



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK



Pengambilan Keputusan Multi Kriteria (MCDM) menggunakan AI dan GIS

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



Pengambilan Keputusan Multi Kriteria (MCDM) menggunakan AI dan GIS

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 978-634-7227-89-8 (PDF)



9

786347

227898

Pengambilan Keputusan Multi Kriteria (MCDM) menggunakan AI dan GIS

Penulis :

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

ISBN : 978-634-7227-89-8 (PDF)

Editor :

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

Penyunting :

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

Desain Sampul dan Tata Letak :

Irdha Yuniarto, S.Ds., M.Kom

Penebit :

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

Anggota IKAPI No: 279 / ALB / JTE / 2023

Redaksi :

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :

Universitas STEKOM

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : info@stekom.ac.id

Hak cipta dilindungi undang-undang

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjangkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat-Nya sehingga buku ***Pengambilan Keputusan Multi Kriteria (MCDM) menggunakan AI dan GIS*** ini dapat terwujud. Buku ini hadir sebagai panduan komprehensif bagi para akademisi, peneliti, praktisi, dan pembuat kebijakan yang ingin memanfaatkan integrasi kecerdasan buatan (AI) dan sistem informasi geografis (GIS) dalam pengambilan keputusan multi kriteria (MCDM) untuk pembangunan berkelanjutan. Pengambilan Keputusan Multi Kriteria (MCDM) menggunakan AI dan GIS adalah pendekatan analitik yang menggabungkan metode MCDM dengan kecerdasan buatan (AI) serta sistem informasi geografis (GIS) untuk menangani keputusan kompleks berbasis data spasial. MCDM merupakan kerangka kerja untuk mengevaluasi berbagai alternatif keputusan berdasarkan multiple kriteria yang sering saling bertentangan, seperti biaya, dampak lingkungan, dan efisiensi. Integrasi AI (seperti fuzzy logic atau machine learning) menangani ketidakpastian dan data ambigu, sementara GIS memproses lapisan data spasial untuk analisis lokasi.

Di tengah tantangan global seperti perubahan iklim, bencana alam, degradasi lingkungan, dan urbanisasi cepat, pendekatan MCDM berbasis AI-GIS menawarkan solusi inovatif yang menggabungkan analisis spasial canggih, pemrosesan data besar, dan pemodelan prediktif untuk menghasilkan keputusan yang lebih akurat, efisien, dan berkelanjutan.

Isi buku ini mencakup 12 bab yang dirancang secara sistematis, dimulai dari fondasi konseptual AI-GIS dalam pengambilan keputusan berkelanjutan (Bab 1), analisis MCDM geospasial (Bab 2), hingga aplikasi praktis seperti pemetaan risiko banjir di Sigatoka (Bab 4), analisis kualitas udara Delhi NCR selama pandemi (Bab 5), optimalisasi pengelolaan sampah di Patna (Bab 7), dan inovasi IoT untuk kesehatan struktur (Bab 10). Setiap bab dilengkapi studi kasus nyata dari berbagai wilayah seperti Hong Kong, Chiang Mai, Muzaffarpur, dan Papua New Guinea, yang menyoroti penerapan SDG, ketahanan regional, serta strategi adaptasi lingkungan.

Kami berharap buku ini tidak hanya menjadi referensi akademik, tetapi juga katalisator aksi nyata bagi transformasi digital di bidang lingkungan, kehutanan, kesehatan masyarakat, dan energi terbarukan. Kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan untuk penyempurnaan edisi mendatang.

Semarang, Februari 2026

Penulis

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

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
BAB 1 AI-GIS DALAM PENGAMBILAN KEPUTUSAN BERKELANJUTAN.....	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Dasar-Dasar Jalur Untuk Pembangunan Berkelanjutan	4
1.3 Integrasi AI-GIS Untuk MCDM Berkelanjutan.....	9
1.4 Manfaat AI-GIS Untuk MCDM Berkelanjutan.....	12
1.5 Kesimpulan	15
BAB 2 ANALISIS KOMPREHENSIF MCDM GEOSPASIAL BERKELANJUTAN.....	17
2.1 Pendahuluan.....	17
2.2 Indikator Keberlanjutan.....	18
2.3 MCDM Untuk Pembangunan Masyarakat Tangguh	26
2.4 Pengolahan Data Dalam Pengambilan Keputusan	29
2.5 Informasi Penemuan Terbaru Saat Ini	30
2.6 Kesimpulan	31
BAB 3 GIS DAN MCDM UNTUK CAPAIAN SDG.....	32
3.1 Pendahuluan.....	32
3.2 Lingkup Wilayah Yang Dijelaskan.....	33
3.3 Bahaya Iklim Di Hong Kong.....	34
3.4 Bahaya Dan Ketahanan Regional Dalam MCDM	36
3.5 Penilaian Risiko Multi Bahaya.....	42
BAB 4 ANALISIS GEOSPASIAL BENCANA BANJIR DI KOTA SIGATOKA	46
4.1 Pendahuluan.....	46
4.2 Analisis Multi-Kriteria	46
4.3 Potensi Banjir Di Kota Sigatoka.....	47
4.4 Pengelompokan Potensi Banjir.....	51
4.5 Kesimpulan Dan Rekomendasi	52
BAB 5 ANALISIS MCDM BERBASIS DATA PANDEMI.....	53
5.1 Pendahuluan.....	53
5.2 Profil Wilayah Delhi NCR	56
5.3 Program Arcgis.....	57
5.4 Dampak Lockdown Terhadap Dinamika Kualitas Udara	59
5.5 Pembahasan Polusi Udara	68
5.6 Kesimpulan	71
BAB 6 ANALISIS GEOSPASIAL TUTUPAN HUTAN CHIANG MAI	72
6.1 Pendahuluan.....	72
6.2 Geografis Dan Ekologi Chiang Mai.....	77

6.3	Prosedur Analisis Indeks Vegetasi	78
6.4	Degradasi Vegetasi Dan Dinamika Tutupan Lahan	82
6.5	Kontribusi Temuan Dan Strategi Pengelolaan Hutan	86
6.6	Kesimpulan	88
BAB 7	OPTIMALISASI SAMPAH PADAT BERBASIS GIS	90
7.1	Pendahuluan.....	90
7.2	Profil Wilayah Dan Demografi Patna	91
7.3	Pemanfaatan QGIS.....	92
7.4	Dinamika Sampah Dan Efisiensi Infrastruktur	93
7.5	Pembahasan Dalam Pengelolaan Sampah	97
BAB 8	SPASIALITAS LEISHMANIASIS VISCERAL DI MUZAFFARPUR	100
8.1	Pendahuluan.....	100
8.2	Metode Analisis Epidemiologi Geospasial.....	101
8.3	Pemodelan Risiko Kala-Azar	104
8.4	Pembahasan Leishmaniasis Visceral (VI).....	109
BAB 9	OPTIMASI LOKASI PLTA BERKELANJUTAN DI PNG	112
9.1	Pendahuluan.....	112
9.2	Analisis Hidrologi & Beban	115
9.3	Potensi Hidro Dan Beban Listrik Desa	117
9.4	Kesimpulan Dan Rekomendasi	122
BAB 10	IOT DAN SENSOR PINTAR UNTUK KESEHATAN STRUKTUR KOMPOSIT	124
10.1	Pendahuluan.....	124
10.2	Akuisisi Data Dan Penginderaan	125
10.3	Pemantauan Secara Real-Time	131
10.4	Deteksi Kerusakan Dini	133
10.5	Penilaian Kondisi.....	134
10.6	Integrasi Dengan Platform IOT	136
10.7	Sistem Shm Jarak Jauh.....	137
10.8	Efektivitas Biaya	139
10.9	Implikasi Bagi Akademisi Dan Implikasi Bagi Praktisi	140
10.10	Kesimpulan	143
BAB 11	KONDISI DATA GEOSPASIAL UNTUK TATA KELOLA LINGKUNGAN	145
11.1	Pendahuluan.....	145
11.2	Konteks Lingkungan Nasional Dan Pembangunan Data	146
11.3	Regulasi & Institusi Lingkungan	149
11.5	Metode Penjaminan Kualitas Dan Validasi	153
11.7	Tantangan & Kendala Data Lingkungan	155
11.8	Kesimpulan Dan Langkah Ke Depan	157
BAB 12	INOVASI PADI TAHAN SIKLON UNTUK EKOSISTEM SUNDARBANS.....	158
12.1	Pendahuluan.....	158
12.2	Uji Toleransi Salinitas Padi	159

12.3	Mekanisme Salinitas Padi	162
12.4	Mekanisme Adaptasi & Toleransi Salinitas	166
12.5	Implikasi Bagi Akademisi Dan Implikasi Bagi Praktisi	168
12.6	Kesimpulan	169
DAFTAR PUSTAKA		171

BAB 1

AI-GIS DALAM PENGAMBILAN KEPUTUSAN BERKELANJUTAN

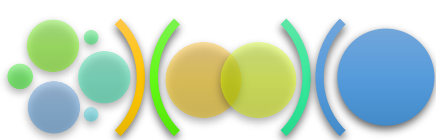
1.1 PENDAHULUAN

Upaya untuk mencapai pembangunan berkelanjutan ditandai dengan kebutuhan untuk menyelaraskan pertumbuhan ekonomi, kesetaraan sosial, dan perlindungan lingkungan. Dalam konteks ini, para pengambil keputusan sering dihadapkan pada masalah yang kompleks dan beragam yang membutuhkan evaluasi komprehensif dan perencanaan strategis. Kerangka kerja pengambilan keputusan multikriteria (MCDM) telah muncul sebagai alat penting untuk menavigasi kompleksitas ini, memungkinkan para pemangku kepentingan untuk mengevaluasi dan memprioritaskan berbagai alternatif berdasarkan serangkaian kriteria yang beragam dan seringkali saling bertentangan.

Kecerdasan Buatan (AI) dan Sistem Informasi Geografis (GIS) telah merevolusi kemampuan MCDM dalam pembangunan berkelanjutan. AI, dengan teknik komputasi canggihnya seperti pembelajaran mesin, jaringan saraf, dan analitik prediktif, dapat memproses dan menganalisis volume data yang besar, mengidentifikasi pola, dan menghasilkan perkiraan dengan akurasi tinggi. Kemampuan ini sangat penting untuk memahami dan memprediksi dampak berbagai skenario pembangunan, mengoptimalkan alokasi sumber daya, dan meningkatkan efisiensi proses pengambilan keputusan. Di sisi lain, GIS menawarkan alat yang ampuh untuk analisis dan visualisasi spasial.

Dengan menyediakan konteks geografis, GIS memungkinkan pemeriksaan pola dan hubungan spasial, yang sangat penting untuk tugas-tugas seperti perencanaan penggunaan lahan, penilaian dampak lingkungan, dan manajemen risiko bencana. Kemampuan untuk memvisualisasikan data kompleks secara spasial memungkinkan pemahaman yang lebih intuitif dan komprehensif tentang implikasi geografis dari berbagai jalur pembangunan. Integrasi AI dan GIS dalam kerangka kerja MCDM memfasilitasi pengembangan jalur pembangunan berkelanjutan yang berbasis data dan bukti. Pendekatan terintegrasi ini mendukung identifikasi, evaluasi, dan implementasi strategi yang menyeimbangkan tujuan ekonomi, sosial, dan lingkungan. Hal ini juga meningkatkan kemampuan untuk memantau dan menyesuaikan strategi ini sebagai respons terhadap perubahan kondisi, memastikan keberlanjutan dan ketahanan jangka panjang.

Pendahuluan ini menguraikan pentingnya menggabungkan AI dan GIS dalam kerangka kerja MCDM untuk mengatasi tantangan rumit pembangunan berkelanjutan. Dengan memanfaatkan kekuatan teknologi canggih ini, para pembuat kebijakan dan perencana dapat membuat keputusan yang lebih informatif, efektif, dan berkelanjutan, membuka jalan bagi masa depan yang seimbang dan tangguh. Jalur pembangunan berkelanjutan bertujuan untuk menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi, inklusi sosial, dan keberlanjutan lingkungan. Metode MCDM digunakan untuk mengevaluasi dan memprioritaskan berbagai pilihan berdasarkan berbagai kriteria yang seringkali saling bertentangan. Integrasi AI dan GIS dapat



meningkatkan proses dengan menyediakan alat canggih untuk analisis data, visualisasi, dan dukungan pengambilan keputusan.

Konsep Kunci

Gambar 1.1 menjelaskan detail tentang konsep-konsep kunci.

- **Jalur Pembangunan Berkelanjutan**

Pertumbuhan Ekonomi: Meningkatkan produktivitas dan efisiensi sambil menjaga keseimbangan ekologis.

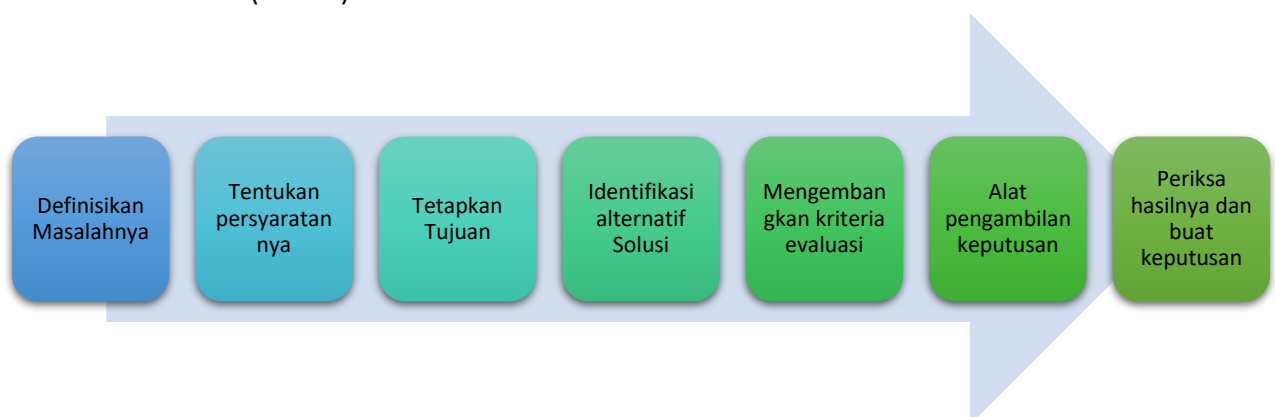
Inklusi Sosial: Memastikan akses yang adil terhadap sumber daya dan peluang bagi semua segmen masyarakat.

Keberlanjutan Lingkungan: Melindungi sumber daya alam dan mengurangi jejak ekologis.

- **Pengambilan Keputusan Multikriteria (MCDM)**

Tujuan: Memberikan pendekatan terstruktur untuk mengevaluasi dan membandingkan berbagai alternatif berdasarkan serangkaian kriteria.

Metode Umum: Proses Hierarki Analitik (AHP), Teknik untuk Preferensi Urutan berdasarkan Kesamaan dengan Solusi Ideal (TOPSIS), dan Teori Utilitas Multi-Atribut (MAUT).



Gambar 1.1 Pengambilan keputusan multi-kriteria (MCDM).

- **Kecerdasan Buatan (AI)**

Peran: AI dapat mengotomatisasi dan mengoptimalkan proses pengambilan keputusan dengan menganalisis kumpulan data besar, mengidentifikasi pola, dan membuat prediksi.

Aplikasi: Algoritma pembelajaran mesin, jaringan saraf, dan sistem pakar dapat digunakan untuk pemodelan prediktif, penilaian risiko, dan analisis skenario.

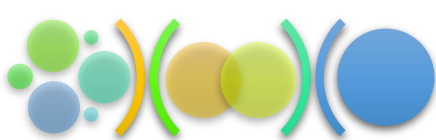
- **Sistem Informasi Geografis (SIG)**

Peran: SIG memungkinkan analisis spasial dan visualisasi data geografis, yang sangat penting untuk memahami faktor lingkungan dan sosial-ekonomi.

Aplikasi: Pemetaan perubahan penggunaan lahan, penilaian dampak lingkungan, dan perencanaan pengembangan infrastruktur.

Aplikasi AI dan SIG dalam pembangunan berkelanjutan.

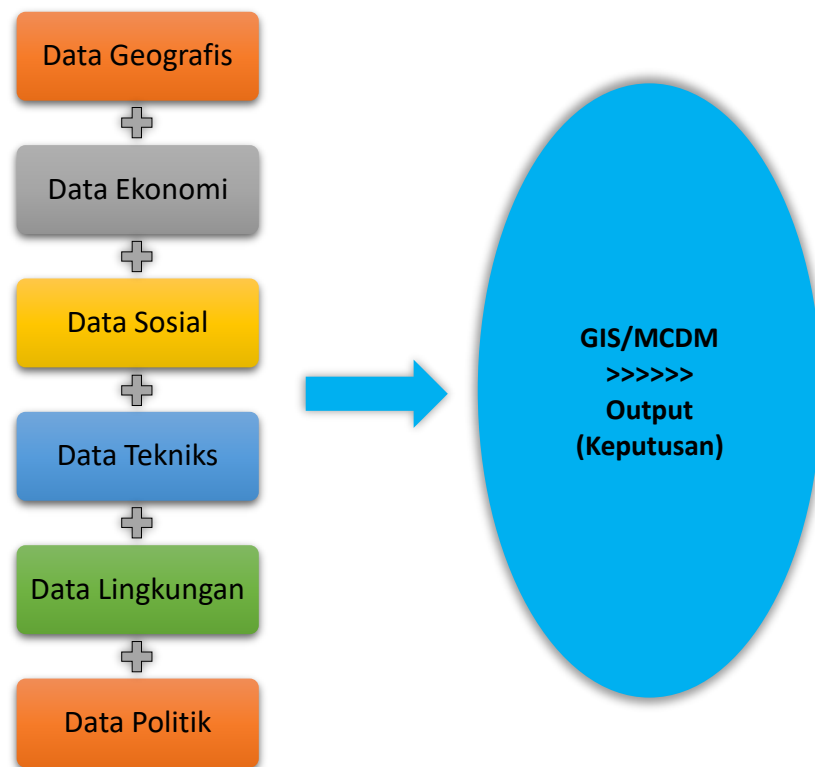
- **Pemantauan dan Manajemen Lingkungan**



AI: Algoritma pembelajaran mesin dapat memprediksi tingkat polusi, mengidentifikasi pola deforestasi, dan memodelkan dampak perubahan iklim.

SIG: Alat analisis spasial dapat memetakan area rentan, melacak perubahan penggunaan lahan, dan menilai distribusi sumber daya alam.

Gambar 1.2 menunjukkan tampilan analisis multi-kriteria spasial dan sumber daya alam lainnya yang diberikan di bawah ini secara rinci.



Gambar 1.2 Analisis multi-kriteria spasial.

- **Perencanaan Kota dan Pengembangan Infrastruktur**

AI: Model prediktif dapat mengoptimalkan jaringan transportasi, konsumsi energi, dan sistem pengelolaan limbah.

GIS: Alat-alat dapat memvisualisasikan pola pertumbuhan perkotaan, mengevaluasi kesesuaian lokasi untuk pembangunan baru, dan mengelola risiko bencana.

- **Pertanian dan Ketahanan Pangan**

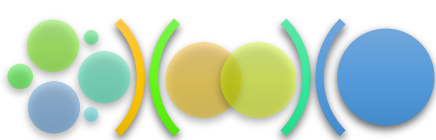
AI: Teknik pertanian presisi dapat meningkatkan prediksi hasil panen, deteksi hama, dan alokasi sumber daya.

GIS: Analisis spasial dapat menilai kesehatan tanah, memantau kondisi tanaman, dan merencanakan sistem irigasi.

- **Manajemen Bencana Alam**

AI: Algoritma dapat memprediksi terjadinya bencana alam, memodelkan dampaknya, dan mengoptimalkan strategi tanggap darurat.

GIS: Alat pemetaan dapat mengidentifikasi area berisiko tinggi, melacak perkembangan bencana, dan mengoordinasikan upaya bantuan.



- **Manajemen Sumber Daya Air**

AI: Analisis prediktif dapat memperkirakan permintaan air, mendeteksi kebocoran, dan mengoptimalkan sistem distribusi.

GIS: Alat-alat dapat memetakan sumber air, menilai kualitas air, dan merencanakan penggunaan yang berkelanjutan.

Integrasi AI-GIS untuk MCDM Berkelanjutan

- *Pengumpulan dan Integrasi Data*: Mengumpulkan dan mengintegrasikan beragam dataset dari sensor, citra satelit, survei, dan catatan administrasi.
- *Definisi dan Pembobotan Kriteria*: Mendefinisikan kriteria yang relevan untuk pengambilan keputusan dan menetapkan bobot berdasarkan kepentingannya.
- *Pemodelan dan Analisis*: Menggunakan algoritma AI untuk menganalisis data, mengidentifikasi tren, dan menghasilkan model prediktif. Menggunakan alat GIS untuk memvisualisasikan data secara spasial dan melakukan analisis spasial.
- *Pengembangan dan Evaluasi Skenario*: Membuat dan mengevaluasi berbagai skenario pembangunan untuk memahami potensi dampak dan pertimbangan timbal balik.
- *Dukungan dan Implementasi Keputusan*: Memberikan wawasan dan rekomendasi yang dapat ditindaklanjuti kepada para pengambil keputusan. Mengimplementasikan jalur yang dipilih dan memantau hasilnya.

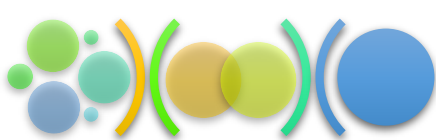
Kekuatan AI dan GIS dalam kerangka MCDM memungkinkan upaya pembangunan berkelanjutan dapat direncanakan, diimplementasikan, dan dipantau secara lebih efektif, sehingga menghasilkan hasil yang lebih baik bagi masyarakat dan lingkungan.

1.2 DASAR-DASAR JALUR UNTUK PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN

Pembangunan berkelanjutan mencakup gagasan untuk memenuhi kebutuhan masa kini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri. Hal ini melibatkan pengintegrasian pertimbangan ekonomi, sosial, dan lingkungan untuk mencapai keseimbangan yang mendorong kesejahteraan dan kemakmuran jangka panjang bagi semua. Berikut adalah beberapa dasar jalur untuk pembangunan berkelanjutan (Tabel 1.1).

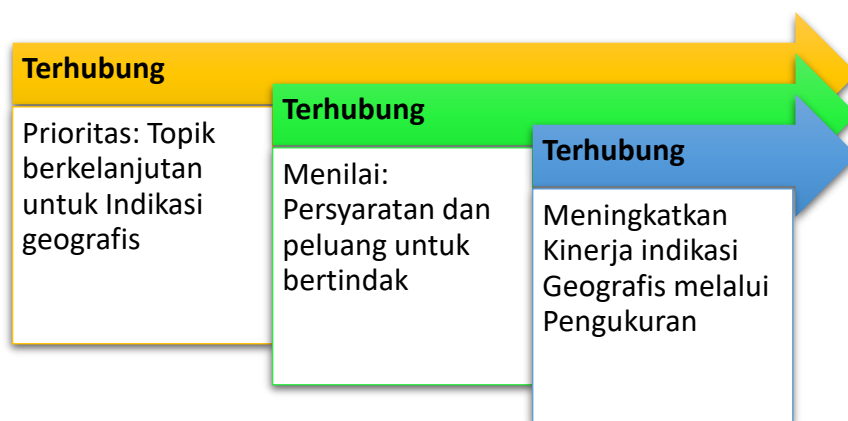
Tabel 1.1 Jalur Menuju Pembangunan Berkelanjutan

Aspek	Deskripsi
Pendekatan Tiga Pilar Utama	Pertimbangan ekonomi, sosial, dan lingkungan diintegrasikan untuk mencapai pembangunan yang seimbang.
Prinsip Keberlanjutan	Meminimalkan dampak lingkungan, mempromosikan kesetaraan sosial, memastikan kelangsungan ekonomi, menghormati keragaman.
Pendekatan Antardisiplin	Kolaborasi lintas disiplin (misalnya, ilmu lingkungan, ekonomi, sosiologi, teknologi).



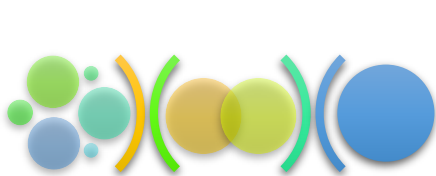
Tujuan dan Kerangka Kerja Global	SDGs PBB menyediakan peta jalan global untuk pembangunan berkelanjutan pada tahun 2030.
Keterlibatan Pemangku Kepentingan	Melibatkan komunitas, bisnis, pemerintah, LSM untuk mengidentifikasi prioritas dan menciptakan solusi bersama.
Manajemen Adaptif	Pembelajaran berkelanjutan, pemantauan, dan penyesuaian kebijakan berdasarkan informasi dan umpan balik baru.
Teknologi dan Inovasi	Memanfaatkan teknologi seperti energi terbarukan, pertanian berkelanjutan, solusi digital untuk hasil yang berkelanjutan.
Kebijakan dan Tata Kelola	Regulasi dan insentif yang efektif untuk mempromosikan keberlanjutan dalam pengambilan keputusan dan investasi.
Pendidikan dan Kesadaran	Mempromosikan pengetahuan dan peningkatan kapasitas untuk praktik dan gaya hidup berkelanjutan.
Kebijakan dan Tata Kelola	Regulasi dan insentif yang efektif untuk mempromosikan keberlanjutan dalam pengambilan keputusan dan investasi.

Pembangunan berkelanjutan adalah pendekatan holistik yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri. Abstrak ini mengeksplorasi prinsip-prinsip dasar, strategi, dan kerangka kerja yang penting untuk menavigasi kompleksitas pembangunan berkelanjutan (Gambar 1.3).



Gambar 1.3 Komponen dasar peta jalan strategis untuk keberlanjutan.

Konsep pembangunan berkelanjutan mencakup tiga dimensi yang saling terkait: kemakmuran ekonomi, kesetaraan sosial, dan pengelolaan lingkungan. Dimensi-dimensi ini sering disebut sebagai triple bottom line, yang menekankan saling ketergantungan dan



kebutuhan akan pengambilan keputusan yang seimbang yang mempertimbangkan ketiga aspek tersebut secara bersamaan.

Prinsip-prinsip utama yang memandu jalur pembangunan berkelanjutan meliputi meminimalkan degradasi lingkungan, mempromosikan inklusivitas sosial, memastikan kelangsungan ekonomi, dan menghormati keragaman budaya. Kolaborasi interdisipliner antar bidang seperti ilmu lingkungan, ekonomi, sosiologi, teknologi, dan pembuatan kebijakan sangat penting untuk mengatasi tantangan yang beragam dan merancang solusi terpadu.

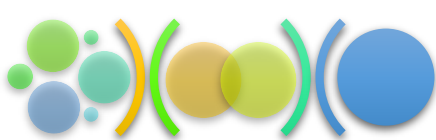
Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) Perserikatan Bangsa-Bangsa menyediakan kerangka kerja global untuk aksi kolektif menuju pembangunan berkelanjutan pada tahun 2030. Tujuan-tujuan ini membahas isu-isu penting seperti pengentasan kemiskinan, aksi iklim, kota-kota berkelanjutan, konservasi keanekaragaman hayati, dan konsumsi serta produksi yang bertanggung jawab. Keterlibatan pemangku kepentingan memainkan peran penting dalam pembangunan berkelanjutan, memastikan inklusivitas, transparansi, dan akuntabilitas dalam proses pengambilan keputusan. Strategi manajemen adaptif memungkinkan pembelajaran berkelanjutan, pemantauan, dan penyesuaian kebijakan berdasarkan informasi dan umpan balik yang berkembang, sehingga meningkatkan ketahanan dan efektivitas.

Inovasi teknologi, termasuk kemajuan dalam energi terbarukan, pertanian berkelanjutan, dan solusi digital, mempercepat kemajuan menuju hasil yang berkelanjutan. Kerangka kebijakan dan tata kelola yang efektif sangat penting untuk menerjemahkan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan ke dalam rencana dan peraturan yang dapat ditindaklanjuti yang memberikan insentif bagi praktik dan investasi berkelanjutan. Inisiatif pendidikan dan kesadaran merupakan bagian integral dalam menumbuhkan budaya keberlanjutan, memberdayakan individu dan komunitas untuk mengadopsi perilaku dan gaya hidup yang bertanggung jawab.

Kesimpulannya, merangkul dasar-dasar jalur pembangunan berkelanjutan membutuhkan pendekatan komprehensif dan terintegrasi yang menyeimbangkan pertimbangan ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dengan memasukkan prinsip-prinsip ini ke dalam proses pengambilan keputusan dan praktik sehari-hari, para pemangku kepentingan dapat berkontribusi untuk membangun masa depan yang lebih adil, tangguh, dan berkelanjutan bagi semua. Dengan merangkul dasar-dasar ini dan mengintegrasikannya ke dalam perencanaan, pengambilan keputusan, dan tindakan sehari-hari, para pemangku kepentingan dapat berkontribusi untuk memajukan pembangunan berkelanjutan dan mencapai masa depan yang lebih adil dan tangguh bagi semua.

Aplikasi/Teknik AI Dan GIS

AI dan GIS mewakili dua teknologi paling transformatif dalam analisis data dan pengambilan keputusan kontemporer. AI, dengan kemampuannya dalam pembelajaran mesin, jaringan saraf, dan analitik prediktif, menyediakan alat yang ampuh untuk memproses dan menafsirkan sejumlah besar data, memungkinkan ekstraksi wawasan yang berharga dan otomatisasi tugas-tugas kompleks. Di sisi lain, GIS mengkhususkan diri dalam analisis spasial dan visualisasi data geografis, menawarkan kerangka kerja penting untuk memahami dan mengelola dimensi spasial dari berbagai fenomena.



Konvergensi AI dan GIS membuka peluang yang belum pernah terjadi sebelumnya di berbagai bidang, meningkatkan kapasitas untuk mengatasi tantangan yang rumit melalui pengambilan keputusan yang terinformasi. Integrasi ini memanfaatkan kekuatan kedua teknologi: kemampuan analitis AI dan konteks spasial GIS, sehingga memberikan pendekatan komprehensif untuk pemecahan masalah berbasis data. Dengan menggabungkan kemampuan prediksi dan optimasi AI dengan analisis spasial GIS, para pemangku kepentingan dapat mengembangkan solusi yang lebih efisien, efektif, dan berkelanjutan.

Aplikasi AI dan GIS mencakup berbagai bidang, masing-masing mendapat manfaat dari peningkatan kemampuan analitis dan wawasan spasial yang diberikan oleh teknologi ini. Dalam manajemen lingkungan, mereka membantu dalam memprediksi dan mengurangi dampak perubahan iklim dan polusi. Dalam perencanaan kota, mereka mengoptimalkan pengembangan infrastruktur dan inisiatif kota pintar. Di bidang pertanian, mereka meningkatkan teknik pertanian presisi dan langkah-langkah ketahanan pangan. Dalam manajemen bencana, mereka meningkatkan kesiapsiagaan dan strategi respons. Terakhir, dalam manajemen sumber daya air, mereka mengoptimalkan penggunaan dan praktik konservasi.

Teknik AI

1. Pembelajaran Mesin

Deskripsi: Algoritma pembelajaran mesin memungkinkan sistem untuk belajar dari data dan membuat prediksi atau keputusan tanpa pemrograman eksplisit.

Aplikasi: Pemodelan prediktif, klasifikasi, pengelompokan, deteksi anomali, dan sistem rekomendasi.

Contoh: Support Vector Machines (SVM), Random Forest, Jaringan Saraf, dan Deep Learning.

2. Pemrosesan Bahasa Alami (NLP)

Deskripsi: NLP melibatkan interaksi antara komputer dan manusia menggunakan bahasa alami, memungkinkan mesin untuk memproses, menganalisis, dan memahami bahasa manusia.

Aplikasi: Analisis sentimen, penerjemahan bahasa, chatbot, dan ringkasan teks.

Contoh: Pengenalan Entitas Bernama (NER), Klasifikasi Teks, model Generasi Bahasa seperti GPT-3.

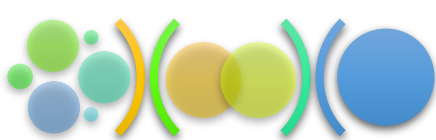
3. Visi Komputer

Deskripsi: Visi komputer memungkinkan mesin untuk menafsirkan dan memahami informasi visual dari dunia.

Aplikasi: Deteksi objek, klasifikasi gambar, pengenalan wajah, analisis gambar medis, dan kendaraan otonom.

Contoh: Jaringan Neural Konvolusional (CNN), Segmentasi Gambar, dan Pengenalan Karakter Optik (OCR).

4. Pembelajaran Penguatan



Deskripsi: Pembelajaran penguatan melibatkan pelatihan algoritma untuk membuat keputusan berurutan dengan berinteraksi dengan lingkungan dan belajar dari umpan balik.

Aplikasi: Permainan (misalnya, AlphaGo), robotika, sistem otonom, dan manajemen sumber daya.

Contoh: Q-Learning, Deep Q-Networks (DQN), dan metode Policy Gradient.

5. Analisis Prediktif

Deskripsi: Analisis prediktif menggunakan teknik statistik dan pembelajaran mesin untuk menganalisis data saat ini dan historis untuk membuat prediksi tentang peristiwa di masa mendatang.

Aplikasi: Peramalan, penilaian risiko, peramalan permintaan, dan pemeliharaan prediktif.

Contoh: Model peramalan deret waktu seperti ARIMA, dan Prophet.

Teknik GIS

1. Analisis Spasial

Deskripsi: Analisis spasial memeriksa data geografis untuk memahami pola, hubungan, dan tren.

Aplikasi: Buffering, analisis overlay, interpolasi, dan analisis kedekatan.

Contoh: Statistik spasial (misalnya, Moran's I), analisis hotspot, dan regresi spasial.

2. Pemodelan Data Geospasial

Deskripsi: Pemodelan data geospasial melibatkan representasi fitur, fenomena, dan hubungan dunia nyata dalam lingkungan digital.

Aplikasi: Pemodelan 3D, analisis jaringan, perencanaan penggunaan lahan, dan pemodelan hidrologi.

Contoh: Analisis Jaringan (misalnya, jalur terpendek), Model Ketinggian Digital (DEM), dan Model Hidrologi (misalnya, SWAT).

3. Penginderaan Jauh

Deskripsi: Penginderaan jauh melibatkan pengumpulan data tentang permukaan Bumi tanpa kontak fisik langsung, biasanya dari satelit atau pesawat terbang.

Aplikasi: Klasifikasi tutupan lahan, pemantauan vegetasi, analisis pertumbuhan perkotaan, dan penilaian bencana.

Contoh: Klasifikasi citra (misalnya, terawasi dan tidak terawasi), deteksi perubahan, dan pencitraan termal.

4. Kartografi dan Visualisasi

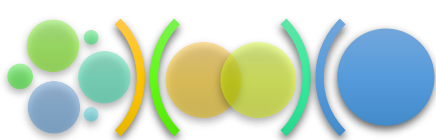
Deskripsi: Kartografi melibatkan pembuatan dan desain peta, sedangkan visualisasi menggunakan teknik grafis untuk merepresentasikan data geospasial.

Aplikasi: Desain peta, pemetaan tematik, penceritaan spasial, dan visualisasi interaktif.

Contoh: Peta panas, peta kloroplek, dan peta cerita.

5. Sistem Pendukung Keputusan Spasial (SDSS)

Deskripsi: SDSS mengintegrasikan GIS dengan proses pengambilan keputusan untuk mendukung keputusan spasial yang kompleks.



Aplikasi: Pemilihan lokasi, penilaian dampak lingkungan, manajemen bencana, dan perencanaan kota.

Contoh: Analisis Keputusan Multikriteria (MCDA), model Lokasi-Alokasi, dan perencanaan skenario.

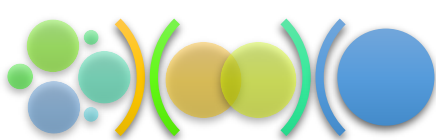
Integrasi Teknik AI dan GIS

Integrasi teknik AI dan GIS meningkatkan proses pengambilan keputusan dengan menggabungkan kemampuan analitik canggih AI dengan konteks spasial GIS. Integrasi ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif, pemodelan prediktif dengan komponen spasial, dan otomatisasi tugas spasial yang kompleks. Dengan memanfaatkan teknik AI dan GIS, organisasi dapat mencapai wawasan yang lebih akurat, mengoptimalkan pengelolaan sumber daya, dan mengembangkan solusi berkelanjutan di berbagai bidang. Pendahuluan ini menyoroti peran penting aplikasi AI dan GIS dalam mentransformasi proses pengambilan keputusan di berbagai sektor, menunjukkan bagaimana integrasi keduanya memfasilitasi hasil yang lebih informatif, efisien, dan berkelanjutan.

1.3 INTEGRASI AI-GIS UNTUK MCDM BERKELANJUTAN

Pembangunan berkelanjutan melibatkan pemenuhan kebutuhan masa kini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri. Kerangka kerja MCDM dapat bermanfaat dalam menavigasi kompleksitas pembangunan berkelanjutan dengan mempertimbangkan berbagai faktor dan pertimbangan. Berikut adalah beberapa jalur dan pertimbangan untuk mengintegrasikan pembangunan berkelanjutan dan MCDM:

1. *Mengidentifikasi Pemangku Kepentingan dan Tujuan:* Mulailah dengan mengidentifikasi semua pemangku kepentingan yang terlibat dalam proses pengambilan keputusan, termasuk masyarakat, bisnis, pemerintah, dan LSM. Tetapkan tujuan yang jelas yang selaras dengan SDGs, seperti konservasi lingkungan, kesetaraan sosial, kemakmuran ekonomi, dan kemajuan teknologi.
2. *Pengembangan Kriteria:* Kembangkan serangkaian kriteria yang mencerminkan berbagai dimensi keberlanjutan yang relevan dengan keputusan yang ada. Kriteria ini dapat mencakup dampak lingkungan, inklusivitas sosial, kelayakan ekonomi, kelayakan teknologi, pelestarian budaya, dan kepatuhan kebijakan. Setiap kriteria harus terukur dan relevan dengan kekhawatiran para pemangku kepentingan.
3. *Pengumpulan Data dan Informasi:* Kumpulkan data dan informasi yang relevan untuk menilai kinerja berbagai alternatif terhadap kriteria yang telah ditetapkan. Ini dapat melibatkan pelaksanaan penilaian lingkungan, analisis sosial-ekonomi, pembahasan kelayakan, dan penilaian risiko. Pengambilan keputusan berbasis data memastikan bahwa pilihan didasarkan pada bukti dan analisis komprehensif.
4. *Metode Evaluasi Multikriteria:* Manfaatkan metode MCDM yang tepat untuk mengevaluasi dan membandingkan alternatif tindakan. Teknik umum meliputi AHP, Analytic Network Process (ANP), MAUT, dan metode pemeringkatan seperti ELECTRE dan PROMETHEE. Metode-metode ini membantu dalam mengkuantifikasi faktor



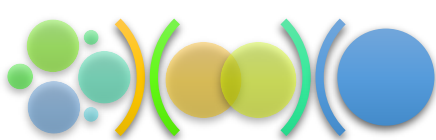
kualitatif dan memprioritaskan alternatif berdasarkan kinerja keseluruhannya di berbagai kriteria.

5. *Analisis Skenario dan Pengujian Sensitivitas*: Melakukan analisis skenario untuk mengevaluasi bagaimana berbagai skenario masa depan dapat memengaruhi hasil inisiatif pembangunan berkelanjutan. Pengujian sensitivitas membantu memahami ketahanan keputusan dalam berbagai kondisi dan ketidakpastian, memastikan ketahanan dan kemampuan beradaptasi dalam menghadapi perubahan.
6. *Keterlibatan Pemangku Kepentingan dan Transparansi*: Melibatkan pemangku kepentingan sepanjang proses pengambilan keputusan untuk memastikan inklusivitas, transparansi, dan akuntabilitas. Masukan pemangku kepentingan memberikan wawasan yang berharga, meningkatkan legitimasi keputusan, dan mendorong kepemilikan kolektif atas inisiatif pembangunan berkelanjutan.
7. *Pemantauan dan Adaptasi*: Menerapkan mekanisme untuk memantau implementasi dan hasil strategi yang dipilih dari waktu ke waktu. Evaluasi berkala memungkinkan manajemen adaptif, di mana penyesuaian dapat dilakukan berdasarkan umpan balik, informasi baru, dan perubahan keadaan untuk meningkatkan efektivitas dan mencapai tujuan keberlanjutan jangka panjang.
8. *Integrasi Kebijakan dan Kapasitas Kelembagaan*: Mengintegrasikan pertimbangan pembangunan berkelanjutan ke dalam kerangka kebijakan dan memperkuat kapasitas kelembagaan untuk implementasi yang efektif. Hal ini melibatkan penyelarasan kerangka peraturan, mempromosikan inovasi dan berbagi pengetahuan, serta membangun kemitraan lintas sektor dan yurisdiksi.

Dengan mengintegrasikan MCDM dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan, para pemangku kepentingan dapat membuat pilihan yang tepat yang menyeimbangkan pertimbangan lingkungan, sosial, dan ekonomi, sehingga mendorong jalur holistik dan tangguh menuju pembangunan berkelanjutan. Integrasi AI dan GIS merevolusi jalur untuk pembangunan berkelanjutan dan MCDM.

Pembangunan berkelanjutan bertujuan untuk menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi, inklusi sosial, dan perlindungan lingkungan, yang membutuhkan proses pengambilan keputusan yang kompleks yang dapat mempertimbangkan berbagai kriteria yang seringkali saling bertentangan. AI dan GIS menyediakan alat dan yang diperlukan untuk meningkatkan proses ini dengan menawarkan analisis data tingkat lanjut, visualisasi, dan kemampuan pendukung keputusan.

AI menghadirkan teknik komputasi yang ampuh seperti pembelajaran mesin, jaringan saraf, dan analitik prediktif. Kemampuan ini memungkinkan pemrosesan dan analisis kumpulan data yang luas dan beragam, mengungkap pola, memprediksi tren masa depan, dan mengoptimalkan alokasi sumber daya. GIS melengkapi hal ini dengan menawarkan alat analisis dan visualisasi spasial yang kuat, yang penting untuk memahami pola dan hubungan geografis. Bersama-sama, AI dan GIS memfasilitasi pengembangan strategi yang lebih efektif dan berkelanjutan dengan mengintegrasikan data spasial dan non-spasial, mengoptimalkan

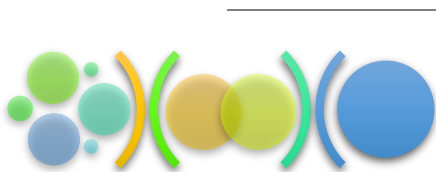


penggunaan lahan, memantau perubahan lingkungan, dan mendukung manajemen risiko bencana.

Integrasi AI dan GIS dalam kerangka kerja MCDM memungkinkan evaluasi komprehensif dari berbagai skenario pembangunan, dengan mempertimbangkan berbagai kriteria seperti kelayakan ekonomi, kesetaraan sosial, dan dampak lingkungan (Tabel 1.2). Pendekatan ini mendukung para pembuat kebijakan dan perencana dalam mengambil keputusan berbasis data dan bukti yang sangat penting untuk mencapai tujuan keberlanjutan jangka panjang.

