah tanah dapat membantu memperluas pemahaman mendasar tentang proses penggalian dan dukungan.

Memang, riwayat kasus merupakan cara penting untuk mempelajari tentang bawah tanah karena mereka menjadi tolok ukur keadaan praktik, dan memberikan informasi yang dapat memvalidasi atau menyangkal asumsi dan model. Pengarsipan data dan catatan yang terkait dengan karakterisasi lokasi untuk pengembangan, desain, operasi dan pemeliharaan infrastruktur, rehabilitasi, penggunaan kembali, dan penghentian operasional akan memungkinkan perencanaan dan pengelolaan masa depan yang lebih baik dengan cara yang mendorong keberlanjutan lama setelah data dikumpulkan.

Keamanan Informasi

Menjaga, memelihara, dan melindungi integritas data dari kelalaian, vandalisme, waktu, atau keusangan teknologi merupakan masalah serius yang mengancam pengelolaan berkelanjutan. Menangkap informasi bawah permukaan cukup sulit; membuat katalog dan memeliharanya dengan benar dalam jangka waktu yang lama (misalnya, 50 hingga 100 tahun dan lebih lama) merupakan tantangan yang signifikan. Data yang diarsipkan secara elektronik dapat menjadi usang hanya dalam satu atau dua dekade ketika teknologi berubah dan media tempat data tersebut disimpan tidak dapat lagi diakses.

Di sisi lain, salinan data cetak telah bertahan selama hampir satu abad untuk beberapa proyek terowongan, tetapi hanya jika dirawat dengan benar. Keamanan data selama transmisi atau penyimpanan dalam sistem komputer pusat menjadi perhatian yang semakin serius. Data dapat diakses, dimanipulasi, dan dirusak oleh pihak yang tidak berwenang sehingga merugikan operasi fasilitas bawah tanah yang aman atau lancar. Karena data sensor menginformasikan keputusan yang memengaruhi, misalnya, keselamatan jiwa (misalnya, operasi lalu lintas, ventilasi), kesejahteraan penghuni infrastruktur bawah tanah bergantung pada fungsi sistem yang aman dan tepat.

Kekhawatiran menjadi lebih serius ketika sensor digunakan dalam loop umpan balik otomatis (seperti manajemen lalu lintas atau sistem kontrol pengawasan dan akuisisi data [SCADA]). Sabotase data dapat segera memengaruhi operasi fasilitas bawah tanah. Penyebab masalah mungkin sulit dilacak. Karena penggunaan penginderaan jaringan dan pengambilan keputusan otomatis menjadi lebih luas, ada kebutuhan untuk mengembangkan jaringan data

yang aman dan mekanisme autentikasi untuk mencegah kerusakan dan manipulasi data yang berbahaya atau tidak disengaja.

Jaringan yang paling kuat masih berpotensi rentan terhadap serangan berbahaya, dan National Research Council (NRC) telah menerbitkan beberapa laporan tentang masalah yang terkait dengan keamanan teknologi informasi. Pada tahun 2007, NRC mengembangkan strategi untuk penelitian keamanan siber dan mempromosikan kategori penelitian yang mencakup pembatasan dampak kompromi keamanan (misalnya, desain sistem yang aman, evaluasi keamanan), memungkinkan akuntabilitas (misalnya, atribusi, autentikasi jarak jauh), mempromosikan penerapan desain keamanan (misalnya, "keamanan yang dapat digunakan"), pencegahan (misalnya, kebijakan dan tindakan hukum), dan pendekatan spekulatif, "di luar kotak" terhadap keamanan. Ketahanan perlu dibangun ke dalam sistem sensor, termasuk pengambilan keputusan yang melibatkan manusia untuk komponen penting guna mengurangi kerusakan data.

6.6 TEKNOLOGI YANG MENINGKATKAN KEBERLANJUTAN DAN KETAHANAN

Bagian ini menyoroti beberapa isu utama yang terkait dengan dampak keberlanjutan dan ketahanan fasilitas bawah tanah, dan khususnya bagaimana perkembangan teknologi dapat mendorong peningkatan di area ini. Banyak dari isu ini telah dipertimbangkan dalam beberapa bentuk dalam desain dan pengoperasian fasilitas bawah tanah, tetapi isu ini menjadi sangat penting jika dipertimbangkan dalam kaitannya dengan keberlanjutan dan ketahanan masyarakat secara keseluruhan.

Isu lain, seperti pemahaman dan pengendalian sistem yang sangat saling terkait, merupakan bidang studi baru dengan kepentingan besar di masa mendatang. Keterkaitan dan saling ketergantungan antara sistem infrastruktur individual dan fungsi serta kesejahteraan masyarakat dan sistem sosial secara keseluruhan perlu dipertimbangkan.

Material

Peningkatan kemungkinan keberlanjutan memerlukan pertimbangan penggunaan material secara ekonomi. Yang perlu dipertimbangkan adalah material yang digunakan, ketersediaan sumber dayanya, proses yang dibutuhkan untuk menciptakan produk siap konstruksi, ketersediaan material dalam jangka panjang, implikasi penggunaan energi (dan jejak karbon), dan dampak lingkungan jangka panjang. Misalnya, bahkan material yang umum digunakan seperti pasir dan kerikil mungkin persediaannya terbatas karena kurangnya ketersediaan regional atau karena keputusan pembangunan dan perencanaan perkotaan yang membuat sumber daya pasir dan kerikil tidak dapat diakses.

Dalam hal penggunaan energi (lihat bagian berikutnya), beton, elemen penting dalam sebagian besar bentuk konstruksi bawah tanah, memerlukan masukan energi tingkat tinggi untuk pembuatannya (disebut energi terwujud). Beberapa material konstruksi yang umum digunakan telah terbukti merugikan lingkungan dan kesehatan masyarakat (misalnya, berbagai jenis senyawa organik volatil yang digunakan dalam pipa yang dapat mencemari sistem air tanah, dan asbes yang digunakan dalam pipa semen).

Material galian dari beberapa proyek pembuatan terowongan dapat terbukti menjadi

sumber daya untuk proyek konstruksi di dekatnya. Jutaan meter kubik material mungkin perlu disingkirkan dari penggalian. Sebagian material ini bisa jadi merupakan sumber pasir, kerikil, dan batu. Namun, sebagian material ini mungkin berakhir sebagai bahan berbahaya dan karenanya memerlukan penanganan dan pembuangan khusus. Namun, sejumlah besar material mungkin cocok untuk penggunaan konstruksi lainnya, atau mungkin menjadi bagian dari solusi untuk masalah keberlanjutan lainnya.

Kotak 6.5 menjelaskan kasus penggunaan kembali material galian dari proyek Boston Central Artery/Tunnel untuk membantu mereklamasi fasilitas limbah padat dan mengubahnya menjadi taman yang dioperasikan oleh National Park Service. Pembuangan atau penggunaan kembali material galian merupakan masalah serius yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Penggunaan material yang lebih berkelanjutan dapat berarti memilih opsi desain dan konstruksi bawah tanah yang menggunakan material dalam jumlah lebih sedikit atau material dengan kinerja yang lebih baik, atau dapat berarti memasukkan lebih banyak material limbah atau produk sampingan yang berasal dari aplikasi lain ke dalam desain (misalnya, geopolimer yang dibuat terutama dari abu terbang limbah).

Namun, biaya dan manfaat siklus hidup perlu diperhitungkan dalam keputusan. Misalnya, mengintegrasikan sistem pendukung tanah primer (dukungan untuk konstruksi) dan permanen dapat memungkinkan penggunaan lebih sedikit material konstruksi, tetapi dapat memengaruhi efisiensi operasi konstruksi. Memaksimalkan kemampuan tanah untuk menjadi bagian dari sistem pendukung, atau menggunakan kembali material galian dari dalam atau dekat proyek, akan membantu meningkatkan efisiensi dalam penggunaan atau penggunaan kembali material.

Teknologi pelapisan dan konstruksi bawah tanah baru diperlukan untuk mengurangi penggunaan material dan meningkatkan kinerja fasilitas jangka panjang. Pengambilan keputusan yang lebih terinformasi memerlukan penyediaan informasi yang lebih baik tentang aspek keberlanjutan material konstruksi (misalnya, ketersediaan, energi yang terkandung) kepada para perancang.

KOTAK 6.5

Pemanfaatan Kembali Material Galian dari Proyek Terowongan/Arteri Pusat Boston

Spectacle Island di Pelabuhan Boston (Massachusetts) adalah lokasi fasilitas limbah padat kota yang digunakan hingga tahun 1959. Dari tahun 1959 hingga 1993, tempat pembuangan sampah tersebut tetap menjadi sumber pelindian yang tidak tertutup ke Pelabuhan Boston. Material galian yang tidak terkontaminasi dari proyek Terowongan/Arteri Pusat Boston (Big Dig) digunakan untuk menstabilkan lereng di pulau tersebut dan mengisi serta menutup tempat pembuangan sampah tersebut untuk mengubahnya menjadi penggunaan rekreasi. Material galian diangkut dengan lebih dari 4.400 tongkang ke pulau tersebut mulai tahun 1992 dan digunakan untuk menutup tempat pembuangan sampah tersebut dengan lapisan tanah liat setinggi 2 kaki.

Penutup tersebut menciptakan lapisan kedap air yang berfungsi untuk mencegah air hujan bercampur dengan limbah di bawahnya dan meresap ke pelabuhan. Timbunan tanah

galian dicampur dengan biosolid dari beberapa fasilitas pengomposan limbah di New England untuk menciptakan lapisan tanah atas yang kemudian ditumbuhi tanaman untuk menjaga penutup tetap di tempatnya. Sekitar 2.400 pohon dan 26.000 semak ditanam di atas lapisan tanah tersebut. Pada tahun 2006, sebuah taman seluas 114 hektar dibuka setelah 15 tahun kegiatan pembersihan. Taman tersebut dioperasikan oleh National Park Service dan memiliki pusat pengunjung, beberapa mil jalur pendakian, dan pantai untuk berenang.

Energi dan Karbon

Biaya, ketersediaan, keamanan pasokan, dan dampak iklim dari penggunaan energi telah mendapat perhatian dunia dalam beberapa tahun terakhir, dan para ilmuwan serta insinyur telah berupaya mengembangkan kalkulator energi yang terkandung dalam berbagai infrastruktur dan sistem geoteknik. Tanpa kalkulator tersebut, sulit untuk memahami biaya energi sebenarnya dari infrastruktur bawah tanah. Bawah tanah menawarkan berbagai pilihan untuk mempromosikan efisiensi energi dan memperbaiki perubahan iklim yang dijelaskan di seluruh laporan, tetapi masih ada tantangan perencanaan, desain, konstruksi, pemeliharaan, dan keberlanjutan lainnya yang harus lebih dipahami atau diintegrasikan ke dalam praktik untuk memaksimalkan penghematan energi infrastruktur bawah tanah.