Tabel 1.2 Aplikasi AI dan GIS dalam Pembangunan Berkelanjutan dan MCDM

Bidang Pembahasan	Aplikasi AI	Aplikasi GIS
Manajemen Lingkungan	Pemodelan Prediktif: Algoritma AI memprediksi tingkat polusi, dampak perubahan iklim, dan pola deforestasi.	Analisis Spasial: Alat GIS memetakan dan menganalisis data lingkungan, seperti distribusi habitat dan kesehatan ekosistem.
	Pengenalan Pola: Model pembelajaran mesin mengidentifikasi dan memantau perubahan penggunaan lahan dan tutupan vegetasi.	Penilaian Dampak: GIS memvisualisasikan potensi dampak kebijakan dan proyek lingkungan di berbagai wilayah.
	Optimasi: AI membantu mengoptimalkan alokasi sumber daya untuk upaya konservasi dan pengendalian polusi.	Manajemen Sumber Daya: GIS mendukung perencanaan dan pengelolaan sumber daya alam seperti air, hutan, dan satwa liar.
Perencanaan Kota dan Pengembangan Infrastruktur	Analisis Prediktif: Model AI memprediksi pertumbuhan perkotaan, pola lalu lintas, dan kebutuhan infrastruktur.	Analisis Kesesuaian Lokasi: GIS mengidentifikasi lokasi optimal untuk pembangunan baru berdasarkan berbagai kriteria.
	Kota Pintar: Sistem berbasis AI mengoptimalkan penggunaan energi, pengelolaan limbah, dan transportasi umum di daerah perkotaan.	Perencanaan Tata Ruang dan Penggunaan Lahan: GIS membantu dalam membuat dan mengelola rencana tata ruang dan peta penggunaan lahan.
	Analisis Risiko: AI menilai risiko yang terkait dengan proyek infrastruktur, termasuk faktor keuangan, lingkungan, dan sosial.	Manajemen Risiko Bencana: GIS memetakan area berisiko tinggi dan mendukung perencanaan kesiapsiagaan dan respons bencana.
Pertanian dan Ketahanan Pangan	Pertanian Presisi: AI menganalisis data dari sensor dan drone untuk mengoptimalkan irigasi,	Pemetaan Tanah dan Tanaman: GIS memetakan jenis tanah, kondisi tanaman, dan zona produktivitas untuk



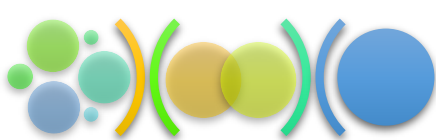
	pemupukan, dan pengendalian hama. • Prediksi Hasil Panen: Model pembelajaran mesin memprediksi hasil panen berdasarkan data cuaca, tanah, dan tanaman. • Optimalisasi Rantai Pasokan: AI meningkatkan efisiensi rantai pasokan pertanian, dari produksi hingga distribusi.	perencanaan pertanian yang lebih baik. • Penggunaan Lahan dan Rotasi Tanaman: GIS mendukung perencanaan penggunaan lahan dan jadwal rotasi tanaman yang optimal. • Manajemen Sumber Daya Air: GIS membantu merencanakan dan mengelola sistem irigasi dan distribusi sumber daya air.
Manajemen Bencana Alam	• Prediksi Bencana: Model AI memprediksi bencana alam seperti gempa bumi, banjir, dan badai. • Simulasi Dampak: AI mensimulasikan skenario bencana untuk merencanakan strategi respons yang efektif.	• Pemetaan Risiko: GIS memetakan area yang rawan bencana alam, membantu dalam penilaian risiko dan perencanaan mitigasi. • Koordinasi Tanggap Darurat: GIS mendukung koordinasi upaya tanggap darurat selama bencana.
Manajemen Sumber Daya Air	• Peramalan Permintaan: AI memprediksi permintaan air dan pola penggunaan untuk pengelolaan sumber daya air yang efisien. • Deteksi Kebocoran: AI mendeteksi kebocoran pada sistem distribusi air untuk meminimalkan kehilangan air. • Optimasi: AI mengoptimalkan distribusi sumber daya air untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan.	• Pemetaan Sumber: GIS memetakan sumber air, termasuk sungai, danau, dan cadangan air tanah. • Pemantauan Kualitas: GIS memantau kualitas air di berbagai wilayah, mengidentifikasi area yang perlu diperhatikan. • Perencanaan Penggunaan Berkelanjutan: GIS mendukung perencanaan praktik penggunaan air yang berkelanjutan.

1.4 MANFAAT AI-GIS UNTUK MCDM BERKELANJUTAN

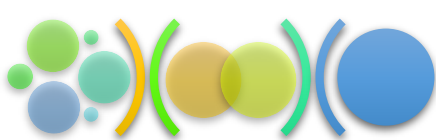
Integrasi AI dan GIS dengan jalur untuk pembangunan berkelanjutan dan MCDM menawarkan banyak keuntungan. Teknologi ini dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi, akurasi, dan efektivitas proses pengambilan keputusan, yang mengarah pada hasil pembangunan berkelanjutan yang lebih baik (Tabel 1.3 dan 1.4).

Tabel 1.3 Aplikasi AI dan GIS dalam Jalur Pembangunan Berkelanjutan

Aspek	Aplikasi AI	Aplikasi GIS	Keunggulan Gabungan
Optimasi	• Alokasi Sumber Daya: Mengoptimalkan penggunaan sumber	• Perencanaan Penggunaan Lahan: Membantu dalam	• Penilaian dan Mitigasi Risiko: Mengidentifikasi area

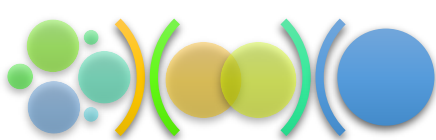


	daya untuk mencapai tujuan keberlanjutan.	perencanaan penggunaan lahan yang efektif dan pelestarian habitat alami.	rentan dan menilai potensi dampak untuk intervensi yang tepat sasaran.
	Optimasi	Alokasi Sumber Daya: Mengoptimalkan penggunaan sumber daya untuk mencapai tujuan keberlanjutan.	Perencanaan Penggunaan Lahan: Membantu dalam perencanaan penggunaan lahan yang efektif dan pelestarian habitat alami.
Otomatisasi	Tugas Rutin: Mengotomatiskan tugas-tugas berulang untuk membebaskan sumber daya manusia agar dapat fokus pada tugas-tugas yang lebih kompleks.		
Integrasi Data		Integrasi: Mengintegrasikan berbagai kumpulan data ke dalam satu platform untuk tampilan yang komprehensif.	
Pemantauan dan Manajemen		Pemantauan: Memantau perubahan lingkungan, urbanisasi, dan dampak iklim.	
Kebijakan dan Tata Kelola	Dukungan Pengambilan Keputusan: AI meningkatkan sistem pendukung pengambilan keputusan untuk pembuatan kebijakan yang efektif.	Tata Kelola Spasial Mendukung pengembangan kebijakan yang berlandaskan informasi spasial.	
Pendidikan dan Kesadaran	AI Wawasan Prediktif menyediakan wawasan prediktif untuk tujuan pendidikan.	Kesadaran Geospasial: GIS meningkatkan pemahaman dan kesadaran geospasial.	



Tabel 1.4 Kerugian Penerapan AI dan GIS dalam Jalur Pembangunan Berkelanjutan dan Pengambilan Keputusan Multikriteria (MCDM)

Aspek	Aplikasi AI	Aplikasi GIS	Gabungan Kerugian
Kualitas dan Ketersediaan Data	Ketergantungan Data: Model AI membutuhkan kumpulan data berkualitas tinggi dan ekstensif, yang mungkin tidak selalu tersedia atau akurat.	Akurasi Data: Analisis GIS bergantung pada akurasi dan resolusi data spasial, yang dapat terbatas atau sudah usang.	Integrasi Data: Menggabungkan kumpulan data dari berbagai sumber dapat menjadi tantangan karena inkonsistensi dan standar data yang berbeda-beda.
Kompleksitas Teknis	Algoritma Kompleks: AI melibatkan algoritma kompleks yang mungkin sulit dipahami dan diimplementasikan oleh non-ahli.	Keahlian Teknis: GIS membutuhkan pengetahuan khusus agar dapat digunakan secara efektif, yang dapat menjadi kendala bagi sebagian pemangku kepentingan.	Tantangan Antardisiplin: Mengintegrasikan AI dan GIS membutuhkan kolaborasi lintas bidang teknis yang berbeda, yang dapat menjadi kompleks untuk dikelola.
Biaya dan Sumber Daya	Biaya Tinggi: Menerapkan solusi AI bisa mahal, membutuhkan investasi signifikan dalam perangkat keras, perangkat lunak, dan keahlian.	Biaya Infrastruktur: Sistem GIS dapat mahal untuk disiapkan dan dipelihara, terutama di lingkungan dengan sumber daya terbatas.	Intensitas Sumber Daya: Kedua teknologi ini dapat bersifat intensif sumber daya, membutuhkan sumber daya finansial dan manusia yang substansial untuk penerapan yang efektif.
Kekhawatiran Etika dan Privasi	Bias dan Keadilan: Algoritma AI dapat melanggengkan bias yang ada dalam data pelatihan, yang menyebabkan hasil yang tidak adil atau bias.	Isu Privasi: Pengumpulan dan penggunaan data GIS dapat menimbulkan kekhawatiran privasi, terutama ketika berurusan dengan informasi lokasi yang sensitif.	Keamanan Data: Memastikan keamanan dan privasi kumpulan data terintegrasi merupakan tantangan yang signifikan.
Skalabilitas dan Kemampuan Beradaptasi	Skalabilitas: Model AI mungkin tidak dapat diskalakan dengan baik di berbagai wilayah atau konteks karena variasi data dan kondisi.	Spesifik Konteks: Solusi GIS mungkin memerlukan penyesuaian yang signifikan untuk konteks geografis	Tantangan Integrasi: Mengintegrasikan solusi AI dan GIS di berbagai konteks dapat menjadi kompleks dan

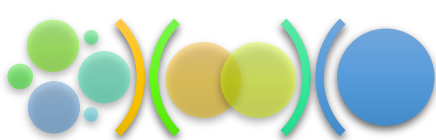


		atau sosial-ekonomi yang berbeda.	memerlukan adaptasi yang signifikan.
Ketergantungan pada Teknologi	Ketergantungan Berlebihan: Ketergantungan berlebihan pada AI dapat mengurangi pengawasan dan pemikiran kritis manusia, yang berpotensi menyebabkan konsekuensi yang tidak terduga.	Kegagalan Teknis: Sistem GIS rentan terhadap masalah atau kegagalan teknis, yang memengaruhi keandalan analisis.	Ketergantungan Sistem: Ketergantungan pada sistem terintegrasi meningkatkan kerentanan terhadap kegagalan teknis atau gangguan pada salah satu komponen.
Hambatan Implementasi	Resistensi terhadap Perubahan: Organisasi mungkin menolak mengadopsi AI karena dianggap rumit atau takut akan hilangnya pekerjaan.	Tantangan Adopsi: Adopsi GIS dapat terhambat oleh kurangnya keterampilan teknis atau resistensi terhadap perubahan di antara para pemangku kepentingan.	Isu Interoperabilitas: Memastikan interoperabilitas antara sistem AI dan GIS dapat menjadi tantangan, terutama saat mengintegrasikan sistem lama.
Transparansi dan Kemampuan Menjelaskan	Masalah Kotak Hitam: Algoritma AI dapat bersifat buram, sehingga sulit untuk memahami bagaimana keputusan dibuat, yang dapat merusak kepercayaan.	Hasil yang Kompleks: Hasil GIS dapat kompleks dan sulit diinterpretasikan oleh non-spesialis.	Interpretasi: Menggabungkan AI dan GIS dapat menghasilkan sistem kompleks yang sulit dijelaskan dan dipahami secara komprehensif.

1.5 KESIMPULAN

Kesimpulannya, integrasi AI dan GIS dengan kerangka kerja MCDM menghadirkan jalur yang menjanjikan untuk memajukan SDGs. Algoritma AI memungkinkan analisis data yang kuat, pemodelan prediktif, dan pengenalan pola, sehingga meningkatkan akurasi dan efisiensi proses pengambilan keputusan. Teknologi GIS menyediakan visualisasi data spasial, pemetaan, dan kemampuan analisis spasial, yang penting untuk memahami konteks geografis dan mengoptimalkan alokasi sumber daya. Bersama-sama, AI dan GIS memberdayakan para pemangku kepentingan untuk mengevaluasi faktor lingkungan, sosial, dan ekonomi yang kompleks secara bersamaan.

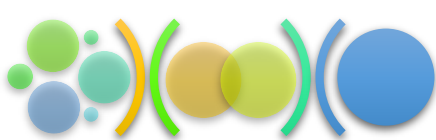
Algoritma AI dapat menganalisis kumpulan data yang luas untuk mengidentifikasi pola, korelasi, dan pertukaran di antara berbagai kriteria, membimbing para pengambil keputusan menuju pilihan yang terinformasi dan berbasis bukti. Platform GIS memfasilitasi visualisasi hubungan spasial dan integrasi data geospasial, memungkinkan para pemangku kepentingan



untuk menilai dampak spasial dari inisiatif pembangunan dan mengidentifikasi lokasi optimal untuk intervensi berkelanjutan.

Kombinasi AI dan GIS mendorong analisis skenario dan pemodelan prediktif, memungkinkan para pemangku kepentingan untuk mensimulasikan berbagai skenario pembangunan dan mengantisipasi dampak potensialnya terhadap ekosistem, komunitas, dan ekonomi. Pendekatan proaktif ini mendukung strategi manajemen adaptif, di mana keputusan dapat disesuaikan sebagai respons terhadap perubahan kondisi lingkungan dan umpan balik pemangku kepentingan.

Penggabungan AI dan GIS ke dalam kerangka kerja MCDM juga mendorong transparansi, keterlibatan pemangku kepentingan, dan kolaborasi interdisipliner. Dengan menyediakan wawasan yang mudah diakses dan dipahami, teknologi ini memfasilitasi proses pengambilan keputusan inklusif yang mempertimbangkan beragam perspektif dan meningkatkan akuntabilitas inisiatif pembangunan berkelanjutan. Intinya, pemanfaatan AI dan GIS dalam kerangka kerja MCDM meningkatkan kapasitas pemangku kepentingan untuk menavigasi kompleksitas pembangunan berkelanjutan secara efektif. Dengan memanfaatkan kekuatan wawasan berbasis data dan analisis spasial, para pengambil keputusan dapat mengejar jalur yang mendorong pengelolaan lingkungan, kesetaraan sosial, dan ketahanan ekonomi, sehingga mendorong pembangunan berkelanjutan untuk generasi sekarang dan masa depan.



BAB 2

ANALISIS KOMPREHENSIF MCDM GEOSPASIAL BERKELANJUTAN

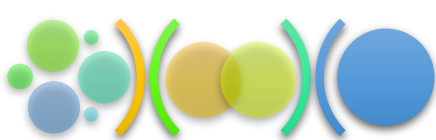
2.1 PENDAHULUAN

Pada tahun 1984, “Perserikatan Bangsa-Bangsa” (PBB) membentuk komite otonom dengan 22 anggota dari negara berkembang dan negara kaya untuk merumuskan kebijakan lingkungan jangka panjang bagi masyarakat dunia. “Komisi Dunia tentang Lingkungan dan Pembangunan” (WCED, 1987) merilis laporan “Masa Depan Kita Bersama,” yang secara umum diakui sebagai hal penting dalam membangun pembangunan berkelanjutan secara global dan membentuk masa depan bersama. Dalam laporan ini, istilah “pembangunan berkelanjutan” pertama kali diperkenalkan, yang didefinisikan sebagai pembangunan yang memenuhi tuntutan saat ini tanpa membahayakan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi tuntutan atau kebutuhan mereka.

Dalam laporan ini, komisi tersebut meneliti isu-isu lingkungan yang muncul dari proses pembangunan dari sudut pandang ekonomi, sosial, dan politik, bukan hanya dari aspek ilmiah. Gagasan mereka berfokus pada pengintegrasian strategi pembangunan, regulasi lingkungan, dan kemitraan global untuk mengatasi isu-isu lingkungan yang saling terkait dan prospek pertumbuhan. Pada tahun 2015, negara-negara anggota PBB menyepakati “Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan,” yang menyediakan peta jalan terpadu untuk kemakmuran dan perdamaian bagi manusia dan lingkungan saat ini dan di masa mendatang. Kebijakan inti didasarkan pada 17 “Tujuan Pembangunan Berkelanjutan” (SDGs), yang menandakan seruan mendesak untuk bertindak dari semua negara dalam kolaborasi global. SDGs bertujuan untuk memberantas kemiskinan dan kesulitan lainnya, menyediakan fasilitas pendidikan dan kesehatan, menghilangkan ketidaksetaraan, dan mendorong pertumbuhan ekonomi sambil mengatasi perubahan iklim dan melindungi lingkungan.

SDGs telah menggantikan “Tujuan Pembangunan Milenium” (MDGs) yang sebelumnya ditetapkan oleh PBB dan lebih menekankan peran peneliti daripada sebelumnya dalam menangani perubahan iklim, efisiensi energi, kesehatan, gizi, dan masalah pasokan air. Pelaksanaan pembangunan berkelanjutan yang efektif bergantung pada pemahaman manajemen sumber daya dan tantangan regional. Untuk tujuan ini, berbagai masalah sosial, ekonomi, dan lingkungan harus dipantau dan dimodelkan secara global. Penginderaan jauh (RS) adalah alat yang efisien untuk mengatasi tantangan ekologis dan sosial-ekonomi pada skala global. RS memungkinkan pemantauan sistem Bumi pada skala spasial dan temporal yang berbeda, memberikan informasi yang cepat dan akurat. RS sangat berguna untuk mengumpulkan data di daerah terpencil dan sulit diakses, menjadikannya pendekatan pengawasan utama.

Meskipun banyak metode dan teknik yang ada untuk menilai sumber daya alam dan bahaya yang mempengaruhinya, teknik RS telah digunakan sejak tahun 1970-an karena biaya akuisisi yang terjangkau dan kegunaannya yang besar dalam pengumpulan, analisis, dan



administrasi data. Metode dan pendekatan berbasis RS telah diterapkan untuk berbagai aplikasi pada berbagai skala waktu selama beberapa dekade terakhir. RS memberikan perspektif terpadu tentang informasi spasial pada tingkat lokal, regional, dan global, memungkinkan pengambilan keputusan dan tindakan yang lebih cepat. Dengan demikian, selama 20 tahun terakhir, RS telah banyak diterapkan di sektor pertanian; kehutanan; perikanan; solusi lingkungan; manajemen perkotaan; mitigasi bencana; dan lain-lain.

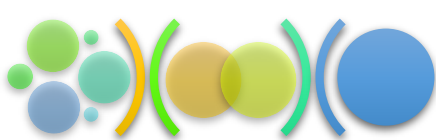
Saat ini, banyak penilaian dilakukan berdasarkan berbagai kriteria yang diperoleh dari kelompok ahli dan ditentukan sesuai dengan bobot yang diberikan. Tidak hanya ada tantangan signifikan yang membutuhkan beberapa kriteria, bahkan kriteria tertentu dapat berdampak pada tantangan tertentu; tetapi, untuk mencapai solusi ideal, semua pilihan harus sesuai dengan kriteria yang identik, yang mengarah pada pengambilan keputusan yang efektif dan terinformasi. Pengambilan keputusan multi-kriteria (MCDM) berkaitan dengan kerangka kerja dan solusi untuk masalah pengambilan keputusan dan perencanaan yang mencakup banyak kriteria.

Tujuan mendasar MCDM adalah untuk mendukung pengambil keputusan dan pemangku kepentingan setiap kali ada beberapa kemungkinan untuk menyelesaikan suatu masalah. Ketika tidak ada solusi ideal untuk masalah ini, menjadi perlu untuk memanfaatkan kecenderungan pengambil keputusan untuk memilih di antara alternatif. Dengan kemajuan teknologi baru dan algoritma modern, MCDM telah digunakan secara besar-besaran di setiap aspek kehidupan sosial dalam dua dekade terakhir. Beberapa aplikasi penting meliputi manajemen konstruksi, perencanaan konsumsi energi berkelanjutan, manajemen pembuangan limbah, proyek transportasi, pemilihan lokasi, perencanaan kota, dan pengembangan energi terbarukan.

Meskipun terdapat banyak publikasi tentang pendekatan MCDM yang digunakan di berbagai sektor, terdapat kekurangan pembahasan pembangunan berkelanjutan yang menggunakan MCDM dalam literatur. Sejak implementasi Kerangka Kerja Sendai pada tahun 2015, telah terjadi peningkatan kebutuhan akan aplikasi MCDM di berbagai sektor masyarakat. Oleh karena itu, pembahasan ini bertujuan untuk menyajikan tinjauan komprehensif tentang penelitian yang telah dipublikasikan yang menggunakan MCDM dan RS. Pendekatan ini akan membantu mensintesis pengetahuan yang telah kita miliki tentang topik ini dan diharapkan dapat merumuskan arah untuk masa depan tentang Pembahasan MCDM berbasis RS pada pembangunan berkelanjutan.

2.2 INDIKATOR KEBERLANJUTAN

Sejak akhir tahun 1980-an, seiring dengan semakin menonjolnya dampak lingkungan terhadap masyarakat, metrik kinerja yang terkait dengan keberlanjutan telah menjadi fokus penelitian arus utama. Beberapa pembahasan telah menggunakan "Biaya" sebagai indikator utama untuk menganalisis pertumbuhan ekonomi. Indikator kinerja ekonomi komprehensif lebih lanjut diberikan oleh pengembalian proyek atau pendapatan, yang mengungkapkan berapa banyak pendapatan tambahan yang dapat dihasilkan dari penyelesaian proyek yang efektif. Beberapa teknik digunakan untuk menilai profitabilitas, dengan nilai sekarang bersih



(NPV) menjadi strategi yang paling populer. Model pengembalian investasi menghitung waktu yang dibutuhkan untuk memulihkan investasi dan merupakan metode penting lainnya untuk mengevaluasi profitabilitas. “Return on Investment” (ROI) adalah indikator lebih lanjut dari kinerja ekonomi. Metrik ini memungkinkan untuk membandingkan pendapatan prospektif dari berbagai proyek.

Selain pertimbangan ekonomi, kinerja lingkungan juga telah dipertimbangkan terkait pemilihan proyek. Dalam hal terkait sebelumnya, beberapa sektor, terutama manufaktur dan konstruksi, bertujuan untuk memasukkan penilaian lingkungan ke dalam manajemen proyek. Secara umum, kinerja lingkungan digunakan sebagai skenario yang membantu pengambilan keputusan dalam manajemen proyek. Beberapa penelitian menggunakan metode “Life Cycle Assessment” (LCA) dan desain ramah lingkungan dalam “Project Portfolio Selection” (PPS). “Environmental Quality Function Deployment” (EQFD), matriks “Materials, Energy, and Toxicity” (MET), dan “Environmental Failure Mode Effects Analysis” (E-FMEA) adalah beberapa contoh metrik kinerja lingkungan yang digunakan dalam manajemen proyek.

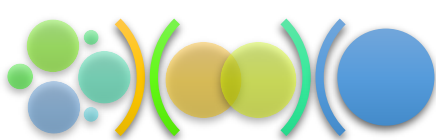
Komponen ketiga dalam mengevaluasi keberlanjutan adalah komponen sosial. Keberlanjutan sosial kurang mendapat perhatian dibandingkan keberlanjutan ekonomi dan lingkungan karena penjelasan yang kompleks dan kuantifikasi yang menantang. Namun, karena mencerminkan standar kehidupan manusia dan memiliki dampak signifikan pada masyarakat, keberlanjutan sosial layak mendapat fokus dan upaya yang jauh lebih besar. Benoît et al. mengkategorikan indikator penilaian sosial ke dalam lima kelompok: tenaga kerja, masyarakat, komunitas lokal, konsumen, dan pemangku kepentingan rantai nilai. Klasifikasi mereka sangat bermanfaat dalam penerapan penelitian tentang penilaian keberlanjutan sosial. Komite Penasihat Ilmiah dan Teknis UNEP telah menyediakan dokumentasi tentang standar dan pendekatan mengenai Analisis Siklus Hidup Sosial (Social-LCA) sebagai pelengkap penilaian keberlanjutan sosial. Dokumen-dokumen ini selanjutnya digunakan dalam beberapa pembahasan untuk melakukan penilaian sosial.

Sdg Pbb: Di Mana Posisi Kita Saat Ini?

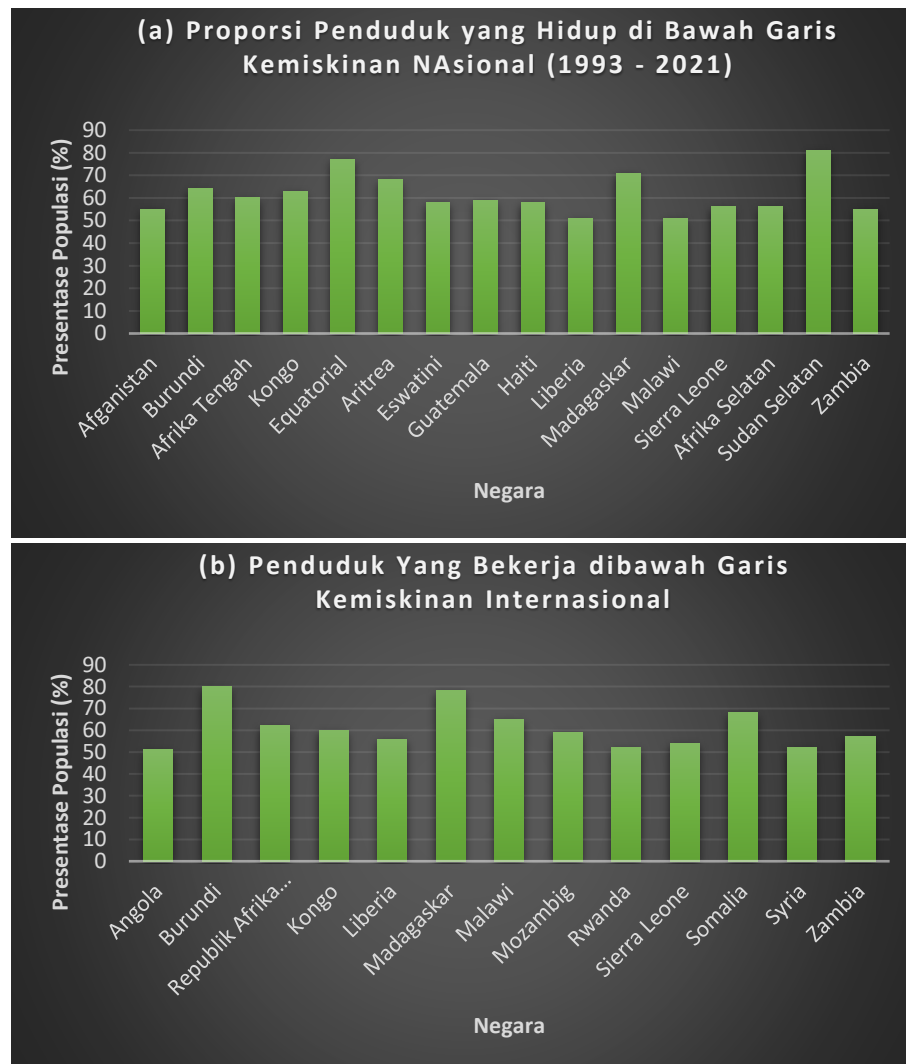
Meskipun “Departemen Urusan Ekonomi dan Sosial Perserikatan Bangsa-Bangsa” (UNDESA) telah mempresentasikan 17 SDG, tidak semua tujuan tersebut dapat diatasi dengan bantuan RS dan MCDM. Survei literatur yang menyeluruh menghasilkan sektor-sektor SDG yang menonjol yang dapat didekati dan dikuantifikasi menggunakan RS dan MCDM. Deskripsi singkat dari tujuan-tujuan tersebut disajikan di bawah ini.

Tujuan 1 – Tanpa Kemiskinan

Definisi kemiskinan ekstrem adalah hidup dengan daya beli kurang dari Rp21.500 per hari pada tahun 2017. Namun, prevalensi definisi ini menurun secara signifikan selama beberapa dekade terakhir hingga pandemi COVID-19 melanda, yang membalikkan tren positif ini. Persentase orang yang hidup dalam kemiskinan ekstrem turun dari 10,8% pada tahun 2015 menjadi 8,4% pada tahun 2019. Namun, selama periode antara tahun 2015 dan 2019, tingkat penurunan tahunan rata-rata hanya 0,54%, yang kurang dari setengah dari tingkat 1,28% yang diamati antara tahun 2000 dan 2014 (Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), 2023).



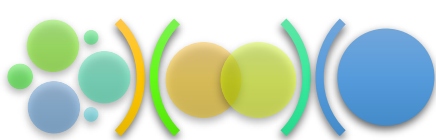
Gambar 2.1a menunjukkan negara-negara dengan lebih dari 50% penduduknya hidup di bawah garis kemiskinan nasional dan Gambar 2.1b menunjukkan negara-negara dengan lebih dari 50% penduduk yang bekerja di bawah garis kemiskinan internasional. Data menunjukkan bahwa mayoritas negara Afrika menderita kemiskinan akut, dan lapangan kerja saja tidak dapat mengangkat mereka keluar dari garis kemiskinan. Pada tahun 2020, jumlah orang yang hidup dalam kemiskinan ekstrem meningkat sebesar 90 juta menjadi total 724 juta, membalikkan hampir tiga tahun kemajuan dalam pengurangan kemiskinan.



Gambar 2.1 (a) Negara-negara dengan lebih dari 50% penduduknya hidup di bawah garis kemiskinan nasional dan (b) negara-negara dengan lebih dari 50% penduduk yang bekerja di bawah garis kemiskinan internasional.

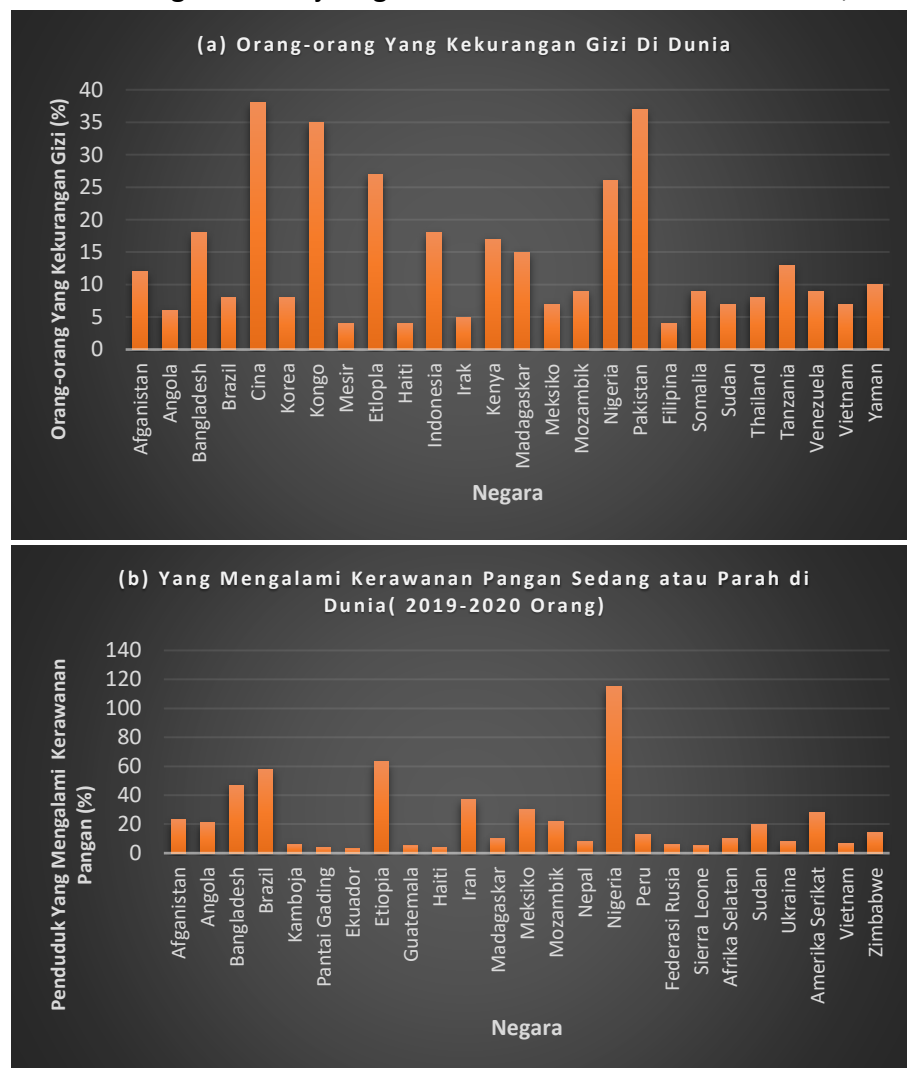
Tujuan 2 – Nol Kelaparan

Jumlah orang di seluruh dunia yang menderita kelaparan kronis meningkat sebesar 9,2% pada tahun 2022, naik dari 7,9% pada tahun 2019. Menurut indeks kelaparan, sekitar 735 juta orang di seluruh dunia akan kekurangan makanan yang cukup pada tahun 2022, angka yang mengejutkan yaitu 122 juta lebih banyak daripada tahun 2019. Selain itu, sekitar 2,4



miliar atau 29,6% dari populasi global menderita kerawanan pangan mulai dari tingkat sedang hingga parah, yang menunjukkan bahwa mereka kekurangan akses reguler terhadap makanan yang cukup. Meskipun Afrika memiliki proporsi penduduk yang menderita kelaparan lebih besar daripada wilayah lain, Asia memiliki jumlah penderita kelaparan tertinggi.

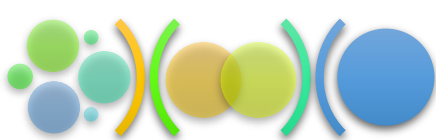
Lebih dari 600 juta orang di seluruh dunia diperkirakan akan kekurangan gizi pada tahun 2030, yang menekankan betapa sulitnya mencapai tujuan nol kelaparan. Gambar 2.2a dan b menunjukkan negara-negara dengan tingkat kekurangan gizi tertinggi di dunia. India dengan 224,3 juta penduduk yang kekurangan gizi menduduki peringkat teratas dalam basis data tersebut karena negara ini berjuang untuk memberi makan lebih dari 1,4 miliar orang.



Gambar 2.2 (a) Negara-negara dengan lebih dari 5% penduduk kekurangan gizi dan (b) negara-negara dengan lebih dari 5% penduduk yang mengalami kerawanan pangan sedang atau parah.

Tujuan 6 – Air Bersih dan Sanitasi

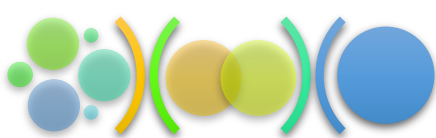
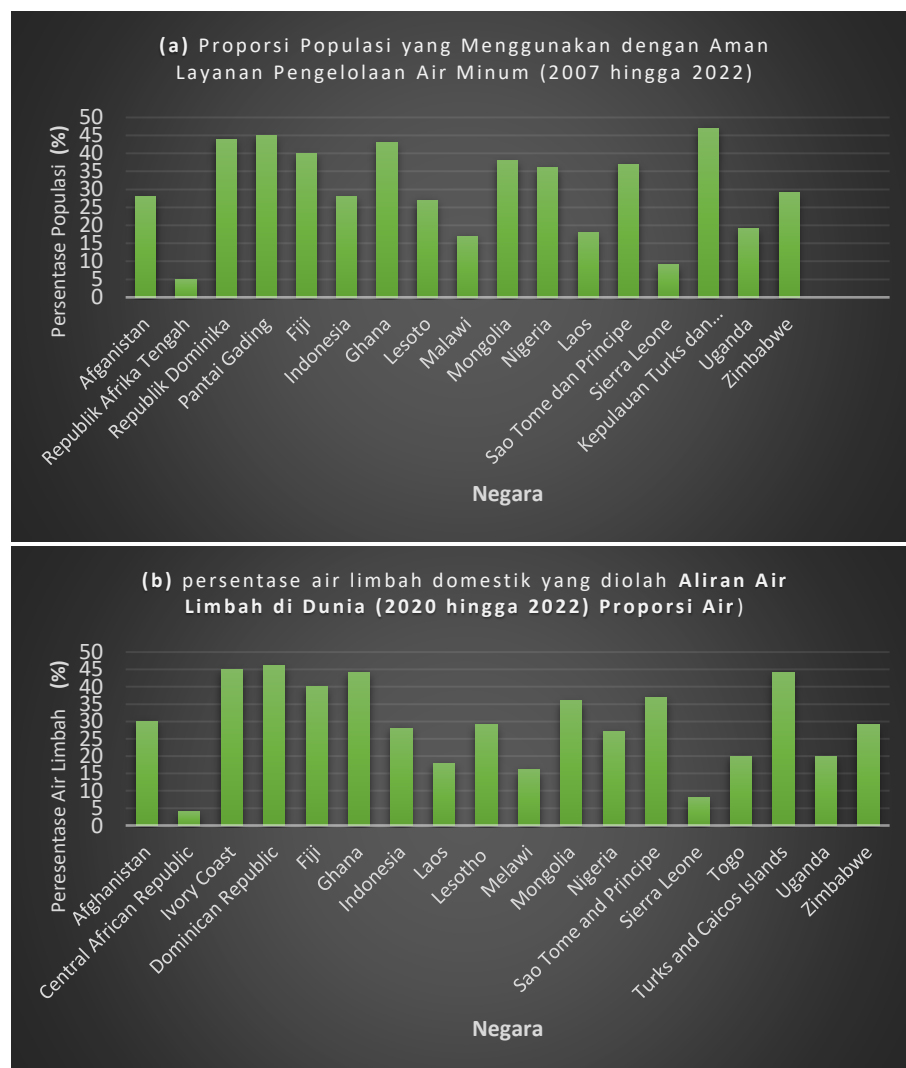
Proporsi penduduk global yang memiliki akses memadai terhadap air minum bersih dan aman meningkat dari 49% menjadi 57% antara tahun 2015 dan 2022. Kemudian, proporsi penduduk yang memiliki akses terhadap layanan sanitasi yang aman meningkat dari 49%



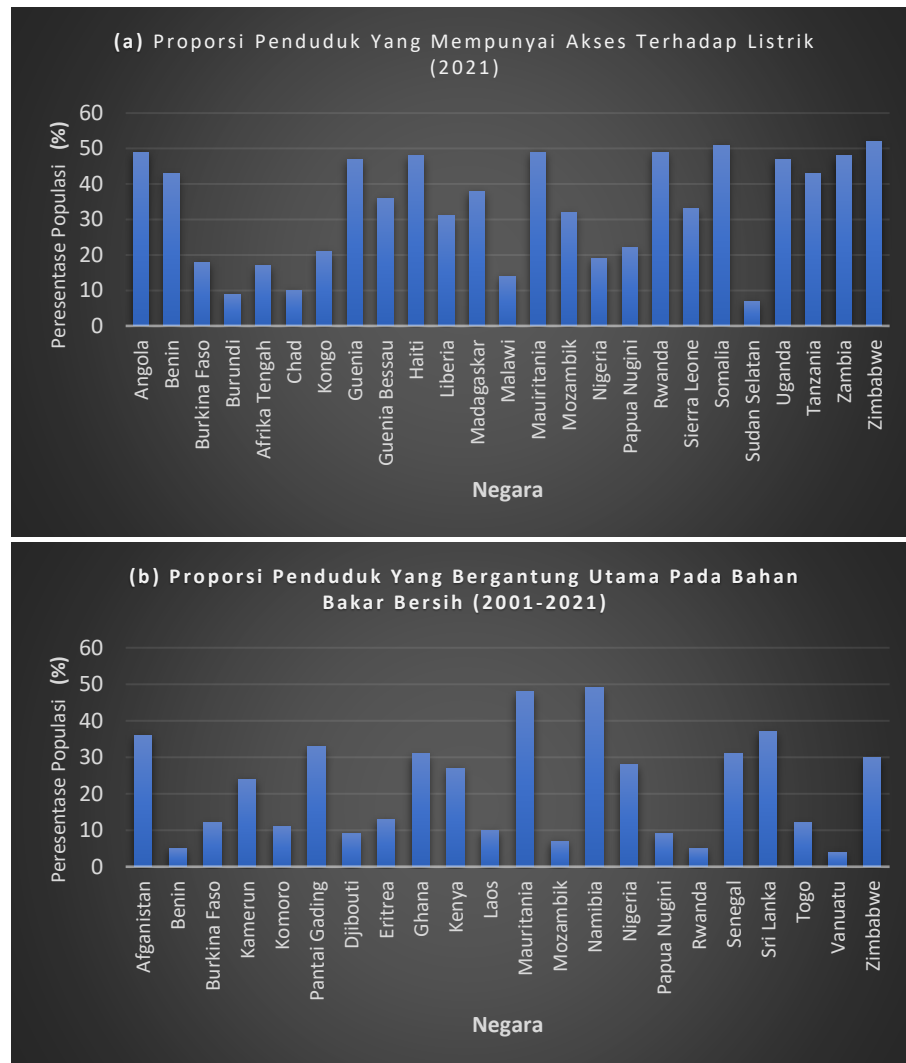
menjadi 57%, dan mereka yang memiliki akses terhadap layanan kebersihan dasar meningkat dari 67% menjadi 75%. Gambar 2.3a dan b menunjukkan kondisi terkini air minum dan pengolahan air limbah domestik di negara-negara dunia ketiga. Pada tahun 2022, populasi sebanyak 2,2 miliar jiwa masih belum memiliki akses yang memadai terhadap air minum yang aman, dan sekitar 703 juta jiwa kekurangan akses terhadap layanan air dasar. Selain itu, 1,5 miliar jiwa kekurangan akses terhadap sanitasi dasar, dan hampir 2 miliar jiwa tidak memiliki fasilitas cuci tangan rumah tangga dasar yang memadai, dengan 653 juta jiwa sama sekali tidak memiliki fasilitas apa pun.

Tujuan 7 – Energi Terjangkau dan Bersih

Dari 87% pada tahun 2015 menjadi 91% pada tahun 2021, lebih dari 800 juta orang akan memiliki akses ke energi listrik secara global. Namun, pada tahun 2021, 675 juta orang yang tinggal di negara-negara kurang berkembang (LDCs) masih belum memiliki akses ke listrik (Gambar 2.4a). Dengan tren saat ini, pada tahun 2030, 660 juta orang masih akan kekurangan akses ke energi bersih, terutama di Afrika (Gambar 2.4b).



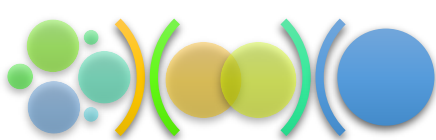
Gambar 2.3 (a) Negara-negara dengan < 50% penduduk yang menggunakan layanan air minum aman dan 2.3(b) negara-negara dengan < 50% air limbah domestik yang diolah dengan aman.



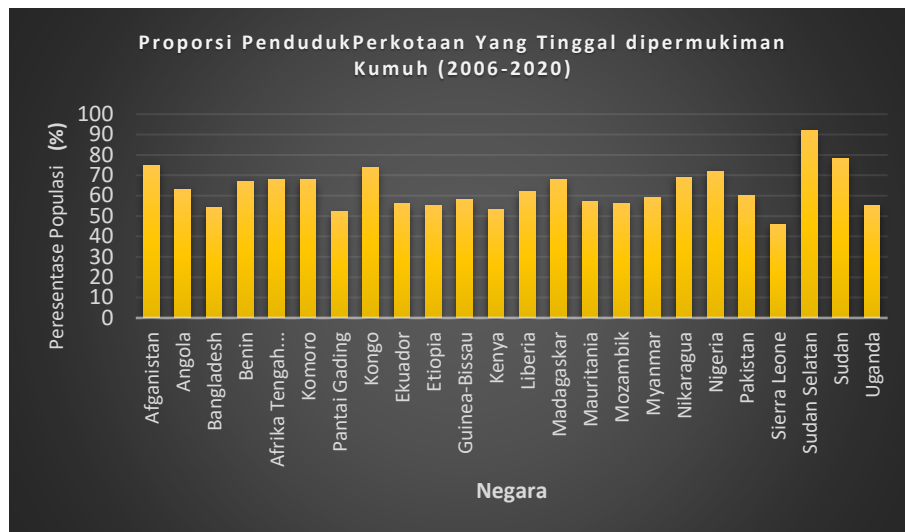
Gambar 2.4 (a) Negara-negara dengan < 50% penduduk yang memiliki akses ke listrik dan (b) negara-negara dengan < 50% penduduk yang memiliki akses ke sumber energi bersih.

Tujuan 11 – Komunitas dan Kota Berkelanjutan

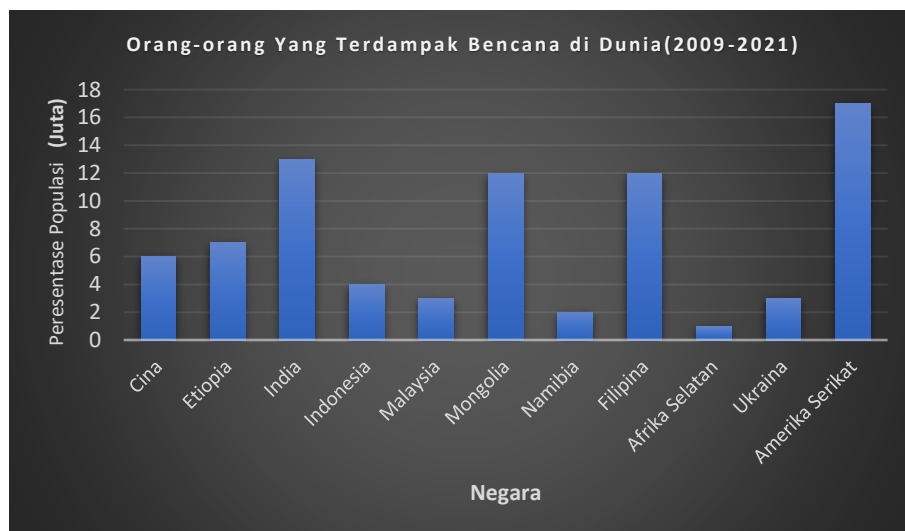
Pada November 2022, populasi dunia mencapai 8 miliar; 55% di antaranya tinggal di kota, dan angka ini diperkirakan akan meningkat menjadi 70% pada tahun 2050. Mayoritas pertumbuhan perkotaan terkonsentrasi di kota-kota kecil dan menengah, yang memperburuk kesenjangan dan kemiskinan perkotaan. Meskipun proporsi penduduk perkotaan yang tinggal di permukiman kumuh sedikit menurun dari 25,4% pada tahun 2014 menjadi 24,2% pada tahun 2020, populasi penghuni permukiman kumuh secara keseluruhan masih meningkat karena urbanisasi (Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), 2023), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Jumlah penduduk perkotaan yang tinggal di permukiman kumuh atau kondisi serupa dengan permukiman kumuh diperkirakan mencapai 1,1 miliar pada tahun 2020. Lebih



lanjut, diperkirakan akan ada tambahan populasi sebanyak 2 miliar orang yang tinggal di permukiman serupa selama 30 tahun ke depan.



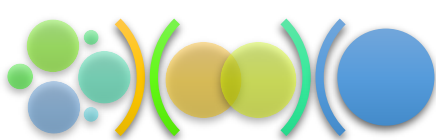
Gambar 2.5 Negara-negara dengan lebih dari 50% penduduk perkotaan tinggal di permukiman kumuh.



Gambar 2.6 Negara-negara dengan lebih dari 1 juta penduduk yang terdampak bencana alam.

Tujuan 13 – Aksi Iklim

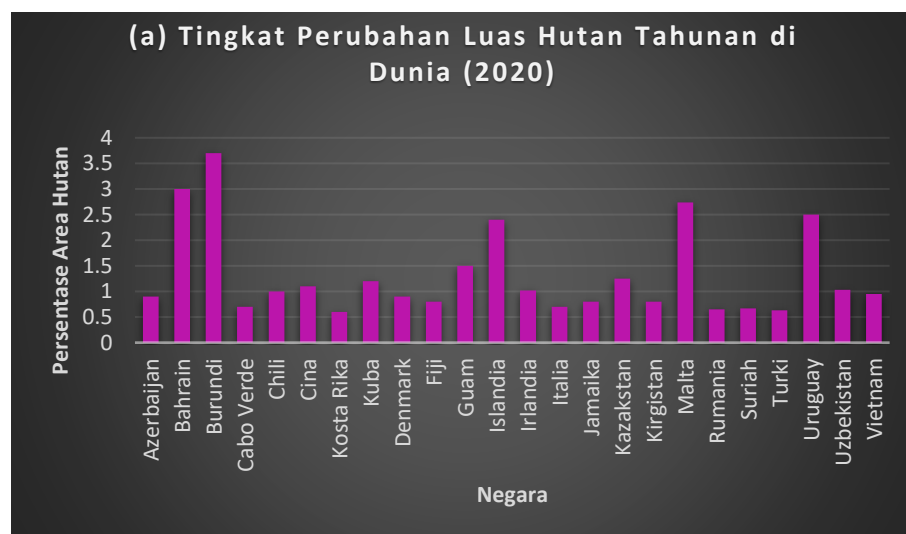
Menurut laporan sintesis terbaru dari “Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim” (IPCC), merupakan fakta yang tak terbantahkan bahwa aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil, penggunaan lahan dan energi yang tidak berkelanjutan, dan pola konsumsi dan produksi yang tidak berkelanjutan, telah menyebabkan suhu global meningkat sebesar 1,1°C dibandingkan dengan tingkat pra-industri (IPCC, 2021). Meskipun kontribusinya terhadap perubahan iklim paling kecil, komunitas yang kurang beruntung terkena dampak secara tidak proporsional.



Selama tahun 2010–2020, korban jiwa akibat badai, banjir, dan kekeringan 15 kali lebih tinggi di tempat-tempat yang sangat rentan (Gambar 2.6). Mayoritas wilayah yang sangat rentan di dunia terletak di Asia Tenggara, dengan populasi berkisar antara 3,3 miliar hingga 3,6 miliar jiwa. Ekosistem telah sangat menderita akibat dampak buruk perubahan iklim, yang meliputi kelangkaan pangan, kerusakan infrastruktur, perpindahan penduduk, dan hilangnya nyawa manusia.

Tujuan 14 – Kehidupan di Bawah Air

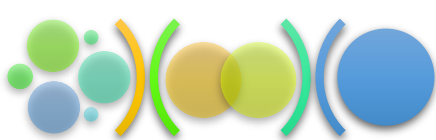
Akibat intensifikasi eutrofikasi, pengasaman, pemanasan, dan sampah plastik, lautan berada dalam keadaan darurat. Selain itu, tren penangkapan ikan berlebihan yang mengkhawatirkan terus berlanjut, yang bertanggung jawab atas hilangnya sekitar sepertiga populasi ikan di dunia. Beban nutrisi pada wilayah pesisir merupakan akibat dari praktik pertanian, akuakultur, dan pengelolaan air limbah, yang telah menyebabkan eutrofikasi pesisir yang luas dan pertumbuhan alga. Pertumbuhan alga ini memiliki konsekuensi negatif, termasuk penipisan oksigen, kerusakan kehidupan laut, kontaminasi makhluk air, dan kerusakan terumbu karang, dan lamun. Meskipun ada hukum internasional untuk melindungi kawasan keanekaragaman hayati laut, keberhasilan implementasinya sangat rendah di seluruh dunia (Gambar 2.7b).



Gambar 2.7 (a) Negara-negara dengan perubahan lebih dari 0,5% pada area hutan dan (b) negara-negara dengan kurang dari 20% area keanekaragaman hayati laut yang dilindungi oleh hukum.

Tujuan 15 – Kehidupan di Darat

Hutan sangat penting dalam menghambat perubahan iklim dan menyediakan barang, jasa, dan mata pencaharian yang penting. Namun, tutupan hutan bersih menurun sekitar 100 juta hektar selama dua dekade sebelumnya (Gambar 2.7a). Antara tahun 2000 dan 2020, tutupan hutan global menurun sebesar 0,7% dari 4,2 miliar menjadi 4,1 miliar hektar. Ekspansi pertanian secara langsung bertanggung jawab atas sekitar 90% deforestasi di seluruh dunia



(dengan 49,5% dan 38,5% disebabkan oleh pertanian dan penggembalaan ternak). Antara tahun 2000 dan 2018, deforestasi di seluruh dunia disebabkan oleh panen minyak sawit, yang menyumbang sekitar 7% dari keseluruhan deforestasi.

2.3 MCDM UNTUK PEMBANGUNAN MASYARAKAT TANGGUH

MCDM dapat membantu mengembangkan solusi untuk masalah spasial lokal, regional, dan global. Dipadukan dengan RS (Resolution Support), sistem informasi geografis (GIS), dan teknik Kecerdasan Buatan (AI) yang baru dikembangkan, penerapan MCDM (Multidimensional Decision Making) sangat luas. Bagian ini memberikan informasi komprehensif tentang berbagai aplikasi MCDM di berbagai sektor masyarakat.

Mcdm Dalam Pengentasan Kemiskinan

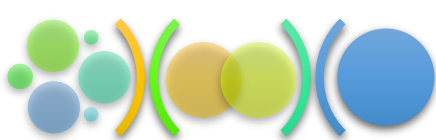
Berbagai negara telah menerapkan indikator kemiskinan multidimensi untuk menilai berbagai aspek kemiskinan, termasuk akses ke layanan penting, pekerjaan, pendidikan, kesehatan, dan saling ketergantungan berbagai tujuan keluarga. Meskipun menerapkan kebijakan serupa, terdapat kekurangan kemajuan yang signifikan dalam mengurangi kemiskinan multidimensi nasional. MCDM dapat menjadi alat yang signifikan dalam mengatasi masalah kemiskinan dan mengidentifikasi solusi yang kuat. Misalnya, pengentasan kemiskinan melalui energi surya merupakan salah satu cara untuk membantu penduduk marginal menjadi stabil secara ekonomi. Tao dan rekan-rekan. menerapkan metode ini di Yunnan, Tiongkok, dengan membahas empat aspek utama: ekonomi, teknologi, masyarakat, dan lingkungan. MCDM juga berguna untuk menentukan jenis kemiskinan dan indikator kemiskinan untuk wilayah tertentu.

Untuk mengatasi masalah pemberian nilai unik pada indikator tertentu, Ming et al. menggunakan himpunan fuzzy Pythagoras (PFS) alih-alih algoritma tipikal yang hanya menggunakan satu penilaian indikasi untuk melindungi nilai potensial dari elemen positif dan negatif. Efektivitas RS dan MCDM sebagai alat pengentasan kemiskinan telah didokumentasikan dengan baik oleh berbagai ilmuwan. Sayangnya, jumlah publikasi tentang subjek ini masih cukup terbatas, terutama untuk negara-negara dunia ketiga dan negara berkembang di mana alat-alat ini sangat penting. Pembahasan penting tentang masalah ini telah dilakukan oleh Ke et al., Budiman et al., Olajuyigbe et al. dan Ariyani.

Mcdm Dalam Mencapai Nol Kelaparan

Secara khusus, tujuan “Nol Kelaparan” melambangkan pengakuan yang sudah lama tertunda bahwa industrialisasi pertanian membahayakan proses ekosistem penting yang mendukung pasokan pangan. Konsekuensinya meliputi hilangnya keanekaragaman hayati, peningkatan ancaman hama, erosi tanah, hilangnya bahan organik dalam tanah, emisi Gas Rumah Kaca (GRK), eutrofikasi, dan pencemaran badan air. Tiwari et al. menciptakan kerangka kerja MCDM yang secara efektif menggabungkan kriteria keberlanjutan dan perspektif masyarakat lokal untuk memfasilitasi pengambilan keputusan yang tepat di bidang lingkungan dan ekonomi.

Selain analisis kesesuaian lokasi, metode MCDM dapat digunakan di bidang pertanian untuk manajemen risiko rantai pasokan, masalah distribusi, manajemen pertanian irigasi,



analisis biaya-manfaat, dan lain sebagainya. Kemajuan teknologi RS dalam tiga dekade terakhir telah memberikan dampak yang besar pada pertanian. MCDM diterapkan dengan RS untuk analisis kesesuaian lahan di daerah perbukitan, penilaian zona potensi air tanah, penilaian kerentanan kekeringan, dan lain-lain.

Mcdm Dalam Menyediakan Air Bersih Dan Sanitasi

Instalasi pengolahan air limbah (STP) di seluruh dunia yang menggunakan metode usang saat ini menghadapi tantangan baru karena meningkatnya kekhawatiran mengenai keberlanjutan, intensitas sumber daya, jejak ekologis, emisi sekunder, dan dampak siklus hidup. Pengambil keputusan harus mengevaluasi sistem pengolahan air limbah berdasarkan keandalan, keterjangkauan, keberlanjutan, dan fungsionalitas. Kemajuan terkini dalam pendekatan MCDM telah membantu evaluasi yang kuat ini dengan mengintegrasikan pendekatan "Preference Ranking Organization Approach for Enrichment of Evaluations" (PROMETHEE) di bawah pendekatan MCDM.

Pendekatan MCDM telah banyak digunakan di berbagai bidang seperti pengelolaan air limbah perkotaan; menilai keandalan jangka panjang sistem perpipaan saluran pembuangan; mengevaluasi pasokan air alternatif; mengembangkan sanitasi berkelanjutan, dan aplikasi serupa lainnya. Selain itu, MCDM saat ini digunakan untuk pemulihan sumber daya dari air limbah perkotaan, pengembangan indeks kualitas air, dan penyediaan air darurat setelah bencana alam.

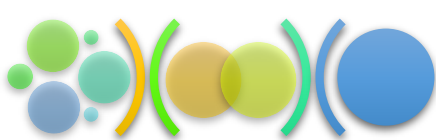
Mcdm Di Sektor Energi

Sistem energi sangat penting bagi pertumbuhan ekonomi dan sosial suatu negara serta standar hidup penduduknya. Meningkatnya permintaan energi untuk bahan bakar fosil memiliki implikasi global yang luas. Pelepasan kontaminan kimia beracun, gas rumah kaca seperti CO₂, dan kontaminan udara lainnya merupakan masalah lingkungan yang signifikan. Penggunaan MCDM dalam pengambilan keputusan energi berkelanjutan menawarkan cara untuk mengatasi masalah tersebut, dan telah menarik minat para pengambil keputusan. Ini adalah pendekatan yang didasarkan pada penilaian operasional dan pengambilan keputusan untuk mengatasi masalah kompleks yang meliputi tingkat ketidakpastian yang tinggi, tujuan yang bersaing, berbagai jenis informasi, berbagai kepentingan, dan sudut pandang.

Pendekatan ini juga mempertimbangkan sifat multifaset dan dinamis dari struktur biofisik dan sosial-ekonomi. Di zaman modern, MCDM digunakan untuk menganalisis pasokan energi dalam mata pencaharian pedesaan, perencanaan dan pengembangan energi berkelanjutan, pemilihan lokasi untuk pengembangan energi terbarukan, dan pengelolaan masalah. MCDM telah terbukti membantu mengidentifikasi zona optimal untuk pemanenan energi angin dengan menggunakan RS dan pemasangan panel surya.

Aplikasi Mcdm Untuk Kota Dan Komunitas Berkelanjutan

Keberlanjutan perkotaan dapat dilihat sebagai perencanaan proyek perkotaan saat ini dan masa depan dengan cara yang efisien sumber daya dan ramah lingkungan. Dengan demikian, tujuannya adalah untuk memajukan kemakmuran ekonomi dan kesejahteraan manusia untuk mengurangi dan beradaptasi dengan konsekuensi buruk perubahan iklim. Ali-Toudert dan rekan-rekan. merancang kerangka kerja berdasarkan keberlanjutan perkotaan



multi-kriteria yang disebut CAMSUD (Metode Penilaian Komprehensif untuk Pembangunan Perkotaan Berkelanjutan), yang membahas tiga pilar keberlanjutan: masyarakat, ekonomi, dan ekologi. Implementasi pendekatan “Mekanisme Pembangunan Bersih” (CDM) sangat penting untuk mempercepat pertumbuhan dan pembangunan sosial-ekonomi.

Banyak organisasi, termasuk IPCC, UNFCCC (“Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim”), dan UNEP (“Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa”), bertujuan untuk meminimalkan emisi GHG dengan menerapkan kebijakan rendah karbon dan intensif sumber daya untuk mencapai keberlanjutan. Ali dan rekan-rekan. menerapkan MCDM dan model Bilan Carbone untuk mengevaluasi analisis biaya-manfaat dari pengurangan emisi karbon langsung. RS dan GIS dapat digunakan untuk mengatasi berbagai masalah perkotaan, seperti pengelolaan sampah padat, penilaian tanah longsor, pemetaan kerentanan banjir, penilaian layanan kesehatan, ekstraksi dan pengolahan mineral, konstruksi, dan teknik sipil.

Mcdm Dalam Perubahan Iklim

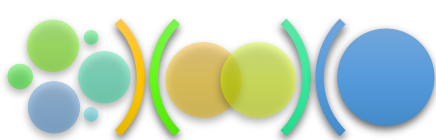
Manajemen risiko untuk inisiatif lingkungan membutuhkan penanganan penemuan ilmiah dengan masukan yang beragam dari berbagai pemangku kepentingan dengan tujuan dan prioritas yang berbeda. Dalam keadaan ini, pendekatan analitik keputusan yang metodis adalah cara yang paling berhasil untuk mengatasi kesulitan perilaku dan teknis yang rumit. Manajer risiko membuat keputusan berdasarkan empat sumber informasi utama: (1) hasil analisis risiko, (2) preferensi pemangku kepentingan, (3) analisis biaya, dan (4) investigasi pemodelan dan pemantauan.

Sejauh ini, MCDM telah digunakan untuk analisis kerentanan terkait iklim, evaluasi tekanan panas, manajemen sumber daya air, pengembangan kebijakan baru, dan lain-lain. Namun, penggunaan utama MCDM dapat diamati dalam rekomendasi dan formulasi kebijakan.

Mcdm Dalam Pengelolaan Kelautan Dan Lingkungan

Pendekatan pengelolaan lingkungan telah banyak berubah dalam tiga dekade terakhir. Masalah polusi yang signifikan secara tradisional dikendalikan oleh undang-undang, standar, dan penetapan mekanisme pengendalian pada tahun 1970-an dan 1980-an. Rencana pengelolaan lingkungan yang lebih proaktif telah dikembangkan sejak awal tahun 1990-an karena dimasukkannya unsur-unsur sosial-ekonomi dan kebutuhan akan keterlibatan banyak pemangku kepentingan dalam strategi konservasi lingkungan jangka panjang. Proyek-proyek ini bertujuan untuk menjamin keberlanjutan ekonomi dan lingkungan serta pengembangan inisiatif sukarela berbasis pasar yang saat ini semakin populer.

Dalam dua dekade terakhir, kita telah menyaksikan beberapa aplikasi MCDM di sektor oseanografi, seperti identifikasi zona penangkapan ikan potensial, manajemen zona pesisir terpadu, pembuatan kawasan lindung laut, identifikasi zona potensial budidaya rumput laut, dan pemilihan lokasi untuk regenerasi terumbu karang. Selain itu, MCDM digunakan untuk mengevaluasi potensi ekologis, penilaian risiko ekologis, penilaian jasa ekosistem, pengelolaan sumber daya alam, dan lain-lain.



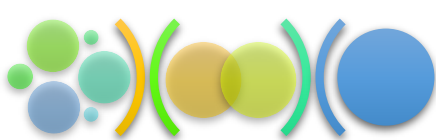
2.4 PENGOLAHAN DATA DALAM PENGAMBILAN KEPUTUSAN

Seperti yang disebutkan di atas, MCDM merupakan salah satu metode pengambilan keputusan yang paling dapat diandalkan karena mempertimbangkan beberapa aspek kualitatif dan kuantitatif yang harus diubah untuk mencapai hasil yang paling menguntungkan. Selama bertahun-tahun, beberapa peneliti telah menciptakan atau meningkatkan beberapa teknik dan jenis MCDM yang berbeda. Pendekatan-pendekatan ini terutama berbeda dalam hal seberapa canggih algoritma yang digunakan, bagaimana mereka memberi bobot pada kriteria, dan bagaimana mereka merepresentasikan kriteria evaluasi preferensi.

Terdapat beberapa pendekatan MCDM yang tersedia dalam literatur yang diterbitkan. Pendekatan-pendekatan ini meliputi “Proses Hierarki Analitik” (AHP), “Proses Jaringan Analitik” (ANP), “Pendekatan Bobot Jumlah” (SW), “Teori Fungsi Nilai Multi-Atribut” (MAVT), “Teori Fungsi Utilitas Multi-Atribut” (MAUT), “Eliminasi dan Pilihan yang Mengekspresikan Realitas” (ELECTRE), dan “Teknik untuk Urutan Preferensi berdasarkan Kesamaan dengan Solusi Ideal” (TOPSIS). Solusi kompromi harus dicari karena, dalam sebagian besar masalah multi-kriteria, tidak ada solusi ideal yang dapat memenuhi semua kriteria sekaligus.

Pendekatan dan teknologi MCDA yang disebutkan di atas dapat membantu dalam membuat pilihan lingkungan dalam kerangka manajemen tradisional, tetapi potensi penuhnya menjadi jelas ketika dikombinasikan dengan manajemen yang adaptif. Dalam pendekatan konvensional, strategi manajemen yang paling sesuai dipilih, dan setelah diimplementasikan, efektivitasnya mungkin tidak dievaluasi secara rutin. Namun, pendekatan tersebut pasti akan dievaluasi pada titik tertentu, dan jika tidak berhasil, pendekatan alternatif kemungkinan akan diterapkan. Dalam paradigma ini, setiap modifikasi terhadap metode manajemen atau pengakuan adanya ambiguitas terkait sistem yang dikelola dapat dianggap sebagai kegagalan, dan tujuan atau sasaran yang telah ditetapkan perlu dinilai ulang secara berkala.

Manajemen adaptif mengakui sistem alam, yang pada dasarnya tidak pasti, dan bertujuan untuk meminimalkan ketidakpastian ini dengan mengumpulkan data tentang sistem yang diatur. Terdapat dua jenis utama manajemen adaptif: aktif dan pasif. Kedua bentuk tersebut melibatkan penetapan tujuan, pemodelan sistem, serta pemilihan dan penerapan strategi manajemen. Mengintegrasikan pengetahuan lokal masyarakat adat ke dalam manajemen adaptif untuk pengurangan risiko bencana sangat penting, dan MCDM menyediakan platform yang efektif untuk mencapai hal ini. Kesiapan, mitigasi, dan adaptasi bencana dapat diintegrasikan secara mulus ke dalam strategi yang layak dengan bantuan MCDM. Meskipun sebagian besar negara telah menerapkan MCDM dalam manajemen bencana, masih terdapat kurangnya kesadaran dan kebijakan yang sejalan dengan Kerangka Kerja Sendai (Gambar 2.8).





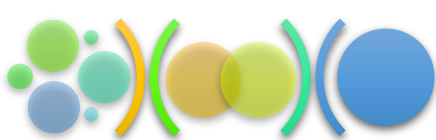
Gambar 2.8 Negara-negara dengan skor <0,5 dari 1 dalam menerapkan pendekatan pengurangan risiko bencana nasional sesuai dengan Kerangka Kerja Sendai.

Dalam konteks ini, penting untuk mengangkat pembahasan kasus oleh Kiker dan rekan-rekan., yang menggarisbawahi bahwa manajemen adaptif telah digunakan sebagai teknik karena pemahaman yang ada saat ini tidak cukup untuk restorasi ekologis. Kemudian, McDaniels dan Gregory juga menyarankan bahwa pengambilan keputusan manajerial harus mencakup pembelajaran sebagai tujuan. Keterlibatan pemangku kepentingan sangat penting untuk manajemen adaptif. Semua pemangku kepentingan yang terlibat dalam proses tersebut, termasuk masyarakat umum, bisnis, akademisi, dan organisasi pemerintah, harus merasa terwakili dan mendapatkan informasi. Beberapa pembahasan kasus telah menyoroti pentingnya keterlibatan pemangku kepentingan dalam manajemen adaptif.

2.5 INFORMASI PENEMUAN TERBARU SAAT INI

Banyak ilmuwan berpendapat bahwa MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) bersama dengan manajemen adaptif akan menawarkan fondasi yang kuat untuk berbagai masalah manajemen lingkungan di masa depan. Hal ini akan memungkinkan pengambilan keputusan yang terorganisir dan tepat, serta modifikasi keputusan tersebut sebagai respons terhadap hasilnya. Di masa depan, akan dibutuhkan kerangka kerja komprehensif untuk memandu pengambilan keputusan lingkungan. Elemen penting pertama dalam pengambilan keputusan adalah memiliki perpaduan orang yang tepat. Pengambil keputusan, ilmuwan, insinyur, dan pemangku kepentingan adalah tiga kelompok atau divisi utama yang aktivitas dan tingkat partisipasinya sangat penting.

Meskipun keanggotaan dan tanggung jawab dari ketiga kategori ini dapat bervariasi atau tumpang tindih, fungsinya sangat penting untuk memaksimalkan pentingnya masukan manusia dalam sistem pengambilan keputusan. Setiap kelompok memiliki perspektif uniknya sendiri tentang dunia, pendekatan pemecahan masalah, dan rasa tanggung jawab sosial. Sebagian besar waktu yang dihabiskan oleh pembuat kebijakan dan pengambil keputusan adalah untuk mengidentifikasi konteks masalah dan batasan keseluruhan keputusan. Mereka



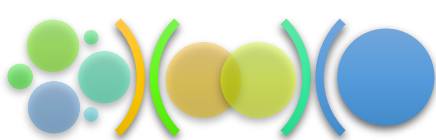
juga dapat bertanggung jawab untuk membuat pilihan akhir dan melaksanakan kebijakan yang menyertainya.

Para pemangku kepentingan dapat membantu dalam mendefinisikan masalah, tetapi kontribusi utama mereka berupa standar kinerja dan penilaian nilai yang menyeimbangkan berbagai kriteria keberhasilan. Tergantung pada masalah dan kerangka peraturan, para pemangku kepentingan mungkin memiliki peran dalam menilai dan memilih alternatif akhir. Peran para ilmuwan dan insinyur dalam menentukan pilihan yang berhasil sangat penting. Mereka memberikan pengukuran dan perkiraan yang tepat tentang kriteria yang diperlukan, tanpa menyisakan ruang untuk kesalahan. Kerangka kerja ini dapat menyelesaikan pengambilan keputusan yang kompleks di masa depan, baik melalui implementasi langsung atau dengan mengulangi setiap fase masalah.

2.6 KESIMPULAN

Dalam bab ini memberikan tinjauan menyeluruh tentang investigasi MCDM dan RS berbasis pada pembangunan berkelanjutan. Operasi berkelanjutan memerlukan metode dan kerangka kerja yang mendukung fungsi organisasi sambil mencapai berbagai tujuan, termasuk memaksimalkan ekuitas pemangku kepentingan dan efisiensi keuangan sambil menghilangkan atau meminimalkan eksternalitas lingkungan yang berpotensi merugikan. Sistem Manajemen Lingkungan Berkelanjutan (SEMS) yang baru dibentuk dapat memenuhi komitmen tersebut, meskipun pencapaian tujuan ini sangat sulit.

Dukungan terhadap aktivitas jangka panjang dan keterkaitan antara perusahaan, produksi, dan perencanaan digunakan untuk mengembangkan kerangka kerja SEMS. Selain itu, SEMS memenuhi kebutuhan yang semakin meningkat akan pedoman pengambilan keputusan yang spesifik untuk pengurangan kontaminan lingkungan dalam jangka panjang. Untuk memanfaatkan ELECTRE III untuk pengambilan keputusan yang efektif, perlu menetapkan tolok ukur dan metrik kinerja utama sebagai variabel masukan. Untuk memfasilitasi hal ini, kami telah merancang kerangka kerja komprehensif yang mendorong pengembangan standar keuangan, ekologis, dan sosial yang selaras dengan tujuan organisasi dan memenuhi harapan pemangku kepentingan internal dan eksternal.



BAB 3

GIS DAN MCDM UNTUK CAPAIAN SDG

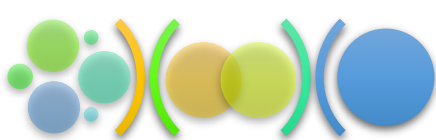
3.1 PENDAHULUAN

Intensifikasi bencana alam dan peningkatan dampak perubahan iklim memengaruhi banyak masyarakat metropolitan, terutama di kawasan Asia Pasifik yang telah menekankan promosi ketahanan untuk pembangunan berkelanjutan. Hong Kong adalah kota berkembang yang berpenduduk padat yang terletak sebagai daerah administratif khusus (SAR) di pantai tenggara Tiongkok. Hong Kong rentan terhadap banjir gabungan akibat curah hujan lebat dan permukaan laut ekstrem yang disebabkan oleh siklon tropis (TC). Total curah hujan tahunan di Hong Kong tercatat 2400 mm, dengan 4–5 hari curah hujan ekstrem lebih dari 100 mm per hari setiap tahunnya. Hong Kong memiliki luas hingga 1110,18 km², dengan lebih dari setengahnya merupakan daerah perbukitan.

Sebagian besar lahan perkotaan berada di daerah dataran rendah yang rawan banjir, membuat Hong Kong sangat rentan terhadap banjir dan bahaya hidrologi lainnya, yang mengakibatkan kerugian ekonomi dan korban jiwa yang besar akibat banjir yang terkait dengan siklon tropis. Seperti yang dilaporkan oleh HKO, permukaan laut rata-rata di Pelabuhan Victoria meningkat sebesar 31 mm/dekade dalam 20 tahun terakhir. Perubahan ini secara luas memperburuk banjir dari semua jenis (misalnya, banjir bandang, banjir akibat hujan, dan banjir pesisir), yang sangat menantang manajemen risiko banjir Hong Kong.

Sistem Informasi Geografis (SIG) telah menjadi salah satu alat yang paling disukai dalam membantu dan memantau tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs). Banyak pendekatan geospasial telah diimplementasikan dalam berbagai skema pembangunan skala regional, nasional, dan multinasional karena pemetaan, manajemen data yang efisien, perencanaan regional, visualisasi, perencanaan kebijakan, peningkatan manajemen, dan alokasi sumber daya. Pemahaman klaster sosio-ekonomi dalam pendekatan spasial menggunakan GIS telah membantu pemangku kepentingan nasional dan lokal untuk merencanakan dan mengimplementasikan kebijakan guna mencapai SDGs. GIS memainkan peran penting dalam mencapai SDG 11: kota dan komunitas berkelanjutan. Integrasi informasi geospasial seperti penggunaan lahan, tutupan lahan, data statistik, dan kepadatan administratif dan penduduk dapat menjadi pendekatan dasar untuk memahami fasilitas industri atau sosio-ekonomi yang perlu dipantau dalam mencapai SDG 11. Selain itu, banyak perencana kota dan pemangku kepentingan lokal menggunakan GIS untuk menganalisis dan mengidentifikasi bagaimana kota-kota telah, sedang, dan akan menjadi di masa depan dengan menetapkan tonggak atau skema di bawah berbagai skenario untuk membantu menjaga keberlanjutan kota dan komunitas.

GIS telah digunakan dalam rencana aksi iklim pada berbagai skala untuk SDG 13: aksi iklim. Teknologi GIS dan Penginderaan Jauh merupakan beberapa dukungan teknis utama untuk memantau sistem iklim saat ini pada wilayah tersebut. Selama bertahun-tahun, pengumpulan data iklim telah membantu tidak hanya dalam skenario iklim saat ini tetapi juga



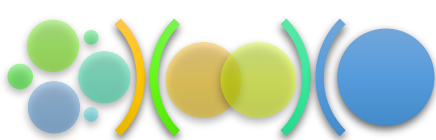
kemungkinan skenario masa depan yang akan terdampak oleh perubahan iklim dengan emisi karbon yang berbeda untuk perencanaan dan pengelolaan di masa mendatang. Dengan memahami berbagai dimensi lanskap iklim, para pemangku kepentingan utama dapat bersama-sama merencanakan, mempromosikan, membiayai, dan menerapkan rencana aksi yang diperlukan sebagai langkah mitigasi.

Karena kompleksitas tantangan global, SDG telah ditetapkan dan didekati dengan cara multi-dimensi dan multi-disiplin. Oleh karena itu, Pengambilan Keputusan Multikriteria (MCDM) telah menjadi sangat populer dalam beberapa tahun terakhir. Dalam kerangka Agenda 2030, terdapat 143 artikel ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2016 dan 2020 di mana MCDM digunakan untuk memahami SDGs karena fleksibilitasnya bagi para pemangku kepentingan untuk mengambil keputusan, dengan mempertimbangkan semua kriteria dengan tingkat kepentingan yang berbeda untuk skala isu yang berbeda. Dalam menangani SDG 7: energi terjangkau dan bersih, pendekatan MCDM hibrida dan MCDM fuzzy adalah yang paling umum diterapkan, diikuti oleh Analytical Hierarchy Process (AHP) dan fuzzy AHP, berdasarkan lima masalah pengambilan keputusan: pemilihan sumber, lokasi, keberlanjutan, kinerja proyek, dan kinerja teknologi.

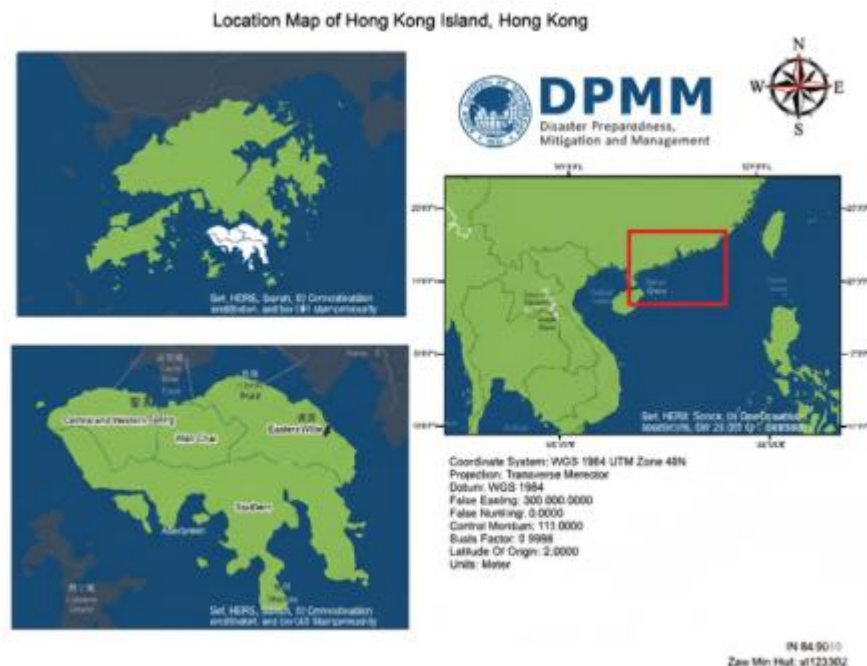
Popularitas AHP dalam mendukung pengambilan keputusan untuk pembangunan berkelanjutan telah meningkat di antara pendekatan MCDM lainnya dalam beberapa tahun terakhir ketika dikategorikan sebagai berikut: pemodelan preferensi, pendekatan ketidakpastian, analisis sensitivitas, penilaian jangka panjang, dan keterlibatan pemangku kepentingan. Pengambilan Keputusan Multikriteria dalam Kerangka Agenda 2030 paling banyak diimplementasikan di tingkat nasional, diikuti oleh tingkat lokal dan regional. Dalam menangani SDG 7, SDG 9, dan SDG 11, pemrograman tujuan (GP) digunakan untuk mobilisasi sumber daya, pembangkitan listrik terdesentralisasi, dan moda transportasi baru untuk Uni Emirat Arab (UEA). Mengenai SDG 11 dan SDG 13, fuzzy TOPSIS digunakan untuk sistem transportasi berkelanjutan di India. AHP diimplementasikan untuk SDG 4, SDG 5, dan SDG 17 di Eropa untuk aspek tata kelola, keterlibatan warga, kesetaraan gender, dan lainnya. Terdapat kasus MCDM tunggal, kombinasi metode MCDM dan non-MCDM, dan integrasi metode MCDM dalam mendekati SDG pada skala yang berbeda.

3.2 LINGKUP WILAYAH YANG DIJELASKAN

Dalam pembahasan wilayah ini, Pulau Hong Kong, adalah bagian selatan dan terletak pada koordinat geografis 22.2988°–22.2070° lintang utara dan 114.1732° dan 114.1631° bujur timur, dari Radar Apertur Sintetik Hong Kong (SAR) di Tiongkok. Letaknya di selatan Semenanjung Kowloon dan dipisahkan oleh Pelabuhan Victoria, berbatasan dengan Provinsi Guangdong di Tiongkok Daratan. Wilayah mencakup area seluas 78,64 km² dengan empat distrik utama: Pusat dan Barat, Wan Chai, Timur, dan Selatan. Topografi Pulau Hong Kong ditandai oleh perbukitan di daerah tengah dan pesisir di sepanjang pantai. Pulau Hong Kong sebagian besar dihuni di sepanjang daerah pesisir, terutama di bagian utara, barat, dan selatan pulau. Sebagian besar permukiman berada di daerah dataran rendah yang rawan banjir, sehingga menjadikan Hong Kong sebagai tantangan bagi pembangunan berkelanjutan. Hong



Kong rentan terhadap banjir gabungan akibat curah hujan lebat dan permukaan laut ekstrem yang disebabkan oleh siklon tropis.



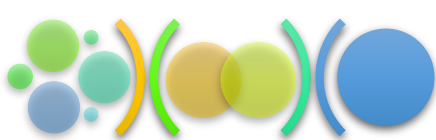
Gambar 3.1 Peta lokasi Pulau Hong Kong, Daerah Administratif Khusus Hong Kong, Tiongkok.

Bulan Mei, Juni, Juli, Agustus, dan September memiliki tingkat curah hujan bulanan melebihi 300 mm; sekitar 80% dari curah hujan tahunan terjadi dalam periode lima bulan. Data curah hujan rata-rata bulanan HKO dari tahun 1981 hingga 2010 menunjukkan bahwa Juni adalah bulan terbasah baik dalam hal total maupun durasi curah hujan. Dilaporkan oleh Markas Besar Observatorium Hong Kong bahwa Hong Kong baru-baru ini menerima curah hujan per jam yang memecahkan rekor pada tanggal 7 September 2023, dengan 158,1 mm, diikuti oleh 145,5 mm, 115,1 mm, 109,9 mm, dan 108,2 mm pada tanggal 7 Juni 2008, 16 Juli 2006, 8 Mei 1992, dan 12 Juni 1966, secara berturut-turut. Intensifikasi tersebut berlangsung selama lebih dari tujuh jam, menunjukkan bahwa Hong Kong rentan terhadap banjir (Gambar 3.1).

3.3 BAHAYA IKLIM DI HONG KONG

Topan

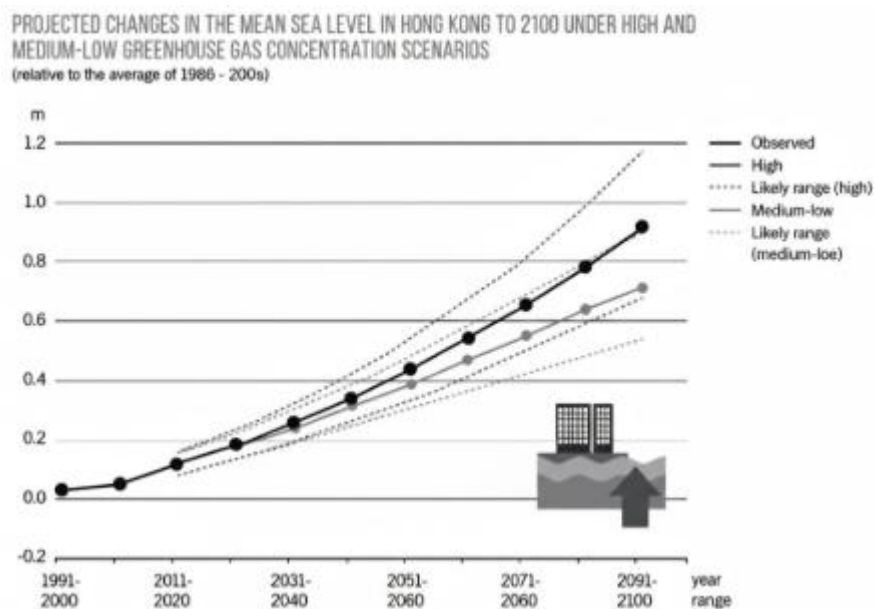
Musim topan di Hong Kong berlangsung dari Mei hingga November, dengan puncaknya pada bulan-bulan musim panas Juni, Juli, dan Agustus. Hong Kong telah mengalami 13 bencana alam dalam 20 tahun terakhir menurut Basis Data Peristiwa Darurat (EM-DAT), di mana 12 di antaranya adalah siklon tropis: Dujuan, Imbudo, Topan “Hagupit” (Nina), Badai Tropis “Kammuri” (Julian), Badai Tropis “Nuri” (Karen), Topan “Koppu”, Topan Chanthu, Topan “Hato”, Badai Tropis “Pakhar”/“Jolina”, Topan Mangkhut (Ompong), TC “Lionrock” (Lannie), dan TC “Kompasu” (Maring). Topan juga merupakan salah satu dari banyak faktor pemicu banjir dan tanah longsor. Tingkat air tertinggi yang tercatat oleh alat pengukur pasang surut



adalah 1,77 m menurut basis data HKO tentang catatan gelombang badai antara tahun 1945 dan 2015. Kerusakan yang disebabkan oleh Topan Mangkhut pada tahun 2018 menyoroti dampak destruktif dari banjir gabungan. Kombinasi curah hujan yang tinggi dan permukaan laut yang ekstrem selama topan mengakibatkan lebih dari 400 orang terluka dan kerugian ekonomi yang besar.

Kenaikan Permukaan Laut

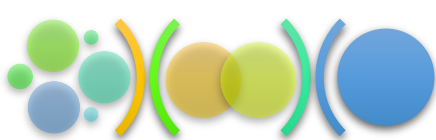
Dampak utama kenaikan permukaan laut (SLR) terhadap Pulau Hong Kong adalah kemungkinan peningkatan frekuensi dan skala banjir laut akibat gelombang badai yang disebabkan oleh siklon tropis. Pulau Hong Kong, yang sebagian besar wilayahnya merupakan daerah dataran rendah, rentan terhadap kenaikan permukaan laut karena diprediksi bahwa perubahan iklim dapat menaikkan permukaan laut hingga 1 meter secara global menjelang akhir abad ini dan meningkatkan ancaman gelombang badai (Gambar 3.2).



Gambar 3.2 Proyeksi kenaikan permukaan laut Hong Kong.

Dampak Perubahan Iklim

Menurut Laporan Perubahan Iklim Hong Kong, perubahan iklim akan menyebabkan hari dan malam yang lebih hangat, lebih sedikit hari hujan dengan peningkatan intensitas curah hujan rata-rata, lebih banyak kejadian curah hujan ekstrem, lebih banyak tahun basah ekstrem dengan risiko tahun kering ekstrem, dan peningkatan potensi gelombang badai yang terkait dengan siklon tropis. Permukaan laut rata-rata di Pelabuhan Victoria telah meningkat dengan laju 30 mm dalam periode sepuluh tahun dari tahun 1954 hingga 2014. Hong Kong diproyeksikan akan naik sebesar 62 hingga 70–73 hingga 91 cm pada tahun 2100, tergantung pada pengaturan perubahan iklim, relatif terhadap permukaan laut rata-rata tahun 1986–2005.