Metode yang lebih efisien atau alternatif untuk penggalian atau produksi beton keduanya merupakan proses yang menghabiskan energi dapat menghasilkan efisiensi energi yang lebih besar selama konstruksi. Penggunaan ruang bawah tanah membutuhkan sejumlah besar energi untuk ventilasi, kontrol suhu, pencahayaan, deteksi kebakaran, dan sistem lainnya selama masa pakai fasilitas bawah tanah. Beberapa kemajuan memungkinkan efisiensi yang lebih besar, tetapi biaya pemasangan yang lebih tinggi dapat menghalangi penerapannya. Pengembangan teknologi dan konfigurasi ruang yang meningkatkan efisiensi sistem ini akan menguntungkan operator fasilitas dan masyarakat luas. Perlengkapan lampu yang menerima lampu dengan permintaan energi yang lebih rendah telah dirancang dan sedang ditentukan untuk beberapa terowongan dan perbaikan baru.

Sistem ventilasi dirancang untuk meminimalkan bahaya asap yang terkait dengan kebakaran skala besar dan karenanya memiliki permintaan energi terpasang yang jauh lebih tinggi daripada yang dibutuhkan untuk operasi sehari-hari. Persyaratan minimum untuk pengujian sistem ventilasi berkala menghasilkan lonjakan penggunaan energi secara teratur. Namun, standar dapat ditinjau dan diubah untuk menentukan apakah metode pengujian yang lebih jarang atau berbeda dapat memastikan operasi yang aman dan dengan demikian mengurangi konsumsi energi selama masa pakai sistem.

Teknologi dan proses baru yang meningkatkan efisiensi energi, dan pengembangan konfigurasi ruang baru dan lebih kecil yang mengurangi penggunaan sumber daya energi, akan menguntungkan operator fasilitas dan masyarakat luas. Fasilitas bawah tanah dapat dibangun dan digunakan untuk menghemat energi dan menciptakan sistem yang mencapai pertukaran panas tanah dengan material geologi bawah permukaan di bawah tanah perkotaan. Penelitian

penting tentang masalah perpindahan panas bawah tanah dimulai pada tahun 1970-an dan 1980-an.

Sistem pertukaran panas yang terhubung dengan tanah sejak saat itu semakin populer di Eropa. Namun, sistem tersebut belum digunakan secara luas di masyarakat perkotaan, dan efisiensi jangka panjangnya saat digunakan dalam jarak dekat belum dievaluasi. Investigasi efek termal dan dampak jangka panjang pada iklim bawah tanah dan penggunaan ruang bawah tanah diperlukan. Penggunaan sumber daya panas bumi bersuhu rendah dapat membantu mengurangi emisi bersih gas rumah kaca melalui penggunaan pompa panas sumber tanah atau sistem pertukaran panas serupa untuk memanaskan atau mendinginkan struktur dan air minum dan air tidak minum untuk penggunaan perumahan.

Sistem semacam itu menukar panas dari bumi ke suatu bangunan di musim dingin, dan sebaliknya di musim panas, dan dalam beberapa kasus, dapat dimasukkan langsung ke dalam fondasi infrastruktur. Meskipun penghematan energi dapat menjadi signifikan, ada implikasi lingkungan yang perlu dieksplorasi, termasuk pemilihan refrigeran, dan efek jangka panjang dari potensi perubahan suhu tanah pada akuifer dan aliran air tanah, kimia, biota, dan pada infrastruktur bawah tanah itu sendiri. Penggunaan bawah permukaan lainnya mungkin menjadi terbatas di beberapa area karena adanya "hutan" lubang bor panas bumi. Masalah produksi energi dan sumber daya serta penyimpanan limbah terkait energi tidak diselidiki dalam laporan ini, tetapi relevan dalam konteks rekayasa bawah tanah dan pembangunan berkelanjutan.

Ekstraksi energi dan sumber daya konvensional dari bawah permukaan dapat dibuat lebih efisien dengan peningkatan tingkat penggalian dan ekstraksi, misalnya. Produksi minyak dan gas dari sumur dalam, penambangan batu bara, penambangan uranium, dan baru-baru ini produksi gas dari formasi serpih dalam semuanya merupakan bagian dari interaksi kompleks bawah tanah dengan masa depan energi kita. Ada juga minat dalam penggunaan penyerapan karbon dan teknologi pembuangan limbah lainnya pada kedalaman yang relatif dangkal. Teknologi ini sering kali menghasilkan diskusi kebijakan publik yang intens tentang dampak lingkungan yang sebenarnya atau yang mungkin terjadi dan manfaat relatif dari mengejar kebijakan yang berbeda untuk konservasi energi atau produksi energi.

Sering kali hilang adalah data dan analisis penting dalam domain publik yang secara tepat menetapkan manfaat dan kewajiban pada berbagai opsi yang dapat secara tepat menginformasikan opsi masa depan yang penting mengenai energi dan iklim. Sumber energi nontradisional dapat dieksploitasi dengan lebih baik dan lebih efisien dengan kemajuan dalam teknologi rekayasa bawah tanah. Daerah yang aktif secara geotermal dapat dieksploitasi, misalnya, dengan mengebor batu-batu panas dan menggunakan suhu tinggi alami untuk menghasilkan uap dan tenaga listrik. Sumber daya geotermal konvensional yang diketahui memiliki potensi untuk menghasilkan sekitar 9.000 MWe, dan potensi daya rata-rata tambahan sebesar 30.000 MWe diperkirakan dari sumber yang belum ditemukan.

Diperkirakan tambahan 518.000 MWe berpotensi dihasilkan dari metode geotermal nonkonvensional termasuk sistem geotermal rekayasa (EGS). Masalah seperti korosi dari air tanah yang sangat korosif di ladang geotermal harus ditangani. Demikian pula, masalah operasi

dan pemeliharaan jangka panjang tidak dipahami dengan baik untuk sistem EGS, terutama mengingat tekanan dan laju aliran tinggi yang diharapkan dari sumur EGS. Pompa submersible suhu tinggi yang andal dan cocok untuk pengembangan EGS, misalnya, telah diidentifikasi sebagai kesenjangan teknologi. Kendala utama lain untuk penggunaan sumber daya panas bumi adalah kedekatan sumber daya dengan tempat dibutuhkannya daya.

BAB 7

KAPABILITAS LEMBAGA, PENDIDIKAN, PENELITIAN, DAN TENAGA KERJA

Menangani keberlanjutan menuntut tingkat komitmen dan kapasitas masyarakat tertentu untuk melakukan pekerjaan yang diperlukan. Bab ini mengkaji isu-isu yang terkait dengan kapasitas masyarakat untuk menggunakan rekayasa bawah tanah sebagai bagian dari sarana untuk meningkatkan keberlanjutan perkotaan. Tugas komite tersebut meliputi eksplorasi keuntungan pembangunan bawah tanah, identifikasi penelitian untuk memanfaatkan peluang rekayasa bawah tanah, usulan arah jalur penelitian untuk meningkatkan kapasitas manusia yang dibutuhkan, dan eksplorasi pendorong pembangunan bawah tanah yang meningkatkan keberlanjutan.

Dalam mempertimbangkan tugasnya, komite menyadari bahwa model pendidikan, penelitian, dan praktik saat ini di bidang yang relevan dengan rekayasa bawah tanah lebih cenderung mendorong aktivitas ad hoc dan independen daripada upaya interdisipliner yang mempromosikan keberlanjutan. Kekuatan pasar di Amerika Serikat sering kali mendorong pertumbuhan kapasitas tenaga kerja yang dibutuhkan dan pembangunan perkotaan dan infrastruktur, tetapi kemajuan sering kali didorong oleh kebutuhan untuk memecahkan tantangan rekayasa tertentu dalam lingkungan tertentu tanpa mempertimbangkan manfaat dan dampak sosial yang lebih luas.

Sistem kelembagaan saat ini tidak dirancang untuk mengembangkan jenis kapasitas yang dibutuhkan untuk pembangunan berkelanjutan. Diperlukan kerangka kerja baru yang akan meningkatkan kapasitas masyarakat dan jenis penelitian, pendidikan, pelatihan, dan praktik yang dibutuhkan untuk perencanaan perkotaan dan pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Kapasitas masyarakat lebih besar daripada kapasitas tenaga kerja dan mencakup:

- Ketersediaan insinyur, perencana, arsitek, teknisi, dan profesional lain yang terlatih dan berpengalaman untuk mengajar, meneliti, merencanakan, merancang, membangun, mengoperasikan, dan memelihara fasilitas bawah tanah yang efektif dan tangguh;
- Komitmen pemerintah, universitas, dan industri yang memadai untuk mengembangkan kapasitas penelitian yang dibutuhkan agar Amerika Serikat tetap menjadi yang terdepan dalam pengembangan sains dan teknologi yang terkait dengan konstruksi bawah tanah perkotaan dan penggunaan ruang (termasuk sistem mekanik dan listrik yang merupakan bagian dari infrastruktur bawah tanah);
- Warga negara dan pembuat keputusan yang cukup terinformasi yang menghargai implikasi jangka panjang dari penggunaan ruang bawah tanah terhadap kualitas hidup di wilayah perkotaan; dan
- Struktur perencanaan, kebijakan, pendidikan, dan penelitian kelembagaan yang memadai yang mendukung inisiatif lintas disiplin dan lintas sektor untuk mengoptimalkan keberlanjutan dan ketahanan melalui penggunaan fasilitas bawah

tanah.

Bab-bab sebelumnya menjelaskan kontribusi infrastruktur dan rekayasa bawah tanah yang telah terealisasi dan potensial bagi masyarakat perkotaan yang berkelanjutan, dan banyak bidang penelitian dan tindakan yang diidentifikasi di seluruh bab. Komite tidak diminta untuk memprioritaskan item-item ini karena untuk melakukannya akan memerlukan penilaian yang lebih rumit daripada yang dapat dicapai oleh komite ini mengingat skala penugasannya.

Sebaliknya, komite mengidentifikasi tema-tema umum yang terkait dengan perubahan pendekatan terhadap pendidikan, penelitian, dan praktik perencanaan perkotaan dan rekayasa bawah tanah yang diperlukan untuk mempromosikan keberlanjutan perkotaan. Dalam bab ini, komite menyajikan serangkaian pengamatan, kesimpulan, item tindakan, dan penelitian yang diperlukan untuk mendukung penggunaan rekayasa bawah tanah yang paling produktif untuk pembangunan perkotaan yang berkelanjutan. Kesimpulan sebagian besar difokuskan pada kerangka kelembagaan yang akan mendukung kapasitas masyarakat, yang tanpanya tujuan keberlanjutan cenderung tidak akan tercapai.