3.4 BAHAYA DAN KETAHANAN REGIONAL DALAM MCDM

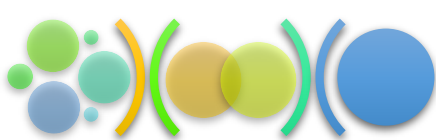
Berbagai metode telah digunakan dalam mempelajari bahaya untuk meningkatkan ketahanan regional dalam konteks manajemen risiko bencana. Menurut Bera dan rekan-rekan. , AHP, Entropi Shannon (SE), dan Support Vector Machine (SVM) digunakan untuk mengidentifikasi kerentanan banjir di distrik pesisir India. Demikian pula, AHP digunakan sebagai analisis multi-kriteria tentang bagaimana parameter seperti elevasi, kepadatan drainase, kemiringan, dan penggunaan/tutupan lahan berkontribusi pada bahaya banjir di Metropolis Sekondi-Takoradi (STM). SE adalah salah satu ukuran informasi yang menggunakan teori probabilitas. Ini digunakan untuk mempelajari seberapa berbeda atau beragam setiap elemen dalam matriks penilaian. Nilai entropi kemudian dihitung untuk mewakili tingkat ketidakpastian dalam atribut untuk memahami indeks kerentanan banjir menggunakan pendekatan penjumlahan tertimbang.

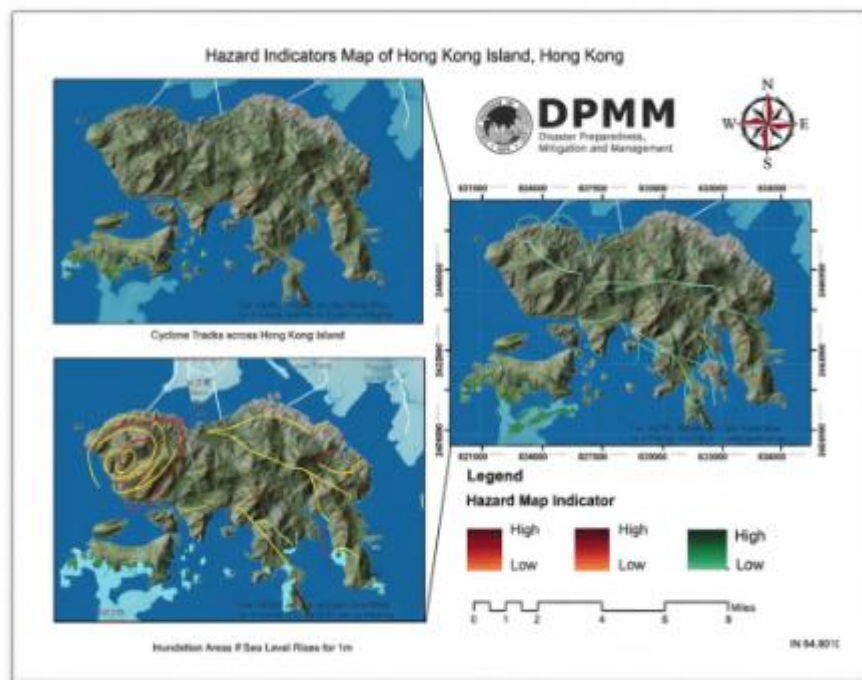
Untuk memahami konteks bahaya banjir pada wilayah Hindukush Timur Pakistan, dua model pembelajaran mesin: SVM dan Random Forest (RF) dan AHP digunakan. SVM adalah pendekatan pembelajaran mesin terawasi, berdasarkan prinsip-prinsip teori pembelajaran statistik. SVM dipraktikkan untuk mengubah data non-linier (LN) menjadi dua kelas yang berbeda, menggunakan fungsi kernel seperti LN, Radial Basis Function (RBF), Sigmoid (SIG), dan Polinomial (PL). Kernel RBF adalah salah satu fungsi yang paling banyak dipraktikkan karena pendekatannya yang kurang intensif data. SVM juga digunakan dalam memahami risiko bencana alam untuk SDGs.

yang dilakukan dalam pembahasan ini didasarkan pada penilaian risiko multi-bahaya komprehensif dalam lingkungan GIS dengan integrasi analisis keputusan multi-kriteria, AHP. Pendekatan ini memungkinkan pertimbangan dan pembobotan berbagai faktor yang memengaruhi untuk menghasilkan penilaian risiko yang kuat untuk membangun ketahanan. Empat elemen utama dipertimbangkan: bahaya, paparan, sensitivitas, dan kapasitas.

Indikator Bahaya

Bahaya mengacu pada kejadian alamiah yang dipicu oleh sistem iklim bumi. Dalam pembahasan ini, indikator bahaya diperoleh dari catatan bahaya historis di Pulau Hong Kong dalam 20 tahun terakhir. Jejak siklon tropis dan kenaikan permukaan laut adalah fenomena yang sangat umum dan penting untuk memperoleh indeks bahaya untuk kuantifikasi risiko dalam perhitungan penilaian risiko multi-bahaya (Gambar 3.3).





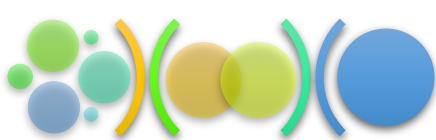
Gambar 3.3 Peta indikator bahaya Pulau Hong Kong.

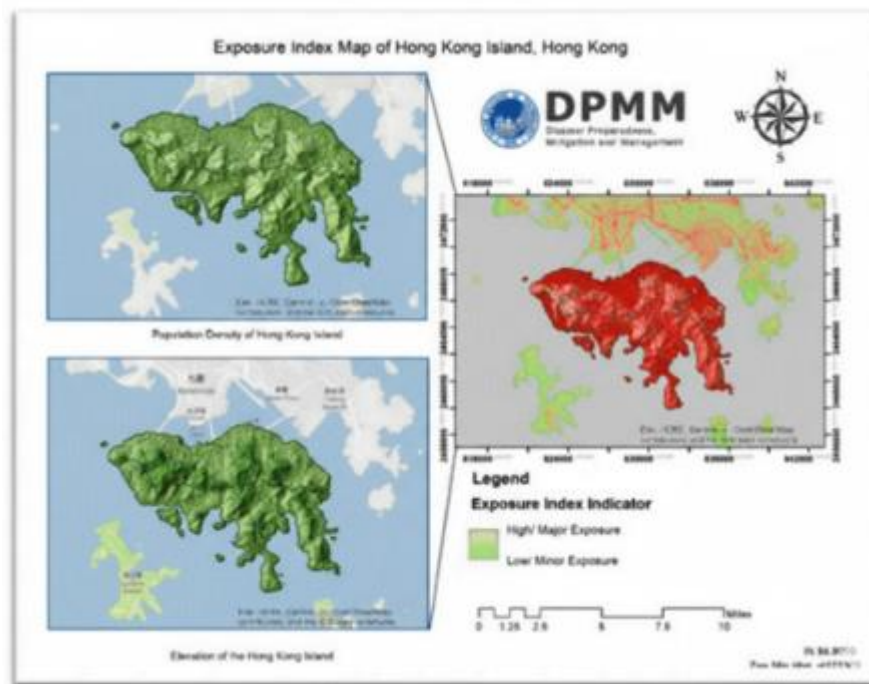
Indikator Paparan

Paparan mengacu pada sejauh mana suatu area bersentuhan dengan gangguan. Komponen paparan terdiri dari kepadatan demografis dan bentang topografi. Kepadatan penduduk keseluruhan Pulau Hong Kong dipertimbangkan karena sebagian besar permukiman terkonsentrasi di daerah dataran rendah yang rawan banjir di pulau tersebut. Bentang topografi dapat memengaruhi kemungkinan dampak bencana terhadap aset dan penduduk. Pemahaman tentang paparan fisik memainkan peran utama dalam penilaian risiko bahaya terpadu (Gambar 3.4).

Indikator Sensitivitas

Sensitivitas mengacu pada tingkat kerentanan terhadap insiden. Penduduk di bawah usia 15 tahun dan mereka yang berusia di atas 65 tahun dianggap sangat sensitif karena ketergantungan dan kebutuhan mereka yang tinggi akan bantuan dari orang lain selama dan setelah bencana. Selain itu, kedekatan dengan garis pantai merupakan indikator sensitivitas penting lainnya dalam penelitian ini karena frekuensi dan intensifikasi siklon tropis dan bahaya pesisir lainnya yang tinggi. Di samping itu, kepadatan jaringan jalan dianggap sebagai indikator sensitivitas karena pentingnya bagi respons darurat dan moda transportasi evakuasi di tengah bencana. Penggunaan lahan juga dianggap sebagai indikator sensitivitas karena berbagai kategori penggunaan lahan dapat terpengaruh pada skala yang berbeda dari bencana alam.





Gambar 3.4 Peta indikator paparan Pulau Hong Kong.

Mengenal komponen sensitivitas sangat penting untuk membangun ketahanan bagi pembangunan berkelanjutan melalui pengembangan indikator (Gambar 3.5 dan 3.6).

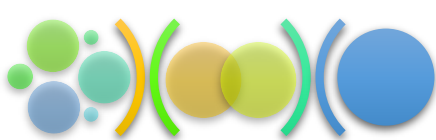
Indikator Kapasitas

Indikator kapasitas merupakan elemen penting dalam mengukur kemampuan suatu komunitas, wilayah, atau sistem untuk menyerap, melawan, atau pulih dari bencana alam. Pendapatan bulanan rata-rata sebagai stabilitas ekonomi dianggap sebagai indikator kapasitas utama. Kemampuan finansial rumah tangga untuk menanggapi bencana alam memainkan peran penting dalam tindakan rekonstruksi pasca bencana. Selain itu, pendidikan menengah sebagai pencapaian pendidikan juga merupakan komponen kapasitas yang penting. Individu yang berpendidikan memiliki kapasitas untuk terlibat dalam informasi terkait bencana untuk terlibat dalam kegiatan kesiapsiagaan bencana proaktif dan tindakan respons dan pemulihan bencana reaktif. Indikator kapasitas, yang ditunjukkan pada Gambar 3.7, merupakan faktor-faktor yang berkontribusi dalam meminimalkan kerentanan dan meningkatkan ketahanan komunitas.

Analisis Multi-Kriteria: Proses Hierarki Analitik (Ahp)

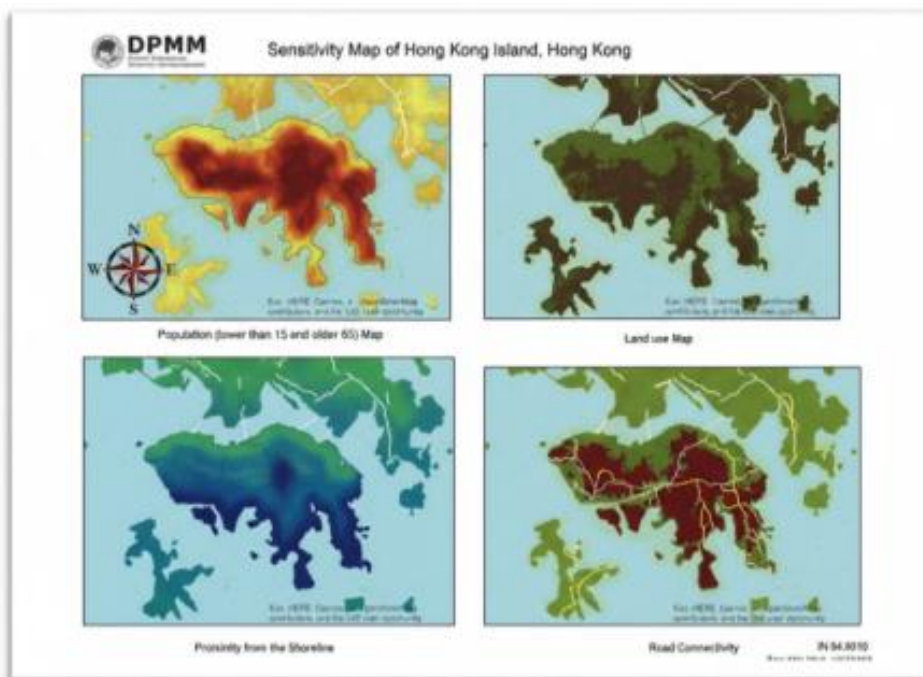
AHP adalah matriks perbandingan berpasangan yang efektif dalam mengubah atribut peringkat ahli menjadi nilai numerik untuk kuantifikasi faktor-faktor penting (Tabel 3.1), yang memengaruhi kejadian bahaya pada wilayah. Bobot diperoleh dari vektor eigen utama matriks resiprokal persegi 9×9 dari perbandingan berpasangan komponen. Rasio konsistensi (CR) dihitung untuk memeriksa konsistensi bobot yang ditentukan menggunakan metode berikut.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$



CR adalah singkatan dari *Consistency Ratio* (Rasio Konsistensi), yang diperoleh dari perhitungan CI (*Consistency Index*) dan RI (*Random Inconsistency Index*) dalam matriks berpasangan. CR dapat dihitung berdasarkan perhitungan di bawah ini.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$



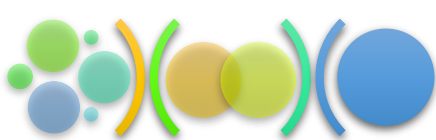
Gambar 3.5 Peta indikator sensitivitas Pulau Hong Kong.

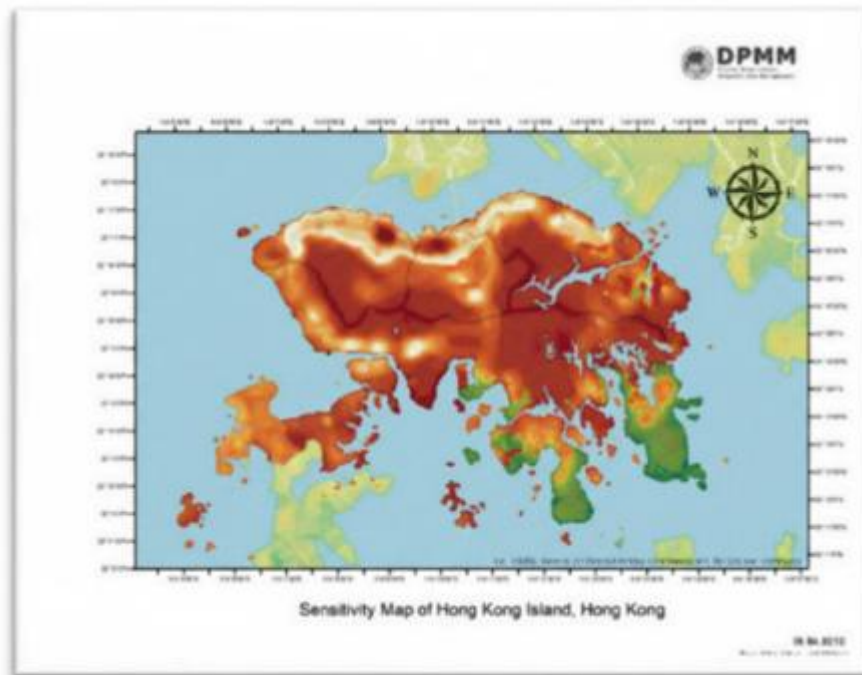
di mana max mengacu pada nilai eigen maksimum dari matriks penilaian dan n adalah jumlah total elemen. CR sebesar 0,0925 mengkonfirmasi konsistensi tinggi dari peringkat yang digunakan dalam penelitian ini. Setelah perhitungan bobot, peta penilaian risiko multi-bahaya dihasilkan, menggunakan pendekatan penjumlahan berbobot dalam Sistem Informasi Geografis berdasarkan Gambar 3.8, di mana setiap elemen dikalikan dengan bobot faktornya, yang dihasilkan dari perhitungan perbandingan berpasangan pada Tabel 3.2 dengan rumus berikut:

$$MHRA = (H + E + S) - C$$

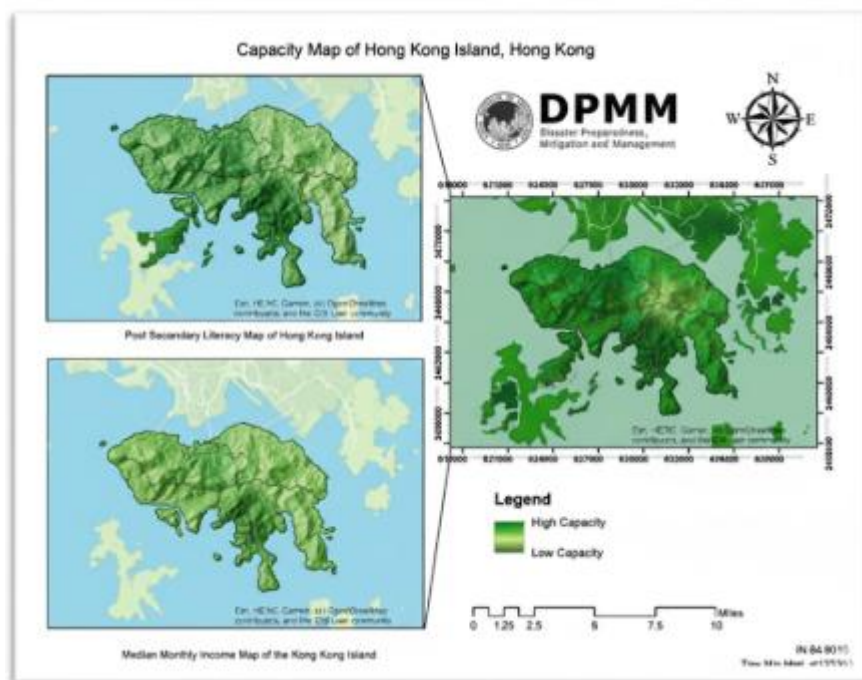
Tabel 3.1 Skala Fundamental untuk Perbandingan Berpasangan dalam AHP

Skala Kepentingan Relatif	Tingkat Kepentingan
1	Sama Penting / Setara
3	Cukup Penting / Moderat
5	Kuat / Penting
7	Sangat Kuat / Sangat Penting
9	Ekstrem / Mutlak
2, 4, 6, 8	Nilai Menengah

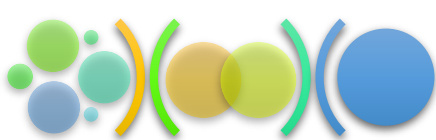




Gambar 3.6 Indikator sensitivitas keseluruhan Pulau Hong Kong.



Gambar 3.7 Peta indikator kapasitas Pulau Hong Kong.





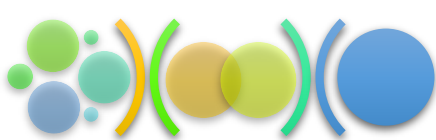
Gambar 3.8 Metodologi.

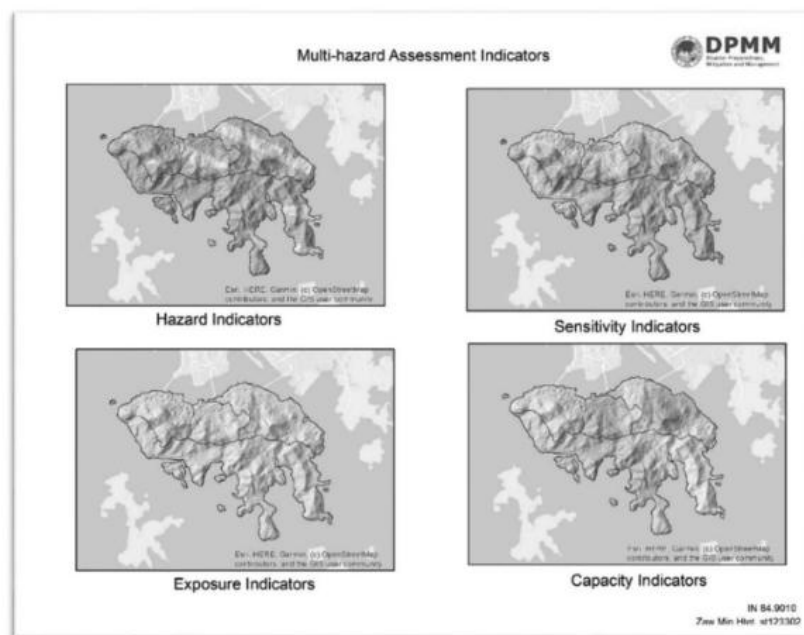
Gambar 3.9 menunjukkan elemen-elemen keseluruhan dari bahaya, paparan, sensitivitas, dan kapasitas penilaian multi-bahaya, menyoroti gambaran umum yang luas tentang distribusi spasial risiko yang menimpa Pulau Hong Kong, Hong Kong.

Tabel 3.2 Rasio Konsistensi Perbandingan Berpasangan

Kriteria	CT	SLR	PD	Elev	Pop	Prox	LU	RD	MMI	SE	Sum Row	Lamda Factor	Lamda Individual	Consistency Index (CI)	Consistency Ratio (CR)
CT	1	3	3	4	4	5	6	7	8	8	2.941	34.33313	11.67289	0.137936	0.092574
SLR	1/3	1	2	3	4	4	5	6	7	7	1.947	23.74575	12.19295		
PD	1/3	1/3	1	3	4	4	5	6	7	8	1.697	20.91023	12.32044		
Elev	1/4	1/3	1/3	1	2	3	4	4	5	6	1.049	12.68446	12.09562		
Pop	1/4	1/4	1/4	1/3	1	2	5	6	7	7	1.004	11.63741	11.59249		
Prox	1/5	1/7	1/7	1/4	1/2	1	3	6	7	8	0.812	9.028292	11.11583		
LU	1/6	1/5	1/5	1/4	1/5	1/3	1	2	3	4	0.415	4.432113	10.67933		
RD	1/7	1/6	1/6	1/6	1/4	1/6	1/6	1	4	5	0.371	3.738515	10.07548		
MMI	1/8	1/7	1/7	1/5	1/7	1/7	1/3	1/4	1	3	0.227	2.296014	10.09801		
SE	1/8	1/7	1/8	1/6	1/7	1/8	1/4	1/5	1/3	1	0.160	1.691506	10.57118		

Catatan: CT = Jalur Siklon, SLR = Kenaikan Permukaan Laut, PD = Kepadatan Penduduk, Elev = Ketinggian, Pop = Populasi di bawah 15 dan di atas 65 tahun, Prox = Kedekatan dengan Garis Pantai, LU = Penggunaan Lahan, RD = Kepadatan Jalan, MMI = Pendapatan Bulanan Median, SE = Pendidikan Menengah





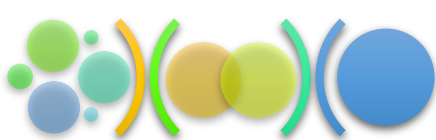
Gambar 3.9 Semua indikator untuk penilaian risiko multi-bahaya.

3.5 PENILAIAN RISIKO MULTI BAHAYA

Dalam pembahasan ini Pulau Hong Kong dilakukan dengan menggunakan elemen-elemen pada Tabel 3.3. Profil bahaya Hong Kong menunjukkan bahwa sisi barat dan selatan pulau relatif lebih rentan terkena dampak bencana alam: siklon tropis dan kenaikan permukaan laut berdasarkan catatan bahaya historis. Kerugian ekonomi dan korban jiwa akibat siklon tropis melebihi kerugian dan korban jiwa akibat kenaikan permukaan laut. Jejak siklon yang tercatat dalam data historis menunjukkan bahwa Distrik Pusat dan Barat serta Distrik Selatan telah beberapa kali terkena dampak siklon tropis dalam beberapa tahun terakhir. Dari segi paparan, kepadatan penduduk Pulau Hong Kong tertinggi di daerah dataran rendah, terutama di Distrik Pusat dan Barat, di sepanjang daerah pesisir. Selain itu, konektivitas jalan di Pulau Hong Kong sangat terkonsentrasi di Distrik Pusat dan Barat, dibandingkan dengan distrik lainnya. Oleh karena itu, sebagian besar infrastruktur sosial-ekonomi dan kelompok usia yang paling rentan terpapar bahaya alam, sementara hanya sedikit di topografi pegunungan tengah yang kurang terpapar. Indikator kapasitas menunjukkan bahwa Distrik Timur relatif lebih tinggi daripada distrik lain dalam hal stabilitas keuangan dan pencapaian pendidikan.

Tabel 3.3 Matriks Indikator Penilaian Risiko Multi-Bencana

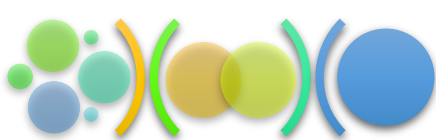
Penilaian Risiko				
1	Indikator Bahaya (Hazard)			34%
	Nama Indikator	Deskripsi	Sumber Data	Bobot (%)
1.1	Lintasan Siklon	Jalur siklon yang melewati Pulau Hong Kong	Data sekunder	65
1.2	Kenaikan permukaan laut	Area yang berpotensi tergenang saat	Ekstraksi dari elevasi	35



permukaan laut naik 1 m				
2	Paparan (Exposure)			33%
	Nama Indikator	Deskripsi	Sumber Data	Bobot (%)
2.1	Kepadatan penduduk	Kepadatan penduduk secara keseluruhan di Pulau Hong Kong	WorldPop (2020)	60
2.2	Elevasi	Ketinggian wilayah Pulau Hong Kong	SRTM	40
3	Sensitivitas (Sensitivity)			33%
	Nama Indikator	Deskripsi	Sumber Data	Bobot (%)
3.1	Populasi <15 & >65 thn	Kelompok usia rentan (kurang dari 15 tahun dan lebih dari 65 tahun)	WorldPop (2020)	20
3.2	Kedekatan (Proksimitas)	Jarak dari garis pantai	Ekstraksi dari batas wilayah	20
3.3	Kepadatan jalan	Konektivitas antar komunitas di Hong Kong	Open Street Map	30
3.4	Tata guna lahan	Perencanaan tata guna lahan di Hong Kong	ESRI (2024)	30
4	Kapasitas (Capacity)			
	Nama Indikator	Deskripsi	Sumber Data	Bobot (%)
4.1	Pendapatan bulanan median	Kapasitas finansial untuk mengatasi bencana	Data sekunder	50
4.2	Pendidikan menengah	Kapasitas intelektual untuk mengatasi bencana	Data sekunder	50
Penilaian Risiko Keseluruhan = (Bahaya + Paparan + Sensitivitas) – Kapasitas				100%

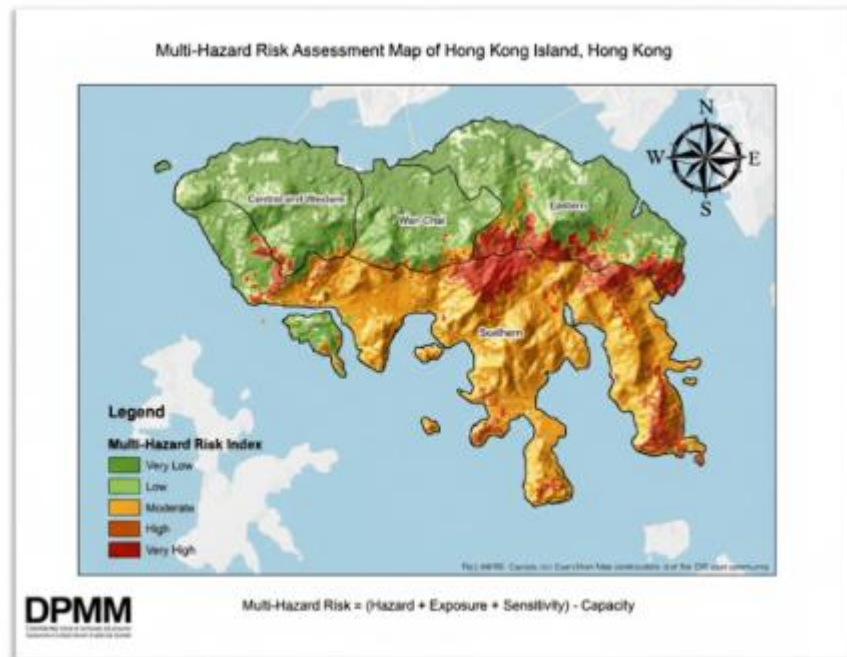
Indeks risiko multi-bahaya secara keseluruhan menunjukkan bahwa aktivitas sosial-ekonomi di Distrik Timur berada pada peringkat risiko sangat tinggi dari berbagai bahaya dengan perkiraan luas kumulatif 92,67 km² diikuti oleh Distrik Selatan (8,796 km²), Distrik Tengah dan Barat (5,837 km²), dan Distrik Wan Chai (4,589 km²), seperti yang terlihat pada Gambar 3.10 dan ditabulasi pada Tabel 3.4. Pembahasan penilaian multi-bahaya sebelumnya di Distrik Tengah dan Barat juga sepakat bahwa indeks risikonya tidak terlalu tinggi. Distrik Selatan dikategorikan sebagai satu-satunya distrik dengan perkiraan luas wilayah 0,039 km² yang berisiko “sangat tinggi”, menunjukkan ketahanan yang kuat dari Pulau Hong Kong terhadap bencana alam.

Penilaian risiko multi-bahaya adalah evaluasi komprehensif terhadap potensi risiko yang ditimbulkan oleh bahaya yang semakin intensif, terutama bahaya hidrometeorologi dalam kasus Pulau Hong Kong, Hong Kong. Melalui identifikasi komprehensif tentang



pentingnya empat komponen: bahaya, paparan, sensitivitas, dan kapasitas, rencana aksi pengurangan risiko yang ekstensif dan strategi pembangunan ketahanan dapat dirumuskan sebagai sarana untuk mempromosikan SDGs. Pemahaman konteks spasial dari potensi risiko, kerugian, dan potensi kerusakan akibat bencana alam dapat dikurangi melalui perencanaan ketahanan dan alokasi sumber daya.

Selain itu, para pemangku kepentingan utama dan pengambil keputusan dapat mengartikulasikan tingkat keparahan dan probabilitas bahaya yang lebih umum pada wilayah tersebut dan memprioritaskan pengembangan mitigasi terstruktur atau langkah-langkah adaptasi yang diperlukan, seperti tembok laut, solusi berbasis alam: hutan bakau, dan pelatihan serta praktik evakuasi bencana yang tidak terstruktur. Produk penilaian risiko multi-bahaya yang terperinci seperti peta juga dapat menjadi salah satu alat bantu visualisasi pendidikan bencana awal untuk mempromosikan pendekatan proaktif dan kesadaran serta merumuskan program pengurangan risiko bencana berbasis komunitas.

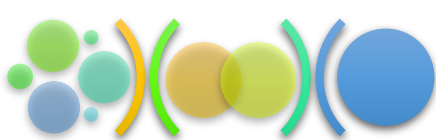


Gambar 3.10 Peta penilaian risiko multi-bahaya di Pulau Hong Kong.

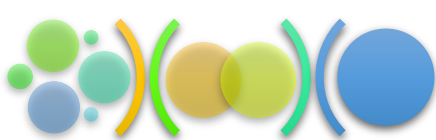
Tabel 3.4 Indeks Risiko Multi-Bahaya Luas Wilayah dalam km²

Nama Distrik	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Persentase (%)
Central and Western	0.018	5.425	0.394	0	0	5%
Wan Chai	0	4.518	0.071	0	0	4%
Eastern	0.078	62.3	14.419	15.869	0	83%
Southern	0.012	8.177	0.515	0.0529	0.0392	8%

Membangun ketahanan sosial-ekonomi menggunakan Sistem Informasi Geografis dalam penilaian risiko multi-bencana dapat mencegah masyarakat dari keterkaitan



kemiskinan-bencana, yang pada gilirannya menjaga SDG 1: pengentasan kemiskinan tetap pada jalurnya. Lebih jauh lagi, pembangunan ketahanan melalui modifikasi struktur bangunan, untuk tujuan keberlanjutan, mendorong SDG 9: industri, inovasi, dan infrastruktur, serta SDG 11: kota dan komunitas berkelanjutan. Selain itu, produk pengetahuan tentang risiko yang mendasari dari penilaian risiko multi-bencana sangat penting dalam penciptaan kebijakan dan praktik pembangunan berkelanjutan adaptif dengan landasan yang kuat dari profil bahaya lokal dan lanskap risiko yang berkembang pesat.



BAB 4

ANALISIS GEOSPASIAL BENCANA BANJIR DI KOTA SIGATOKA

4.1 PENDAHULUAN

Peta bahaya banjir Sigatoka dibuat dan dirumuskan melalui pendekatan kolaboratif antar sektor pemerintahan. Kementerian Kehutanan mengumpulkan model elevasi digital (DEM) melalui survei drone LiDar. Mereka memproses data dan menyerahkan data yang telah diproses untuk analisis lebih lanjut. Gambar 4.1 mengilustrasikan lokasi Kota Sigatoka di Pulau Vitilevu. Kota ini mencakup 202,24 hektar lahan dengan populasi perkotaan yang terus bertambah. Belum ada penilaian atau demarkasi bahaya banjir yang dilakukan di Kota Sigatoka, yang menjadi motivasi untuk menyediakan platform bagi penelitian di masa mendatang. Terdapat tiga pertanyaan penelitian yang diajukan untuk memandu penelitian ini, yaitu (i) apa saja kategori risiko di dalam batas kota, (ii) bagaimana geomatika dapat membantu dalam menentukan zona rawan, dan (iii) mengapa penelitian ini diperlukan secara mendesak. Oleh karena itu, hipotesis utama penelitian ini adalah untuk menentukan zona bahaya di Kota Sigatoka dan menentukan zona banjir yang sesuai.

4.2 ANALISIS MULTI-KRITERIA

Dalam pembahasan ini yang digunakan untuk analisis ini dikenal sebagai Analytical Hierarchical Process (AHP) menggunakan analisis multi-kriteria di ArcGIS Pro dan lembar Excel. metode ini telah digunakan oleh Sekac dan rekan-rekan. dan Sekac dan rekan-rekan. di Papua Nugini dan Varo dan rekan-rekan. di Kepulauan Fiji. Menurut Shackleton mengungkapkan bahwa geologi Kepulauan Fiji sangat kompleks dan rapuh karena terletak di cincin api. Analisis ini berfokus pada sembilan faktor lokasi-tanah-geologi yaitu akumulasi aliran, jarak sungai, elevasi, penggunaan lahan, curah hujan, kemiringan, tekstur tanah, drainase tanah, dan geologi. Rumus yang ditunjukkan di bawah ini digunakan untuk mendapatkan peta zona bahaya banjir akhir di Sigatoka.

$$FHI = \sum^n (RI)/(CI) \text{ Formular,}$$

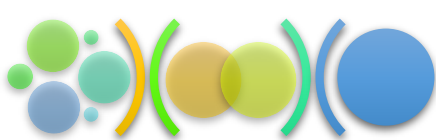
di mana FHI = Indeks Bahaya Banjir

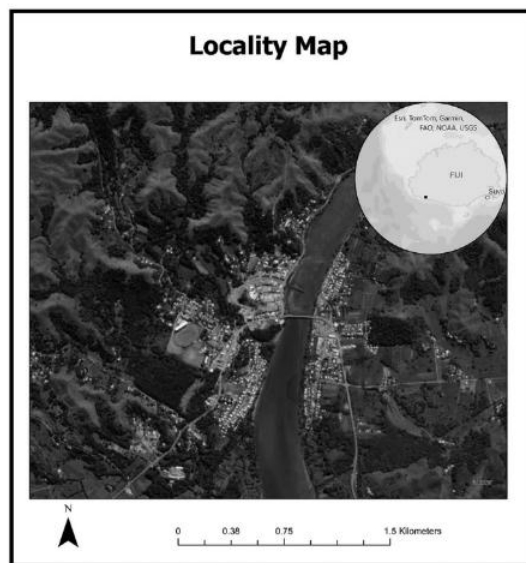
$\sum$ = jumlah

n = faktor

RI = Indeks Acak

CI = Indeks Konsistensi





Gambar 4.1 Peta wilayah Kota Sigatoka.

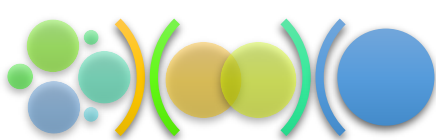
Tabel 4.1 menunjukkan data yang digunakan untuk analisis khusus ini dan sumber dari setiap data. Hal ini memverifikasi dan memvalidasi keakuratan penilaian karena semua data dikumpulkan dari instansi pemerintah yang bertanggung jawab dan diproses terlebih dahulu agar sesuai dengan tujuan ini.

Tabel 4.1 Sumber Data

Data	Sumber	Tahun
DEM, kemiringan, akumulasi aliran	Turunan dari drone – Kementerian Kehutanan	2024
Curah Hujan	Turunan dari Departemen Meteorologi	2023
Geologi dan Tata Guna Lahan	Turunan dari Peta Geologi Fiji & Sistem Klasifikasi Kemampuan Lahan	2023
Kelas Tanah dan Drainase Tanah	Turunan dari Sistem Klasifikasi Kemampuan Lahan Fiji	2023
Jarak Sungai	Turunan dari drone – Kementerian Kehutanan	2014

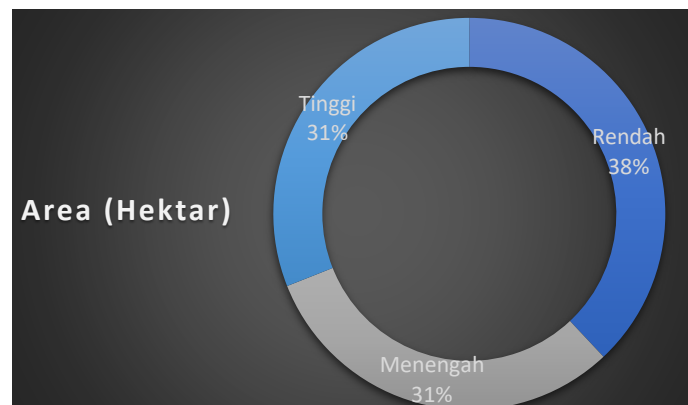
4.3 POTENSI BANJIR DI KOTA SIGATOKA

Peta bahaya banjir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 mengungkapkan bahwa pusat Kota Sigatoka memiliki campuran dari semua zona. Oleh karena itu, hal ini menunjukkan kecenderungan banjir selama hujan deras. Lapisan kadaster ditumpangkan pada peta ini untuk memverifikasi lahan yang ada di dalam zona bahaya banjir.





Gambar 4.2 Peta bahaya banjir.



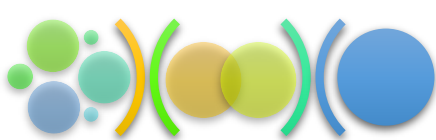
Gambar 4.3 Persentase zona.

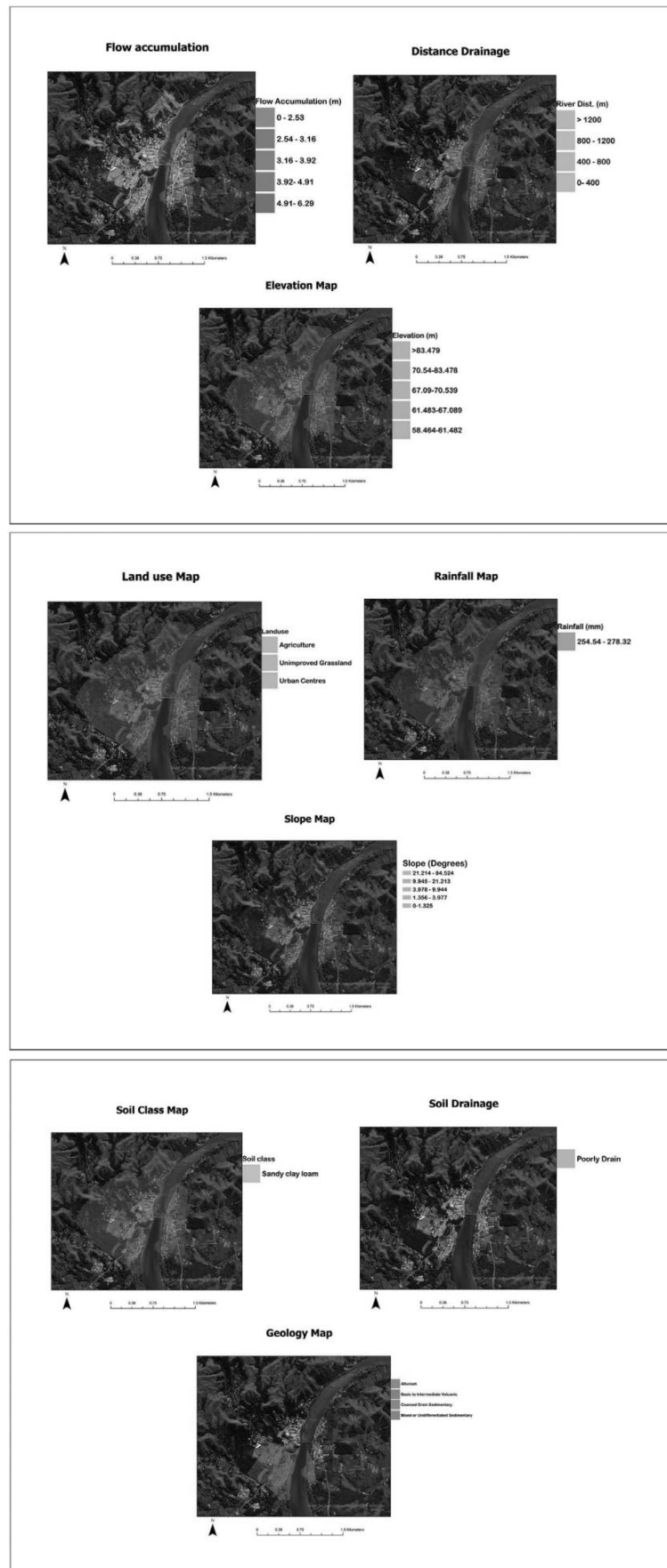
Diagram lingkaran yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 menunjukkan persentase cakupan setiap zona. Zona sedang dan tinggi masing-masing terdiri dari 31% sedangkan zona rendah terdiri dari 38% dari total cakupan area seluas 202,24 hektar.

Tabel 4.2 Persentase Zona

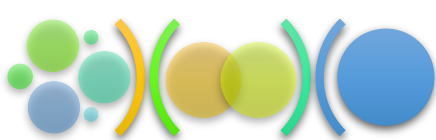
FHI	Zone	Area (h)
1.01–2.0	Low	77.906
2.01–3.0	Moderate	62.016
3.01–4.0	High	62.323

Tabel 4.2 menunjukkan persentase cakupan area untuk setiap zona. Indeks Bahaya Banjir (FHI) menunjukkan koefisien korelasi setiap zona. FHI 1,01–1,0 mewakili zona rendah, 2,01–3,0 mewakili zona sedang, dan 3,01–4,0 mewakili zona banjir tinggi.



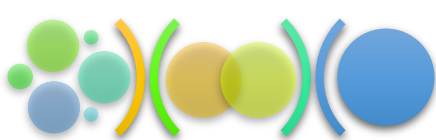


Gambar 4.4A, B, DAN C Pemetaan Vektor



Tabel 4.3 Informasi Faktor

Faktor	Bobot	Kelas	Peringkat	Laju Normalisasi	Luas (Hektar)	Luas (%)
Akumulasi Aliran	0.296	0–2.53	1	0.062	93.7	37.7
		2.53–3.16	2	0.098	77.3	31.1
		3.16–3.92	3	0.161	52.7	21.2
		3.92–4.91	4	0.262	20.0	8.0
		4.91–6.29	5	0.416	4.7	1.9
Arak Jaringan Sungai (m)	0.222	0–400	5	0.416	111.45	44.8
		400–800	4	0.262	78.06	31.4
		800–1200	3	0.161	47.85	19.2
		1200–1600	2	0.098	11.26	4.5
		1600–2000	1	0.062	0.00	0
Elevasi / Ketinggian (m)	0.157	58.464–61.482	5	0.416	46.19	18.6
		61.483–67.089	4	0.262	61.02	24.5
		67.09–70.539	3	0.161	44.44	17.9
		70.54–83.478	2	0.098	54.04	21.7
		83.479–168.44	1	0.062	42.94	17.3
Tata Guna Lahan	0.11	Hutan campuran	1	0.062	0	0
		Vegetasi jarang	2	0.098	0	0
		Pertanian	3	0.161	141.2	57.1
		Padang rumput	4	0.262	11.6	4.7
		Lahan basah perkotaan	5	0.416	94.60	38.2
Intensitas Curah Hujan (mm)	0.077	219.60–254.14	1	0.062	0	0
		254.14–278.32	2	0.098	248.64	100
		278.32–303.36	3	0.161	0	0
		303.36–350.86	4	0.262	0	0
		> 350.86	5	0.416	0	0
Kemiringan / Lereng (derajat)	0.053	0–1.325	5	0.416	43.5	17.5
		1.326–3.977	4	0.262	54.1	21.8
		3.978–9.944	3	0.161	53.0	21.3
		9.945–21.213	2	0.099	48.8	19.7
		21.214–84.524	1	0.062	48.8	19.7
Kelas Tanah	0.037	Pasir	1	0.096	0	0
		Lempung berlanau	2	0.161	0	0
		Lempung liat berpasir	3	0.277	248.33	100
		Gambut	4	0.466	0	0
Drainase Tanah	0.026	Drainase baik	1	0.096	0	0
		Drainase tidak sempurna	2	0.161	0.00	0
		Drainase buruk	3	0.277	247.46	100
		Tergenang air	4	0.466	0.00	0
Geologi	0.019	Aluvium	1	0.416	61.30	24.7
		Vulkanik basa ke menengah	2	0.262	45.43	18.3
		Sedimen butir kasar	3	0.161	0.015	0.0
		Sedimen campuran	4	0.099	141.89	57.1
		Batu kapur Viti	5	0.062	0	0



Tabel 4.3 menunjukkan faktor-faktor yang dipertimbangkan untuk analisis lokasi-tanah-geologi. Tabel ini juga mengungkapkan bobot individu setiap faktor, kelas setiap faktor, peringkat untuk setiap faktor, tingkat normalisasi, luas dalam hektar, dan persentase luas.

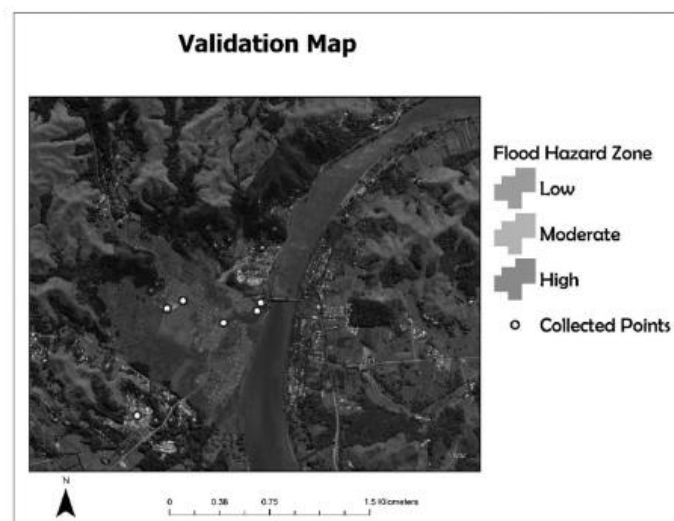
Gambar 4.4a–4.4c mengilustrasikan peta setiap faktor. Cakupan area terperinci, peringkat, dan persentase luas dirinci dalam Tabel 4.3, dan Tabel 4.4 memberikan perbandingan berpasangan antar faktor.

Tabel 4.4 Perbandingan Per Par

Fokus	Faktor-faktor								
	Flow Dist. Drain			Land	Rainfall	Slope	Soil	Soil	Geology
	Acc.	Net	Elevasi	Penggunaan	Intensity		Texture	Drainage	
Akumulasi Aliran	1.00	2.00	3.00	4.00	3.00	6.00	7.00	8.00	9.00
Jarak ke Jaringan Drainase	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
Elevasi	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
Tata Guna Lahan	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
Intensitas Curah Hujan	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Kemiringan Lereng	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00
Tekstur Tanah	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00
Drainase Tanah	0.13	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00
Geologi	0.11	0.13	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00
Jumlah (Sum)	2.83	4.72	7.59	11.45	14.28	22.08	28.83	36.50	45.00

4.4 PENGELOMPOKAN POTANSI BANJIR

Gambar 4.5 mengilustrasikan titik-titik validasi yang dikumpulkan di lapangan pada hari Kamis, 28 Maret 2024. Terdapat total enam titik yang dikumpulkan di lapangan. Empat titik berada di zona banjir tinggi sementara hanya dua titik yang tercatat di zona banjir rendah. Kami juga melakukan wawancara singkat dengan anggota masyarakat mengenai lokasi titik-titik tersebut dan risiko banjir. Sangat menggembirakan melihat bahwa semuanya menguatkan validitas titik-titik tersebut dan hubungannya dengan risiko banjir selama hujan deras.



Gambar 4.5 Peta Validasi.

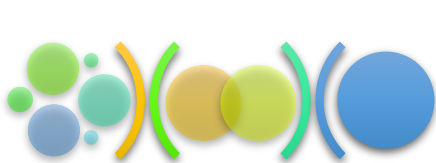
Dalam pembahasan ini memberikan kontribusi signifikan bagi akademisi dan praktisi dalam hal perencanaan, penganggaran, pengembangan dan konservasi lahan mereka serta penelitian di masa mendatang. Bagi akademisi, ini menyediakan platform untuk penelitian di masa mendatang dan bagi praktisi untuk mengetahui di mana harus membangun di masa depan untuk menghindari kerugian sosial-ekonomi bisnis dan rumah mereka. Penelitian ini juga mendorong penggunaan kecerdasan buatan dalam pengumpulan data seperti drone dan pemrograman Python pada kumpulan data besar untuk analisis yang lebih detail. Kecerdasan buatan telah digunakan dalam pengumpulan data, penyimpanan data, dan juga analisis data untuk menghasilkan hasil yang diinginkan seperti yang disajikan dalam penelitian ini.

4.5 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

AHP adalah pembahasan ilmiah yang digunakan untuk menentukan koefisien korelasi dan indeks faktor lokasi-tanah-geologi. Ini diterapkan pada penilaian bahaya banjir dan rasio konsistensinya jauh di bawah inkonsistensi yang diizinkan dan dapat diterima. Dengan demikian, pemetaan bahaya banjir ini perlu diimplementasikan di seluruh kota dan wilayah kita untuk meningkatkan perencanaan dan mengurangi bencana di tahun-tahun mendatang.

Pemetaan bahaya banjir adalah salah satu komponen manajemen bencana dan perencanaan tata ruang di masyarakat kita. Karena penelitian ini akan dikembangkan menjadi dokumen nasional, sangat penting untuk menambahkan pandangan ahli yang multidimensi dan terintegrasi tentang penilaian kerentanan sosial-ekonomi, geografis, dan manusia ke dalam laporan ini. Pandangan ahli terperinci berikut direkomendasikan untuk mendorong dampak yang luas dari laporan ini:

1. Dimensi manusia dan sosial
2. Dimensi geografi dan perencanaan kota
3. Penilaian properti dan dimensi real estat
4. Dimensi terkait lainnya.



BAB 5

ANALISIS MCDM BERBASIS DATA PANDEMI

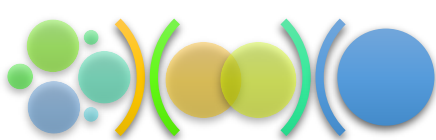
5.1 PENDAHULUAN

Badan Pengendalian Polusi Pusat (CPCB) India mendefinisikan kualitas udara sebagai volume berbagai polutan di atmosfer dan tingkat yang dapat diterima atau diizinkan, yang umumnya disebut sebagai standar (CPCB 2014). Ini menunjukkan kuantitas partikel tersuspensi kecil dan senyawa kimia lainnya seperti oksida karbon, sulfur dioksida, nitrogen dioksida, dan ozon yang ada di atmosfer. Kualitas udara mencakup semua tingkatan di atmosfer, mulai dari lokal hingga global, memberikan umpan balik di setiap arena. Polusi udara bertanggung jawab atas beberapa dampak buruk terhadap kesehatan, lingkungan, iklim, dan monumen. Indeks kualitas udara (AQI) adalah alat untuk mengukur dan mempublikasikan informasi tentang kualitas udara (misalnya, baik, memuaskan, buruk) dan dampak kesehatan yang terkait (CPCB 2014).

Intensitas polusi udara umumnya dinyatakan sebagai Kualitas Udara. Jacobson, dalam *Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation*, mendefinisikan polusi sebagai konsentrasi gas atau partikel aerosol yang dipancarkan secara antropogenik yang cukup tinggi yang menyebabkan kerusakan langsung atau tidak langsung pada iklim, ekosistem, dan warisan. Berbagai polutan udara, seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), berbagai bentuk materi partikulat (PM) (SPM, PM₁₀, dan PM_{2.5}), senyawa organik volatil (VOC), ozon permukaan (O₃), dan logam berat (kadmium, merkuri), bertanggung jawab atas perubahan komposisi atmosfer yang merugikan. SPM (materi partikulat tersuspensi) dihasilkan oleh reaksi kimia dalam cahaya dengan berbagai zat gas yang ada di atmosfer.

Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO, 2016) pada tahun 2016, dilaporkan bahwa 4,2 juta kematian prematur di seluruh dunia per tahun disebabkan oleh polusi udara ambien (luar ruangan) di daerah perkotaan dan pedesaan. Lebih lanjut, sekitar 58% kematian yang disebabkan oleh polusi udara ambien disebabkan oleh stroke dan penyakit jantung aterosklerotik. Sebagai perbandingan, 18% dari kematian disebabkan oleh kondisi parah akibat obstruksi paru-paru seperti bronkitis kronis dan emfisema serta infeksi akut pada organ pernapasan bagian bawah, dan 6% dari kematian disebabkan oleh kanker paru-paru.

Awalnya, anggapan yang beredar adalah bahwa hanya negara-negara industri dan maju yang rentan terhadap dampak buruk polusi udara. Namun, telah diketahui bahwa bahkan negara-negara berpenghasilan menengah dan kurang berkembang pun mengalami konsekuensi buruk dari polusi udara. Meskipun demikian, beberapa wilayah di seluruh dunia telah mengalami perubahan kualitas udara akibat langkah-langkah lockdown yang diterapkan selama pandemi. Perubahan tersebut dapat bervariasi secara spasial karena variasi tingkat polutan yang dilepaskan, termasuk emisi kendaraan, pembakaran bahan bakar fosil, dan produksi industri.

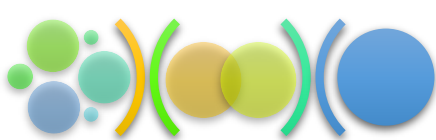


Sebagai contoh global, beberapa negara dapat dikutip di mana variasi signifikan dalam kualitas udara dapat dipantau karena tindakan pencegahan untuk menekan pandemi, seperti lockdown akibat pengurangan emisi dari industri dan pembangkit listrik kendaraan. Di Almaty, Kazakhstan, selama periode lockdown, konsentrasi $PM_{2.5}$ menurun sebesar 21% (kisaran: 6%–34%) pada tahun 2020 dibandingkan dengan tingkat $PM_{2.5}$ rata-rata, yang dihitung pada hari yang sama pada tahun 2018–2019. Namun, konsentrasi $PM_{2.5}$ masih melebihi standar WHO. Selain itu, konsentrasi CO dan NO_2 secara substansial berkurang masing-masing sebesar 49% dan 35%.

Demikian pula, konsentrasi NO_2 menunjukkan pengurangan yang signifikan sekitar 53% di daerah perkotaan Eropa dan 57% di Wuhan, Tiongkok, jika dibandingkan dengan tingkat rata-rata tiga tahun (2017–2019); konsentrasi $PM_{2.5}$ juga berkurang sebesar 8% dan 42% pada wilayah perkotaan Eropa dan Wuhan, masing-masing. Selain itu, hasil menunjukkan bahwa aktivitas manusia pada wilayah Delta Yangtze di Tiongkok menurun secara signifikan akibat pandemi; Emisi industri dan kendaraan bermotor berkurang secara signifikan, yang mengakibatkan penurunan emisi SO_2 , NO_x , $PM_{2.5}$, dan VOC masing-masing sekitar 16%–26%, 29%–47%, 27%–46%, dan 37%–57% selama periode Januari hingga 31 Maret 2020. Rata-rata harian konsentrasi $PM_{2.5}$ dan NO_2 pada wilayah Kota New York antara minggu pertama Januari dan minggu pertama Mei 2020 berkurang masing-masing sekitar 36% dan 51%. Namun, pembahasan di seluruh dunia menunjukkan peningkatan kualitas udara karena berbagai alasan seperti pembatasan sosial dan langkah-langkah karantina wilayah akibat COVID-19. Namun, perubahan signifikan di NYC tidak diamati selama tahun 2015–2019, yang mungkin terjadi karena analisis variasi kualitas udara jangka pendek dan jangka panjang.

Seperti beberapa negara lainnya, pengaruh pembatasan aktivitas manusia selama pandemi juga berdampak positif pada kualitas udara di India. Dibandingkan dengan tahun-tahun sebelumnya, di seluruh India, PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO, dan NO_2 menurun sekitar 43%, 31%, 10%, dan 18%, masing-masing, kemungkinan karena langkah-langkah lockdown. Namun, terjadi peningkatan proporsional pada kadar O_3 sebesar 17%. Berbeda dengan polutan lain yang disebutkan, kadar sulfur dioksida (SO_2) menunjukkan tren peningkatan di Mumbai, Bengaluru, dan Kolkata. AQI di India utara, selatan, barat, timur, dan tengah menunjukkan tren penurunan sekitar 44%, 33%, 32%, 29%, dan 15%, masing-masing. AQI menurun sebesar 30% pada tahun 2020 dibandingkan dengan tahun-tahun sebelumnya; Di antara kota-kota paling tercemar di India, Delhi mengalami dampak positif maksimal pada AQI dengan penurunan hampir 49%. Selama pandemi, polutan utama berubah menjadi O_3 di Gaya, Kolkata, Kanpur, dan Nagpur, sementara di Patna dan Agra, NO_2 muncul sebagai polutan yang sangat penting.

Namun, kualitas udara di berbagai kota di India, sebelum lockdown, menggambarkan gambaran yang berbeda. Basis data tersebut diterbitkan oleh WHO pada April 2018 dan mencakup 100 negara di seluruh dunia antara tahun 2011 dan 2016; total 14 kota dari 15 kota teratas yang terdaftar melaporkan tingkat polusi $PM_{2.5}$ yang berbahaya dari India. Menurut laporan WHO yang dirilis pada tahun 2018, di antara berbagai kota besar di seluruh dunia, Delhi menempati posisi teratas dalam daftar polusi PM_{10} . Delhi, Agra, dan beberapa kota lain seperti Mumbai, Kolkata, Chennai, dan Hyderabad telah berulang kali dibahas dalam berbagai



pembahasan penelitian yang dilakukan selama bertahun-tahun sejak tahun 2000 untuk mengidentifikasi potensi sumber $PM_{2.5}$ dan PM_{10} .

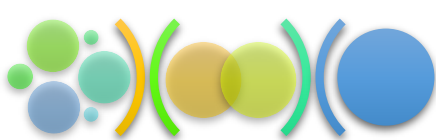
Delhi telah lama dikenal sebagai salah satu kota paling tercemar di dunia. Pemerintah Delhi mengumumkan keadaan darurat kesehatan pada November 2019 ketika kota tersebut mencatat tingkat $PM_{2.5}$ sebesar 625 mikrogram per meter kubik ($\mu g/m^3$) udara, yang 24 kali lebih tinggi dari standar yang direkomendasikan WHO. Volume PM lebih tinggi di Agra daripada pada wilayah perkotaan lain di India. Masalah polusi udara di Delhi mungkin telah berkontribusi pada peningkatan dampak buruk COVID-19 di seluruh kota. Paparan NO_2 dan $PM_{2.5}$ jangka panjang dapat memengaruhi angka kematian akibat COVID-19. Partikel PM dapat mempertahankan patogen SARS-CoV-2, yang menyebabkan COVID-19, sehingga memungkinkan virus tersebut bertahan di atmosfer dan berkembang biak. Tingkat SO_2 di kedua kota, Delhi dan Agra, setara dengan standar tahunan PCB, yaitu $50 \mu g/m^3$, sedangkan untuk NO_2 , tingkatnya melebihi standar tahunan $40 \mu g/m^3$ di kedua kota tersebut.

Berikut adalah beberapa faktor utama yang berkontribusi terhadap penurunan polusi pada wilayah Ibu Kota Nasional Delhi (NCR): penurunan lalu lintas umum sebesar 97% dan penurunan truk dan kendaraan komersial yang mencapai ibu kota sebesar 91% sepanjang bulan April, khususnya dibandingkan dengan periode sebelum lockdown pada Desember–Januari, menurut laporan dari “Centre for Science and Environment”. Indeks Kualitas Udara (AQI) tetap berada dalam kisaran “sedang” antara 18 Mei dan 5 Juni. Musim hujan menjaga kondisi polusi tetap terkendali dari Juli hingga September. Agustus merupakan bulan terbersih dalam setahun untuk kualitas udara, dengan AQI rata-rata 63,8. Pada bulan Agustus, tercatat 4 tanggal dengan kualitas udara “baik”, terbanyak dalam periode mana pun hingga tahun 2015 sejak CPCB mulai mengukur AQI (PTI 2020).

Berdasarkan temuan yang telah disebutkan sebelumnya, pembahasan ini bertujuan untuk menentukan pengaruh lockdown terhadap tingkat polusi udara di Delhi NCR (National Capital Region) dan wilayah sekitarnya dibandingkan dengan tahun-tahun sebelumnya. Pembahasan ini berupaya untuk membahas tingkat polusi udara dalam hal PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2 serta distribusinya pada wilayah-wilayah sensitif Delhi NCR dan distrik-distrik sekitarnya. Pemahaman yang lebih baik tentang dinamika polusi pada wilayah tersebut dan risiko kesehatan masyarakat akan didokumentasikan dalam pembahasan ini. Mengingat konsekuensi lingkungan dari lockdown, upaya telah dilakukan untuk memperkirakan variasi spasial dan temporal dalam jumlah polusi udara di India selama era pasca-lockdown dibandingkan dengan era sebelumnya.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan membandingkan tingkat polutan atmosfer pada wilayah pembahasan negara sebelum, selama, dan setelah pemberlakuan lockdown, termasuk konsentrasi polutan udara (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2), dan untuk menyelidiki potensi lockdown dalam meningkatkan kualitas lingkungan. Selain itu, AQI (Indeks Kualitas Udara) yang diperkirakan untuk penelitian ini dihitung dengan mengikuti NAQI (Indeks Kualitas Udara Nasional) oleh CPCB.

Perhitungan AQI dilakukan dengan menggabungkan rata-rata tertimbang dari polutan kriteria, termasuk PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2 ke dalam matriks nilai seragam selama periode



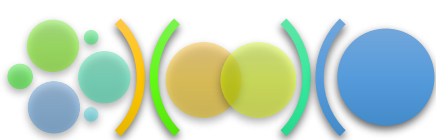
pembahasan yang sama yaitu April sebelum (2019), selama (2020), dan setelah lockdown total (2021), untuk menyelidiki efektivitas lockdown dalam meningkatkan kualitas lingkungan. Pembahasan ini juga mencoba untuk mengusulkan kerangka kerja untuk pengelolaan standar kualitas udara yang efektif di Delhi dan wilayah NCR. Kerangka kerja ini akan membantu badan pengelola dan pembuat kebijakan seperti pemerintah serta para pemangku kepentingan untuk mengatasi masalah ini secara terinformasi.

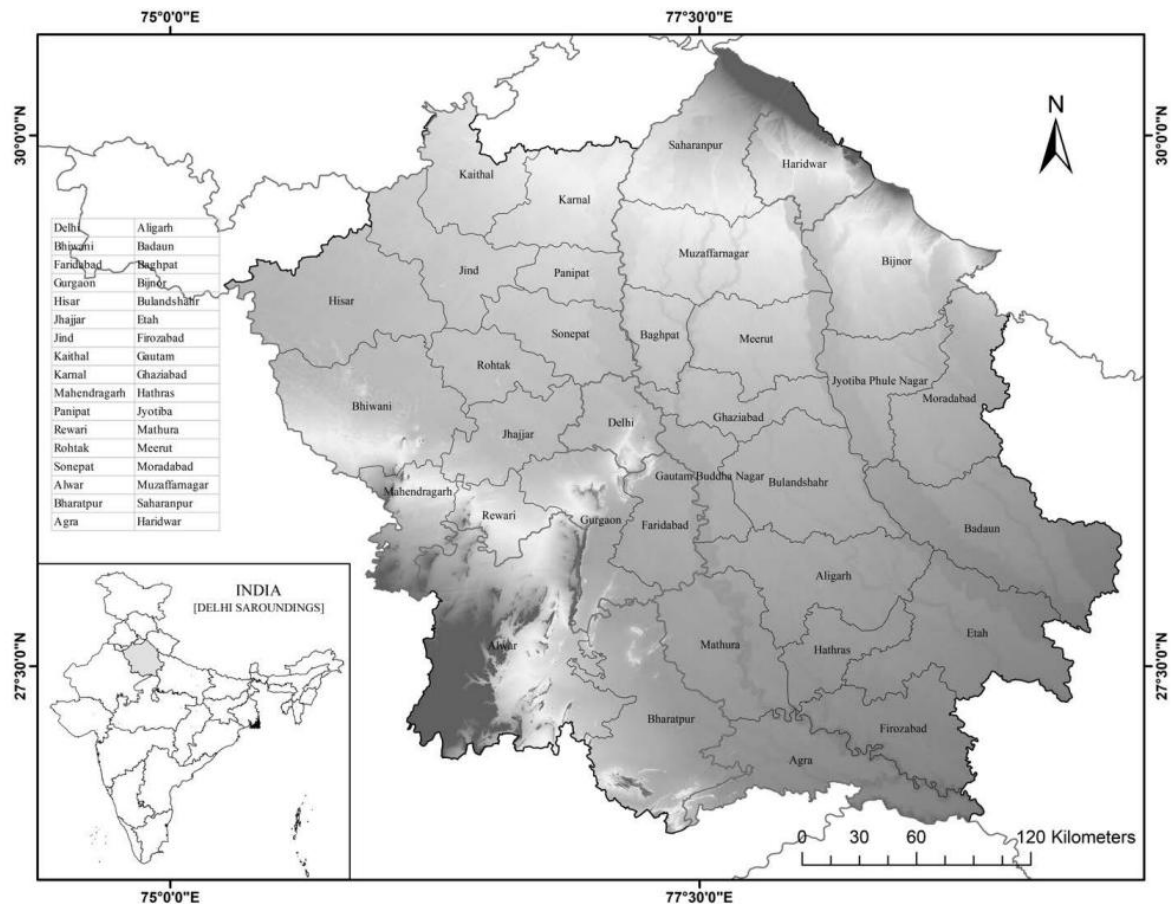
5.2 PROFIL WILAYAH DELHI NCR

Dalam pembahasan ini dilakukan di seluruh Delhi NCR, meliputi lima wilayah perkotaan rentan berdasarkan berbagai karakteristik lokasi, seperti komersial, industri, institusional, dan perumahan. Wilayah saat ini (Gambar 5.1) meliputi Delhi NCR, termasuk distrik-distrik sekitarnya seperti Kaithal dan Hisar di Haryana; Bijnor, Haridwar, Saharanpur, Aligarh, Etah, Hathras, Firozabad, Mathura, Bharatpur, Firozabad, dan Agra di Uttar Pradesh; seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1. NCR terletak di antara $27,60^{\circ}\text{N}$ dan $29,30^{\circ}\text{N}$ serta $76,20^{\circ}\text{E}$ dan $78,40^{\circ}\text{E}$, dengan kepadatan penduduk yang tinggi (790 jiwa/ km^2) yang meliputi 4 negara bagian—Delhi, Haryana, Uttar Pradesh, dan Rajasthan—dan terdiri dari 24 distrik. NCR kini mencakup area sekitar 58.332 km^2 , dengan Haryana memiliki wilayah terluas (28.545 km^2), diikuti oleh Uttar Pradesh (14.858 km^2), Rajasthan (13.446 km^2), dan kemudian Delhi (1.483 km^2).

Ibu kota (Delhi) memang memiliki lingkungan semi-kering dan secara fisik terletak di antara $28,39^{\circ}\text{N}$ hingga $28,88^{\circ}\text{N}$ dan $76,82^{\circ}\text{E}$ hingga $77,34^{\circ}\text{E}$. Kota ini dibatasi di utara oleh Pegunungan Himalaya, di selatan oleh wilayah semenanjung tengah yang panas, di timur laut oleh medan pegunungan, dan di barat oleh Gurun Thar Besar India. Iklim Delhi ditandai dengan musim panas yang panas dan kering serta musim dingin yang dingin. Jalan raya nasional (NH) utama berikut melewati Delhi: NH-1, -2, -8, -10, -24, dan -48. Pada musim panas, debu yang terbawa angin (Selatan–Barat Daya) dari Gurun Thar memengaruhi iklim Delhi. Musim dingin ditandai dengan pembalikan suhu, yang berkontribusi pada peningkatan konsentrasi aerosol dengan penurunan zona batas planet. Kecepatan angin rata-rata di ibu kota diperkirakan sekitar $1,0$ dan $2,0$ m/s. Distrik Agra yang diteliti dalam pembahasan ini memiliki sejarah panjang dan kaya akan situs bersejarah (Direktorat Operasi Sensus Uttar Pradesh 2011).

Meskipun demikian, usaha kecil yang berkembang pesat di Agra (industri kulit, kerajinan tangan, pabrik besi), sektor pariwisata, manufaktur komponen elektronik, pembangkit listrik tenaga termal, industri batu bata, dan pertanian merupakan basis ekonomi kota ini. Arsitektur Taj Mahal yang indah, yang dipahat dari batu marmer putih, mengalami kerusakan serius akibat meningkatnya tingkat polusi. Untuk melestarikan warisan tersebut, Mahkamah Agung menetapkan zona aman seluas 50 km di sekitar Taj Mahal pada tahun 2000, yang disebut TTZ (Taj Trapezium Zone), yang seharusnya bebas dari polutan industri dan lalu lintas. Namun demikian, strategi ini terbukti tidak efektif karena dampaknya tidak signifikan, yang mengakibatkan peningkatan eksponensial emisi $\text{PM}_{2.5}$ di Agra, yang akhirnya menempatkan kota tersebut sebagai kota tercemar keempat di India pada tahun 2016.





Gambar 5.1 Peta lokasi area yang dipilih untuk penelitian ini.

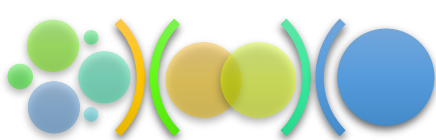
NCRPB (National Capital Region Planning Board di bawah Kementerian Pertumbuhan Perkotaan, Undang-Undang Pemerintah India, 1985) mendirikan NCR dengan tujuan untuk mendorong pembangunan yang terkoordinasi dengan baik pada wilayah tersebut. NCRTC (National Capital Region Transport Corporation), yang didirikan pada tahun 2013, bertanggung jawab untuk mengimplementasikan proyek RRTS (Regional Rapid Transit System) di seluruh NCR untuk memastikan pertumbuhan yang adil dan berkelanjutan pada wilayah metropolitan. Dalam hal polusi udara, kualitas udara pada wilayah ibu kota telah memburuk karena proyek pembangunan, intensitas kendaraan, dan emisi industri. Peningkatan lalu lintas kendaraan bermotor, urbanisasi bangunan, dan industri berkontribusi terhadap polusi udara di seluruh wilayah Delhi NCR.

5.3 PROGRAM ARCGIS

Dataset Yang Digunakan

Fokus utama bab ini adalah pada spesifikasi data dan parameter input yang dibutuhkan untuk penelitian ini. Prosedur dilakukan dengan program ArcGIS 10.5, yang digunakan untuk bekerja dengan peta dalam konteks GIS. Pembahasan ini membutuhkan dataset berikut: (i) Data polutan udara berbasis Stasiun Pemantauan Kualitas Udara Ambien Kontinu (CAAQMS); (ii) Data berbasis satelit tentang kontaminan udara.

Polutan Udara



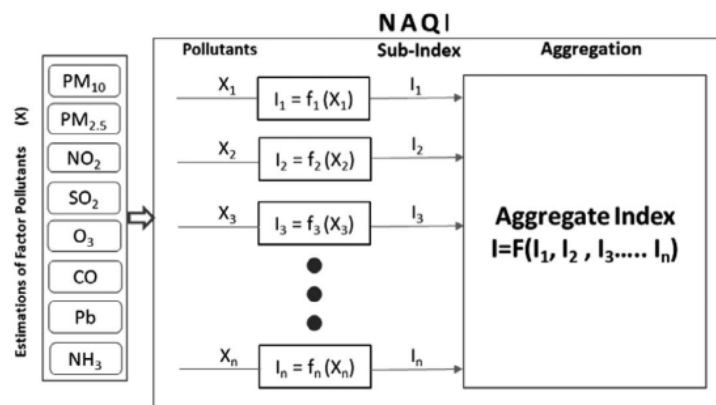
India memiliki jaringan 231 CAAQMS (Stasiun Pemantauan Kualitas Udara Ambien Kontinu) yang tersebar di seluruh negeri. CPCB dan SPCB (Badan Pengendalian Polusi Negara Bagian), DPCC (Komite Pengendalian Polusi Delhi), dan IMD (Departemen Meteorologi India) bertanggung jawab atas CAAQMS ini. CPCB memperoleh data polusi udara dari CAAQMS ini. Untuk penelitian ini, data rata-rata 24 jam diperoleh dari situs web CPCB (CPCB 2021) untuk PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2 dari 16 stasiun yang terletak di area penelitian untuk April 2019–2021. Data dari April 2019 hanya digunakan untuk membandingkan perubahan temporal dalam dimensi konsentrasi kontaminan udara untuk tahun 2019 dan 2020. Sebaliknya, data dari April 2021 dimasukkan ke dalam penilaian statistik untuk analisis komparatif konsentrasi intensitas polutan udara yang diamati sebelum, selama, dan setelah lockdown nasional.

Analisis Data Satelit

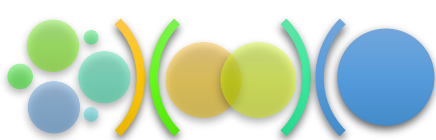
Citra satelit yang menggambarkan konsentrasi NO_2 dan SO_2 (resolusi spasial: $0,25^\circ$ -level-3 OMI troposfer harian) untuk April 2019–2021 diperoleh dari antarmuka Giovanni. Kemudian citra yang menggambarkan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan PM_{10} yang diperoleh dari Layanan Pemantauan Atmosfer Copernicus Eropa (CAMS) (ECMWF 2021) pada resolusi spasial 1° .

Estimasi Indeks Kualitas Udara

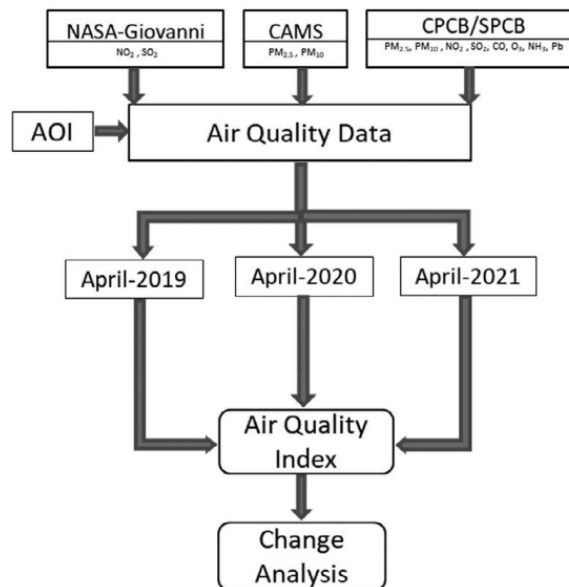
AQI dihitung menggunakan data polutan udara sebagai parameter masukan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.2. Terakhir, fluktuasi spasial-temporal polutan udara (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2) pada wilayah dinilai sebelum, selama, dan setelah periode lockdown (2019–2021). CPCB merilis data real-time tentang NAQI di 231 CAAQMS. NAQI ditentukan dengan menggabungkan rata-rata tertimbang dari polutan kriteria, termasuk PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 , O_3 , CO , NH_3 , dan Pb , ke dalam matriks nilai seragam. Singkatnya, NAQI dihitung dalam dua tahap. Pertama, sub-indeks dari setiap polutan kriteria dihitung. Kedua, semua sub-indeks kemudian digabungkan untuk membentuk indeks tunggal. Dokumen tentang NAQI membahas rumus yang digunakan untuk menghitung NAQI secara rinci. Data NAQI rata-rata harian dari CAAQMS diperoleh dari situs CPCB untuk bulan April selama tahun 2019–2021. Jika suatu lokasi memiliki lebih dari satu CAAQMS, satu nilai NAQI rata-rata harian dari seluruh CAAQMS juga telah diamati untuk lokasi tersebut. Selain itu, tidak semua CAAQMS beroperasi setiap saat.



Gambar 5.2 Ilustrasi dengan mengacu pada metode sistematis CPCB



AQI kemudian dihitung menggunakan data dari polutan udara sebagai parameter masukan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3. Gambar 5.3 menggambarkan bagan alur yang menguraikan semua prosedur yang digunakan dalam data untuk penelitian ini. Terakhir, fluktuasi spasial-temporal polutan udara (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2) pada wilayah dinilai sebelum, selama, dan setelah periode lockdown (2019–2021).



Gambar 5.3 Bagan alur yang menunjukkan dalam penelitian ini.

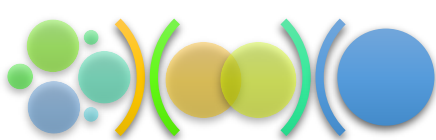
5.4 DAMPAK LOCKDOWN TERHADAP DINAMIKA KUALITAS UDARA

Tingkat polutan udara (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2) yang diamati (rata-rata harian) selama periode target bulan April selama tiga tahun berturut-turut (2019–2021), yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini, membantu memahami pengaruh lockdown terhadap kualitas udara di distrik-distrik wilayah yang meliputi Delhi NCR dan distrik-distrik sekitarnya di Haryana, UP, dan Rajasthan. Tujuan utama bab ini adalah untuk menentukan apakah ada dampak langsung dari lockdown COVID-19 terhadap tingkat polusi melalui temuan-temuan tersebut. Untuk menentukan dampak langsung dari lockdown ini, perubahan spasial dan temporal tingkat polutan sebelum, selama, dan setelah lockdown total telah dievaluasi, menggunakan bulan April tahun 2019–2021.

Variasi Spasial-Temporal Polutan Udara

PM_{2.5} (Partikulat < 2,5 μm)

Menurut USEPA, $PM_{2.5}$ mencakup partikel halus yang terhirup dengan diameter 2,5 μm dan lebih kecil. $PM_{2.5}$ sebagai polutan mulai dipertimbangkan pada tahun 2009 dan pertama kali diukur pada tahun 2016 di stasiun pengukuran manual. Standar tertinggi yang ditetapkan untuk $PM_{2.5}$ di udara ambien untuk nilai rata-rata 24 jam adalah 25 dan 60 $\mu g/m^3$, seperti yang disebutkan oleh Organisasi Kesehatan Dunia, Tim Kesehatan Kerja dan Lingkungan dan CPCB, masing-masing. Namun, $PM_{2.5}$ memiliki dampak yang lebih besar, bahkan ketika konsentrasinya rendah di atmosfer, dan seringkali dikaitkan dengan beberapa dampak berbahaya bagi kesehatan dibandingkan dengan polutan lainnya.



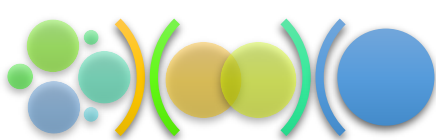
Emisi industri dan kendaraan, memasak dan pemanasan rumah tangga, pembakaran sampah terbuka, generator diesel, dan debu konstruksi merupakan sumber utama polusi $PM_{2.5}$ di atmosfer. Gambar 5.4 menunjukkan gambar yang menggambarkan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diperoleh dari CAMS pada April 2019–2021, yang menggambarkan periode sebelum lockdown, lockdown penuh, dan setelah lockdown atau lockdown parsial. Dapat diamati dari gambar pada Gambar 5.4 bahwa tingkat $PM_{2.5}$ sangat tinggi selama April 2019, yang kemudian turun drastis selama lockdown total pada April 2020 dan kembali naik ke tingkat moderat pada April 2021.

Menurut data CPCB, tingkat $PM_{2.5}$ rata-rata, yaitu $79,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ selama April 2019, menurun menjadi $40,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2020 dan kembali meningkat menjadi $68,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2021. Tingkat $PM_{2.5}$ maksimum tercatat di Ghaziabad (Sanjay Nagar – UPPCB) Uttar Pradesh yaitu $104,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2019; Tingkat maksimum $PM_{2.5}$ menurun menjadi $59,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2020. Namun, kembali meningkat menjadi $101,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2021. Tingkat minimum $PM_{2.5}$ yang tercatat di Panipat (Sektor-18, HSPCB) Haryana adalah $39,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2019. Pada April 2020, tingkat minimum $PM_{2.5}$ ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tercatat di Sanjay Nagar (Ghaziabad – UPPCB) Uttar Pradesh, yang relatif lebih rendah dibandingkan tahun 2019. Pada April 2021, konsentrasi terendah $PM_{2.5}$ kembali sedikit meningkat menjadi $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ yang tercatat di Bhiwani (H.B. Colony – HSPCB), Haryana. Pengamatan ini membuktikan bahwa penguncian total (lockdown) memiliki efek mendalam dalam mengurangi polutan $PM_{2.5}$ di udara ambien wilayah.

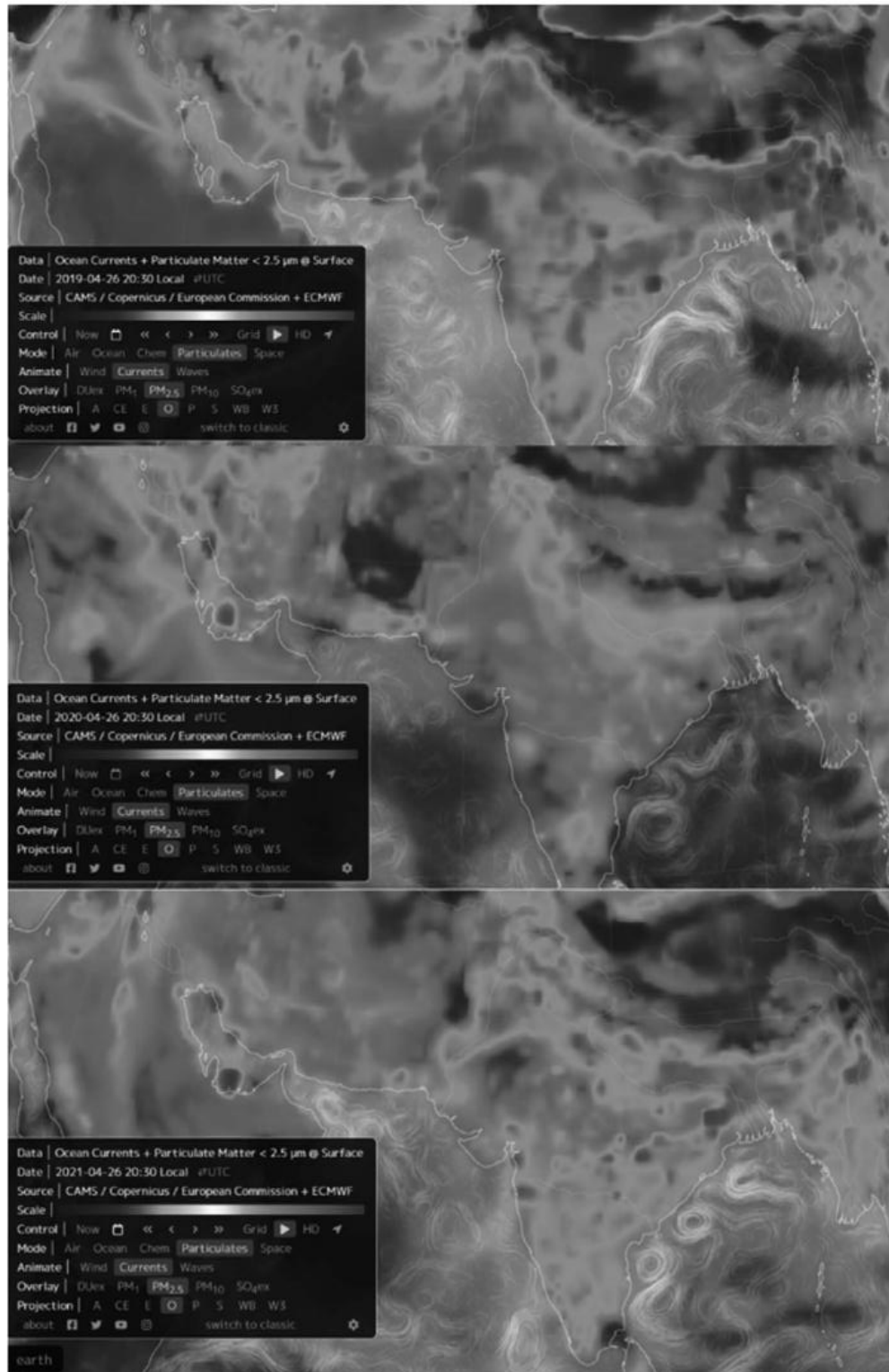
PM₁₀ (Particulate Matter <10 μm)

PM₁₀ terdiri dari partikel-partikel PM yang diameter aerodinamisnya lebih kecil dari 10 μm . Partikel ini memiliki afinitas penetrasi paru-paru manusia tertinggi, yang mengakibatkan peningkatan penyakit pernapasan dan jantung, dan dalam kasus ekstrem, bahkan kematian dini. Di udara ambien atau luar ruangan, batas maksimum rata-rata 24 jam PM₁₀ seperti yang direkomendasikan oleh WHO adalah $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan batas yang diizinkan adalah $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sejak tahun 2005, volume PM₁₀ terus meningkat dan pada akhirnya mencapai peningkatan yang lebih signifikan dari 2,5 kali lipat. Pada tahun 2010, konsentrasi PM₁₀ rata-rata tahunan di luar ruangan mencapai $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hampir empat kali lebih tinggi dari standar nasional dan 13 kali lebih tinggi dari pedoman yang disebutkan oleh WHO. Sumber utama PM₁₀ terdiri dari pembakaran batu bara, minyak tanah, bahan bakar fosil, biomassa, dan debu.