7.1 PERENCANAAN FORMAL YANG TERKOORDINASI

Pengamatan: Ada sedikit koordinasi strategis pembangunan infrastruktur bawah tanah di Amerika Serikat. Dukungan administratif formal yang terkoordinasi dan pengelolaan infrastruktur bawah tanah sebagai bagian dari sistem perkotaan yang terintegrasi, multidimensi, di atas dan di bawah tanah sangat penting bagi keberlanjutan perkotaan. Tindakan potensial:

- a. Mengenali tanggung jawab yang terkait dengan dukungan formal untuk infrastruktur bawah tanah sebagai bagian dari keseluruhan sistem perkotaan melalui perencanaan dan operasi yang terkoordinasi, pengembangan teknologi yang dibina, dan pembuatan aturan lokal dan regional.
- b. Mengembangkan dan mendorong penggunaan sistem pengumpulan data, pengarsipan, dan akses yang konsisten untuk digunakan oleh semua pemilik dan operator fasilitas guna membantu pengambilan keputusan.

Riset:

- a. Jelajahi pendekatan teknis dan administratif yang paling tepat di dalam pemerintah federal untuk memfasilitasi pengelolaan terkoordinasi atas tanah bawah tanah sebagai bagian dari sistem perkotaan secara keseluruhan. Kenali dan koordinasikan dengan riset yang sedang berlangsung di area ini, misalnya, yang dilakukan oleh Badan Riset Transportasi Dewan Riset Nasional (NRC) terkait proyek jalan raya.
- b. Lakukan pemindaian teknologi tentang bagaimana negara dan kota di seluruh dunia mengumpulkan, mengelola, menyediakan, dan menggunakan informasi geologi dan struktur terkubur tiga dimensi.

Infrastruktur perkotaan secara umum, dan infrastruktur bawah tanah secara lebih khusus, dimiliki, dibangun, dioperasikan, dan dirawat oleh banyak organisasi sektor swasta dan publik yang berbeda untuk melayani lebih banyak pemangku kepentingan. Kelompok-kelompok yang berbeda ini mungkin masing-masing memiliki misi uniknya sendiri, didorong oleh tujuan yang

berbeda, dan memiliki kendaraan finansial yang berbeda, yang semuanya mungkin berbeda.

Kontraktor yang disewa untuk membangun atau mengoperasikan infrastruktur bawah tanah mungkin tidak memiliki komitmen jangka panjang terhadap infrastruktur atau wilayah tersebut. Mungkin ada sedikit peluang bagi pemilik dan operator untuk memahami saling ketergantungan antara sistem infrastruktur masing-masing. Pertimbangan tentang saling ketergantungan spasial dan fungsional infrastruktur permukaan dan bawah tanah selama semua fase siklus hidup infrastruktur sangat penting bagi keberlanjutan perkotaan.

Namun, konvensi budaya dan politik di Amerika Serikat cenderung mengakui, merencanakan secara sistematis, dan mengatur hanya hak atas tanah dan udara di atas atau di atas permukaan, yang secara efektif mengabaikan tanah berharga dan tak terbarukan di bawah kaki kita (dengan pengecualian ekstraksi sumber daya). Lebih jauh, sejak tahun 1980-an, Amerika Serikat tidak memiliki dorongan federal multi-lembaga yang terkoordinasi untuk menjaga penelitian dan teknologi AS di garis depan dalam pengembangan bawah tanah.

Pengembangan infrastruktur, secara umum, dan pengembangan infrastruktur bawah tanah, khususnya, di Amerika Serikat mengalami kesulitan karena diorganisasikan berdasarkan sektor dan tanpa lembaga misi atau organisasi lain dalam lembaga federal yang didedikasikan untuk koordinasi lintas sektor. Koordinasi ini dapat mengarah pada pengelolaan investasi penelitian yang lebih baik dan mengurangi risiko investasi federal (terutama proyek infrastruktur besar), dan juga dapat dikoordinasikan dengan investasi oleh negara bagian dan kotamadya.

Perencanaan yang terintegrasi, holistik, dan tiga dimensi diperlukan. Semua tingkat pemerintahan di banyak wilayah negara menghadapi kesulitan ekonomi yang mungkin menjadi norma ekonomi selama bertahun-tahun mendatang. Sistem bantuan keuangan antarpemerintah yang memungkinkan banyak sistem bawah tanah mungkin tidak dapat berinvestasi dalam infrastruktur bawah tanah seperti yang telah dilakukan di masa lalu. Pengembangan kerangka kelembagaan yang mengkatalisasi pola pertumbuhan berkelanjutan melalui investasi strategis yang ditargetkan menjadi lebih penting dalam keadaan ekonomi seperti itu.

Manajemen informasi, teknologi informasi, dan komunikasi akan menjadi kunci dalam memfasilitasi penelitian yang kompleks tetapi efisien serta desain, konstruksi, operasi, dan manajemen infrastruktur bawah tanah. Pengamatan: Kekuatan pasar di Amerika Serikat mendorong pertumbuhan kapasitas tenaga kerja dan pembangunan perkotaan dan infrastruktur, tetapi sering kali dengan cara ad hoc yang mungkin tidak konsisten dengan keberlanjutan perkotaan.

Pengembangan ruang bawah tanah sebagai bagian dari urbanisasi berkelanjutan memerlukan komunikasi yang diperluas dan terkoordinasi dengan para pemangku kepentingan untuk lebih menggabungkan kondisi khusus lokasi, fleksibilitas yang lebih besar, dan kebutuhan masyarakat jangka panjang ke dalam desain sistem infrastruktur dan manajemen siklus hidup yang optimal. Tindakan potensial:

- a. Membentuk jaringan interdisipliner yang dipimpin pemerintah federal atau organisasi organisasi dan lembaga untuk memandu pola berkelanjutan dalam pengembangan

infrastruktur bawah tanah dan mendorong penelitian interdisipliner dan komunikasi temuan di antara semua disiplin ilmu dan pemangku kepentingan. Para pemangku kepentingan meliputi, misalnya, desainer, perencana jangka panjang, arsitek, spesialis keselamatan, dan serangkaian spesialis teknik, geologi, geofisika, lingkungan, dan kontrak dari industri, pemerintah, dan akademisi.

- b. Mengembangkan mekanisme untuk penelitian dan perencanaan tiga dimensi yang terintegrasi dan holistik yang mencakup manajemen informasi dan teknologi komunikasi untuk memfasilitasi penelitian, desain, konstruksi, operasi, dan manajemen infrastruktur bawah tanah yang kompleks.

Penelitian:

- a. Menjelajahi model untuk merancang keberlanjutan ke dalam sistem rekayasa sistem perkotaan yang mengakui saling ketergantungan, kerentanan, kompleksitas, dan kemampuan beradaptasi. Mengkoordinasikan penelitian yang sedang berlangsung di Amerika Serikat dan di tempat lain, misalnya, mengenai sistem adaptif yang kompleks dan rekayasa faktor manusia (misalnya, menggabungkan ilmu perilaku, kinerja dan kapasitas manusia, personel dan pelatihan, serta biologi dan fisiologi manusia ke dalam sistem rekayasa).
- b. Mengembangkan model konseptual dari interaksi kompleks di antara berbagai sistem (misalnya, mekanik, manusia, dan lingkungan) untuk meningkatkan pemahaman, mengurangi risiko, dan mengelola infrastruktur secara efektif di tengah perubahan teknologi, kondisi masyarakat, dan harapan.
- c. Meneliti perilaku mereka yang mengoperasikan, memelihara, dan menggunakan infrastruktur bawah tanah selama skenario operasi normal dan terburuk untuk mengoptimalkan antarmuka manusia-teknis dengan cara yang konsisten dengan nilai jangka panjang.

Diperlukan kerangka kelembagaan yang mengkatalisasi pembangunan berkelanjutan dan secara memadai merevitalisasi kapasitas pendidikan dan penelitian AS untuk menangani ruang bawah tanah perkotaan yang berkelanjutan. Modal manusia teknis yang dibutuhkan dapat dikembangkan dalam kerangka ini dengan menyatukan lembaga federal, negara bagian, dan lokal, industri teknik dan konstruksi, serta pendidik dan peneliti universitas di bawah payung yang sama.

Pengembangan ruang bawah tanah kemudian dapat ditangani secara holistik melalui program pendidikan dan penelitian terpadu yang melampaui pendidikan dan pelatihan teknik sarjana, pascasarjana, dan berkelanjutan tradisional. Hal ini melibatkan perubahan signifikan dalam struktur dasar beberapa program gelar profesional di Amerika Serikat termasuk perencanaan, arsitektur, teknik, administrasi publik, dan kebijakan sosial dan ekonomi suatu usaha yang sulit. Negara ini membutuhkan perencana yang memahami ruang bawah tanah dan ekonom yang lebih memahami bagaimana infrastruktur bawah tanah mendukung penyediaan layanan jalur vital dan lingkungan perkotaan ekonomi yang kuat.

Badan Penelitian Transportasi NRC dan Program Pengurangan Bahaya Gempa Bumi Nasional dapat dipelajari untuk menentukan elemen model organisasi mana yang dapat

dimasukkan ke dalam kerangka kelembagaan seperti yang dibahas di sini. Sangat penting bagi para insinyur untuk memahami faktor sosial dan ekonomi yang berkontribusi terhadap keberlanjutan perkotaan, tetapi sama pentingnya bagi pemangku kepentingan lain yang terlibat dalam perencanaan perkotaan dan pembangunan bawah tanah untuk memiliki harapan yang realistis terhadap rekayasa.

Informasi bersama tentang hubungan antara sistem individual dan kinerja sistem secara keseluruhan sangat penting, dan ontologi yang diterima di seluruh sektor dan budaya kelembagaan diperlukan untuk koordinasi dan kolaborasi. Data dan model yang digunakan untuk memahami biaya langsung, tidak langsung, dan sosial dari keputusan yang terkait dengan elemen infrastruktur individual selama siklus hidup sistem dapat menjadi dasar untuk pengambilan keputusan yang lebih baik terkait dengan, misalnya, kinerja versus investasi yang dibutuhkan untuk perbaikan, rehabilitasi, atau penggantian.

Pengamatan: Model kepemilikan yang kompleks untuk infrastruktur bawah tanah membingungkan tanggung jawab untuk inspeksi rutin, pemeliharaan, perbaikan, pedoman, anggaran, dan kewajiban. Perlu dipahami model kepemilikan dan kontrol ruang bawah tanah dan untuk mengembangkan pedoman untuk pendanaan dan pelaksanaan inspeksi berkala, pemeliharaan, dan perbaikan elemen infrastruktur individual. Riset:

- a. Menganalisis pendekatan multidisiplin dan holistik untuk melihat jaringan kepemilikan, kontrol, dan tanggung jawab yang kompleks terkait dengan pemeliharaan dan keselamatan infrastruktur bawah tanah.
- b. Mengkaji pendekatan multidisiplin untuk membantu transisi ke manajemen sistem yang lebih modern.