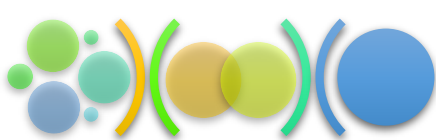
Gambar 5.5 menggambarkan konsentrasi PM₁₀ yang diperoleh dari CAMS untuk April 2019–2021, menunjukkan periode sebelum lockdown, lockdown total, dan setelah lockdown atau lockdown parsial, serupa dengan tingkat $PM_{2.5}$. Berdasarkan gambar pada Gambar 5.5, tingkat PM₁₀ sangat tinggi pada April 2019 dan kemudian menurun drastis selama lockdown penuh pada April 2020 sebelum naik ke tingkat yang wajar pada April 2021. Menurut statistik CPCB dan Gambar 5.5, tingkat PM₁₀ rata-rata pada April 2019 adalah $198,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, turun menjadi $107,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2020, dan naik menjadi $193,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2021. Pada April tahun ini, tingkat PM₁₀ tertinggi di Ghaziabad (Sanjay Nagar – UPPCB) di Uttar Pradesh adalah $303,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tingkat PM₁₀ tertinggi di Bhiwani (H.B. Colony) adalah $188,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2020 dan kemudian meningkat menjadi $188,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2021. Meskipun terjadi

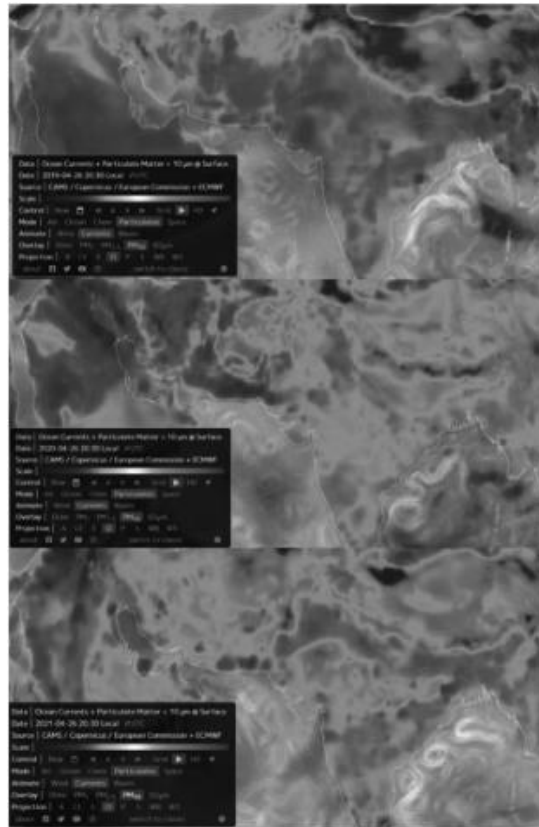


penurunan konsentrasi PM_{10} selama lockdown pada wilayah yang disebutkan di atas, sepanjang periode tersebut, tingkat PM_{10} melebihi standar yang ditetapkan oleh WHO, sehingga kualitas udara menjadi berbahaya.



Gambar 5.4 Variasi konsentrasi $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) selama April 2019–2021.





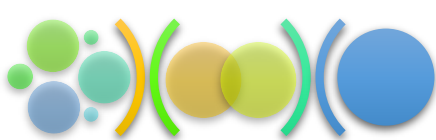
Gambar 5.5 Variasi konsentrasi PM₁₀ (µg/m³) dari April 2019 hingga 2021.

Tingkat PM₁₀ terendah di Panipat (Sektor-18 – HSPCB) di Haryana adalah 39,17 µg/m³ pada April 2019. Di Moradabad (Lajpat Nagar – UPPCB) di Uttar Pradesh, tingkat PM₁₀ minimum (34,43 µg/m³) dilaporkan pada April 2020, lebih rendah dari tahun 2019. Tingkat PM₁₀ ini berada dalam standar WHO. Pada April 2021, konsentrasi PM₁₀ terendah di Alwar (Moti Doongri – RSPCB) di Rajasthan meningkat secara signifikan menjadi 84,11 µg/m³. Temuan ini menunjukkan bahwa lockdown penuh berdampak signifikan pada penurunan tingkat polutan PM₁₀ di udara ambien di seluruh wilayah penelitian.

SO₂ (Sulfur Dioksida)

SO₂ sebagai gas tidak berwarna dan memiliki bau yang menyengat (WHO, 2018). Sumber utama SO₂ adalah pembakaran bahan bakar fosil (batu bara dan minyak) dan peleburan bijih mineral yang kaya sulfur. Sumber antropogenik meliputi pembakaran bahan bakar fosil untuk keperluan rumah tangga, pembangkit listrik, dan transportasi (WHO, 2018). Standar yang ditetapkan untuk SO₂ rata-rata 24 jam oleh CPCB adalah 80 mg/m³, sedangkan standar yang ditetapkan oleh WHO adalah 40 mg/m³ di udara ambien. SO₂ terutama menyebabkan penyakit pernapasan, memengaruhi paru-paru, dan menyebabkan iritasi pada mata (WHO, 2018).

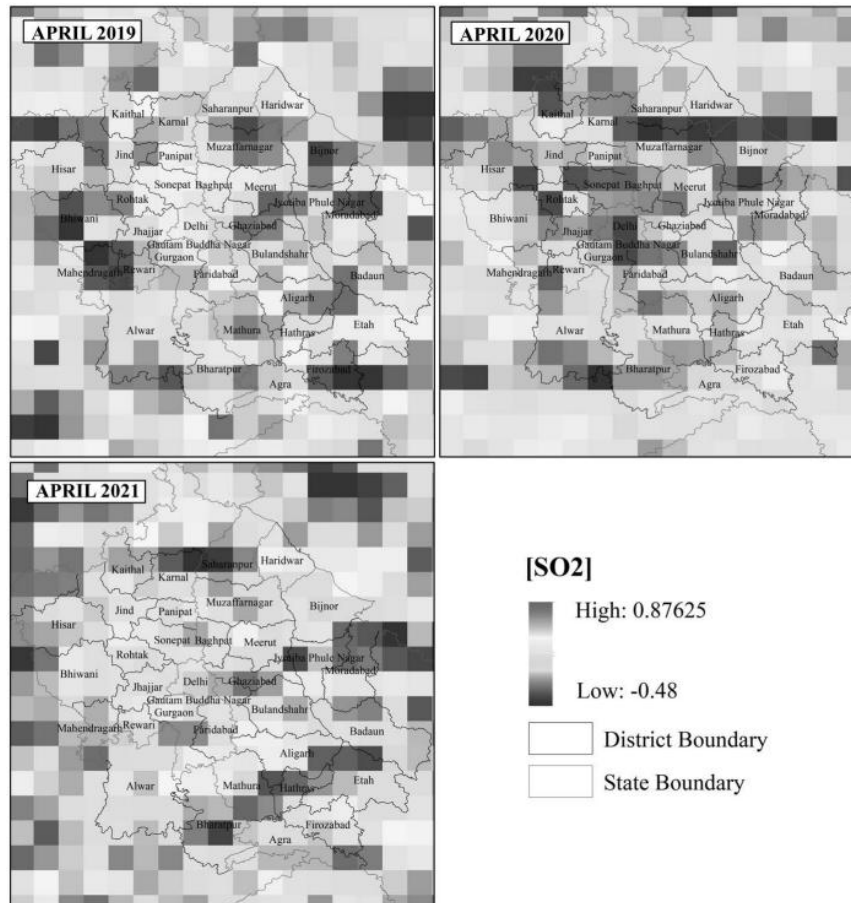
Dalam kombinasi dengan air, SO₂ membentuk asam sulfat, yang merupakan komponen utama hujan asam, penyebab utama deforestasi (WHO, 2018). Gambar 5.6 menunjukkan konsentrasi SO₂ di seluruh area pembahasan yang diperoleh dari NASA-Giovanni untuk April 2019–2021, yang menunjukkan periode sebelum lockdown, lockdown penuh, dan setelah lockdown atau lockdown parsial, yang sebanding dengan tingkat SO₂. Berdasarkan gambar



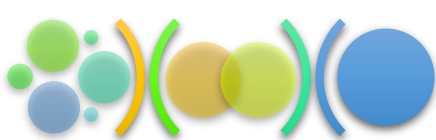
pada Gambar 5.6, tingkat SO_2 sangat tinggi pada April 2019. Tingkat SO_2 menurun secara signifikan selama lockdown total pada April 2020, sehingga meningkatkan kualitas udara, sebelum naik ke tingkat moderat pada April 2021.

Menurut data CPCB yang mendukung Gambar 5.6, tingkat SO_2 rata-rata pada April 2019 adalah $25,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$, turun menjadi $16,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2020, dan naik menjadi $24,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2021. Pada April 2020, tingkat SO_2 tertinggi di Bulandshahr (Yamunapuram – UPPCB) di Uttar Pradesh adalah $46,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pada April 2020, tingkat SO_2 tertinggi di Bhiwani (H.B. Colony) adalah $31,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$, yang merupakan standar memuaskan yang ditetapkan oleh WHO. Tingkat SO_2 maksimum adalah $49,78 \text{ g}/\text{m}^3$ pada April 2021, yang melebihi standar WHO. Tingkat SO_2 minimum adalah $9,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2019 di Kaithal (Rishi Nagar – HSPCB) di Haryana.

Di Gurugram (Vikas Sadan – HSPCB), tingkat SO_2 minimum ($6,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) diamati pada April 2020, lebih rendah daripada tahun 2019. Pada April 2021, konsentrasi SO_2 terendah di Jind (Police Lines – HSPCB) di Haryana meningkat menjadi $12,91 \text{ g}/\text{m}^3$, lebih tinggi daripada tahun 2019. Angka-angka yang disebutkan di atas mengenai tingkat SO_2 minimum berada dalam standar yang ditetapkan oleh WHO. Dengan demikian, seperti halnya $\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10} , data ini menunjukkan bahwa lockdown penuh memiliki pengaruh signifikan dalam menurunkan tingkat polutan SO_2 di udara ambien dan meningkatkan kualitasnya di seluruh wilayah.



Gambar 5.6 Variasi konsentrasi SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dari April 2019 hingga 2021.

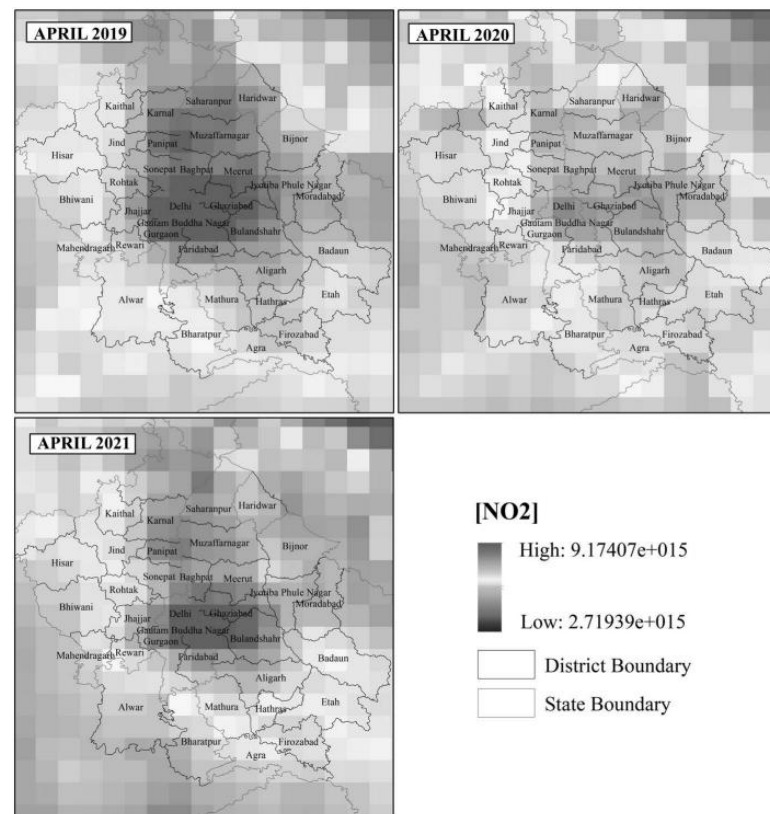


NO₂ (Nitrogen Dioksida)

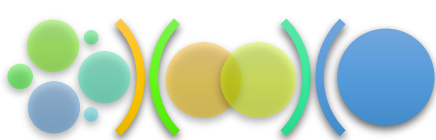
NO₂ adalah gas oksidan yang terutama dihasilkan akibat pembakaran bahan bakar fosil. Gas ini bertanggung jawab untuk memicu asma. Aerosol nitrat adalah produk dari NO₂, dan merupakan bagian penting dari PM_{2.5}; dengan adanya sinar ultraviolet, gas ini menjadi komponen utama ozon.

Standar NO₂ untuk rata-rata 24 jam adalah 20 dan 80 mg/m³ seperti yang ditetapkan oleh WHO dan CPCB, masing-masing, di udara ambien. Sumber utama NO₂ meliputi pembakaran bahan bakar fosil (yaitu, emisi kendaraan) dan industri besar. Gambar 5.7 menunjukkan konsentrasi NO₂ di seluruh wilayah penelitian yang diperoleh dari NASA-Giovanni untuk April 2019–2021, menunjukkan periode sebelum lockdown, lockdown penuh, dan setelah lockdown atau lockdown parsial, yang serupa dengan tingkat NO₂. Menurut foto-foto pada Gambar 5.6, tingkat NO₂ sangat tinggi pada April 2019.

Namun, tingkat NO₂ menurun secara substansial selama lockdown penuh pada April 2020 sebelum meningkat ke tingkat yang wajar pada April 2021. Gambar 5.7 menggambarkan konsentrasi NO₂ pada wilayah penelitian untuk April 2019–2021, seperti yang diperoleh dari NASA-Giovanni, menunjukkan periode sebelum lockdown, lockdown penuh, dan setelah lockdown atau lockdown parsial, yang setara dengan tingkat NO₂. Pada bulan April 2019, tingkat NO₂ sangat tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.6. Tingkat NO₂ rata-rata pada bulan April 2019 adalah 35,57 µg/m³, menurun menjadi 18,92 g/m³ pada bulan April 2020, dan meningkat menjadi 25,46 µg/m³ pada bulan April 2021 berdasarkan data CPCB yang mendukung Gambar 5.7.



Gambar 5.7 Variasi konsentrasi NO₂ (µg/m³) dari April 2019 hingga 2021.

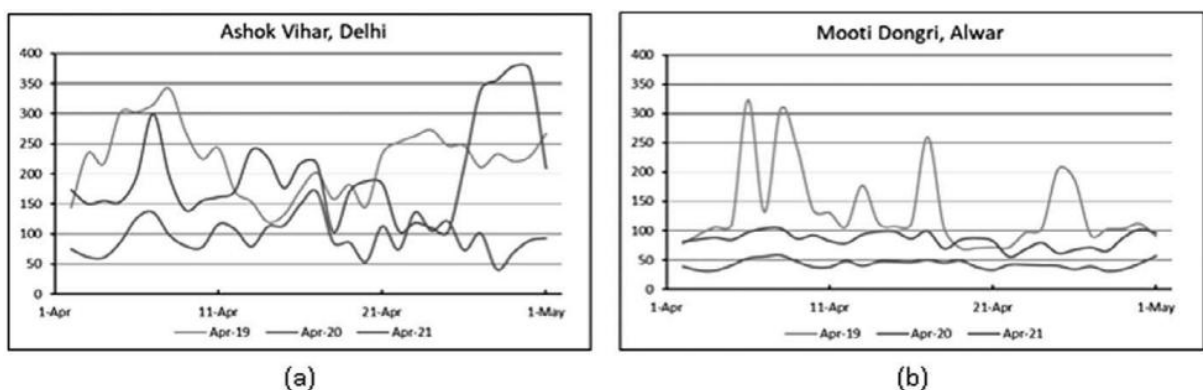


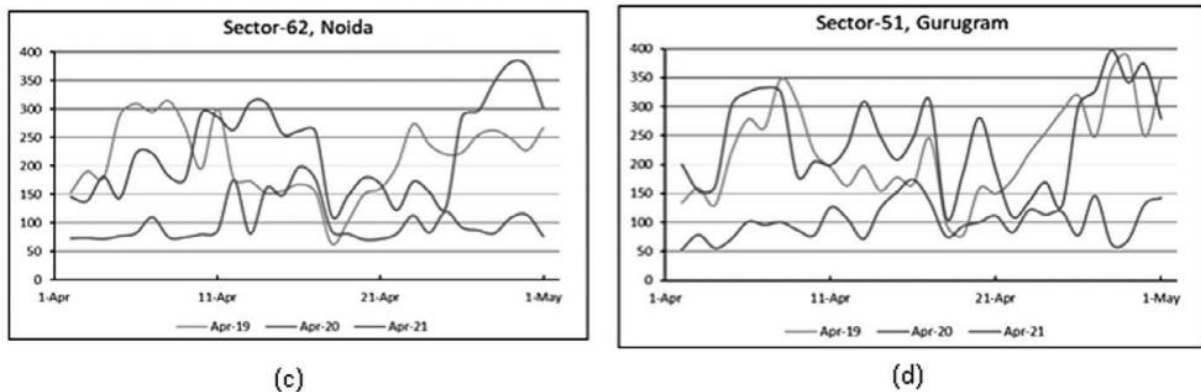
Dari nilai rata-rata NO_2 pada April 2020 ($18,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$) terlihat bahwa nilai tersebut berada dalam standar WHO, yang menunjukkan bahwa kadar NO_2 memuaskan. Kadar NO_2 tertinggi yang tercatat di Ghaziabad (Sanjay Nagar – UPPCB) pada April 2019 adalah $66,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kadar NO_2 tertinggi di Panipat (Sektor-18 – HSPCB) pada April 2020 adalah $50,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, di atas standar memuaskan WHO. Pada April 2021, kadar NO_2 maksimum di Ghaziabad (Sanjay Nagar, UPPCB) mencapai $69,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kadar NO_2 yang disebutkan di atas lebih tinggi dari standar WHO. Pada April 2019, tingkat minimum NO_2 di Gurugram (Vikas Sadan – HSPCB) adalah $10,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pada April 2020, tingkat minimum NO_2 ($5,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$) di Bhiwani (H.B. Colony – HSPCB) diukur, yang lebih rendah daripada tahun 2019. Konsentrasi minimum NO_2 di Jind (Police Lines – HSPCB) di Haryana sedikit meningkat menjadi $6,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada April 2021, agak lebih tinggi daripada tahun 2019. Angka-angka tingkat minimum NO_2 ini, yang berada dalam kriteria WHO, menunjukkan bahwa tingkat NO_2 pada wilayah ini memuaskan. Hasil ini menunjukkan bahwa lockdown penuh berdampak signifikan pada penurunan tingkat polutan NO_2 di udara ambien dan peningkatan kualitasnya di seluruh wilayah penelitian, seperti halnya pada PM_{10} dan $\text{PM}_{2.5}$.

Indeks Kualitas Udara

“Indeks Kualitas Udara” adalah instrumen yang sangat baik untuk mengkomunikasikan kondisi kualitas udara kepada masyarakat dalam matriks nilai terpadu, serta potensi dampaknya terhadap kesehatan masyarakat dan ekosistem. Untuk empat lokasi CAAQMS, Gurugram (Vikas Sadan – HSPCB), Alwar (Moti Doongri – RSPCB), Noida (Sektor-125 – UPPCB), dan Delhi (Ashok Vihar – DPCC), polutan kriteria, yaitu PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2 diakses untuk waktu yang dipilih.

Gambar 5.8 menggambarkan grafik variasi spasial regional dari NAQI rata-rata bulanan untuk April (2019–2021). CPCB telah membagi skala warna NAQI menjadi enam kategori, masing-masing dengan rentang nilai dan kondisinya, sebagai berikut: baik (0–50); memuaskan (51–100); sedang (101–200); buruk (201–300); sangat buruk (301–400); dan parah (>401), seperti yang diilustrasikan pada Tabel 5.2.





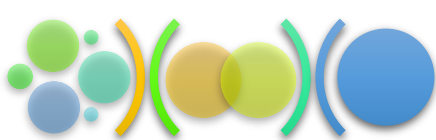
Gambar 5.8 Grafik garis yang menggambarkan tren AQI antara tahun 2019 dan 2021. (a) Ashok Vihar, Delhi; (b) Mooti Dongri, Alwar; (c) Sektor 62, Noida; (d) Sektor-51, Gurugram.

Tabel 5.2 Skala Warna NAQI Menunjukkan Kemungkinan Dampak Kesehatan

AQI	Keterangan	Kemungkinan Dampak Kesehatan
0–50	Baik	Dampak minimal.
51–100	Memuaskan	Gangguan pernapasan ringan pada orang yang sensitif.
101–200	Sedang	Kesulitan bernapas bagi penderita penyakit paru-paru, asma, dan jantung.
201–300	Buruk	Kesulitan bernapas bagi sebagian besar individu dengan paparan berkepanjangan.
301–400	Sangat Buruk	Ketidaknyamanan pernapasan pada paparan berkepanjangan.
>400	Parah	Mempengaruhi orang sehat dan berdampak signifikan bagi penderita penyakit yang sudah ada.

Nilai NAQI untuk setiap wilayah telah diperoleh dengan menghitung rata-rata tingkat NAQI harian dari setiap CAAQMS di negara bagian tersebut, yang kemudian dirata-ratakan menjadi satu angka untuk wilayah tersebut untuk setiap bulan. Sesuai dengan Gambar 5.8(a, b, c, d), nilai AQI rata-rata diplot dalam grafik garis yang menggambarkan polusi selama April 2019–2021. Distribusi geografis berdasarkan wilayah ditunjukkan dalam NAQI per wilayah (Gambar 5.8 (a, b, c, d)), menunjukkan pola yang jelas dalam keadaan kualitas udara (dari buruk hingga sangat baik) di lokasi yang mencakup bulan April 2019–2021.

Grafik garis pada Gambar 5.8(a) menggambarkan status AQI di Ashok Vihar (Delhi). Sesuai tren AQI tahun 2019, AQI dimulai sekitar 120 pada bulan April, diikuti oleh tren kenaikan dalam kisaran 300–350 (ketidaknyamanan pernapasan jika terpapar dalam waktu lama) dan kemudian melengkung ke bawah pada akhir April. AQI di Ashok Vihar kembali meningkat selama minggu terakhir April dan Mei. Tren AQI April 2020 menunjukkan nilai yang relatif lebih rendah dibandingkan tahun 2019. Nilai tertinggi (sekitar 170) dan terendah (di bawah 50) menggambarkan polusi sedang hingga minimal selama lockdown di Ashok Vihar. AQI pada tahun 2021 menunjukkan peningkatan signifikan dari tahun 2020 dengan nilai tinggi sekitar 400, yang dapat menyebabkan ketidaknyamanan pernapasan jika terpapar dalam



waktu lama. AQI lebih tinggi pada awal April, diikuti oleh penurunan yang stabil dan kemudian meningkat menjadi sekitar 400 pada awal Mei.

Gambar 5.8(b) menggambarkan status AQI Moti Doongri, Alwar, untuk bulan April (2019–2021). Nilai AQI selama April 2019 menunjukkan serangkaian fluktuasi yang berkisar antara 50 hingga 300. Grafik tersebut menggambarkan dua puncak signifikan di awal April 2019, diikuti oleh satu puncak masing-masing di pertengahan dan akhir bulan. Pengamatan ini agak menarik, karena AQI pada tahun 2020 dan 2021 di Moti Doongri tidak menunjukkan fenomena seperti itu. AQI pada tahun 2020 tetap sekitar 50, menunjukkan peningkatan karena lockdown total pada tahun 2020 diikuti oleh peningkatan pada tahun 2021, yang menunjukkan penurunan kualitas udara.

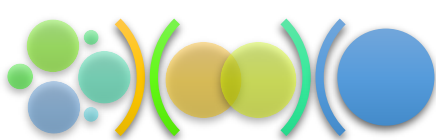
Kualitas udara pada April 2019 di sektor 62, Noida, menunjukkan fluktuasi yang besar, dengan nilai yang lebih tinggi di awal April, diikuti oleh penurunan tajam di pertengahan dan kemudian meningkat lagi di akhir bulan. Indeks Kualitas Udara (AQI) pada April 2019 berkisar dari sangat rendah (sekitar 50) hingga sangat tinggi (sekitar 300). Kualitas udara membaik selama lockdown, seperti yang terlihat pada Gambar 5.8(c), dengan nilai AQI tertinggi 200. Kualitas udara kembali memburuk pada tahun berikutnya, dengan nilai tertinggi naik menjadi sekitar 400. AQI April 2021 menunjukkan nilai yang lebih tinggi sepanjang bulan dengan penurunan sesekali di akhir bulan.

Kondisi AQI Sektor-51, Gurugram, untuk bulan April digambarkan pada Gambar 5.8(d). AQI pada tahun 2019 menunjukkan fluktuasi besar dengan empat puncak berbeda yang berkisar antara 80 dan 400. Kualitas udara sangat membaik selama lockdown pada tahun 2020 dengan kisaran nilai AQI 50–200. Seperti tempat lain, kualitas udara memburuk pada tahun 2021, mencapai 400 di akhir April. Nilai AQI selama tahun 2019 dan 2021 menunjukkan tren yang serupa, dengan nilai tinggi di awal April, diikuti oleh penurunan di pertengahan dan kemudian meningkat kembali ke nilai tertinggi di akhir.

Variasi Spasio-Temporal AQI

Gambar 5.9 menggambarkan sebaran spasial-temporal kualitas udara antara tahun 2019 dan 2021. Peta-peta tersebut dibuat menggunakan nilai AQI, yang melaluinya grafik garis yang diilustrasikan di atas diperkirakan. Gambar 5.9 menunjukkan bahwa selama April 2019, AQI buruk di distrik Muzaffarnagar, Ghaziabad, dan Mathura pada wilayah pembahasan. AQI berkisar dari sedang hingga buruk di Saharanpur, Bijnor, Jyotiba Phule Nagar, Moradabad, Bulandshahr, Meerut, Hathras, Karnal, Gurugram, dan Delhi. Kemudian, AQI hanya tergolong sedang di Hisar, Bhiwani, Mahendragarh, Jhajjar, Rohtak, Jind, Panipat, Rewari, Aligarh, Etah, dan Budaun.

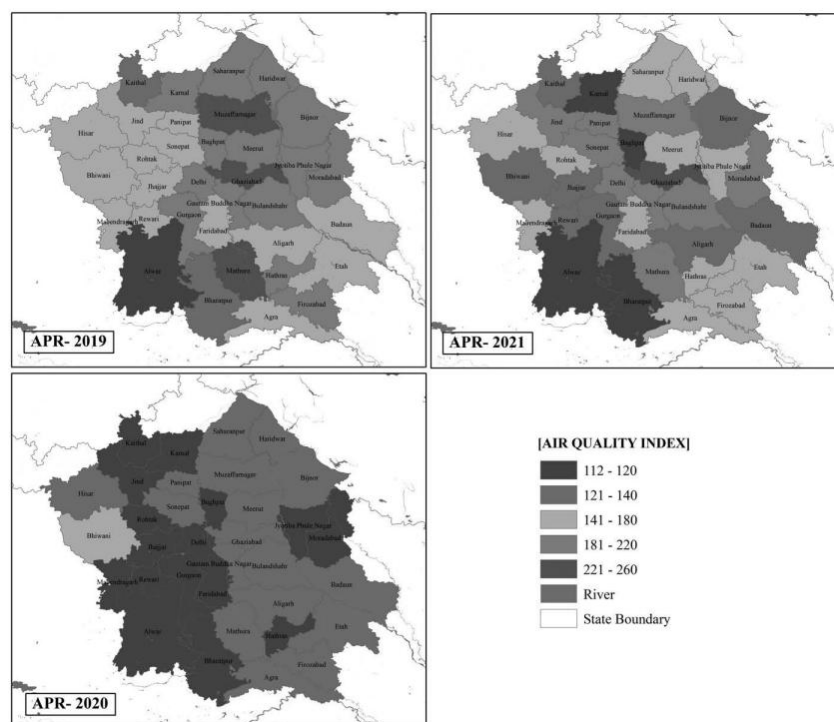
Selanjutnya, AQI berkisar dari memuaskan hingga sedang di distrik Kaithal, Bharatpur, dan Alwar. Sesuai Gambar 5.9, selama April 2020, AQI di hampir seluruh wilayah berkisar dari memuaskan hingga sedang, yang jelas menunjukkan peningkatan drastis dalam kualitas udara akibat lockdown total. Kemudian, selama April 2021, setelah pencabutan lockdown total dan pemberlakuan lockdown parsial, sesuai Gambar 5.9, kisaran AQI menjadi sedang hingga buruk di distrik Jind, Panipat, Sonapat, Delhi, Gautam Buddha Nagar, Bulandshahr, dan Moradabad,



Mathura, dan menjadi buruk di Ghaziabad. Namun, di Alwar, Bharatpur, Karnal, dan Baghpat, AQI masih lebih baik, dan berkisar dari sedang hingga memuaskan.

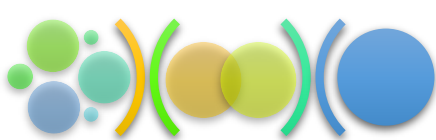
5.5 PEMBAHASAN POLUSI UDARA

COVID-19 memberi negara-negara kesempatan sekali seumur hidup untuk mengumpulkan data dasar tentang polusi udara, karena emisi polutan udara dari transportasi, sektor industri, dan operasi bisnis berkurang secara signifikan selama lockdown nasional yang relevan dengan inisiatif mitigasi polusi udara. Mulai 25 Maret 2020, India telah memberlakukan lockdown nasional selama beberapa bulan. Akibatnya, tingkat polusi udara menurun secara signifikan (Gambar 5.4 dan 5.5). Selama lockdown nasional, rata-rata keseluruhan pembacaan PM_{10} dan $PM_{2.5}$ yang diamati jauh lebih rendah daripada NAAQS untuk PM_{10} dan $PM_{2.5}$ (Gambar 5.8 dan 5.9).



Gambar 5.9 Variasi spasial-temporal AQI selama April (2019–2021).

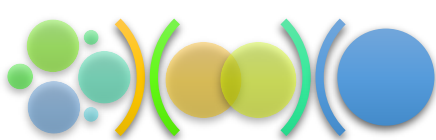
Selain itu, tingkat rata-rata nasional SO_2 dan NO_2 yang tercatat secara konsisten lebih rendah daripada NAAQS yang relevan untuk SO_2 dan NO_2 (Gambar 5.6 dan 5.7). Mempertimbangkan dampaknya terhadap kesehatan manusia, WHO merekomendasikan agar standar kualitas udara atmosfer untuk PM_{10} dan $PM_{2.5}$ mendekati 50 dan 25 $\mu g/m_3$. Di India, NAAQS untuk PM_{10} dan $PM_{2.5}$ masing-masing adalah 100 dan 60 $\mu g/m_3$, yang sekitar dua kali lipat di atas tingkat yang direkomendasikan WHO. Mengingat tingginya tingkat polusi di India, ada kebutuhan mendesak untuk mengevaluasi NAAQS yang berlaku untuk kontaminan udara guna mengurangi polusi udara. Stasiun pengukur polutan udara yang disajikan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa proporsi polutan udara dari lalu lintas, industri, dan aktivitas bisnis berkurang secara signifikan selama lockdown nasional.

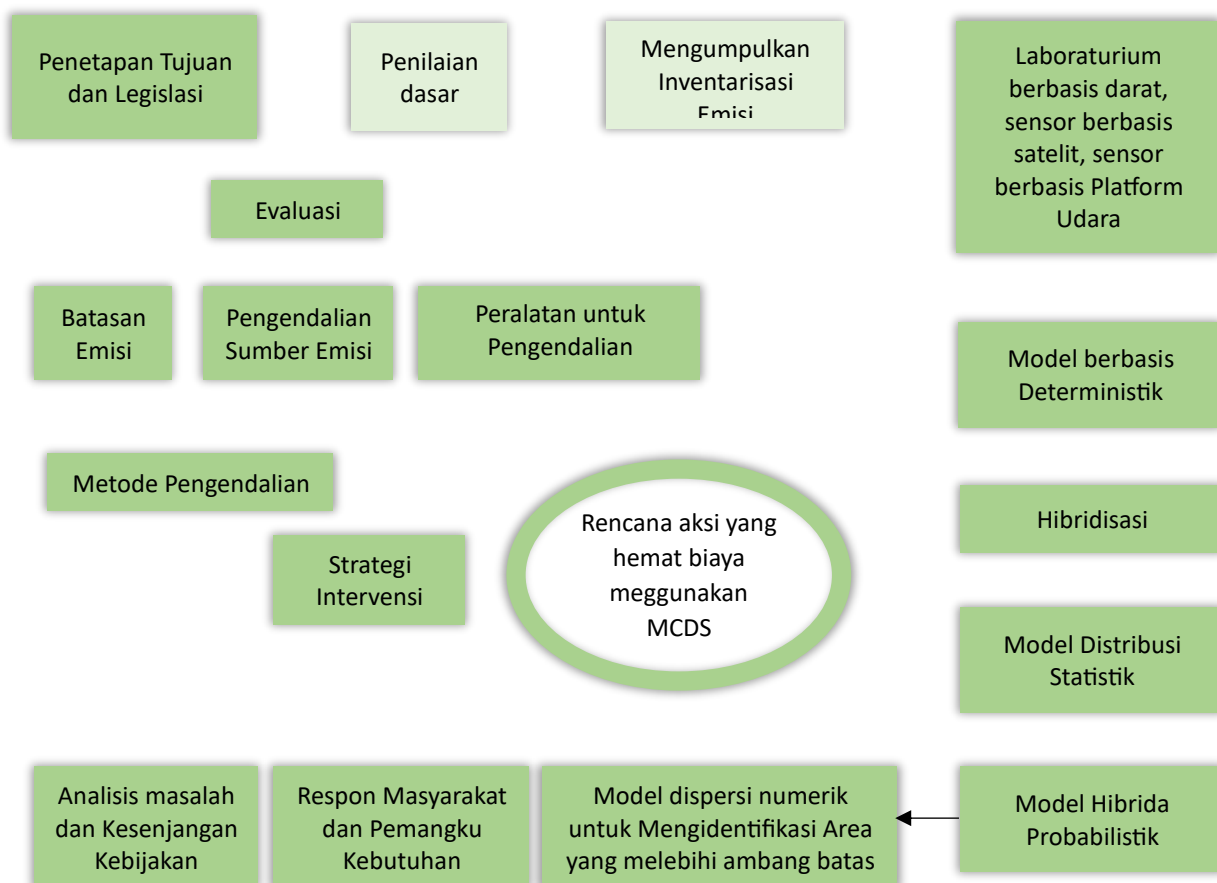


Akibatnya, kadar $PM_{2.5}$ dan PM_{10} mencapai atau melampaui NAAQS . Hal ini menunjukkan bahwa jika emisi polutan udara dari transportasi, industri, dan aktivitas komersial, termasuk pembakaran biomassa, memasak di rumah, dan pembakaran biomassa terbuka, dikurangi, NAAQS yang berlaku dan juga kadar $PM_{2.5}$ dan PM_{10} yang lebih rendah dapat tercapai. Hal ini dapat dicapai dengan menyediakan bahan bakar bersih dan melaksanakan 25 langkah mitigasi yang direkomendasikan dalam Laporan “Solusi Berbasis Sains” (Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP), 2019). Pembahasan ini merupakan upaya yang wajar untuk mengevaluasi dampak lockdown nasional terhadap kualitas lingkungan dalam hal emisi PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , dan NO_2 . Kami percaya bahwa hasil penelitian saat ini bergantung pada sumber data yang andal dari periode yang sangat singkat, dan data tambahan tentang metrik emisi yang berbeda dapat memberikan lebih banyak informasi tentang sejauh mana penguncian wilayah telah berkontribusi pada peningkatan kualitas lingkungan. Meskipun demikian, hasil sejauh ini telah menunjukkan tren yang jelas menuju peningkatan kualitas lingkungan sebagai dampak langsung dari penguncian wilayah total.

Manajemen Kualitas Udara Pada wilayah Delhi Ncr Melalui Pendekatan Mcds

Pengembangan pengendalian kualitas udara di India harus dipahami dalam konteks tantangan perlindungan lingkungan yang lebih umum serta struktur politik dan konstitusional India. Pengurangan signifikan dalam tingkat polusi atmosfer mungkin tidak mungkin dicapai jika kita melihat masalah ini secara terpisah dari konteks yang lebih besar dan mengabaikan interaksi beberapa faktor rumit yang memengaruhi sumber polusi. Meskipun pemerintah telah mengambil beberapa langkah pengendalian sporadis dan tidak terukur di kota Delhi untuk menurunkan tingkat polusi udara, namun masih melampaui Standar Kualitas Udara Ambien Nasional.

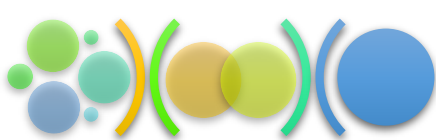




Gambar 5.10 Kerangka konseptual untuk manajemen kualitas udara pada wilayah Delhi NCR.

Oleh karena itu, dalam pembahasan ini, kami telah mencoba mengembangkan kerangka kerja untuk pemantauan kualitas udara di New Delhi. Pada langkah pertama, otoritas penegak hukum dan majelis legislatif memilih kualitas udara target untuk beberapa tahun ke depan. Kemudian dibentuk badan umum untuk melaksanakan tugas tersebut, yang meliputi pengumpulan inventaris dan pemodelan. Di zaman modern, data satelit juga menjadi sumber penilaian kualitas udara bersama dengan metode berbasis darat. Pemodelan melibatkan pembangunan sistem hibrida yang mampu memprediksi dan memberikan peringatan tentang penurunan kualitas udara. Kemudian, area dengan konsentrasi partikulat tinggi diidentifikasi untuk strategi mitigasi. Strategi mitigasi melibatkan mempertimbangkan semua faktor yang relevan dan memberikan solusi optimal dengan menerapkan pendekatan MCDS.

Metode ini akan memberikan informasi tentang batas emisi dan menunjukkan jalur untuk mengendalikan emisi dari sumber secara langsung. Saat ini, emisi dari sumber diatur secara langsung dengan mengganti bahan baku dan memodifikasi peralatan industri, sedangkan sistem seperti filter kain pemisah siklon, kolektor basah ESP, dan menara semprot digunakan untuk pengendalian asap. Rencana aksi yang berasal dari sistem MCDS akan memberikan solusi baru untuk manajemen kualitas udara. Pemerintah dan badan pengatur lainnya dapat membuat keputusan yang tepat dan mengubah atau memodifikasi kebijakan sesuai dengan kerangka kerja yang disediakan (Gambar 5.10).

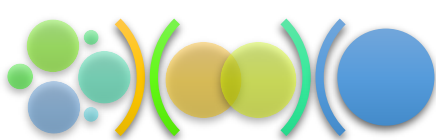


5.6 KESIMPULAN

Dalam pembahasan ini jelas menunjukkan bahwa penguncian pandemi global COVID-19 secara langsung berdampak pada peningkatan kualitas udara atmosfer di lokasi perkotaan, seperti yang ditunjukkan oleh pengurangan substansial pada sebagian besar polutan udara, terutama PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , dan NO_2 . Penurunan konsentrasi polutan udara berada dalam batas yang diizinkan yang ditetapkan oleh pedoman CPCP India. Penurunan estimasi AQI Bumi ini konsisten dengan citra satelit NASA-Giovanni tentang partikulat udara. Alasan pengurangan ini adalah pemberlakuan hukum dan peraturan yang ketat, termasuk pembatasan semua aktivitas luar ruangan, penangguhan sektor transportasi, dan penghentian industri, pasar, tempat kerja, gedung perkantoran, lembaga pendidikan, dan tempat-tempat institusional lainnya yang digambarkan untuk memerangi pandemi pada wilayah hotspot.

Menurut penelitian, kejadian COVID-19 lebih umum terjadi di daerah metropolitan dengan kepadatan penduduk tinggi, riwayat perjalanan internasional, dan tingkat polusi udara ambien yang tinggi. Karena virus corona terutama menyerang paru-paru dan sistem pernapasan, individu yang tinggal di tempat dengan konsentrasi polusi atmosfer yang tinggi lebih rentan terhadap virus dan memiliki tingkat kematian yang lebih tinggi. Karena sebagian besar penduduk perkotaan India memiliki kerentanan yang panjang dan berkelanjutan terhadap polusi udara, mereka berisiko tinggi meninggal akibat wabah COVID-19.

Penelitian ini menyoroti pentingnya melindungi kesehatan masyarakat selama, dan setelah wabah virus corona. Hal ini dapat dilakukan dengan menerapkan undang-undang dan standar polusi udara yang sesuai. Kami percaya bahwa penguncian total di India adalah salah satu metode yang paling berhasil karena memperlambat penyebaran virus dan mengurangi jumlah polutan di udara. Penelitian ini mendukung perlunya partisipasi komunitas ilmiah dalam merevisi pedoman kualitas udara. Para penulis percaya bahwa memperpanjang penguncian selama beberapa bulan lagi akan menyebabkan penurunan cepat kejadian COVID-19 di seluruh negeri.



BAB 6

ANALISIS GEOSPASIAL TUTUPAN HUTAN CHIANG MAI

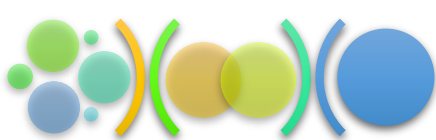
6.1 PENDAHULUAN

Kehidupan di planet ini bergantung pada hutan. Dari sudut pandang ekologis, ekosistem hutan memainkan peran kunci dan menawarkan layanan yang sangat penting untuk mempertahankan mekanisme pendukung kehidupan pada skala regional dan global. Selain menghasilkan oksigen dan menyerap karbon dioksida, tutupan hutan melindungi kita dari erosi, memurnikan air tanah, dan berfungsi sebagai penghalang penting terhadap perubahan iklim. Selain menyediakan habitat bagi satwa liar dan mata pencaharian bagi manusia, ekosistem hutan memainkan peran penting dalam pengaturan emisi gas rumah kaca (GRK), pasokan dan pengelolaan air, siklus nitrogen, keanekaragaman genetik dan biologis, dan rekreasi.

Berdasarkan Penilaian Sumber Daya Hutan Global 2020 oleh Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO), total tutupan hutan planet ini diperkirakan mencapai 4,06 miliar hektar, yaitu 31% dari total luas daratan planet ini (Penilaian Sumber Daya Hutan Global). Sumber daya hutan telah menipis karena penggunaan berlebihan. Deforestasi dan degradasi hutan menempati peringkat kedua dalam hal kontribusinya terhadap emisi gas rumah kaca setelah pembakaran bahan bakar fosil. Sekitar 15% emisi karbon dioksida antropogenik dunia antara tahun 1997 dan 2006 disebabkan oleh deforestasi, degradasi tutupan hutan, serta kebakaran lahan gambut.

Dampak deforestasi dan degradasi hutan dapat dilihat pada semua skala, mulai dari ancaman terhadap mata pencaharian lokal hingga penurunan nilai ekonomi keanekaragaman hayati dan sumber daya hutan. Dibandingkan dengan hutan di bioma lain, hutan tropis memiliki kepadatan karbon tertinggi serta luas lahan terbesar yang memerangkap 2,2–2,7 Gt karbon setiap tahunnya. Namun, hutan tropis, lahan gambut, dan hutan bakau mengalami tingkat deforestasi tertinggi dan menghasilkan sebagian besar emisi karbon bersih melalui kehutanan dan penggunaan lahan lainnya yang diperkirakan sebesar 1,1–1,4 Gt karbon per tahun. Lebih dari 40.000 spesies pohon pada wilayah tropis telah menjadi terancam punah.

Telah banyak penelitian tentang bagaimana tutupan hutan berubah di Asia tropis antara tahun 1880 dan 1980. 8 juta km² lahan terdegradasi terlibat, serta 13 negara seperti India, Bangladesh, Sri Lanka, Thailand, Myanmar, Laos, Vietnam, Kamboja, Malaysia, Singapura, Brunei, Filipina, dan Indonesia. Hutan dan lahan basah pada wilayah ini telah berkurang sebesar 131 juta hektar (47%) selama 100 tahun terakhir (1880–1980). Saat ini, Asia memiliki jumlah wilayah tertinggi yang mengalami perubahan tutupan lahan yang dramatis, khususnya terkait dengan kerusakan lahan kering. Di Asia Tenggara, terdapat tren yang nyata menuju pertumbuhan pemukiman pertanian yang sering disertai dengan deforestasi yang luas. Hampir dua pertiga deforestasi di seluruh dunia disebabkan oleh penebangan hutan yang didorong oleh komoditas, khususnya di Asia Tenggara dan Amerika Latin. Asia Tenggara mengalami deforestasi dengan laju 28% per tahun saat ini.