Memahami kepemilikan, kewajiban, dan tanggung jawab atas ruang bawah tanah menjadi lebih penting jika manajemen infrastruktur ingin mendukung peningkatan keberlanjutan di seluruh kompleksitas sistem bawah tanah yang saling terkait. Keselamatan yang terkait dengan kegagalan, misalnya, utilitas bawah tanah juga perlu ditangani. Dengan semakin dikenalnya sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) dan kerentanannya, strategi antisipatif perlu dikembangkan untuk menyelidiki kejadian dan ancaman langsung terhadap masyarakat perkotaan, atau yang merupakan hasil dari kegagalan berjenjang. Kurangnya investasi di masa lalu dalam konstruksi dan rehabilitasi infrastruktur meningkatkan kerentanan saat ini dan masa depan sebagai akibat dari inspeksi yang tidak memadai, kerusakan yang tidak diperbaiki, kapasitas sistem yang tidak memadai, dan kurangnya adaptasi terhadap tuntutan dan tantangan baru.

7.2 KEPEMIMPINAN TEKNOLOGI

Observasi: Amerika Serikat adalah pemimpin dunia dalam banyak bidang sains dan teknologi bawah tanah ketika ada investasi federal dan industri dalam penelitian dan pengembangan teknik bawah tanah. Mempertahankan daya saing global dalam pendidikan teknik bawah tanah, pengembangan teknologi, dan praktik mendukung keberlanjutan, ketahanan, dan standar hidup perkotaan di Amerika Serikat. Tindakan Potensial: Alokasikan sumber daya untuk pendidikan interdisipliner yang lebih luas dan pengembangan teknologi

dalam desain dan konstruksi bawah tanah.

Penelitian: Perluas penelitian AS yang memajukan dan merevolusi, misalnya, teknologi material, teknologi konstruksi robotik, sistem panduan laser, sistem informasi geografis, dan sistem analisis dan visualisasi komputer yang disempurnakan yang meningkatkan kemampuan untuk memodelkan, merancang, merencanakan, dan mengurangi risiko yang terkait dengan sistem bawah tanah yang kompleks (lihat Bab 6 untuk detail lebih lanjut). Dapat dikatakan bahwa mencapai dan mempertahankan posisi kepemimpinan teknologi dalam teknik bawah tanah tidak diperlukan bagi Amerika Serikat untuk meraup semua manfaat dari fasilitas bawah tanah perkotaan yang efektif.

Amerika Serikat memang diuntungkan oleh teknologi yang dikembangkan di tempat lain, tetapi tidak menjadi kepentingan terbaik negara tersebut untuk bergantung sepenuhnya pada teknologi dan keahlian impor seperti yang dilakukan saat ini. Banyak fasilitas penting bawah tanah yang secara khusus dirancang untuk memberikan keamanan dan ketahanan yang lebih baik dalam menghadapi potensi kejadian atau risiko ekstrem. Lebih jauh, meskipun di luar cakupan laporan ini, rekayasa bawah tanah merupakan kontributor penting bagi pertahanan nasional dan kapasitas energi. Berkurangnya kapasitas teknologi AS dalam rekayasa bawah tanah dapat memberikan kontribusi negatif terhadap pertumbuhan ekonomi dan daya saing global perusahaan-perusahaan AS.

KOTAK 7.1

Pengelolaan dan Pembagian Data

Ketergantungan timbal balik yang tidak digambarkan dengan baik dapat menimbulkan risiko yang muncul, khususnya yang berkaitan dengan peristiwa ekstrem. Misalnya, pemeliharaan kinerja, perlindungan dari serangan, biaya jangka panjang atau jangka pendek, kualitas layanan, atau ekuitas akses dan pasokan perlu diselidiki dalam hal ruang (area yang terdampak, hubungan geografis dengan dampak sekunder, dll.) dan waktu (evolusi temporal dampak dan pemulihan) untuk mengoptimalkan desain atau operasi.

Berbagai alat pemodelan tentu akan melayani kelompok pemangku kepentingan yang berbeda, tetapi informasi yang dikembangkan oleh alat tersebut akan sangat berguna jika formatnya kompatibel dan jika alat tersebut memiliki registrasi spasial dan temporal yang sama. Data dan model sistem sering kali memerlukan keamanan yang tinggi, tetapi sarana perlu dikembangkan untuk berbagi informasi yang relevan dan diperlukan untuk studi ketergantungan timbal balik dengan komunitas pengguna yang menjadi sasaran.

Ketidakpastian tentang silsilah data sering kali ada di banyak basis data infrastruktur, dan protokol yang dapat memberikan informasi tentang kualitas data, resolusi, ketidakpastian, dan kepercayaan misalnya penting. Demikian pula, pengelolaan dan kurasi aliran data real-time besar-besaran dari rangkaian penginderaan kinerja dan sistem pintar akan menjadi semakin penting, seperti halnya alat untuk penambangan data, protokol untuk pembuatan metadata, dan alat untuk mendukung interpretasi data cepat termasuk visualisasi.

Amerika Serikat telah menjadi pemimpin dunia dalam banyak bidang sains dan

teknologi untuk konstruksi bawah tanah (lihat Kotak 7.2) di masa lalu. Kemitraan dengan para peneliti di lembaga-lembaga akademis dalam 40 tahun terakhir berkontribusi pada aliran ide yang berkelanjutan, pemahaman yang lebih baik, dan lulusan tenaga kerja berkualitas tinggi yang memberikan kepemimpinan bagi industri AS. Namun, kepemimpinan itu sudah mulai memudar, dan hanya sedikit penggantinya yang telah dilatih.

Mayoritas inovasi konstruksi bawah tanah (misalnya, dinding lumpur, jangkar tieback, tiang mikro, pencampuran tanah dalam, jet grouting, mesin tunneling lumpur dan keseimbangan tekanan tanah, sistem pelapisan ulang pipa yang diawetkan di tempat, dan masih banyak lagi) sekarang berasal dari luar Amerika Serikat. Saat ini di Amerika Serikat, industri dan lembaga penelitian terus berkolaborasi dalam pengembangan teknologi, dan lembaga penelitian sering kali menerima dukungan industri untuk mahasiswa dan penelitian. Banyak pengetahuan, keahlian, dan pelatihan tenaga kerja teknik, konstruksi, dan manufaktur peralatan yang diperlukan untuk pengembangan bawah tanah diperoleh melalui pendampingan, pemecahan masalah di tempat kerja dan khusus proyek, penggunaan perusahaan konstruksi luar negeri secara luas pada proyek, dan kolaborasi dengan insinyur internasional pada penugasan sementara.

Agar tetap kompetitif, perusahaan seperti Parsons Brinkerhoff memiliki program pengembangan karier untuk mengimbangi jumlah perguruan tinggi dan universitas yang lebih sedikit yang menyediakan pengetahuan teknik bawah tanah secara langsung. Kelompok industri seperti North American Society for Trenchless Technology (lihat <http://nastt.org/training>) juga menyediakan kursus bagi para profesional tentang topik yang ditargetkan. Namun, pelatihan ini tidak dipandang bahkan oleh mereka yang memiliki pengalaman industri yang luas di Komite sebagai pendidikan yang luas, dan kontribusi dari lembaga pendidikan tinggi terhadap upaya ini sangat minim.

Ada keuntungan tetapi juga keterbatasan penting yang terkait dengan pelatihan berbasis industri. Daya saing ekonomi dalam industri berarti bahwa pengetahuan yang diperoleh oleh perusahaan tertentu cenderung tetap berada di perusahaan itu dan bahkan dapat meninggalkan Amerika Serikat jika perusahaan itu kembali ke luar negeri setelah proyek selesai.

Kendala komersial dapat mencegah industri untuk menerima tantangan yang terkait dengan pendekatan terpadu dan holistik terhadap pembangunan perkotaan, serta tantangan yang terkait dengan keberlanjutan infrastruktur dan kinerja jangka panjang. Sebaliknya, kemajuan yang dicapai di lembaga penelitian multidisiplin lebih mungkin memberikan manfaat sosial yang lebih besar sekaligus menghasilkan tenaga kerja domestik yang lebih terdidik (lihat Kotak 7.3). Hal ini bahkan lebih penting karena negara ini bersiap untuk mengatasi tantangan perkotaan, demografi, dan iklim yang diproyeksikan.

KOTAK 7.2**Dulu Menjadi Pemimpin Dunia**

Amerika Serikat pernah menjadi pemimpin dunia dalam teknologi bawah tanah di masa lalu. Misalnya, pembangkit listrik tenaga air pertama yang sepenuhnya berada di bawah tanah dibangun di Snoqualmie Falls, Washington, pada tahun 1898 (PSE, 2009). Perkembangan besar dalam mesin bor terowongan batu keras muncul pada tahun 1960-an sebagai hasil dari keputusan para perencana Chicago dan Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago untuk membangun terowongan interseptor dalam di batu dolomit yang kompeten untuk menghilangkan limbah dan luapan air hujan ke Danau Michigan.

Proyek-proyek ini melibatkan peneliti universitas dan menghasilkan pertumbuhan pengetahuan. Pada tahun 1970-an, ada upaya intensif untuk meningkatkan teknologi konstruksi bawah tanah karena lembaga-lembaga menyadari meningkatnya kebutuhan untuk penggunaan ruang bawah tanah di daerah perkotaan, khususnya terkait dengan kereta bawah tanah (dengan pendanaan dari Urban Mass Transit Administration [UMTA]) dan proyek gabungan saluran pembuangan dan air (yang diamanatkan oleh Badan Perlindungan Lingkungan AS [EPA]). Proyek-proyek ini menghasilkan kepemimpinan AS dalam teknologi pendukung tanah (misalnya, pemasangan baut batu dan pelapisan terowongan) dan desain, penemuan, serta pembuatan mesin bor terowongan.

Dengan dukungan dari badan-badan federal termasuk program Riset Terapan untuk Kebutuhan Nasional (RANN) milik National Science Foundation, UMTA, Departemen Pertahanan, EPA, dan Departemen Energi, Amerika Serikat membuat kemajuan signifikan dalam teknologi konstruksi bawah tanah pada tahun 1970-an dan 1980-an. Selain itu, inovasi dalam konstruksi pipa dan industri utilitas menciptakan kemungkinan baru yang radikal untuk instalasi pipa dan utilitas melalui konsep-konsep baru dalam penggalian tanpa parit dan adaptasi teknologi pengeboran sumur minyak terarah ke instalasi kabel dan pipa pada tahun 1980-an dan 1990-an.

KOTAK 7.3**Riset Multidisiplin yang Membantu Daya Saing Domestik**

Dari tahun 1977 hingga 1995, pada saat Amerika Serikat menjadi pemimpin dunia dalam teknologi dan inovasi rekayasa bawah tanah, organisasi riset dengan misi yang mungkin paling luas terkait dengan konstruksi bawah tanah adalah Pusat Luar Angkasa Bawah Tanah yang didanai negara di Universitas Minnesota. Pusat tersebut menyusun tim multidisiplin untuk melihat secara luas berbagai isu yang memengaruhi penggunaan ruang bawah tanah, termasuk kebijakan publik, perencanaan, desain arsitektur, rekayasa geoteknik, dan perpindahan panas bawah tanah, dan menjadi model bagi beberapa pusat lain di seluruh dunia yang memandu penggunaan ruang bawah tanah di negara masing-masing.

Ini termasuk pusat-pusat di Universitas Delft di Belanda, Universitas Tongji,

Universitas Chongqing dan Institut Teknik Nanjing serta universitas-universitas lain di Tiongkok, dan Pusat Luar Angkasa Bawah Tanah Perkotaan Jepang. Sementara pusat Universitas Minnesota berhasil dalam hal aktivitas penelitian dan mempertahankan mandatnya yang luas, kurangnya basis pendanaan yang stabil untuk misinya membuatnya rentan terhadap resesi pendanaan universitas dan negara yang mengakibatkan penutupan pada tahun 1995.

7.3 KERANGKA KERJA PENDIDIKAN

Pengamatan: Kurangnya keberlanjutan pendanaan yang memungkinkan investasi yang berarti dalam peralatan dan fakultas telah mengakibatkan pengurangan substansial dalam jumlah program universitas AS yang didedikasikan untuk penelitian dan pendidikan teknik bawah tanah terpadu. Ada kekurangan kritis dalam kesempatan pendidikan, pelatihan, dan penelitian bagi para insinyur yang ingin belajar dan mempraktikkan teknik bawah tanah di Amerika Serikat. Tindakan potensial:

- a. Mengembangkan pusat penelitian multidisiplin, multilembaga, lintas sektor nasional yang berfokus pada berbagai bidang dalam teknik bawah tanah dan infrastruktur perkotaan yang berkelanjutan untuk menghasilkan generasi pemimpin berikutnya dalam teknik bawah tanah.
- b. Mengintegrasikan studi teknik bawah tanah pascasarjana dengan program penelitian atau massa kritis aktivitas fakultas terkoordinasi untuk menambatkan penelitian ke program yang ada. Menciptakan peluang untuk mengkhususkan diri dalam aspek-aspek tertentu dari teknik bawah tanah, tetapi dengan pendekatan multidisiplin.
- c. Mengembangkan konsorsium universitas untuk menggabungkan keahlian fakultas; memperkuat hubungan fakultas industri-universitas.
- d. Mengajarkan perencanaan dan manajemen fasilitas yang lebih baik dengan pendekatan multidisiplin melalui format pendidikan tradisional, jarak jauh, atau hibrida. Magang (misalnya, Magang Pendidikan Pascasarjana Integratif dan Penelitian NSF) dapat membantu mendanai program.
- e. Memperkenalkan berbagai disiplin ilmu, isu, tantangan, dan peluang kepada mahasiswa tingkat sarjana yang terkait dengan pemanfaatan dan rekayasa ruang bawah tanah yang berkelanjutan.
- f. Mengembangkan peluang pendidikan berkelanjutan bagi para profesional.
- g. Mengembangkan kredensial yang sesuai bagi inspektur, teknisi, dan operator fasilitas bawah tanah yang kompleks.

Teknik yang baik bergantung pada keterampilan analitis yang kuat, kreativitas, kecerdikan, profesionalisme, dan kepemimpinan serta pada pengetahuan yang terkumpul berdasarkan keberhasilan lama dan baru dalam pekerjaan bawah tanah. Program sarjana yang berkontribusi pada jenis pengetahuan yang dibahas dalam laporan ini termasuk tetapi tidak terbatas pada teknik mekanik, listrik, sipil, struktural, geoteknik dan geologi, perencanaan, arsitektur, kebijakan publik, keselamatan kebakaran, dan teknologi informasi.

Namun, program tradisional di bidang ini tidak mempersiapkan siswa untuk pendekatan praktik yang terintegrasi. Beberapa program interdisipliner dalam teknik bawah tanah pada tingkat pascasarjana sesuai dengan Kebijakan 465 American Society of Civil Engineer untuk mendukung gelar Master of Science (MS) (atau yang setara) sebagai prasyarat untuk praktik profesional. Beberapa contoh program tersebut mencakup MS dalam rekayasa infrastruktur di University of California di Berkeley, MS dalam sistem infrastruktur berkelanjutan dan tangguh di University of Illinois di Urbana-Champaign, dan fokus infrastruktur dari program rekayasa sipil untuk MS dalam Teknik di Louisiana Tech University.

Pendidikan pascasarjana di beberapa sekolah mencakup fokus yang diidentifikasi secara khusus (misalnya, sertifikat dalam pembuatan terowongan di University of Texas di Austin) atau spesialisasi dalam program gelar pascasarjana yang diberi nama lebih umum. Pendidikan kooperatif dan magang untuk semua bentuk pendidikan sangat penting dalam rekayasa bawah tanah, yang kurang terkodifikasi daripada, misalnya, rekayasa untuk desain bangunan struktural.

Pendidikan dan pelatihan telah diintegrasikan dalam beberapa program rekayasa bawah tanah termasuk, misalnya, kelompok rekayasa pembuatan terowongan dan bawah tanah di University of Illinois (1970-an dan 1980-an), Underground Space Center di University of Minnesota (1977-1995), dan Trenchless Technology Center di Louisiana Tech University. Kelompok penelitian semacam itu secara signifikan memengaruhi praktik umum dan aplikasi khusus, tetapi ukuran programnya tidak seberapa dibandingkan dengan skala yang dijamin oleh tingkat investasi nasional dalam penggunaan dan infrastruktur ruang bawah tanah.

Saat ini, hanya ada sedikit harapan akan keberlanjutan pendanaan yang memungkinkan investasi yang berarti dalam peralatan dan fakultas yang dibutuhkan untuk mendukung program penelitian yang berkelanjutan dan terpadu serta jenis studi pascasarjana terpadu yang disarankan di sini. Hal ini terkait dengan kurangnya fokus pemerintah yang berkelanjutan pada masalah infrastruktur secara umum, dan infrastruktur bawah tanah secara khusus. Relatif sedikit fakultas universitas di Amerika Serikat yang terlibat dalam penelitian pembuatan terowongan, dan banyak dari mereka yang berfokus pada kinerja terowongan dalam situasi seismik dan situasi ekstrem lainnya daripada pada peningkatan desain terowongan dan kinerja konstruksi.

Jumlah program universitas AS yang didedikasikan untuk teknik pertambangan juga telah berkurang secara substansial sejak tahun 1960-an: kurang dari 20 yang ada saat ini. Penurunan penelitian dalam konstruksi dan pembuatan terowongan bawah tanah di universitas-universitas di Amerika Serikat mencerminkan fragmentasi kegiatan yang disponsori pemerintah AS dalam penelitian pengembangan bawah tanah. Tenaga kerja teknik bawah tanah yang mendukung keberlanjutan tidak dapat diciptakan hanya dengan menggabungkan program pendidikan dengan keahlian yang sama. Hal ini berlaku untuk beberapa disiplin ilmu yang merupakan inti dari teknik bawah tanah seperti teknik geoteknik dan pertambangan.

Teknik geoteknik, misalnya, sering dianggap sebagai subdisiplin dalam teknik sipil dan karenanya bersaing untuk mendapatkan sumber daya dengan disiplin ilmu teknik struktural, transportasi, lingkungan, dan teknik lainnya. Jumlah fakultas teknik geoteknik di sebuah

universitas mungkin hanya 1 atau 2, dan jarang lebih dari 5 atau 6 bahkan di fakultas teknik sipil besar yang memiliki 30-40 profesor. Pendidikan dan pelatihan teknik pertambangan telah mengalami penurunan sebagian sebagai akibat dari pengurangan aktivitas pertambangan AS yang mendukung pengembangan tambang di luar negeri.

Hilangnya program, fakultas, dan mahasiswa teknik pertambangan, mengingat pengetahuan inti mereka yang serupa dengan rekan-rekan teknik sipil mereka, memperparah masalah kapasitas manusia untuk teknik bawah tanah. Bidang pengetahuan khusus seperti pembuatan terowongan telah mendapat tekanan oleh pengurangan yang diamanatkan negara dalam persyaratan jam kredit untuk gelar sarjana, kurangnya minat mahasiswa AS untuk mengejar gelar lanjutan, dan sifat terbatas atau sporadis dari peluang pendanaan untuk penelitian di bidang ini.

Meningkatkan Kinerja

Observasi: Kompleksitas sistem infrastruktur perkotaan dan ketidakpastian yang terkait dengan desain dan kinerja sistem meningkat seiring dengan tuntutan yang lebih besar dan lebih beragam pada infrastruktur di atas dan di bawah tanah. Insinyur dan perencana kota dapat meningkatkan kinerja fasilitas siklus hidup secara menyeluruh dan keberlanjutan kota secara keseluruhan dengan pendekatan yang terdokumentasi dan tervalidasi terhadap perencanaan dan desain proyek yang mempertimbangkan risiko yang menyeimbangkan kebutuhan proyek siklus hidup dalam hal pemberian layanan, biaya awal, ketahanan terhadap kejadian ekstrem, dan pemeliharaan serta operasi yang efektif.

Penelitian:

- a. Memajukan teknologi yang ada dan mengembangkan teknologi baru untuk memodelkan ketidakpastian selama semua fase siklus hidup infrastruktur. Ini termasuk teknologi invasif dan non-invasif untuk karakterisasi lokasi geologi (termasuk infrastruktur dan material yang ada dan lama); metode desain analitis dan komputasional; teknologi penggalian, dukungan tanah, dan pemantauan; dan teknologi untuk manajemen aset termasuk yang terkait dengan manajemen data dan keamanan.
- b. Mengembangkan strategi untuk menyelidiki potensi bahaya, masalah yang akan datang, dan evolusi masalah yang berjenjang, terutama mengingat kurangnya investasi saat ini dalam rehabilitasi sistem infrastruktur.
- c. Insinyur dan perencana dapat menggunakan kejadian ekstrem untuk memahami perilaku sistem yang kompleks dan saling ketergantungan serta untuk memvalidasi model komputasional kinerja sistem.

Keberlanjutan dan ketahanan baru dipertimbangkan secara umum selama satu atau dua dekade, dan ada lebih banyak pertanyaan daripada jawaban mengenai strategi keberlanjutan dan ketahanan apa yang paling efektif. Betapapun terbatasnya pengetahuan kita saat ini, kita perlu bertindak berdasarkan pengetahuan terbaik yang kita miliki sambil dengan cepat meningkatkan pemahaman kita tentang interaksi sistem yang kompleks, dan sambil mengembangkan metrik untuk menilai kemajuan.