Deforestasi ini sebagian besar melibatkan penebangan hutan untuk membuka lahan pengembalaan ternak serta tanaman seperti kedelai dan kelapa sawit. Urbanisasi yang cepat telah berkontribusi pada hilangnya lahan pertanian, dan intensifikasi pertanian meningkat karena semakin sedikit lahan yang tersedia untuk menanam tanaman pangan seperti di negara-negara berkembang seperti Thailand, Vietnam, dan India. Ekspansi perkotaan yang pesat dan berbagai praktik pertanian menyebabkan perluasan hutan secara besar-besaran yang pada akhirnya mengakibatkan degradasi tutupan hutan.

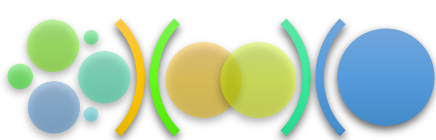
Pemantauan lahan berhutan, serta fungsi hutan dalam berbagai cara, menyediakan data yang dibutuhkan untuk memfasilitasi kebijakan dan pilihan untuk konservasi, perlindungan, dan pengelolaan hutan yang berkelanjutan. Metode yang digunakan untuk memantau sistem juga berubah tergantung pada layanan ekosistem apa pun yang diminati konsumen. Potensi komersial hutan telah menjadi fokus utama pemantauan hutan, menyadari pentingnya hutan untuk menyimpan karbon, melindungi keanekaragaman hayati, melindungi daerah aliran sungai, dan menyediakan berbagai layanan ekosistem.

Perkembangan teknologi yang memungkinkan pemantauan struktur hutan, biomassa, penggunaan lahan pasca-pembukaan, dan kualitas lainnya berkembang pesat. Misalnya, sistem pemantauan untuk mendeteksi perubahan penggunaan lahan oleh manusia akan paling efektif jika lebih terfokus pada daerah perbatasan daripada lahan liar. Mekanisme pemantauan hutan nasional yang mampu menilai secara akurat variasi tutupan hutan dan perubahan stok karbon sangat penting, terutama di daerah tropis di mana hutan menghilang dengan cepat. Untuk mengatasi meningkatnya minat publik terhadap data dan informasi hutan untuk pembahasan, pengelolaan, dan pembuatan kebijakan, kebijakan akses terbuka dan pembentukan infrastruktur siber yang saling melengkapi sangat penting.

Dengan demikian, penginderaan jauh telah terbukti bermanfaat untuk melacak dan mendokumentasikan perubahan penggunaan lahan atau tutupan lahan dan dampaknya karena kapasitas cakupan multispektral, multitemporal, dan sinoptiknya. Data penginderaan jauh dapat dikombinasikan dengan model simulasi untuk memodelkan dan memprediksi perubahan tutupan lahan.

Namun, masih terdapat kesenjangan baik dalam kualitas maupun kuantitas dataset hutan sumber terbuka, khususnya pada wilayah tropis dan bagian lain dari Global South. Misalnya, di negara-negara tropis, pemanfaatan data optik untuk melakukan penelitian mengenai perubahan penggunaan lahan atau tutupan lahan dibatasi oleh tutupan awan yang konstan. Untuk mengatasi masalah ini, data Synthetic Aperture Radar (SAR) terbukti bermanfaat dan berpotensi menembus awan karena sifat multi-polarisasi dan multi-frekuensinya. Selain itu, pembahasan regional mengenai sumber daya hutan tropis serta pola penggunaan lahan dapat memperoleh manfaat dari penggunaan data dari berbagai satelit yang memanfaatkan data penginderaan jauh optik seperti sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) yang dikombinasikan dengan pendekatan pemetaan inovatif.

Untuk memantau kesehatan hutan dan modifikasinya serta untuk mengevaluasi jasa ekologis yang diberikan oleh hutan, sangat diinginkan untuk memperkirakan tingkat



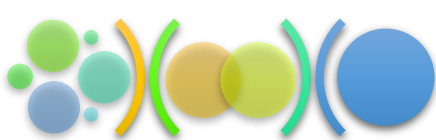
penutupan kanopi hutan (FCC) dengan menggunakan data penginderaan jauh. Sistem Google Earth Engine (GEE) adalah platform berbasis web, sumber terbuka, dan berbasis cloud, yang memanfaatkan citra satelit atau jenis data lainnya untuk mendapatkan indeks vegetasi seperti indeks vegetasi perbedaan normalisasi (NDVI), indeks tanah gundul (BSI), dan BSI yang dimodifikasi (MBSI) untuk menghitung FCC. Penerapan analisis berbasis cloud dari citra satelit untuk survei sumber daya hutan serta proyek pemantauan dapat diselesaikan lebih cepat dan efisien. Pengamatan berbasis ruang angkasa ini bersama dengan sistem informasi geografis cocok untuk melacak perubahan musiman di hutan tropis dan menghasilkan informasi yang relevan mengenainya. Beberapa satelit optik umum lainnya termasuk Landsat, Sentinel-2, MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), dan SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*, atau Satelit untuk pengamatan Bumi).

Selain itu, penginderaan jauh telah mengalami pergeseran dramatis dengan munculnya GEE sebagai alat yang ampuh untuk analisis lingkungan skala besar. Sebuah pembahasan penelitian oleh Gorelick dan rekan-rekan. (2017) mengungkap potensi GEE, menunjukkan kemampuannya untuk menangani kumpulan data informasi geospasial yang sangat besar. Platform berbasis cloud ini memberdayakan para peneliti dengan kemampuan untuk melakukan perhitungan kompleks yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan karena frekuensi data yang rendah dan keterbatasan pemrosesan. "Demokratisasi" data dan sumber daya komputasi ini telah memicu lonjakan aplikasi dalam ilmu lingkungan, mulai dari pelacakan deforestasi hingga pemantauan perluasan perkotaan.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, menggali lebih dalam tantangan dan kemungkinan pemantauan hutan melalui teknologi penginderaan jauh. Mereka menekankan peran GEE dalam mengatasi hambatan seperti ketersediaan data yang tidak konsisten dan biaya akuisisi yang tinggi. GEE memberdayakan para peneliti untuk mengakses citra satelit resolusi tinggi dan memanfaatkan algoritma pembelajaran mesin canggih untuk mendeteksi perubahan tutupan hutan dengan presisi yang tak tertandingi. Karya mereka selanjutnya menyoroti potensi integrasi GEE dengan platform dan kumpulan data penginderaan jauh lainnya, yang pada akhirnya mengarah pada upaya pemantauan hutan yang lebih detail dan dapat diandalkan.

Di Thailand, hutan tidak hanya menyediakan ekologi yang vital tetapi juga tempat tinggal bagi sebagian besar penduduk negara tersebut. Dalam sepuluh tahun terakhir, deforestasi, perubahan iklim, dan kurangnya infrastruktur air yang sepenuhnya berkembang telah membuat Thailand sangat rentan terhadap kekeringan dan banjir. Ekosistem alami Thailand, seperti hutan, waduk alami, dan lahan basah, terancam punah meskipun berbagai peraturan baru telah diterapkan karena perluasan lahan pertanian dan perkotaan yang disebabkan oleh pertumbuhan penduduk dan pembangunan ekonomi.

Sektor Penggunaan Lahan, Perubahan Penggunaan Lahan, dan Kehutanan (LULUCF) merupakan penyerap GHG terbesar di Thailand, menurut inventaris GHG nasional negara tersebut. Emisi GHG di Thailand melalui deforestasi dan penebangan kayu lebih rendah daripada emisi dari perkebunan hutan. Meskipun dilindungi, 23% lahan di Thailand masih berisiko akibat perubahan iklim. Frekuensi dan tingkat keparahan kebakaran hutan dapat



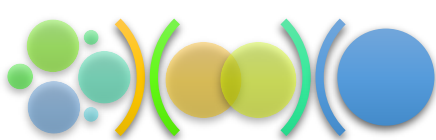
menyebabkan runtuhnya hutan yang sensitif terhadap api. Thailand kehilangan 11,0 kha tutupan pohon akibat kebakaran antara tahun 2001 dan 2021, dan 2,29 Mha akibat semua faktor penyebab kerugian lainnya. Tahun 2010 mencatat kehilangan tutupan pohon seluas 1,02 kha akibat kebakaran, yang mewakili 0,76% dari total penurunan tutupan pohon pada tahun tersebut. Sebanyak 140 kha lahan telah terbakar pada tahun 2022. Dengan luas 2,4 Mha, tahun 2004 mencatat jumlah kebakaran terbanyak dalam setahun.

Selain itu, Thailand menerima total 50.787 peringatan kebakaran Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) antara 9 Desember 2019 dan 5 Desember 2022. Sebagian besar kebakaran hutan diyakini bermula di Taman Nasional Doi Suthep-Pui yang terletak di Chiang Mai, sebuah provinsi di Thailand utara. Kota terbesar kedua di Thailand, Chiang Mai, memiliki sumber daya hutan, air, dan mineral yang melimpah. Pertanian berpindah tampaknya menjadi metode pengembangan hutan yang populer di Chiang Mai (Bank Dunia, 2009). Tutupan hutan provinsi tersebut menurun sebesar 1,71% antara tahun 1995 dan 2015. Deforestasi ilegal di Chiang Mai telah menjadi masalah penting bagi pelestarian hutan.

Sebagian besar Distrik Mae Chaem di provinsi Chiang Mai digunakan untuk pertanian jagung. Area ini dibersihkan dari hutan dan jerami yang terbakar, yang berkontribusi terhadap polusi dan menciptakan titik panas yang mengalami peningkatan suhu yang parah antara Februari dan Maret 2015. Chiang Mai memiliki tutupan hutan alami di 72% wilayahnya pada tahun 2000. 6,92 kha hutan primer lembap Chiang Mai hilang antara tahun 2002 dan 2021, yang mewakili 6,4% dari keseluruhan kehilangan vegetasi hutan kota selama periode tersebut. Provinsi ini kehilangan 7,29 kha vegetasi primer pada tahun 2021, yang setara dengan 4,02 Mt emisi karbon dioksida. Chiang Mai menerima total 10.642 peringatan kebakaran VIIRS antara 9 Desember 2019 dan 5 Desember 2022.

Sebagai bagian dari Kontribusi yang Ditentukan Secara Nasional (NDC) yang sesuai dengan Perjanjian Paris, Thailand baru-baru ini menetapkan tujuan untuk meningkatkan tutupan hutannya sebesar 23% pada tahun 2030 yang termasuk dalam kebijakan nasional barunya ('Kontribusi yang Ditentukan Secara Nasional (NDC) Thailand yang Diperbarui.pdf', 2020) dan meningkatkan lahan hutan [perkebunan] ekonomi sebesar 15% (*Rencana Pembangunan Ekonomi dan Sosial Nasional Kedua Belas (2017-2021) – OD Mekong Datahub, 2018*). Dalam konteks pengelolaan hutan yang berkelanjutan, teknik mitigasi di domain LULUCF telah disarankan untuk membantu pengurangan GHG. Pemerintah Thailand telah berupaya memerangi perubahan iklim untuk mematuhi Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim (UNFCCC). Rencana Induk Perubahan Iklim (2012–2050) Thailand menyediakan kerangka kerja untuk kebijakan perubahan iklim terintegrasi dan strategi implementasi ('Thailand TNC.pdf', tanpa tanggal).

Kemudian, untuk membantu dalam penanggulangan perubahan iklim secara langsung, Strategi Nasional tentang Perubahan Iklim (2013–2017) dibentuk. Kontributor signifikan terhadap deforestasi, khususnya di lingkungan pegunungan Thailand utara, adalah konversi hutan alami menjadi lahan pertanian. Kementerian Sumber Daya Alam dan Lingkungan Thailand (2013–2018) menetapkan tujuan untuk mencegah deforestasi, memulihkan hutan



yang rusak, dan memperluas luas hutan hingga lebih dari 17 juta hektar pada tahun 2016 ('Thailand TNC.pdf', 2018).

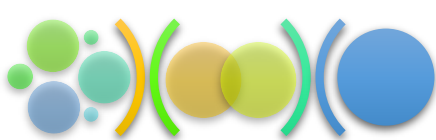
Thailand menerima hibah pembiayaan dari Forest Carbon Partnership Facility (FCPF) pada tahun 2016 untuk kegiatan Fase Kesiapan REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation Plus) yang akan dilaksanakan antara tahun 2016 dan 2019. Pendekatan REDD+, yang dipandang sebagai sistem global pengendalian hutan terpusat, didirikan oleh UNFCCC. Ditargetkan terutama untuk negara-negara berkembang, REDD+ menawarkan insentif keuangan bagi negara-negara ini untuk melindungi hutan mereka guna menurunkan emisi karbon dan, dengan demikian, mengurangi bahaya perubahan iklim.

Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim (IPCC) mengusulkan penggunaan kombinasi inventaris lapangan dan data pengamatan Bumi dengan pendekatan REDD+ untuk mengukur dan mengevaluasi tingkat variasi stok karbon dalam ekosistem hutan yang dilepaskan karena degradasi hutan. Secara khusus, sebagai hasil dari REDD, telah terjadi peningkatan dramatis dalam kesadaran dan pendanaan untuk sistem pemantauan hutan. Ketertarikan pada pembangunan sistem pemantauan mencakup sistem pemantauan di berbagai tingkatan di seluruh dunia, nasional, sub-nasional, serta tingkat komunitas.

Di provinsi Chiang Mai, baik di dalam maupun di luar zona lindung, upaya restorasi hutan telah aktif akhir-akhir ini. Kebakaran hutan di Chiang Mai disebabkan oleh faktor-faktor seperti aktivitas manusia, tabrakan pohon, dan panas yang berlebihan. Pendekatan baru telah diajukan untuk menemukan lokasi kebakaran menggunakan perangkat Internet of Things (IoT) seperti sensor panas, sensor cahaya (modul sensor fotoreistor LDR), sensor suhu (BME280), sensor asap (modul MQ2), dan modul berbagi lokasi Global Positioning System (GPS). Data tersebut dibagikan melalui blockchain ke unit yang dipilih untuk menentukan lokasi yang tepat.

Dengan mengevaluasi data tersebut, titik api dapat diidentifikasi dan jalur kebakaran hutan dapat diprediksi. Dengan cara ini, laju kebakaran dapat diperlambat dan dihentikan dengan memanfaatkan teknik alami dan buatan manusia. Foto satelit dari Landsat-5 TM (2000) dan Landsat-8 TM (2015) digunakan untuk menilai dan memprediksi perubahan penggunaan lahan dan tutupan lahan antara tahun 2000 dan 2030 di Taman Nasional Doi Suthep-Pui di Chiang Mai. Penilaian tersebut menunjukkan bahwa jumlah lahan berhutan, serta lahan tidak berhutan, bervariasi selama periode penelitian. Terutama hutan pegunungan rendah dan hutan gugur campuran, selama 15 tahun pertama (2000–2015), mencakup 5% (2,9 km²) dari hutan yang diubah menjadi lahan pertanian atau perkotaan. Prediksi untuk tahun 2030 mengungkapkan pola yang serupa, menggambarkan dampak fragmentasi hutan serta banyaknya area yang terfragmentasi.

Selain itu, diperkirakan bahwa deforestasi yang cukup besar tersebut akan menyebabkan hilangnya habitat dan selanjutnya mengurangi keanekaragaman hayati. Hutan evergreen, campuran, dan gugur daun merupakan mayoritas hutan di negara ini, sedangkan hutan bakau dan hutan tanaman hanya ditemukan di beberapa lokasi. Dimungkinkan untuk mengidentifikasi area hutan yang terpengaruh oleh pertanian berpindah dan menetapkan strategi untuk mengklasifikasikan berbagai jenis hutan dengan menggunakan teknologi satelit.



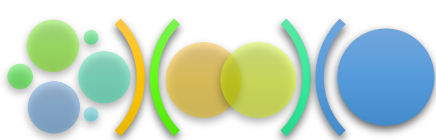
Dengan dukungan GPS, kamera video dengan lensa fisheye, sistem rotator untuk kamera video, kamera Polaroid, dan produk satelit laporan lapangan dapat divalidasi di lapangan.

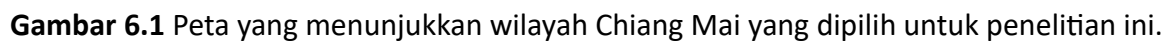
Oleh karena itu, sangat penting untuk menilai dan memantau degradasi tutupan hutan dan keanekaragaman hayati untuk menentukan pengaruh aktivitas dan bahkan efektivitas inisiatif konservasi. Motivasi di balik penelitian ini didorong oleh kebutuhan besar untuk memantau kesehatan hutan dalam hal meningkatnya laju deforestasi dan dampak universal perubahan iklim. Hutan memainkan peran penting dalam penyerapan karbon dan konservasi keanekaragaman hayati dengan menyediakan layanan ekosistem yang penting. Pada wilayah Chiang Mai, hutan-hutan ini berada di bawah ancaman signifikan dari berbagai faktor antropogenik dan alami.

Pembahasan ini bertujuan untuk menjawab kebutuhan yang perlu diperhatikan akan pemantauan yang efektif dengan mengajukan beberapa pertanyaan penelitian kunci: Bagaimana tutupan hutan di Chiang Mai berubah antara tahun 2010 dan 2020? Apa pendorong utama perubahan ini? Dan seberapa efektifkah alat penginderaan jauh seperti NDVI dan Indeks Vegetasi yang Ditingkatkan (EVI) dalam memantau perubahan ini? Dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, pembahasan ini berupaya meningkatkan pemahaman kita tentang dinamika hutan di Chiang Mai dan berkontribusi pada pengembangan pendekatan untuk pengelolaan dan konservasi hutan yang berkelanjutan.

6.2 GEOGRAFIS DAN EKOLOGI CHIANG MAI

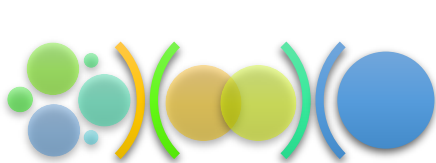
Chiang Mai adalah salah satu wilayah utara Thailand (antara garis lintang $18^{\circ} 40' N$ dan $19^{\circ} 00' N$; garis bujur $98^{\circ} 55' E$ dan $99^{\circ} 10' E$) (Gambar 6.1). Kota ini terletak sekitar 700 km dari Bangkok di lembah sungai antar pegunungan Chiang Mai-Lamphun pada ketinggian sekitar 310 meter di atas permukaan laut dan dikelilingi oleh pegunungan terjal. Wilayah kota Chiang Mai adalah provinsi terbesar kedua di Thailand, meliputi total luas 20.107 km². Selain itu, Chiang Mai terkenal dengan keanekaragaman hayatinya yang kaya, yang mendukung spesies flora dan fauna yang khas. Hutan campuran gugur dan hutan dipterokarp kering mendominasi di dataran rendah dan menengah, sedangkan hutan awan pegunungan tropis, hutan evergreen perbukitan, dan hutan pinus mendominasi di dataran tinggi wilayah ini bersama dengan provinsi-provinsi utara Thailand lainnya. Wilayah ini juga sangat penting untuk konservasi karena habitatnya yang beragam, mulai dari hutan hujan tropis yang melimpah hingga hamparan bunga yang mempesona dan menyediakan habitat penting bagi hewan-hewan yang terancam punah seperti gajah Asia dan makhluk langka lainnya.

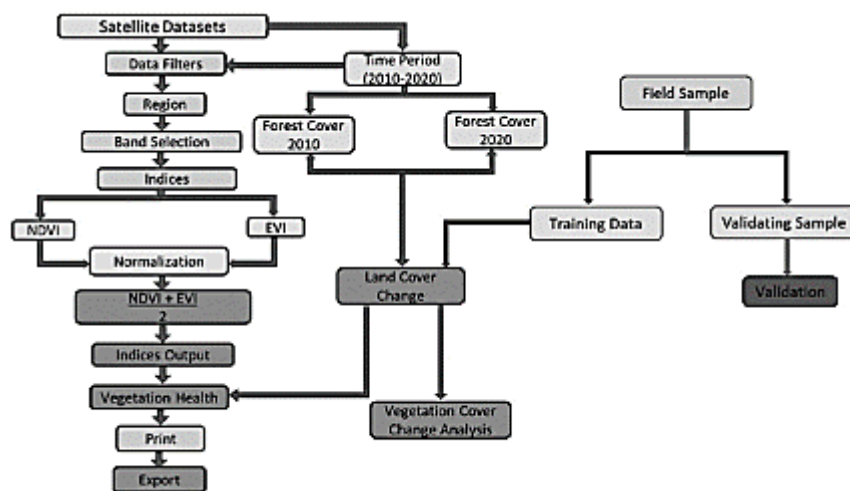




6.3 PROSEDUR ANALISIS INDEKS VEGETASI

Dalam pembahasan ini tentang penilaian kesehatan vegetasi pada wilayah Chiang Mai diilustrasikan pada Gambar 6.2, yang meliputi pengumpulan data multispektral, penutupan awan, bayangan awan, dan badan air, penghitungan indeks spektral, klasifikasi, penyaringan data spasial dan temporal, pemetaan area yang ditutupi oleh hutan, dan analisis perubahan tutupan hutan dalam satu dekade.





Gambar 6.2 Bagan alur yang menunjukkan pemrosesan indeks vegetasi di platform GEE.

Kekeringan

Di era penginderaan jauh, para peneliti di seluruh dunia telah banyak menggunakan berbagai dataset satelit untuk memantau kondisi, luas, dan kesehatan hutan. Penginderaan jauh memberikan cakupan sinoptik dan pengulangan, yang ternyata menjadi keuntungan besar dalam program pemantauan. Para ilmuwan telah mengembangkan berbagai indeks vegetasi menggunakan sifat spektral untuk penilaian kualitatif dan kuantitatif vegetasi. Deskripsi singkat tentang indeks vegetasi yang umum digunakan diberikan di bawah ini.

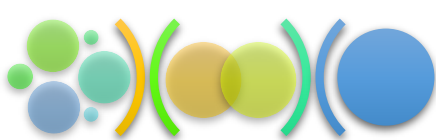
Indeks Vegetasi

Pertumbuhan penelitian fenologi vegetasi telah mendapatkan perhatian di bidang geospasial kontemporer karena metodologi fenologi memungkinkan karakterisasi yang tepat dari variasi spasial-temporal dalam sistem biogeokimia terestrial. Dengan demikian, di area pembahasan saat ini, dua indeks tutupan hutan, EVI dan NDVI, telah dipilih dan diproses di GEE menggunakan kumpulan data satelit. Kemudian, menggunakan data satelit yang mencakup periode sepuluh tahun antara 2010 dan 2020, indeks-indeks yang disebutkan di atas yang dianalisis oleh GEE digunakan untuk mengevaluasi perubahan tutupan tanaman yang terjadi pada wilayah Chiang Mai.

NDVI

NDVI adalah indikator yang diperoleh menggunakan pita data satelit, yang memberikan perkiraan kepadatan dan vitalitas vegetasi pada piksel berdasarkan berbagai tingkat pantulan sinar matahari yang diambil oleh data satelit dalam spektrum tampak (0,4–0,7 μm) dan pita inframerah dekat (0,7–1,1 μm) (NIR). Sedangkan daun tanaman yang sehat menyerap sebagian besar pita merah (0,63–0,69 μm) dalam fotosintesis dengan menggunakan klorofil untuk membuat glukosa melalui air dan karbon dioksida, dinding selnya secara signifikan memantulkan pita NIR. Jika lebih banyak cahaya dipantulkan dalam panjang gelombang NIR daripada dalam panjang gelombang tampak, piksel tersebut tampak pasti ditumbuhi oleh daun yang sehat karena cahaya dalam pita merah tampak telah diserap oleh tanaman.

NDVI adalah indikator yang paling banyak digunakan untuk memperkirakan tutupan vegetasi dan produktivitas di antara beberapa indikator vegetasi berbasis penginderaan jauh



yang digunakan dalam pemantauan pertanian. Untuk memantau modifikasi dalam sistem pertanian, parameter vegetasi seperti durasi musim tanam, tanggal awal kesuburan, dan aktivitas fotosintesis maksimal umumnya diekstrak dari dataset NDVI. Indikator fenologis ini menyoroti banyak sifat ekosistem terestrial untuk memperoleh pemahaman rinci tentang fungsi dan struktur tutupan lahan serta perubahan terkait.

NDVI ditentukan dari pita data satelit yang disebutkan di atas menggunakan persamaan berikut (Persamaan 6.1)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6.1)$$

Nilai NDVI bervariasi dari 0,1 (batuan, pasir, dan salju), 0,3 (vegetasi dengan konsentrasi jarang), dan 0,6 (vegetasi beriklim sedang) hingga 1,0 (kepadatan vegetasi maksimum yang mungkin, misalnya hutan hujan). Air ditunjukkan oleh nilai NDVI kurang dari nol.

EVI

NDVI dapat meminimalkan sebagian besar efek yang terkait dengan kalibrasi peralatan, sudut matahari, medan, awan, bayangan, dan variasi kondisi atmosfer, tetapi rentan terhadap saturasi. Akibatnya, NDVI telah ditingkatkan dan disesuaikan untuk menghasilkan EVI (Persamaan 6.2), yang dapat lebih tepat mencerminkan variasi pertumbuhan vegetasi di tempat-tempat dengan tutupan vegetasi yang luas. Oleh karena itu, EVI dianggap sebagai NDVI yang lebih baik dengan sensitivitas yang lebih besar terhadap zona biomassa padat dan kemampuan pemantauan vegetasi yang lebih baik melalui penurunan pengaruh atmosfer dan pemisahan sinyal latar belakang kanopi. Karena EVI berkinerja lebih baik daripada NDVI, “Grup Disiplin Lahan” MODIS telah memilihnya sebagai indeks vegetasi berbasis global utama dalam memantau kesehatan tanaman fotosintetik terestrial. Sejak itu, EVI telah mendapat perhatian dalam berbagai penelitian.

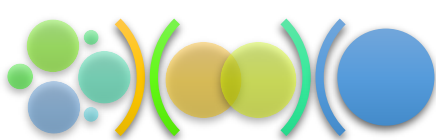
EVI dihitung menggunakan persamaan yang ditentukan pada Persamaan (6.2)

$$EVI = G \frac{(NIR - RED)}{NIR + C_1 \times R - C_2 \times BLUE + L} \quad (6.2)$$

Faktor penguatan (G) diatur ke 2,5, resistensi aerosol disesuaikan dengan C_1 dan C_2 yang diatur pada 6,5 dan 7. Latar belakang kanopi dikoreksi dengan L , diatur pada 1 dan reflektansi NIR, merah, dan biru sesuai dengan panjang gelombang.

Aplikasi GEE Dalam Menilai Indeks Tutupan Vegetasi

GEE telah umum digunakan akhir-akhir ini untuk aplikasi skala dunia seperti mengukur perubahan tutupan hutan global; pertumbuhan, penurunan, dan restorasi hutan serta penilaian hasil panen sejak tahun 2000 dengan memanfaatkan basis data substansial dari citra Landsat. Beberapa pembahasan juga telah membuktikan kemudahan integrasi GEE dengan banyak sumber dataset satelit spasial-temporal dan metode klasifikasi citra otomatis untuk pemantauan flora dan tutupan lahan. Ambang batas vegetasi di berbagai kategori penggunaan lahan tertentu diperlukan untuk memperkirakan penggunaan lahan dalam skala besar



menggunakan GEE, dan semua ambang batas ini dapat diperoleh dengan menganalisis perilaku suksesi vegetasi pada skala temporal dan spasial yang berbeda.

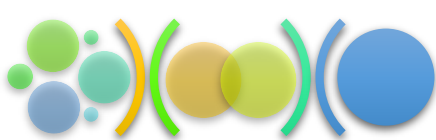
Dataset di GEE dapat diperoleh dan diedit dengan API JavaScript dan Python (“Application Programming Interface”) (Google, 2022c). Selain itu, GEE Code Editor, sebuah IDE (“Integrated Development Environment”) (Google, 2022b), yang menggunakan API JavaScript, menyediakan akses langsung ke semua fungsi GEE tanpa harus mengaktifkan atau mengatur layanan tambahan apa pun. GEE menyimpan informasi dalam jaringan komputasi awan Google yang sangat besar dan secara efisien melakukan perhitungan menggunakan komputasi paralel, yang berarti beban kerja tersebar di beberapa CPU di pusat data.

Skrip Editor Kode GEE, yang disebutkan di bawah ini, telah digunakan untuk mengambil output NDVI dan EVI dari citra satelit (Landsat 5 untuk tahun 2010 dan Landsat 8 untuk tahun 2020), yang mencakup area pembahasan, terutama untuk menilai kondisi kesehatan vegetasi yang bertahan di seluruh area pembahasan antara tahun 2010 dan 2020. Skrip khusus yang dihasilkan dalam tesis ini mengintegrasikan bagian-bagian dari layanan resmi Google. Menurut kode yang disediakan di Lampiran, GEE menggabungkan fitur untuk mengevaluasi kesehatan vegetasi di seluruh area pembahasan dengan memperkirakan NDVI dan EVI untuk keluaran citra dari pita frekuensi MERAH, HIJAU, BIRU, dan NIR dari Landsat 5 dan Landsat 8.

Nilai yang diperoleh disimpan dalam pita baru. Skrip GEE yang digunakan untuk membangun indeks tersebut terdiri dari enam komponen utama. Pertama, ada koleksi fitur yang menerima koordinat plot sebagai fitur titik. Kedua, fungsi NDVI dan EVI berbasis citra satelit tertentu menentukan indeks tersebut dari citra satelit yang sesuai. Fungsi Fmask, yang menentukan piksel mana yang akan dihilangkan berdasarkan kategorisasinya, adalah yang ketiga (misalnya, awan, salju, dan air).

Selain itu, koleksi citra yang menguraikan informasi dari sensor dan periode mana yang akan digunakan untuk menghitung indeks tutupan vegetasi, menambahkan instruksi untuk menghasilkan plot deret waktu untuk setiap set citra. Kemudian, sebagai file csv, data indeks dapat diambil dari file tersebut dengan memberikan instruksi untuk menambahkan koleksi fitur (plot) dan data citra (NDVI, dan EVI) sebagai lapisan peta ke peta dasar Google Maps. Selain itu, fungsi filter Data yang ditunjukkan pada Gambar 6.2 telah digunakan untuk memilih citra satelit yang diambil sepanjang periode pembahasan (2010–2020). Kumpulan data ini diproses menggunakan pendekatan dan prosedur yang disebutkan di atas untuk mengevaluasi perubahan tutupan tanaman yang terjadi pada wilayah Chiang Mai.

Selain estimasi indeks vegetasi, Skrip Editor Kode GEE juga telah digunakan untuk menganalisis perubahan tutupan hutan yang terjadi antara tahun 2010 dan 2020, dengan mempertimbangkan kumpulan data satelit yang sama (Landsat 5 dan Landsat 8) yang dipertimbangkan sebelumnya untuk memperkirakan indeks vegetasi. GEE telah digunakan untuk mengeksekusi fitur penilaian perubahan luas tutupan hutan yang terjadi pada wilayah pembahasan antara tahun 2010 dan 2020 dengan memperkirakan keluaran citra masing-masing menggunakan pita frekuensi MERAH, HIJAU, BIRU, dan NIR dari Landsat 5 dan Landsat 8.



Sampel Data Pelatihan Dan Validasi

Tiga kelas LULC (hutan, air, dan lainnya) membentuk mosaik lanskap yang berubah-ubah yang menjadi ciri khas wilayah pembahasan. Dengan menggunakan platform GEE dan data satelit yang ditunjukkan pada Gambar 6.2, tepat 152 titik diberikan kepada hutan, yang merupakan penekanan utama pembahasan ini, dan kemudian 88 dan 60 titik pelatihan diberikan kepada air dan lainnya. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi penerapan dan efektivitas metode tersebut. Data untuk pelatihan dikumpulkan dari lapisan resolusi tinggi Google Maps. Dengan demikian, 300 lokasi validasi dibuat menggunakan lapisan visual dasar yang sama dan dipilih secara manual secara acak (Tabel 6.1).

Tabel 6.1 Jumlah Total Titik Validasi untuk Setiap Kelas LULC

Kelas Lahan	Titik Validasi
Hutan	152
Air	88
Lainnya	60
Total	300

6.4 DEGRADASI VEGETASI DAN DINAMIKA TUTUPAN LAHAN

Pada bagian ini, pola kesehatan vegetasi selama beberapa dekade diperiksa menggunakan skrip GEE yang telah disebutkan sebelumnya serta citra satelit dari tahun 2010 hingga 2020. Untuk proyek ini, perubahan tutupan vegetasi dan tutupan lahan yang terjadi antara tahun 2010 dan 2020 telah dievaluasi.

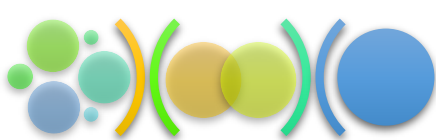
Analisis Indeks Vegetasi

Menurut Gambar 6.3a, pada tahun 2010, total NDVI wilayah penelitian berkisar antara -1 dan 1, dan pada tahun 2020, NDVI (Gambar 6.3b) berkisar antara -0,3 dan 1. Perubahan negatif pada NDVI dari -1 menjadi -0,3 dari tahun 2010 hingga 2020 jelas menunjukkan perubahan skenario vegetasi yang menyebabkan degradasi pada tahun 2020. Dalam hal keluaran NDVI, hal ini menggambarkan skenario degradasi vegetasi, dengan degradasi kesehatan vegetasi hingga 70% terjadi pada wilayah penelitian antara tahun 2010 dan 2020 di berbagai zona dalam wilayah penelitian, terutama di bagian selatan.

Gambar 6.4a menunjukkan bahwa pada tahun 2010, EVI keseluruhan wilayah penelitian bervariasi antara -0,3 dan 1, dan pada tahun 2020, EVI (Gambar 6.4b) berkisar antara -0,5 dan 1. Dengan demikian, dalam hal EVI, pergeseran negatif pada NDVI dari -0,3 menjadi -0,5 dari tahun 2010 hingga 2020 jelas menunjukkan perubahan lingkungan vegetasi yang akan menyebabkan degradasi pada tahun 2020. Tidak seperti NDVI, dalam hal keluaran EVI, hal ini menunjukkan skenario degradasi kesehatan vegetasi, dengan degradasi vegetasi hingga 20% terjadi antara tahun 2010 dan 2020 di beberapa zona pada wilayah penelitian yang membentang dari bagian barat laut hingga tenggara.

Analisis Kesehatan Vegetasi

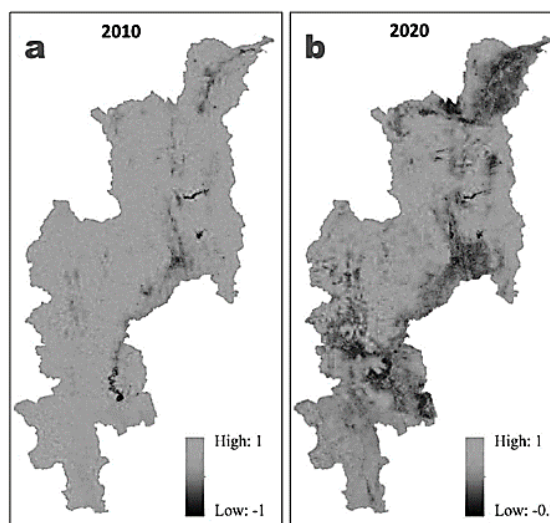
Dengan menggunakan GEE Code Editor, skenario spasial-temporal kesehatan vegetasi di seluruh area penelitian dievaluasi setelah indeks (NDVI, EVI) yang mencakup area



pembahasan dianalisis. Hal ini dilakukan dengan membuat output rata-rata dengan menggabungkan output NDVI dan EVI, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.3. Gambar 6.5a dan 6.5b mengilustrasikan cakupan spasial-temporal kesehatan vegetasi di seluruh area pembahasan selama tahun 2010, dan perubahan kesehatan vegetasi pada tahun 2020 telah dieksekusi.

Setelah menganalisis indeks vegetasi (NDVI, EVI) di seluruh wilayah pembahasan, skenario spasial-temporal kesehatan vegetasi dievaluasi menggunakan GEE Code Editor. Hal ini dicapai dengan menggabungkan data NDVI dan EVI untuk mendapatkan output rata-rata yang ditampilkan pada Gambar 6.1. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.5a dan 6.5b, cakupan spasial dan temporal kesehatan vegetasi di seluruh wilayah penelitian pada tahun 2010 telah berubah pada tahun 2020. Dengan demikian, dari hasil kesehatan vegetasi, jelas bahwa telah terjadi perubahan negatif atau penurunan kesehatan vegetasi di seluruh wilayah penelitian.

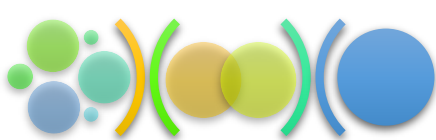
Lebih lanjut, telah terjadi penurunan kesehatan vegetasi hingga 70%, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.5. Dengan demikian, mengikuti perbedaan kesehatan vegetasi antara tahun 2010 dan 2020, sebuah hasil (Gambar 6.6) menunjukkan perbedaan yang telah terjadi pada kesehatan vegetasi.



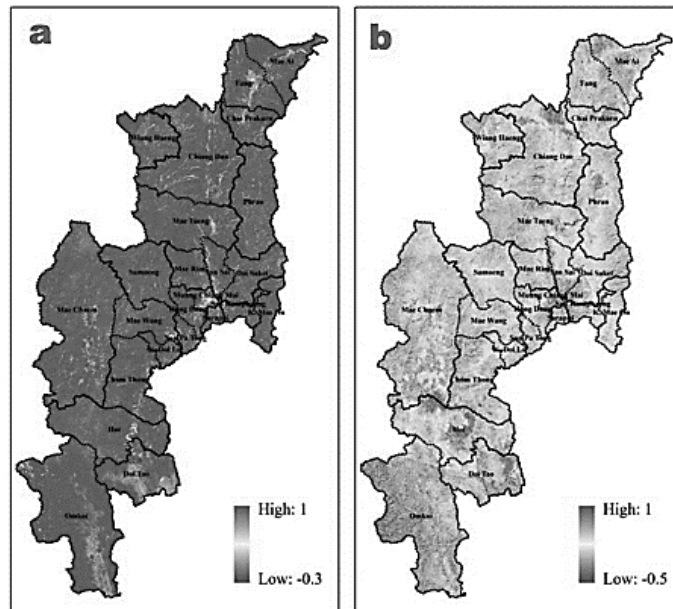
Gambar 6.3 Estimasi NDVI yang dihasilkan dari GEE Code Editor untuk tahun (a) 2010 dan (b) 2020 yang mencakup wilayah Chiang Mai.

Seperti yang terlihat pada Gambar 6.5a, dapat diamati bahwa di seluruh wilayah, yaitu sub-provinsi Phrao, Mae Chaem, Samoeng, Mae Wung, Hom Thong, dan Kae Mae On, kondisi kesehatan vegetasi secara keseluruhan berada dalam kisaran sehat hingga sangat sehat. Sedangkan kesehatan vegetasi di sub-provinsi di sepanjang timur, seperti Doi Lo dan Sarappi, tergolong sedang. Kemudian kesehatan vegetasi kota Chiang Mai, bersama dengan sub-provinsi Omkoi, Doi Tan, dan Hot, berada dalam kisaran buruk hingga sangat buruk.

Kemudian pada Gambar 6.5b, dapat diamati bahwa kesehatan vegetasi secara keseluruhan di seluruh wilayah Chiang Mai telah menurun pada tahun 2020 dibandingkan dengan tahun 2010. Sebagaimana dibuktikan dari pembahasan oleh Global Forest Watch,



Chiang Mai memiliki sekitar 1,50 juta hektar hutan alami, yaitu mencakup 68% dari total luas wilayahnya pada tahun 2010, dan pada tahun 2021, hutan yang meliputi sekitar 7,29 hektar tersebut telah hilang, yang menyebabkan emisi CO₂ sebesar 4,03 juta ton.

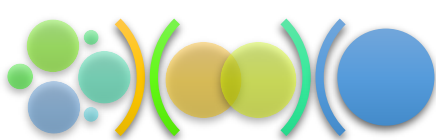


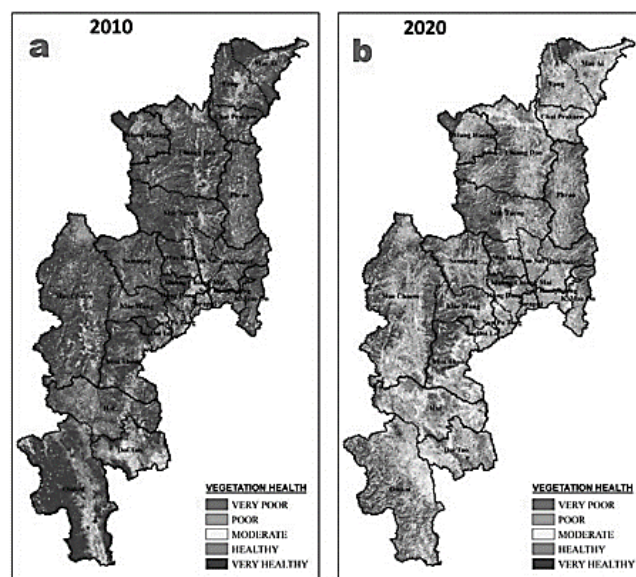
Gambar 6.4 Estimasi EVI yang dihasilkan dari GEE Code Editor untuk tahun (a) 2010 dan (b) 2020 yang mencakup wilayah Chiang Mai.

Analisis Perubahan Tutupan Vegetasi

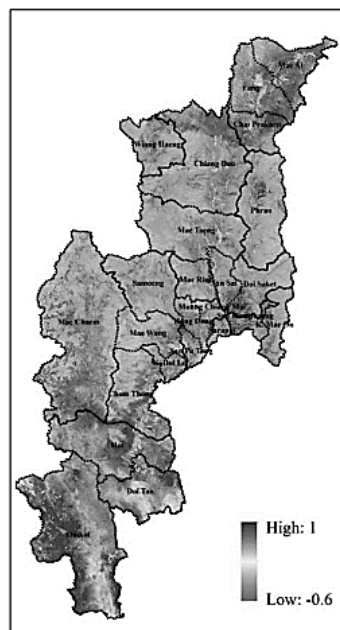
Dalam pembahasan ini, indeks vegetasi dan kesehatannya telah dianalisis pada wilayah Chiang Mai selama sepuluh tahun terakhir (2010–2020), dan analisis terakhirnya mencakup pemetaan vegetasi dan perubahan yang terjadi pada wilayah tersebut selama periode ini. Dengan demikian, untuk menganalisis perubahan vegetasi yang terjadi antara tahun 2010 dan 2020, penilaian perubahan tutupan lahan telah dilakukan menggunakan skrip GEE kedua yang disebutkan di atas dan kumpulan data satelit yang sama yang digunakan untuk memperkirakan indeks vegetasi dan kesehatannya.

Gambar 6.7a dan b menggambarkan skenario tutupan lahan untuk wilayah, pada tahun 2010 dan 2020, yang dibagi menjadi tiga kelas: Badan air, hutan, dan area lainnya. Skenario tutupan lahan menunjukkan bahwa konsentrasi area lain telah meningkat pada tahun 2020 dibandingkan dengan tahun 2010 pada wilayah utara, timur, dan tenggara dari wilayah yang memanjang. Dengan demikian, jelas bahwa telah terjadi penurunan yang signifikan pada luas area yang ditutupi oleh hutan. Selain itu, luas area yang ditutupi oleh badan air pada tahun 2020 juga menurun dibandingkan dengan tahun 2010.



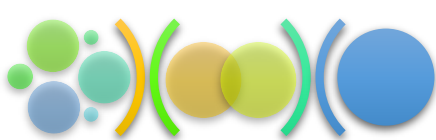


Gambar 6.5 Estimasi kesehatan vegetasi yang dihasilkan dari GEE Code Editor pada tahun (a) 2010 dan (b) 2020 yang mencakup wilayah Chiang Mai.