Dalam hal ini, kerangka pendidikan yang dibahas di atas dapat menciptakan generasi

profesional baru yang mampu mengintegrasikan disiplin teknis dengan pemahaman yang muncul tentang keberlanjutan dan ketahanan serta mengintegrasikan pendekatan yang mempertimbangkan risiko untuk desain, konstruksi, dan manajemen. Fasilitas dan jaringan bawah tanah yang besar dan kompleks merupakan investasi finansial yang besar, menyediakan fungsi dan layanan penting untuk kehidupan perkotaan, dan tidak boleh menurunkan kesehatan dan keselamatan.

Akan tetapi, bagi sebagian besar kota, proyek bawah tanah yang besar bukanlah pekerjaan yang biasa dan karenanya menghadirkan tantangan besar bagi para pembuat kebijakan dan para profesional dari sektor perencanaan, arsitektur, teknik, keuangan, asuransi, tata bangunan, serta kesehatan dan keselamatan yang akan terlibat dalam proyek tersebut. Informasi tepercaya tentang alternatif, biaya, manfaat, dan risiko yang dapat digunakan oleh semua orang dari disiplin ilmu yang berkontribusi tersebut diperlukan sebagaimana cara untuk meningkatkan informasi tersebut seiring dengan bertambahnya pengetahuan dan pengalaman.

Penelitian, pendidikan, dan pelatihan interdisipliner yang memungkinkan pengembangan metode praktis untuk menentukan, misalnya, sisa masa manfaat utilitas dan layanan diperlukan. Pertimbangan topik seperti cara terbaik untuk menggunakan kembali atau mengkonfigurasi ulang ruang bawah tanah seiring dengan perubahan teknologi juga merupakan bagian dari perencanaan kinerja dan siklus hidup total.

7.4 MEMAJUKAN TEKNOLOGI UNTUK KEBERLANJUTAN

Observasi: Infrastruktur bawah tanah yang menua mungkin rentan terhadap kerusakan dan masalah yang terkait dengan perubahan teknologi, perubahan iklim, dan kebutuhan masyarakat. Pengembangan ruang bawah tanah memerlukan komitmen jangka panjang terhadap kemajuan teknologi dalam lingkungan yang mendukung perencanaan, inovasi, dan implementasi yang lebih baik.

Tindakan yang mungkin dilakukan:

- a. Mendesain infrastruktur yang memungkinkan kemudahan akses untuk inspeksi, pemeliharaan, perbaikan, peningkatan, dan konfigurasi ulang sebagai respons terhadap kebutuhan atau teknologi baru yang memungkinkan pekerjaan tersebut diselesaikan dengan biaya yang lebih rendah.
- b. Mempertimbangkan kebutuhan sumber daya, ketersediaan, dan akses saat membuat keputusan administratif dan teknis terkait pengembangan. Ini termasuk sumber daya energi (misalnya, minyak, gas, dan sumber daya energi lainnya), mineral industri, mineral strategis bernilai tinggi atau penting (misalnya, emas, uranium, unsur tanah jarang), dan bahan konstruksi (misalnya, kerikil, pasir, batu bangunan).
- c. Gunakan model yang tepat yang menunjukkan beberapa skenario potensial dan memungkinkan perencanaan sistem infrastruktur yang lebih baik berdasarkan kondisi setempat.

Penelitian:

- a. Akademisi dan pemangku kepentingan sistem dapat secara kolaboratif

mengembangkan model simulasi kinerja jangka panjang untuk sistem yang kompleks dan memvalidasi hasilnya dari waktu ke waktu untuk memahami respons dinamis dan perilaku sistem yang muncul.

- b. Jelajahi bagaimana teknologi dan inovasi dari industri lain (misalnya, peralatan eksplorasi, teknik analisis in situ, sistem pengukuran-saat-pegeboran, pemindaian laser, fusi data multi-sensor) dan aplikasi sipil dari penelitian militer dapat diterapkan pada rekayasa bawah tanah.
- c. Lakukan penelitian jangka panjang tentang dampak infrastruktur bawah tanah pada lingkungan alam dan buatan untuk meningkatkan kapasitas pengambilan keputusan demi kepentingan jangka panjang terbaik masyarakat.
- d. Teliti secara komprehensif dan berdasarkan risiko-biaya-hadiah yang sama tentang dampak jangka panjang pada keberlanjutan penyimpanan bawah tanah atau pembuangan limbah perkotaan (misalnya, produk kota, limbah, atau terkait energi).

Teknologi yang lebih baik dapat meningkatkan kemampuan untuk memilih pendekatan yang paling berkelanjutan terhadap penggunaan ruang bawah tanah dengan membuat penggunaan tersebut lebih murah atau lebih baik. Misalnya, pengembangan teknologi perencanaan, desain, dan konstruksi yang lebih baik dapat mengurangi biaya konstruksi, meminimalkan kerusakan, meningkatkan ketahanan, dan mengatasi masalah geologi, hidrologi, lingkungan, termal, dan sosial yang ada atau mungkin timbul seiring berjalannya waktu.

Teknologi telah meningkat dalam beberapa dekade terakhir, tetapi, yang menarik, banyak bidang umum yang secara teratur disebut sebagai bidang yang memerlukan peningkatan belum berubah. Misalnya, pada tahun 1989, National Research Council mengidentifikasi cara-cara di mana geoteknologi berdampak pada ekonomi AS, lingkungan, dan keamanan nasional (NRC, 1989). Beberapa tema penelitian yang layak mendapat perhatian khusus diidentifikasi yang dapat berkontribusi pada pengembangan dan rehabilitasi infrastruktur termasuk:

- a. Pengaruh konstruksi terhadap struktur di dekatnya;
- b. Teknologi konstruksi tanpa galian untuk memasang dan merehabilitasi jaringan pipa utilitas (lihat kotak 7.4);
- c. Pengembangan dan penggunaan material baru seperti pipa plastik, polimer, dan material geosintetik untuk memenuhi kebutuhan sistem infrastruktur;
- d. Pemeliharaan dan pembaruan sistem infrastruktur yang menua, termasuk sistem penginderaan jarak jauh untuk menemukan dan menilai kualitas sistem infrastruktur; dan
- e. Pendekatan interdisipliner untuk memecahkan berbagai kebutuhan sistem infrastruktur yang kompleks.

Penelitian di banyak bidang ini telah meningkatkan kapasitas AS untuk mengembangkan sistem bawah tanah, tetapi penelitian di bidang yang sama ini masih diperlukan saat ini, terutama mengingat kepentingan nasional dalam keberlanjutan dan ketahanan. Bab 6 memberikan pembahasan terperinci tentang inovasi teknologi yang dibutuhkan terkait dengan karakterisasi lokasi, dan desain, konstruksi, pengoperasian, pemantauan, dan pemeliharaan

infrastruktur bawah tanah yang dapat berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan. Beberapa tantangan dan peluang pengembangan teknologi khusus untuk penelitian yang akan membantu pendekatan yang lebih holistik terhadap desain dan operasi sistem perkotaan terpadu disorot dalam bab-bab sebelumnya dan dalam Kotak 7.4 dan 7.5.

Pendekatan Siklus Hidup

Pengamatan: Hanya sedikit data yang tersedia mengenai dampak lingkungan dan sosial serta keberlanjutan siklus hidup pembangunan perkotaan yang dapat menginformasikan keputusan teknologi dan administratif yang terkait dengan operasi, pemeliharaan, dan pengurangan biaya infrastruktur jangka panjang (puluhan hingga abad). Diperlukan studi retrospektif yang komprehensif dan ilmiah tentang biaya dan dampak langsung dan tidak langsung dari berbagai jenis proyek bawah tanah untuk mengevaluasi kegunaan dan dampak ekonomi, lingkungan, dan sosial sehingga perencanaan di masa mendatang dapat memaksimalkan keberlanjutan.

KOTAK 7.4

Tantangan Khusus untuk Sistem Pipa dan Kabel

- Sistem perpipaan di Amerika Serikat diperkirakan memiliki masa pakai 50 hingga 100 tahun, dan kabel diperkirakan memiliki masa pakai 10 hingga 15 tahun (EPA, 2008). Banyak sistem di Amerika Serikat telah melampaui masa pakai yang diharapkan dan dapat rusak dalam beberapa tahun mendatang jika tidak direnovasi atau diganti.
- Pengembangan material pipa dan kabel baru yang berkinerja lebih baik dalam siklus hidup yang lebih panjang, serta jaringan infrastruktur bawah tanah pintar baru yang memantau kinerja dan kondisinya sendiri sangat dibutuhkan. Sistem pintar dapat memungkinkan prediksi perbaikan yang diperlukan lebih baik sebelum terjadi kegagalan yang mahal. Hasilnya dapat berupa perencanaan pemeliharaan infrastruktur yang lebih cerdas dan pengambilan keputusan yang terintegrasi. Misalnya, perbaikan yang diperlukan di suatu area dapat dikoordinasikan, meminimalkan biaya perbaikan gabungan dan penutupan hak jalan umum.
- Informasi posisi dan kinerja tiga dimensi penting, terutama mengingat premi yang sekarang diberikan pada teknik baru untuk merehabilitasi saluran dan meningkatkan kapasitas pipa yang ada di tempatnya daripada membuat penyelarasan baru.
- Perusahaan utilitas yang menggabungkan sistem utilitas menjadi konfigurasi yang ringkas dan dapat dipelihara dapat dibenarkan secara efektif melalui pengembangan skenario yang dapat diterapkan untuk fasilitas multi-utilitas yang aman, analisis biaya-manfaat siklus hidup, dan strategi transisi yang efektif yang dikombinasikan dengan proyek demonstrasi.
- Standar desain masa depan perlu mencakup pertimbangan peran elemen sistem individual dalam sistem perkotaan yang lebih besar selama siklus hidupnya. Standar juga perlu mengantisipasi, misalnya, dampak perubahan iklim di suatu wilayah (misalnya, sistem drainase mungkin memerlukan kapasitas yang lebih besar untuk mengakomodasi peningkatan intensitas, durasi, dan frekuensi badai).
- Perencanaan dan desain perlu mengakomodasi pendekatan multi-bahaya terhadap

manajemen berbasis risiko selama siklus hidup sistem dan perlu mempertimbangkan ketahanan, ketahanan, dan keberlanjutan jangka panjang selama desain dan operasi. Misalnya, dampak pada sumber daya air tanah dan kecukupan struktural, daya apung, kedap air, dan korosi akan memerlukan perhatian lebih besar di wilayah yang terkena dampak perubahan muka air tanah (terutama jika disertai dengan intrusi air asin).

Riset:

- a. Melakukan investigasi komprehensif dan ilmiah untuk mengidentifikasi secara retrospektif kinerja siklus hidup berbagai jenis infrastruktur bawah tanah dan untuk mengidentifikasi aspek-aspek perencanaan, desain, konstruksi, dan operasi proyek yang paling berkontribusi terhadap biaya dan kinerja proyek. Misalnya, melacak dampak finansial (baik langsung maupun tidak langsung), lingkungan (misalnya, kualitas udara dan air), dan sosial selama periode yang panjang (misalnya, beberapa dekade) setelah proyek seperti penyelarasan Arteri Sentral Boston.
- b. Mengembangkan metrik umum untuk menilai pembangunan berkelanjutan secara lebih umum, dan untuk menilai dampak ekonomi, lingkungan, dan sosial tertentu.
- c. Mengembangkan metode kuantitatif untuk membandingkan nilai ruang bawah tanah yang setara dengan sumber daya perkotaan lainnya (misalnya, terkait dengan nilai pasar properti permukaan) dan dengan mempertimbangkan dampak pada penggunaan bawah tanah di masa mendatang (misalnya, infrastruktur mungkin perlu ditempatkan di kondisi tanah yang semakin sulit).
- d. Mengumpulkan data tentang aspek keberlanjutan berbagai metode dan material konstruksi (misalnya, ketersediaan material dan energi yang terkandung dalam produksi material).

KOTAK 7.5

Teknologi Pemetaan, Pengambilan Data, dan Penilaian

Ruang bawah tanah perkotaan dapat dikelola dengan lebih baik dengan cara yang tidak terlalu padat karya untuk memetakan posisi akurat semua utilitas bawah tanah, melakukan inspeksi layanan jalur vital yang penting, dan mengelola basis data besar yang dihasilkan. Dokumentasi yang andal dari semua hal di bawah tanah dalam sistem basis data yang dapat diakses dan dicari akan meningkatkan kemampuan perencana untuk memaksimalkan penggunaan ruang bawah tanah sambil meminimalkan biaya konstruksi dan pemeliharaan.

Teknologi tersebut juga dapat mengarah pada pendekatan sistem jangka panjang yang lebih baik untuk perencanaan, konstruksi, operasi, dan pemeliharaan. Cara tersebut juga dapat dikembangkan untuk secara dinamis menghubungkan model informasi tanah dengan umpan balik dari peralatan konstruksi atau pemantauan untuk memungkinkan karakterisasi waktu nyata, prediksi respons, dan pengambilan keputusan yang terkait dengan proses di seluruh siklus hidup infrastruktur. Namun, pengumpulan dan transmisi

data bawah tanah yang terkait dengan ketahanan sistem kabel dan kemampuan transmisi sistem nirkabel serta kebutuhan energi masih menghadirkan tantangan.

Sensor dan sistem jaringan diperlukan agar dapat ditempatkan di bawah tanah dalam jaringan yang tersebar luas dan terorganisasi sendiri, yang memungkinkan operasi jangka panjang (termasuk kalibrasi dan registrasi lokasi serta konfigurasi), dan yang dapat dioperasikan dari jarak jauh. Pengembangan teknologi yang terkoordinasi dapat dipertimbangkan dalam bidang-bidang seperti penginderaan dan sistem berdaya rendah, pemulungan dan pemanenan daya, atau pengembangan sistem transmisi sinyal nirkabel di bawah tanah.

Analisis siklus hidup merupakan alat strategis yang dapat menginformasikan keputusan yang terkait dengan operasi, pemeliharaan, biaya, dan dampak lingkungan yang memengaruhi keberlanjutan. Memahami apakah, misalnya, pembangunan bawah tanah perkotaan menghalangi pengelolaan sumber daya air bawah tanah yang baik di suatu wilayah mungkin memerlukan penghitungan jumlah evapotranspirasi, pengisian ulang air tanah, pola aliran, dan polusi, di antara faktor-faktor lain, yang dimungkinkan karena teknik konstruksi yang berbeda atau pelestarian lanskap alam.

Analisis retrospektif menginformasikan analisis biaya siklus hidup prospektif strategis yang, idealnya, menjadi bagian dari proses perencanaan lokal dan regional. Pengambil keputusan yang memahami biaya sebenarnya dari opsi infrastruktur dari waktu ke waktu kemungkinan lebih siap untuk membuat keputusan yang mendukung keberlanjutan. Keputusan desain yang memengaruhi keberlanjutan mencakup, misalnya, keputusan yang mengintegrasikan sistem pendukung tanah awal (selama konstruksi) dan permanen yang membutuhkan lebih sedikit bahan konstruksi, menggunakan bahan dengan kinerja yang lebih baik, atau menggabungkan lebih banyak bahan limbah atau produk sampingan dari aplikasi lain (misalnya, beton yang terbuat dari geopolimer berbasis abu terbang batu bara).

Menangkap semua biaya, seperti kualitas udara yang menurun atau yang terkait dengan gangguan dan kerugian bisnis selama penutupan jalan, dalam perbandingan alternatif proyek tetap menjadi tantangan dan topik untuk penelitian di masa mendatang. Meskipun biaya mungkin berbeda secara signifikan di antara proyek-proyek serupa, perbedaan yang diamati dalam biaya satu kilometer per lajur jalan di berbagai negara, misalnya, menunjukkan bahwa menyelidiki alasan terperinci untuk biaya yang lebih rendah di beberapa negara dibandingkan dengan yang lain akan bermanfaat.

Memahami hubungan tersebut akan membantu pengembangan kerangka kerja manajemen yang realistis yang secara objektif mendistribusikan total biaya selama siklus hidup infrastruktur. Seluruh kerangka kerja manajemen infrastruktur dapat diinformasikan yang mencakup perencanaan, mendokumentasikan kondisi yang ada, menetapkan persyaratan penggunaan lahan (baik di atas maupun di bawah tanah), dan penerbitan izin untuk penggunaan bawah tanah yang disetujui (sebagaimana diarahkan oleh kebijakan yang terinformasi).

7.5 KESELAMATAN DAN KENYAMANAN PENGGUNA

Pengamatan: Infrastruktur bawah tanah dapat meningkatkan kehidupan jutaan orang dengan aman, tetapi hanya sedikit peraturan keselamatan tingkat federal yang ada untuk memandu keselamatan operasional pada saat kompleksitas sistem bawah tanah meningkat. Penerimaan dan hunian pengguna yang lebih besar terhadap infrastruktur dan fasilitas bawah tanah mungkin terjadi jika ruang bawah tanah direncanakan dengan lebih mempertimbangkan utilitas, kemudahan akses, penunjuk jalan, keselamatan, dan estetika.

Tindakan yang mungkin dilakukan:

- a. Mengembangkan dan mengadopsi mekanisme dan kode keselamatan berbasis kinerja yang tidak hanya memperhitungkan hunian bawah tanah saat ini (misalnya, penggunaan campuran, bertingkat) dan risiko, tetapi juga memungkinkan perluasan dan perubahan penggunaan. Persyaratan teknis Dewan Kode Internasional, standar Asosiasi Perlindungan Kebakaran Nasional yang berlaku, dan standar serta pedoman terkait lainnya dapat diperluas dan dibuat berlaku untuk fasilitas bawah tanah.
- b. Menggabungkan faktor manusia dan konsep rekayasa sistem yang kompleks untuk memandu pengenalan ancaman dan pengambilan keputusan teknis dan operasional untuk operasi normal dan untuk operasi selama masa stres (misalnya, sebagai respons terhadap peristiwa ekstrem).
- c. Menggabungkan ilmu perilaku, pelatihan, biologi dan fisiologi, kinerja dan kapasitas manusia ke dalam kode dan desain keselamatan.

Riset:

- a. Meneliti kondisi praktik dan praktik terbaik yang terkait dengan sistem keselamatan (misalnya, deteksi bahaya, pemberitahuan, ventilasi, pemadaman kebakaran, pintu keluar darurat, dan integrasi sistem). Mengembangkan persyaratan sistem keselamatan minimum yang sesuai untuk dimasukkan ke dalam pedoman dan standar tingkat nasional.
- b. Membandingkan kode dan pedoman keselamatan bawah tanah internasional dengan yang berlaku di Amerika Serikat untuk mengidentifikasi kekurangan dan memandu praktik di masa mendatang, dengan mengakui upaya yang ada di area ini (misalnya, oleh Federal Highway Administration).

Penerimaan dan penggunaan ruang bawah tanah oleh masyarakat akan meningkat jika infrastruktur bawah tanah lebih mudah dan nyaman digunakan. Salah satu tantangan desain adalah perencanaan jangka panjang yang menggabungkan konektivitas yang kuat dalam sistem bawah tanah dan dengan sistem permukaan. Ini berarti menciptakan sistem bawah tanah yang terhubung secara wajar dan dapat digunakan yang membatasi waktu tempuh pejalan kaki dan pergerakan vertikal yang panjang melalui tangga, eskalator, atau lift.

Namun, kode bangunan yang ada mungkin tidak cukup fleksibel untuk mengakomodasi jenis desain yang meningkatkan kenyamanan. Kode bangunan dibuat untuk melindungi kesehatan dan keselamatan mereka yang membangun, mengoperasikan, atau menggunakan infrastruktur, tetapi sifatnya yang berkembang lambat menyisakan sedikit ruang untuk mendapatkan manfaat dari teknologi yang terus berkembang. Lebih jauh, kode, peraturan, dan

standar keselamatan yang ada yang dirancang untuk mengatasi risiko yang diketahui di atas tanah sering kali tidak memadai untuk pembangunan bawah tanah yang berkelanjutan dan berskala besar.

Penggunaan publik berskala besar akan memerlukan pengembangan peraturan keselamatan baru dan yang diperbarui yang secara khusus membahas risiko bawah tanah dan aktivitas (penghunian) di dalamnya. Memberikan variasi dalam desain berdasarkan pemahaman yang lebih baik tentang cara menciptakan ruang bawah tanah yang aman tetapi menarik dan menyenangkan tanpa meningkatkan biaya dan kebutuhan ruang secara signifikan tetap menjadi tantangan. Menggabungkan lebih banyak rekayasa faktor manusia ke dalam desain dan operasi sistem bawah tanah dan perkotaan dapat meningkatkan keselamatan, produktivitas, dan estetika bawah tanah.

Penelitian tentang material baru dan perilakunya, dikombinasikan dengan penilaian risiko dan aktivitas manajemen yang menggabungkan, misalnya, ketentuan untuk evakuasi darurat, penyelamatan, dan pemulihan akan menguntungkan lingkungan bawah tanah selama operasi normal, serta selama dan setelah kejadian yang menegangkan. Mengidentifikasi dan mengatasi persepsi negatif dapat sama pentingnya dengan tantangan keselamatan dan teknis dan memerlukan fokus penelitian tersendiri.

Pikiran Akhir

Observasi: Ruang bawah tanah merupakan sumber daya yang berharga tetapi jelas tidak dapat diperbarui. Ruang bawah tanah dapat meningkatkan keberlanjutan perkotaan hanya jika ruang bawah tanah dipahami secara menyeluruh dan jika penggunaan dan penggunaan kembali ruang bawah tanah serta perlindungan lingkungan alam dan buatan dimasukkan ke dalam perencanaan sistem infrastruktur perkotaan jangka panjang.

Tindakan yang mungkin dilakukan:

- a. Melembagakan perencanaan semua ruang bawah tanah sebagai bagian dari sistem perkotaan yang terus berkembang untuk direkayasa atau dilestarikan secara cermat demi penggunaan jangka panjang yang optimal dan keberlanjutan regional.
- b. Menetapkan praktik pemantauan air tanah, tanah, dan infrastruktur yang cukup intensif untuk melacak kesehatan lingkungan perkotaan bawah tanah sesuai dengan kondisi geologi umum dan penggunaan. Menggunakan data yang dihasilkan dari berbagai lingkungan dan situasi untuk menginformasikan perencanaan perkotaan di area lain.

Sangat mudah untuk melihat foto sebuah kota dan membayangkan model tiga dimensi dari struktur permukaannya, gedung pencakar langit, dan jalan raya yang ditinggikan. Laporan ini menantang banyak perencana kota, perancang, insinyur, peneliti, kontraktor, dan operator infrastruktur untuk memasukkan bawah permukaan dalam model tiga dimensi ini, dan menghubungkan infrastruktur antara permukaan dan bawah permukaan secara koheren. Sama seperti luas permukaan di kota tertentu, volume bawah tanah yang dapat digunakan di bawah permukaan juga terbatas.

Namun, tidak seperti infrastruktur di permukaan, infrastruktur bawah tanah tidak

dapat dengan mudah dipindahkan atau dibangun kembali saat masa manfaatnya berakhir. Setelah material geologi bawah permukaan dipindahkan dan elemen infrastruktur atau limbah ditempatkan di tempatnya, bawah permukaan tidak dapat dikembalikan ke keadaan semula dan mungkin tidak dapat digunakan untuk tujuan lain.

Karena alasan ini, keberlanjutan perkotaan bergantung pada pemahaman menyeluruh tentang bawah tanah dan cara terbaik untuk merencanakan penggunaan, penggunaan kembali, dan perlindungan sumber daya bawah tanah baik yang mengacu pada energi alam atau sumber daya material, atau ruang bawah tanah itu sendiri. Orang-orang telah mengeksploitasi ruang dan sumber daya bawah tanah selama ribuan tahun untuk memajukan dan melindungi kelangsungan hidup, prospek ekonomi, budaya mitologis, dan pertumbuhan spiritual.

Upaya-upaya ini melibatkan risiko tinggi yang diimbangi oleh keyakinan bahwa manfaat bawah tanah melebihi bahayanya jauh sebelum ada pemahaman terperinci tentang lingkungan bawah tanah atau peralatan canggih untuk menjelajahnya. Namun, keberhasilan dan kegagalan awal di bawah tanah membantu membangun basis pengetahuan substansial yang ada saat ini di seluruh dunia. Tantangannya sekarang adalah menciptakan warisan yang sebanding untuk mempertahankan sumber daya alam, efisiensi ekonomi, dan solidaritas sosial bangsa untuk jangka panjang.

Ini berarti memperluas basis pengetahuan kita dengan cara yang menyelaraskan peralatan teknis, persepsi kolektif, kebijakan publik, peraturan, dan prosedur kita sehingga kita dapat mengurangi risiko ke tingkat yang dapat diabaikan, menciptakan layanan dan ruang yang dibutuhkan yang berfungsi dengan andal dan mengangkat semangat kita, dan pada akhirnya menyediakan sistem pendukung yang integral dan seimbang untuk area perkotaan yang layak huni dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelrahman, M., & Wallerand, A. S. (2020). *Sustainable underground construction*. ICE Publishing.
- Ahmed, M., & Zayed, T. (2019). Risk management in underground construction projects: A knowledge-based approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(5), 04019025.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2015). *Tunnelling and underground construction*. Reston, VA: ASCE Press.
- Billings, J. (2017). *Construction methods and planning*. Pearson Education.
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics for underground mining*. Springer Science & Business Media.
- Brown, E. T. (2018). *Block caving geomechanics*. Springer.
- Brox, D., & Andersson, G. (2017). *Sprayed concrete for rock support*. CRC Press.
- Cai, M. (2014). *Practical rock engineering*. CRC Press.
- Chaker, V. (2011). *Introduction to x-ray powder diffraction*. John Wiley & Sons.
- Chapman, D. J., & Metje, N. (2015). Key performance indicators for assessing the sustainability of urban underground space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 234-246.
- Chen, R., Huang, H., & Zhu, H. (2021). A review of shield tunneling technology. *Advances in Civil Engineering*, 2021.
- CIRIA. (2017). *Trenchless techniques: A practical guide*. CIRIA.
- Clayton, C. R. I., Matthews, M. C., & Simons, N. E. (1995). *Site investigation*. Blackwell Science.
- Costa, P. A., & Ferreira, C. (2018). Ground improvement techniques for tunnelling. *Geotechnical Engineering*, 49(3), 78-85.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering*. Cengage Learning.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- Doležalová, M., & Všeťečka, M. (2016). *Underground facilities for better environment and safety*. CRC Press.

- Elbaz, K., Shen, Y., Zayed, T., & Lee, S. (2016). BIM applications in underground construction: Current and future trends. *Automation in Construction*, 72, 175-184.
- Fujita, K. (2009). *Subsurface construction*. CRC press.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons.
- Guan, Z., Zhao, J., & Zhou, X. (2018). Study on mechanical properties of shield tunnel segment joints. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 290-301.
- Hefny, A. M., & Lo, K. Y. (2011). Numerical analysis of tunnel face stability in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5), 603-612.
- Henn, J., Marx, V., & Overmeyer, L. (2020). Challenges and potentials of digital twins in underground construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 106, 103597.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). *The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445-463.
- Hunt, R. E. (2005). *Geotechnical engineering investigation handbook*. CRC press.
- Hunt, T. (2018). *Geology of construction materials*. Geological Society of London.
- Institution of Civil Engineers. (2011). *Manual of contract documents for highway works*. ICE Publishing.
- Iseley, D. T., & Najafi, M. (2019). *Trenchless technology: Planning, equipment, and methods*. Butterworth-Heinemann.
- ITAtch Activity Group No. 2. (2020). *Guidelines for good practice in back analysis of tunnelling projects*. Lausanne: ITA.
- Jancsecz, S., & Steiner, W. (1994). Face support for tunnel tubes with fluid support. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9(4), 475-484.
- Karthus, U., & Kuder, J. (2014). *Mechanized tunnelling in urban areas*. Ernst & Sohn.
- Kim, D., Park, C., & Lee, G. (2019). Risk assessment of underground construction projects using fuzzy logic. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(8), 739-752.
- Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to stress and deformation*. Springer.
- Lee, C., & Kim, H. (2014). A simplified method for predicting ground movements induced by shield tunneling. *Computers and Geotechnics*, 55, 220-229.
- Lombardi, G. (2007). *The technology of tunneling: Design, analysis, and construction*. CRC press.

- Ma, L., Zhang, D., & Huang, M. (2017). Analysis of ground settlement induced by shield tunneling in sandy ground. *Computers and Geotechnics*, 81, 169-179.
- Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1997). Theme lecture: Bored tunnelling in the urban environment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 125(2), 79-92.
- Marshall, A. M., & Hazelton, P. (2015). *GIS for sustainable development*. CRC Press.
- Möller, B. (2006). *Analysis of tunnel face stability*. Ernst & Sohn.
- Morgenstern, N. R. (2000). Geotechnical risks in underground construction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(12), 1079-1089.
- Muir Wood, A. M. (2000). *Tunnelling: Management by design*. Taylor & Francis.
- National Research Council. (2011). *Underground engineering for sustainable urban development*. National Academies Press.
- Nicholson, D. (2014). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons.
- Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. In *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
- Peila, D., & Vigna, B. (2008). Improvement of EPB tunnel performance by means of controlled face support. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 248-257.
- Powrie, W. (2010). *Soil mechanics: Concepts and applications*. CRC Press.
- Schweiger, H.F. (2010). Finite element analysis of tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(6), 778-788.
- Shirlaw, J. N. (2015). *Applied tunnel engineering*. CRC Press.
- Singh, B., & Goel, R. K. (2011). *Soft rock tunnelling*. CRC Press.
- Smith, N. J. (2006). *Smith's elements of soil mechanics*. Blackwell Publishing.
- St John, H. D. (2001). *Ground response curves for tunnel design*. Thomas Telford.
- Standish, P. E. (2017). *Underground structures design and construction*. CRC Press.
- Sterling, R., Admiraal, H., Bobylev, N., Korkala, S., Bartak, J., & Hanamura, T. (2012). *Underground space utilization: Analysis of world lessons*. University of Minnesota.
- Suwansawat, S., & Einstein, H. H. (2006). Artificial neural networks for predicting TBM penetration rate in hard rock tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), 587-601.

- The British Tunnelling Society. (2004). *Tunnel construction: Guidance on good practice*. Thomas Telford.
- US Department of Transportation, Federal Highway Administration. (2009). *Technical manual for design and construction of road tunnels—civil elements*.
- Varma, P., Sharma, A., & Kumar, A. (2018). Application of artificial intelligence techniques in tunnel engineering. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(5), 477-489.
- Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. S. (2009). Improved face stability prediction using modified Hoek–Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), 186-199.
- Wang, D., Zhou, H., & Gong, Q. (2016). Study on the influence of shield tunneling on adjacent existing tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 195-205.
- West, G. (1995). *Ground investigation*. Butterworth-Heinemann.
- Wood, D. M. (2004). *Geotechnical modelling*. CRC press.
- Yang, J., & Pan, Y. (2020). A framework for integrating BIM and GIS in underground construction. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3), 162.
- Yoo, C., Kim, J., & You, K. (2009). Analysis of tunnel behavior during shield tunneling in weathered soil. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 443-453.
- Yuan, D., & Zhao, J. (2014). A review of research on the mechanical behavior of shield tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 145-163.
- Zhang, Z., Zhu, W., & Chen, J. (2019). Prediction of surface settlement induced by earth pressure balance (EPB) shield tunneling using a PSO-optimized BP neural network. *Sustainability*, 11(21), 6045.
- Zhou, Z., Huang, H., & Qiu, W. (2021). Application of artificial intelligence in shield tunneling: Current status and future trends. *Applied Sciences*, 11(5), 2090.

TEKNOLOGI

KONSTRUKSI BAWAH TANAH

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 978-623-8642-82-3 (PDF)



9

786238

642823