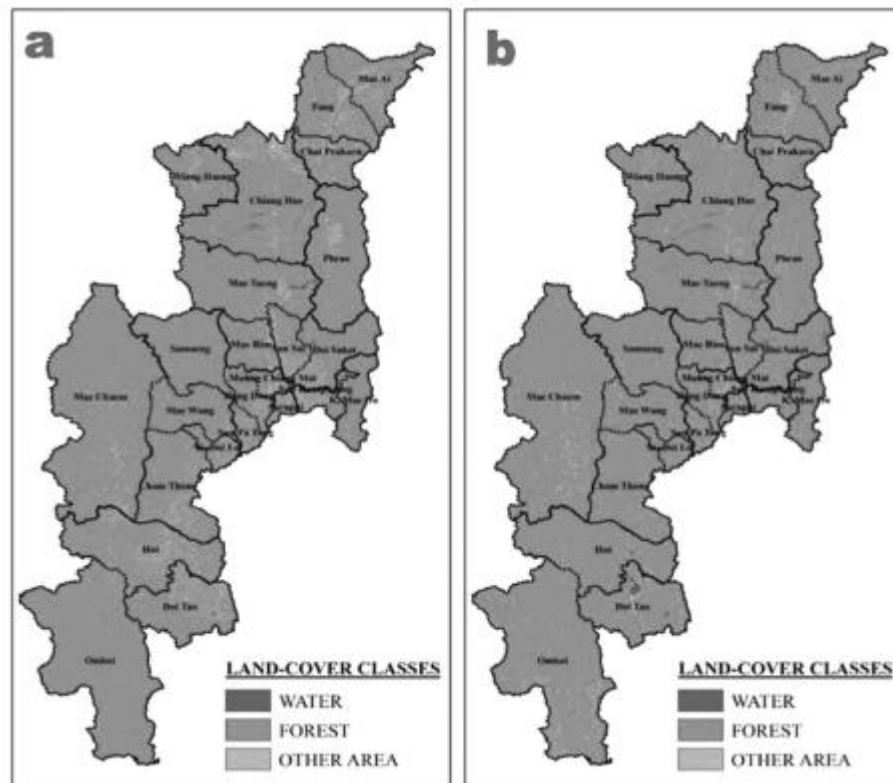


Gambar 6.6 Perbedaan kesehatan vegetasi di area pembahasan antara tahun 2010 dan 2020.

Perubahan negatif pada tutupan vegetasi lebih jelas terlihat dengan mengekstrak area yang mengalami kehilangan tutupan hutan selama dekade (2010–2020), dan telah digambarkan secara terpisah pada Gambar 6.8. Dapat diamati bahwa kehilangan area yang ditutupi oleh area lain relatif minimal. Sedangkan, kehilangan area hutan sangat luas di bagian utara dan bagian timur serta tenggara yang memanjang pada wilayah Chiang Mai. Gambar 6.8 menggambarkan konsekuensi serius dari faktor antropogenik seperti perubahan penggunaan lahan dan deforestasi, yang menyebabkan penurunan area di bawah tutupan hutan sedemikian rupa, dalam waktu yang sangat singkat karena faktor antropogenik, sehingga



menjadi hampir tidak mungkin atau sangat sulit untuk memulihkan tutupan hutan di area atau zona tertentu tersebut.



Gambar 6.7 Skenario tutupan lahan yang dihasilkan dari GEE Code Editor menunjukkan perubahan tutupan vegetasi pada wilayah Chiang Mai selama tahun (a) 2010 dan (b) 2020.

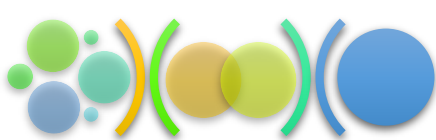
Validasi

Penilaian Akurasi digunakan dalam penelitian ini untuk melakukan validasi, yang dipertimbangkan dalam pembahasan ini, karena telah menjadi kemajuan penting dalam pengolahan data penginderaan jauh karena menetapkan estimasi data informasi berikut kepada pengguna. Akibatnya, empat kategori teknik penilaian akurasi diterapkan dalam pembahasan ini untuk memeriksa akurasi peta perubahan tutupan lahan yang diestimasi pada wilayah dari tahun 2010 hingga 2020: Akurasi Produsen (PA), Akurasi Pengguna (UA), Akurasi Keseluruhan (OA), dan Koefisien Kappa (K) (Tabel 6.2).

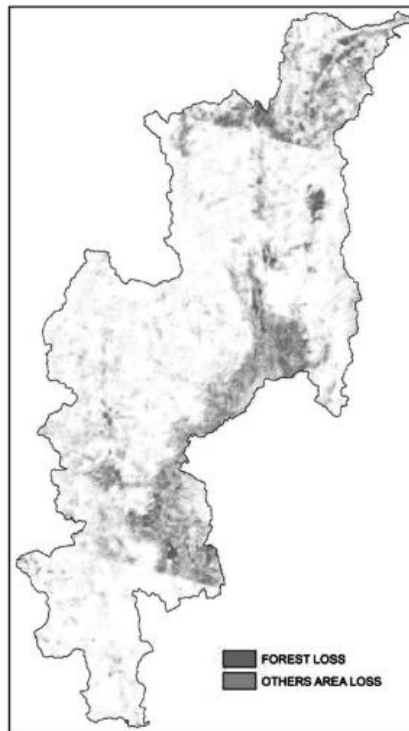
Ketika membandingkan rentang persentase UA, PA, OA, dan persentase perubahan tutupan lahan, menurut nilai penilaian akurasi yang tercantum dalam Tabel 6.1, dapat disimpulkan bahwa PA lebih efektif dibandingkan metode lain, khususnya dalam penelitian ini.

6.5 KONTRIBUSI TEMUAN DAN STRATEGI PENGELOLAAN HUTAN

Temuan penelitian ini tentang pemantauan perubahan tutupan hutan di provinsi Chiang Mai, Thailand, memiliki implikasi penting bagi akademisi dan pengelola hutan. Bagi akademisi, pembahasan ini menunjukkan efektivitas penggabungan teknik penginderaan jauh dengan algoritma pembelajaran mesin, yang menyediakan kerangka kerja untuk memantau

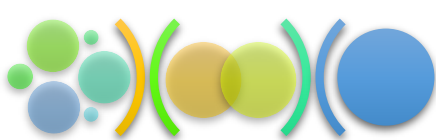


dan mengevaluasi dinamika tutupan hutan pada wilayah lain. Pembahasan ini juga menyoroti potensi peningkatan indeks vegetasi seperti NDVI dan EVI melalui penelitian dan analisis berkelanjutan. Selain itu, pembahasan ini menunjukkan pentingnya menggabungkan data penginderaan jauh dengan pengamatan langsung untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang perubahan penggunaan lahan dan dampaknya terhadap ekosistem hutan.



Gambar 6.8 Skenario hilangnya tutupan hutan pada wilayah Chiang Mai yang terjadi antara tahun 2010 dan 2020.

Bagi pengelola hutan dan pembuat kebijakan yang terlibat dalam pengelolaan hutan berkelanjutan dan upaya mitigasi perubahan iklim, pembahasan ini menekankan urgensi untuk mengatasi penurunan EVI dan NDVI, yang menunjukkan penurunan kesehatan vegetasi dan pengurangan tutupan hutan yang setara selama dekade terakhir. Hasil penelitian juga mengidentifikasi sub-provinsi Kota Chiang Mai dan Omkoi sebagai wilayah yang mengalami kehilangan tutupan pohon yang lebih signifikan, terutama disebabkan oleh urbanisasi dan perluasan pertanian, yang menggarisbawahi perlunya intervensi yang tepat sasaran. Para pengelola hutan dapat memanfaatkan wawasan yang diperoleh dari pembahasan ini untuk mengembangkan dan menerapkan strategi pengelolaan komprehensif yang berfokus pada praktik berkelanjutan, seperti perlindungan, rehabilitasi, penghutanan, dan reboisasi, untuk memastikan kesehatan dan ketahanan jangka panjang ekosistem hutan vital Thailand.



Tabel 6.2 Nilai Klasifikasi Kelas LULC Individual untuk Perhitungan (PA, UA, OA, K)

Kelas	(PA %)	(UA %)
Hutan	100	90,91
Air	71,43	82,00
Lainnya	75	50,94
(OA)	72,72 %	
(K)	0,6626	

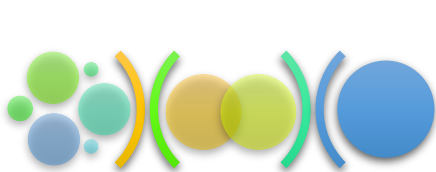
6.6 KESIMPULAN

Meskipun semua wilayah mengalami penurunan EVI dan NDVI, yang mengakibatkan memburuknya kesehatan vegetasi dan penurunan luas tutupan hutan dalam dekade terakhir (2010–2020), kemungkinan besar disebabkan oleh konsekuensi negatif dari perubahan penggunaan lahan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa di antara sub-provinsi pada wilayah Chiang Mai, kota Chiang Mai dan Omkoi telah mengalami kehilangan tutupan pohon yang lebih tinggi daripada wilayah lain. Lebih lanjut, hilangnya tutupan pohon ini menunjukkan bahwa urbanisasi dan pertanian telah menjadi alasan utama degradasi tutupan hutan di kedua wilayah ini. Akibatnya, strategi pengelolaan harus dirancang untuk mencegah penurunan tutupan hutan global melalui pengelolaan hutan berkelanjutan, yang meliputi perlindungan, rehabilitasi, penghutanan, dan reboisasi.

Selain itu, upaya harus ditingkatkan untuk menghentikan degradasi hutan dan mendukung upaya internasional untuk memerangi perubahan iklim. Selain itu, dari sudut pandang teknik yang diterapkan untuk melakukan penelitian ini, dapat dinyatakan bahwa analisis penginderaan jauh seperti ini pada akhirnya akan membantu meningkatkan pemahaman kita tentang ekosistem hutan kita, yang mungkin mengarah pada peningkatan NDVI, EVI, atau beberapa indeks lainnya, yang pada gilirannya dapat mendorong kita untuk mengambil langkah-langkah yang diperlukan seperti yang disebutkan di atas dan memulihkan kesehatan hutan dalam waktu dekat.

Perubahan iklim akan menjadi, dan tentu saja sudah menjadi, salah satu masalah paling serius yang harus ditangani oleh penginderaan jauh dan teknologi geospasial. Selain itu, inisiatif untuk wilayah yang dilindungi di Chiang Mai dibuat dengan bantuan basis data Sistem Informasi Geografis (GIS) terintegrasi untuk konservasi hewan dan analisis lanskap.

Meskipun penginderaan jauh saja tidak dapat digunakan untuk mengevaluasi keadaan tegakan hutan saat ini dan historis, kelengkapan analisis dapat ditingkatkan secara signifikan dengan menggabungkan teknik penginderaan jauh dengan pengamatan langsung terhadap modifikasi penggunaan lahan. Akibatnya, memasukkan subset data, idealnya sebagai kovariabel, dalam analisis sangat penting. Subset data ini seharusnya menjadi fitur otomatis dan terstandarisasi dari setiap investigasi penginderaan jauh dalam jangka panjang. Kecerdasan buatan (AI) dan Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) telah muncul sebagai alat yang ampuh dalam memajukan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) Perserikatan Bangsa-Bangsa.



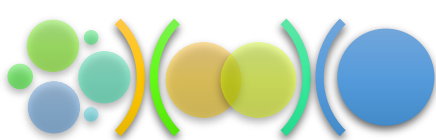
Dengan memanfaatkan kemampuan AI, kita dapat mempercepat kemajuan menuju masa depan yang lebih berkelanjutan. Salah satu cara utama AI berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan adalah dengan meningkatkan kemampuan dalam memecahkan tantangan global yang kompleks. AI dapat menganalisis kumpulan data yang luas untuk mengidentifikasi tren dan wawasan terkait kemiskinan, kelaparan, kesehatan, pendidikan, dan degradasi lingkungan, sehingga memungkinkan intervensi yang tepat sasaran dan alokasi sumber daya. Misalnya, AI dapat membantu memprediksi pola cuaca, menilai dampak perubahan iklim, dan mengoptimalkan penggunaan sumber energi terbarukan, membantu mengembangkan strategi yang lebih efektif untuk pengurangan risiko bencana, pertanian berkelanjutan, dan konsumsi energi.

Selain itu, peran AI dalam pendidikan adalah bidang lain di mana dampaknya sangat besar. AI dapat mempersonalisasi pengalaman belajar melalui platform pembelajaran adaptif yang memenuhi kebutuhan individu siswa, sehingga meningkatkan akses ke pendidikan berkualitas secara global dan selaras dengan SDG 4. Selain itu, AI dapat digunakan untuk mengembangkan teknologi dan produk baru yang dapat membantu mengatasi tantangan pembangunan berkelanjutan, seperti menghasilkan dan menghemat energi, meningkatkan produktivitas pertanian, dan mengurangi polusi.

Di sisi lain, TIK memainkan peran penting dalam memungkinkan akses ke layanan informasi dan komunikasi, yang sangat penting untuk mencapai banyak SDG. Namun, integrasi AI dan TIK ke dalam upaya SDG juga menghadirkan tantangan, termasuk pertimbangan etis, kekhawatiran privasi data, dan kesenjangan digital. Memastikan bahwa teknologi ini inklusif, transparan, dan selaras dengan hak asasi manusia sangat penting untuk memanfaatkannya demi kebaikan global tanpa memperburuk ketidaksetaraan atau merusak privasi dan keamanan.

Kesimpulannya, AI dan TIK memiliki potensi besar untuk memajukan SDG, mulai dari meningkatkan pemahaman kita tentang tantangan global hingga merevolusi layanan penting dan memberdayakan masyarakat. Menurut Janga dan rekan-rekan, AI penginderaan jauh telah menjadi alat yang ampuh dalam memerangi deforestasi.

Dengan menggabungkan data satelit dengan algoritma pembelajaran mendalam, para peneliti dapat secara akurat memetakan dan memantau perubahan tutupan hutan dari waktu ke waktu. Informasi ini sangat penting untuk menegakkan kebijakan konservasi, mengidentifikasi aktivitas penebangan ilegal, dan mengembangkan strategi pengelolaan hutan berkelanjutan untuk melindungi keanekaragaman hayati dan mengurangi perubahan iklim. Model Extreme Gradient Boosting (XGBoost), khususnya, telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam membedakan kelas dengan perbedaan spektral yang halus, meningkatkan kinerja klasifikasi dalam aplikasi pemantauan hutan, sehingga pendekatan pengintegrasian sistem AI ini dapat menyelesaikan pertanyaan penelitian saat ini dengan cara yang lebih bermanfaat dalam konteks penelitian kami tentang hutan Chiang Mai. Hal ini pada gilirannya mendukung skema SDG 15: Kehidupan di Darat.



BAB 7

OPTIMALISASI SAMPAH PADAT BERBASIS GIS

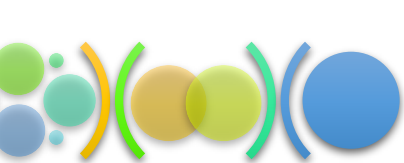
7.1 PENDAHULUAN

Di India, terdapat masalah serius terkait pengelolaan sampah padat perkotaan karena jumlah yang sangat besar yang dihasilkan setiap hari serta masalah lingkungan dan estetika. Meskipun hanya 31% penduduk India yang tinggal di daerah perkotaan, 377 juta penduduk negara ini (berdasarkan Sensus India 2011) menghasilkan 143.449 metrik ton sampah padat perkotaan setiap hari, menurut Badan Pengendalian Polusi Pusat (CPCB), 2014–15, dan angka ini terus meningkat setiap hari seiring pertumbuhan penduduk. Operasi pengelolaan sampah melibatkan banyak tantangan, dan di antaranya, pengumpulan sampah merupakan yang paling menantang karena biaya yang signifikan.

Sebanyak 1,15 lakh metrik ton per hari (TPD) atau 42,0 juta ton sampah padat perkotaan dihasilkan di perkotaan India setiap tahunnya, di mana 83.378 TPD dihasilkan di 423 kota Kelas-I. Sampah yang dihasilkan di 423 kota Kelas-I tersebut mencakup 72,5% dari seluruh sampah yang dihasilkan setiap hari, dan hal ini perlu ditangani terlebih dahulu. Sampah padat perkotaan terdiri dari 40%–55% material inert, 30%–55% materi yang dapat terurai secara hayati (organik), dan 5%–15% bahan yang dapat didaur ulang (CPCB India, 2018). Bagi beberapa kota di negara berkembang, biaya pengumpulan sampah mencapai lebih dari 70% dari anggaran pengelolaan sampah padat, dibandingkan dengan 60% atau kurang di negara maju.

Menurut perkiraan, antara 80% dan 90% sampah kota dibuang di tempat pembuangan akhir tanpa menggunakan teknik pengelolaan yang memadai dan dibakar secara terbuka, yang mencemari udara, air, dan tanah. Mobilitas sampah ke berbagai fasilitas, termasuk stasiun transfer, tempat penyimpanan sementara, dan tempat pembuangan akhir, serta biaya operasional dan pengoperasian infrastruktur ini, semuanya termasuk dalam total biaya pengelolaan sampah padat di beberapa kota di negara berkembang. Hal ini telah mendorong banyak kota, khususnya di dunia industri, untuk meluncurkan proyek penelitian yang hemat biaya seperti optimasi rute.

India baru-baru ini muncul sebagai pasar untuk daur ulang, meskipun kinerja daur ulang belum memenuhi harapan. Namun, beberapa kota di India, seperti Indore, Surat, Alleppey, Bobbili, Panaji, dan Pune, telah menunjukkan sikap yang menguntungkan terhadap pilihan taktik pengelolaan sampah padat. Selain itu, telah dicatat bahwa sebagian besar kota hanya berfokus pada aspek pengumpulan sementara mengabaikan pengolahan lebih lanjut. Swachh Bharat Mission, program unggulan pemerintah India, diperkenalkan pada tahun 2014 dengan tujuan menyediakan akses bagi setiap keluarga terhadap layanan sanitasi dasar, termasuk toilet, serta menerapkan metode ilmiah untuk pengumpulan, pengolahan, dan pembuangan sampah padat perkotaan. Misi ini sangat menekankan komitmen setiap



pemangku kepentingan untuk mewujudkan perubahan nyata dalam masyarakat bersamaan dengan kualitas dan keberlanjutan penyampaian layanan.

Komponen pengumpulan/pengangkutan dalam sistem pengelolaan sampah padat (SWM) berfungsi sebagai inti utamanya karena memudahkan penilaian efektivitas dan biaya sistem. Operasi ini mencakup pemindahan sampah dari lokasi produksi atau perakitan ke stasiun transfer, fasilitas pengolahan, atau lokasi pembuangan akhir. Akibatnya, komponen ini memiliki dampak terbesar dan merupakan bagian termahal dari sistem pengelolaan sampah karena menghabiskan sebagian besar dana yang telah dialokasikan pemerintah kota untuk SWM.

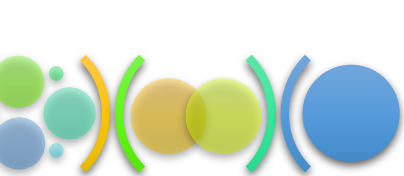
Teknologi GIS terintegrasi modern memberi pengambil keputusan akses ke kerangka kerja pemodelan yang canggih yang memungkinkan mereka untuk menilai dan mensimulasikan berbagai masalah terkait SWM. Bahkan, alat GIS telah digunakan untuk mensimulasikan sejumlah aplikasi pengelolaan sampah, termasuk penempatan tempat pembuangan akhir dan stasiun transfer, optimasi pengumpulan dan pengangkutan, dan perkiraan sampah lokal. Berdasarkan perangkat lunak optimasi rute yang sesuai, sejumlah model untuk pengumpulan dan pengangkutan sampah padat telah dibuat.

Selain itu, lokasi tempat pengumpulan daur ulang telah dilakukan menggunakan teknologi GIS; Pengelolaan sampah di daerah pesisir telah dioptimalkan; pembangkitan sampah padat telah diperkirakan menggunakan data demografis dan sosioekonomi lokal; dan prediksi pembangkitan sampah di tingkat lokal. Untuk meningkatkan efektivitas pengumpulan dan pengangkutan sampah di kota Patna, Bihar (India), optimasi dibuat menggunakan alat QGIS Network Analyst. Ini melibatkan alokasi tempat sampah dan optimasi rute kendaraan dalam hal jarak tempuh dan parameter operasional sambil mempertimbangkan semua parameter pengaturan yang diperlukan, termasuk kepadatan penduduk, tingkat pembangkitan sampah, lokasi tempat sampah, dan kendaraan pengumpul.

7.2 PROFIL WILAYAH DAN DEMOGRAFI PATNA

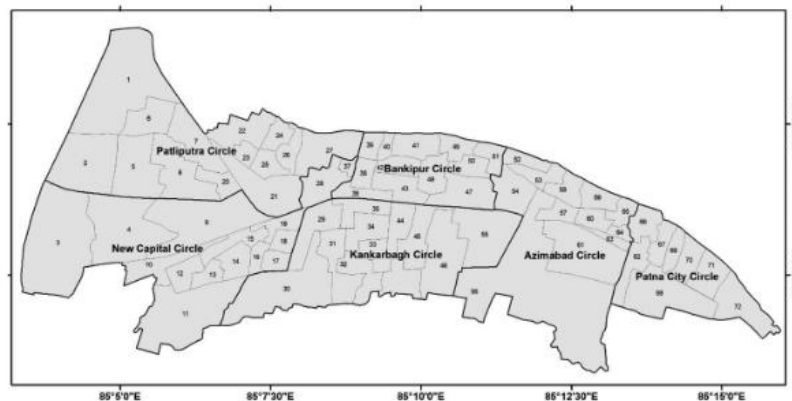
Ibu kota negara bagian Bihar adalah Patna, yang terletak 15 kilometer dari tempat pertemuan sungai Gangga dan sungai-sungai lainnya. Ini adalah negara bagian yang sepenuhnya terkurung daratan yang terletak pada wilayah transisi dalam hal iklim, ekonomi, dan budaya. Kota ini terletak di tengah-tengah antara Benggala Barat yang lembap di timur dan Uttar Pradesh yang semi-lembap di barat. Di tepi selatan Sungai Gangga terdapat kota Patna, sebuah pusat administrasi dan akademik yang penting. Sungai Gangga, Sone, dan Punpun mengelilingi kota di tiga sisi, memberikannya garis pantai sungai yang sangat panjang. Area Aglomerasi Perkotaan Patna (PUA) telah mengalami ekspansi pesat dengan laju 48,13% (1991–2001), yang lebih tinggi daripada tingkat pertumbuhan rata-rata untuk distrik Patna (30,6%) dan negara bagian (28%).

Masalah ini merupakan hasil dari pertumbuhan penduduk internal di Patna dan migrasi dari daerah pedalaman. Korporasi Kota Patna memiliki wilayah seluas 108,87 km². Terdapat 75 lingkungan yang dialokasikan di bawah administrasi eksekutif enam lingkaran administrasi: Divisi Azimabad, Divisi Bankipur, Divisi Kankarbagh, Divisi Ibu Kota Baru, Divisi



Patliputra, dan Divisi Kota Patna (Gambar 7.1). Saat ini, diperkirakan 2.321.000 orang akan tinggal di kota Patna pada tahun 2023. Terdapat 1.234.931 orang yang dapat membaca dan menulis di kota Patna, 685.849 di antaranya laki-laki dan 549.082 di antaranya perempuan.

Tingkat melek huruf laki-laki dan perempuan di Patna masing-masing adalah 87,35% dan 78,89%, dengan tingkat melek huruf rata-rata kota sebesar 83,37%. Sebanyak 885 perempuan untuk setiap 1000 laki-laki tinggal di kota Patna. Untuk setiap 1000 anak laki-laki, terdapat 877 anak perempuan. Sebanyak 13.696 permukiman kumuh, dengan populasi 77.034 orang, terletak di kota Patna dan sekitarnya. Terdapat 1.684.297 orang yang tinggal di kota Patna dan sekitarnya, atau sekitar 4,57% dari total populasi kota. Di kota Patna, 86,39% penduduknya menganut agama Hindu. Dengan 12,27% penduduk Patna yang menganutnya, Islam adalah agama terbanyak kedua. Buddhisme berada di urutan kedua dengan 0,02%, Jainisme 0,09%, Sikhisme 0,23%, dan Kristen 0,51% di kota Patna.

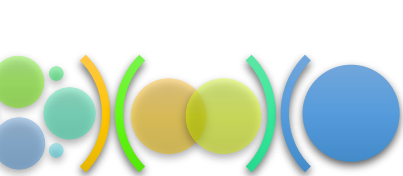


Gambar 7.1 Peta lokasi korporasi kota Patna.

7.3 PEMANFAATAN QGIS

Dengan memanfaatkan lingkungan GIS “Quantum Geographic Information System” (QGIS), sebuah basis data spasial dibuat menggunakan peta, data dari instansi pemerintah kota dan statistik, Open Street Map (OSM), pemantauan dan kerja lapangan, serta informasi dari literatur. Informasi yang diperlukan berkaitan dengan fitur geografis dan perkotaan wilayah penelitian serta kekhususan proses pengumpulan sampah.

Peta kelurahan dan lingkaran telah di-georeferensi dan didigitalkan dari Data Pemosisian Global menggunakan perangkat lunak QGIS. Informasi berikut dikumpulkan dan diproses dalam format yang sesuai (vektor, tabel, dan raster): delineasi lokasi penelitian, rencana tata guna lahan terperinci pemerintah kota, distribusi dan kepadatan penduduk, citra satelit (Google Earth), jaringan jalan, dan fasilitas infrastruktur pengumpulan sampah saat ini. Data populasi per kelurahan dikumpulkan dari kantor pemerintah kota. Semua informasi dan fakta yang diperlukan telah dikumpulkan, termasuk lokasi titik awal, jumlah pekerja, rute yang ditempuh dan koordinat titik pengumpulan, kondisi sampah saat dihasilkan, kondisi kontainer dan tempat sampah, stasiun transfer, volume sampah yang dikumpulkan, dan jumlah energi yang digunakan.



Peta Panas GVP

Kami secara berurutan mengumpulkan data GVP dari setiap lingkungan di Patna Municipal Corporation. Dalam pembahasan ini, total 483 lokasi GVP diidentifikasi dan lokasi geografis masing-masing GVP dicatat melalui aplikasi seluler GPS Map Camera online. Akhirnya, semua titik yang dicatat pada platform GIS dan shapefile lokasi GVP di dalam kota dibuat. Peta panas lokasi GVP dianalisis berdasarkan perangkat lunak QGIS, dengan radius 10 milimeter. Jumlah titik di suatu lokasi digunakan untuk menghitung kepadatan. Ketika terdapat lebih sedikit GVP, area yang mereka cakup di dalam kotamadya lebih besar dan kepadatannya lebih rendah; Sebaliknya, ketika terdapat lebih banyak GVP, maka terdapat lebih banyak lokasi GVP di dalam klaster.

Optimasi Rute

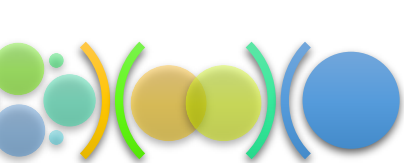
Pertama, dianggap bahwa simpul yang terbentuk di persimpangan jalan berfungsi sebagai tempat pengumpulan sekunder potensial untuk jaringan jalan tertentu. Hubness tampaknya terkait dengan terjadinya konsentrasi jarak, yang biasanya dinyatakan sebagai proporsi antara beberapa kriteria dispersi (misalnya, deviasi standar) dan beberapa penilaian besaran (misalnya, rata-rata) jarak semua titik GVP dalam kumpulan data ke beberapa titik referensi arbitrer. Alat Jarak ke hub terdekat membuat garis yang menghubungkan setiap fitur dari titik-titik rawan sampah (GVP) masukan ke titik terdekat di titik pengumpulan sekunder. Jarak dihitung berdasarkan pusat setiap titik pengumpulan sekunder.

Dengan menggunakan rata-rata sampel distribusi GVP sebagai titik perbandingan, dapat dilihat bahwa lokasi titik GVP dalam ruang data secara signifikan memengaruhi nilai k kemunculannya. Untuk kombinasi distribusi titik pengumpulan sekunder dan ukuran jarak di mana hubness terjadi, serta untuk berbagai nilai k , kami juga membuat pengamatan yang setara. Hub pengumpulan sekunder biasanya terlihat dekat dengan rata-rata distribusi GVP individu dari distribusi data multimodal, seperti yang dibentuk dari kombinasi distribusi unimodal. Solusinya kemudian ditentukan oleh fungsi yang mempertimbangkan sejumlah faktor, termasuk jarak terpendek, titik pengumpulan sekunder, lokasi GVP, dan jaringan jalan.

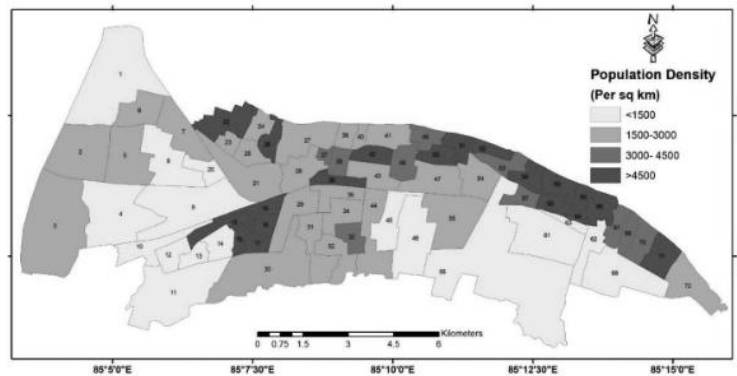
Statistik deskriptif karakteristik pengumpulan sampah telah dilakukan melalui Microsoft Excel. Analisis korelasi silang dilakukan untuk memperkirakan hubungan antara ketersediaan infrastruktur dan karakteristik produksi sampah pada wilayah. Semua analisis dilakukan pada tingkat signifikansi 0,05.

7.4 DINAMIKA SAMPAH DAN EFISIENSI INFRASTRUKTUR

Pengembangan sistem pengelolaan sampah padat memerlukan evaluasi produksi sampah. Berat dan volume sampah secara keseluruhan yang dihasilkan oleh masyarakat yang dilayani oleh sistem pengelolaan tersebut lebih penting dalam hal perencanaan dan desain, meskipun output sampah per kapita merupakan metrik yang diperlukan untuk menunjukkan tren konsumsi dan produksi. Gambar 7.2 mengilustrasikan distribusi spasial kepadatan penduduk di Patna Municipal Corporation. Berdasarkan kepadatan penduduk, wilayah dibagi menjadi empat kategori, yaitu (i) <1500 jiwa per km persegi, (ii) 1500–3000 jiwa per km persegi, (iii) 3000–4500 jiwa per km persegi, dan (iv) 4500 jiwa per km persegi. Hasil



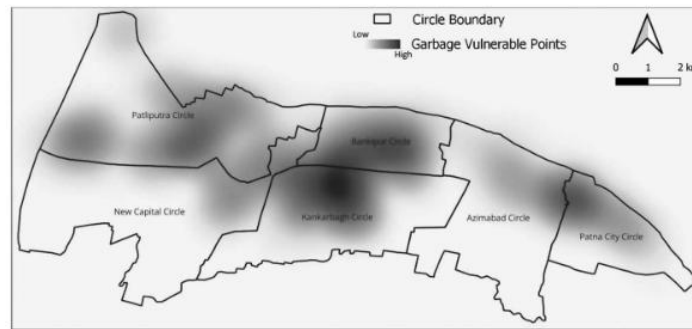
menunjukkan kepadatan penduduk maksimum tersebar di bagian utara, timur laut, dan kantong-kantong kecil pada wilayah tengah Patna Municipal Corporation. Kepadatan penduduk terendah tersebar di bagian selatan dan barat wilayah tersebut. Kepadatan penduduk sedang tersebar di bagian tengah.



Gambar 7.2 Distribusi spasial kepadatan penduduk per kelurahan pada wilayah kota Patna.

Gambar 7.3 mengilustrasikan kepadatan spasial GVP di Korporasi Kota Patna. Kepadatan GVP tertinggi sebagian besar tersebar pada wilayah Kankarbagh dan Bankipur. Kepadatan GVP terendah sebagian besar diamati pada wilayah Azimabad dan Ibu Kota Baru. Kepadatan GVP terendah diamati pada wilayah Patna dan Patliputra. Jumlah sampah yang dihasilkan juga akan berubah sebagai akibat dari pertumbuhan populasi, yang secara langsung terkait dengan perubahan gaya hidup dan pola konsumsi. Kehidupan sehari-hari penduduk kota memberikan bukti pergeseran pola konsumsi, seperti kecenderungan mereka untuk membeli makanan cepat saji yang menggunakan, misalnya, wadah makanan sekali pakai. Pertumbuhan produksi sampah sangat dipengaruhi oleh gaya konsumsi ini. Kota Patna menjadi daya tarik utama bagi populasi migran. Populasi meningkat karena migrasi serta tingkat kelahiran alami.

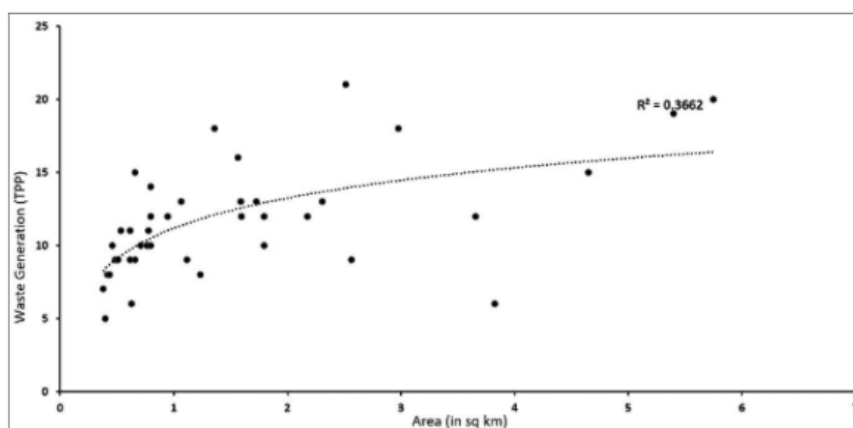
Peningkatan produksi sampah padat perkotaan terlihat sebagai akibat dari kepadatan penduduk, yang dianggap sebagai ancaman bagi lingkungan. Terdapat berbagai pembatasan dalam penanganan sampah, baik dalam hal transportasi maupun masalah dengan tempat pembuangan akhir, sebagai konsekuensi dari kepadatan penduduk dan berbagai tingkat kehidupan dalam populasi. Gambar 7.4a mengilustrasikan jumlah produksi sampah dan wilayah geografisnya. Hasil menunjukkan hubungan sedang dan positif ($R^2 = 0,37$) pada wilayah pembahasan. Gambar 7.4b menunjukkan korelasi antara distribusi populasi dan jumlah produksi sampah di Patna Municipal Corporation. Hasil menunjukkan terdapat korelasi positif yang kuat ($R^2 = 0,93$) antara populasi dan produksi sampah pada wilayah. Nilai p signifikansi kurang dari 0,05 mengkonfirmasi temuan ini.



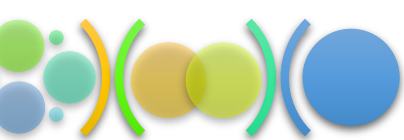
Gambar 7.3 Peta panas titik rawan sampah pada wilayah kota Patna.

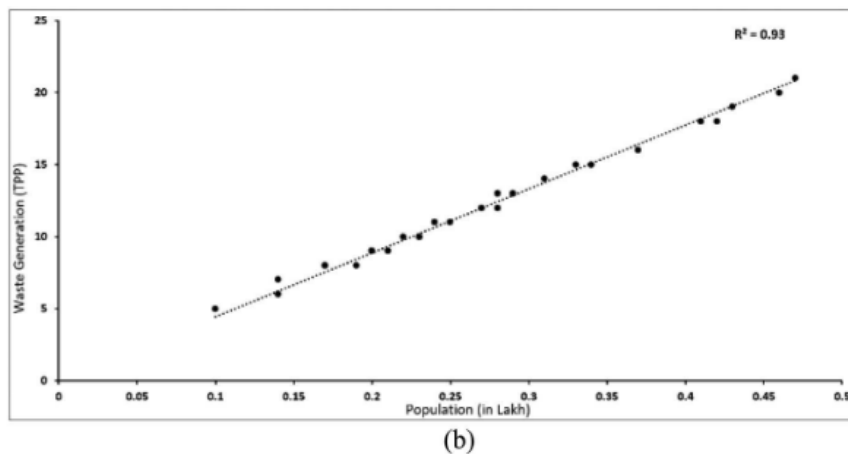
Sebuah matriks korelasi silang dibuat untuk mengidentifikasi hubungan antara aset pengelolaan sampah dan perkiraan produksi sampah pada wilayah. Hasil menunjukkan hubungan positif sedang antara jumlah kendaraan dan perkiraan produksi sampah per km persegi ($r^2 = 0,319$) dan produksi sampah per lakh penduduk ($r^2 = 0,420$) pada wilayah. Selain itu, korelasi positif yang kuat diamati antara tenaga kerja dan produksi limbah/dalam TPD ($r^2 = 0,849$) dan total produksi limbah ($r^2 = 0,844$). Hubungan negatif yang kuat diamati antara produksi limbah per km persegi ($r^2 = -0,690$) dan produksi limbah per lakh penduduk ($r^2 = -0,616$).

Gambar 7.5 mewakili variasi spasial per lingkaran dari praktik pengelolaan limbah yang diadopsi oleh Patna Municipal Corporation. Gambar 7.5a menunjukkan distribusi spasial tenaga kerja di mana jumlah tenaga kerja maksimum dialokasikan untuk Lingkaran Azimabad dan jumlah tenaga kerja terendah dialokasikan untuk Lingkaran Bankipur. Gambar 7.5b menunjukkan jumlah kendaraan maksimum dialokasikan untuk Lingkaran Ibu Kota Baru diikuti oleh Lingkaran Bankipur. Jumlah terendah dialokasikan untuk Lingkaran Kankarbagh. Gambar 7.5c menunjukkan distribusi spasial kuantitas produksi limbah di PMC. Peta jaringan jalan telah disiapkan yang mencakup semua jalan yang mungkin membutuhkan layanan. Atribut kelas jalan ditambahkan sesuai dengan peta survei area (Gambar 7.6). Area cakupan titik pengumpulan sekunder, yang menyumbangkan sampah padat ke lokasi tertentu, dihitung dengan mempertimbangkan jarak terpendek.



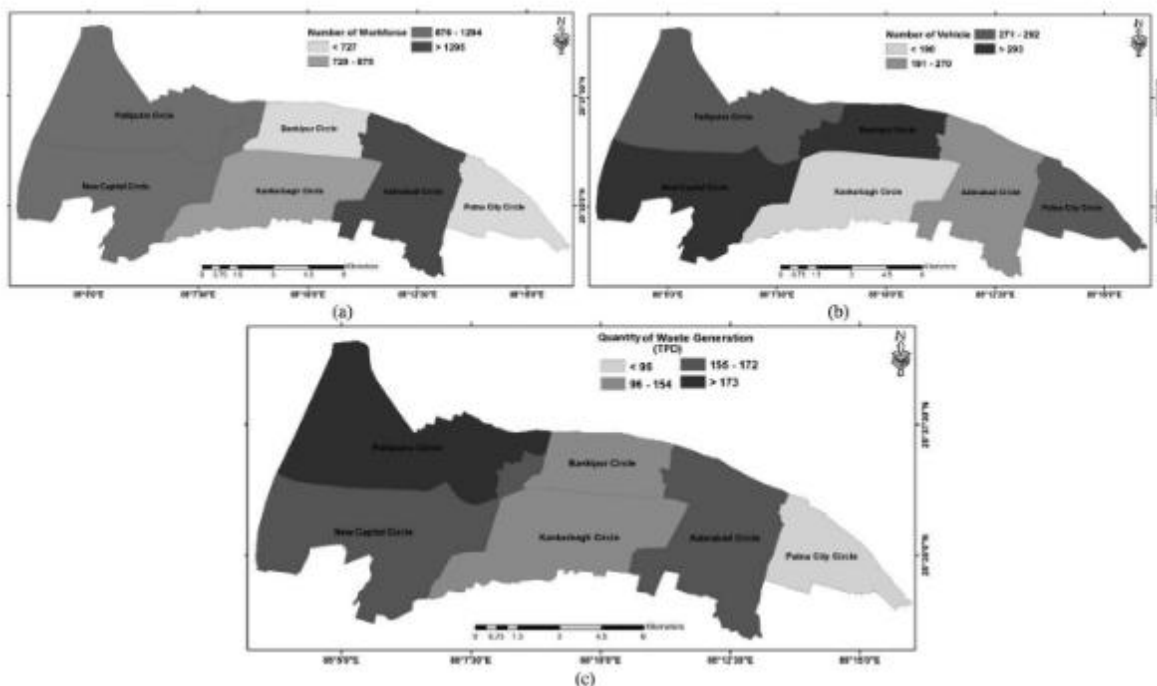
(a)



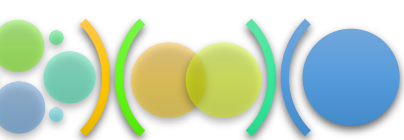


Gambar 7.4 Korelasi antara produksi sampah dan luas wilayah dalam km persegi (a) dan jumlah penduduk (b) pada wilayah kota Patna.

Konektivitas antara lokasi pengumpulan sekunder terdekat bertindak sebagai penghubung jaringan, sementara pusat setiap titik pengumpulan sekunder bertindak sebagai simpulnya. Berdasarkan alat jarak ke hub yang digunakan untuk identifikasi rute baru dengan bantuan jaringan jalan yang ada dan lokasi titik pengumpulan sekunder untuk mengidentifikasi rute terpendek yang akan menempuh jarak lebih pendek dan mencakup titik pengumpulan sampah maksimum dengan tumpang tindih yang lebih sedikit. Gambar 7.6 menunjukkan rute terpendek baru secara melingkar dan konektivitas antara GVP dan titik pengumpulan sekunder di area. Rute yang direvisi mengurangi jarak tempuh keseluruhan, sehingga secara bertahap mengurangi penggunaan bahan bakar. Akibatnya, biaya yang terkait dengan pengumpulan (pengumpulan) dan emisi polusi menurun.



Gambar 7.5 Distribusi tenaga kerja (a) per lingkaran, (b) alokasi kendaraan, dan (c) jumlah sampah yang dihasilkan pada wilayah kota Patna.



Tabel 7.1 menampilkan jarak untuk rute pengumpulan sampah saat ini dan ideal untuk kendaraan bermotor. Tabel 7.1 menampilkan perubahan persentase berdasarkan jarak yang tepat untuk semua paket antara rute saat ini dan rute yang dioptimalkan. Untuk pengumpulan dan pengiriman sampah, pembahasan optimasi rute seringkali berfokus pada penentuan jarak terpendek atau durasi mengemudi minimal.

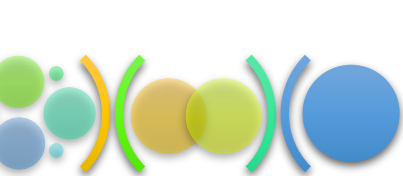
Perbedaan rute maksimum dihitung untuk Lingkaran Ibu Kota Baru (12,76 km), diikuti oleh Lingkaran Kankarbagh (10,47 km). Perbedaan terendah dihitung untuk Lingkaran Kota Patna (5,78 km), diikuti oleh Lingkaran Bankipur (6,04 km). Selain itu, efisiensi penghematan maksimum dihitung untuk Lingkaran Bankipur (31,09%), diikuti oleh Kota Patna (26,06%). Efisiensi penghematan terendah dihitung untuk Patliputra (15,05%), diikuti oleh Lingkaran Ibu Kota Baru (17,30%).

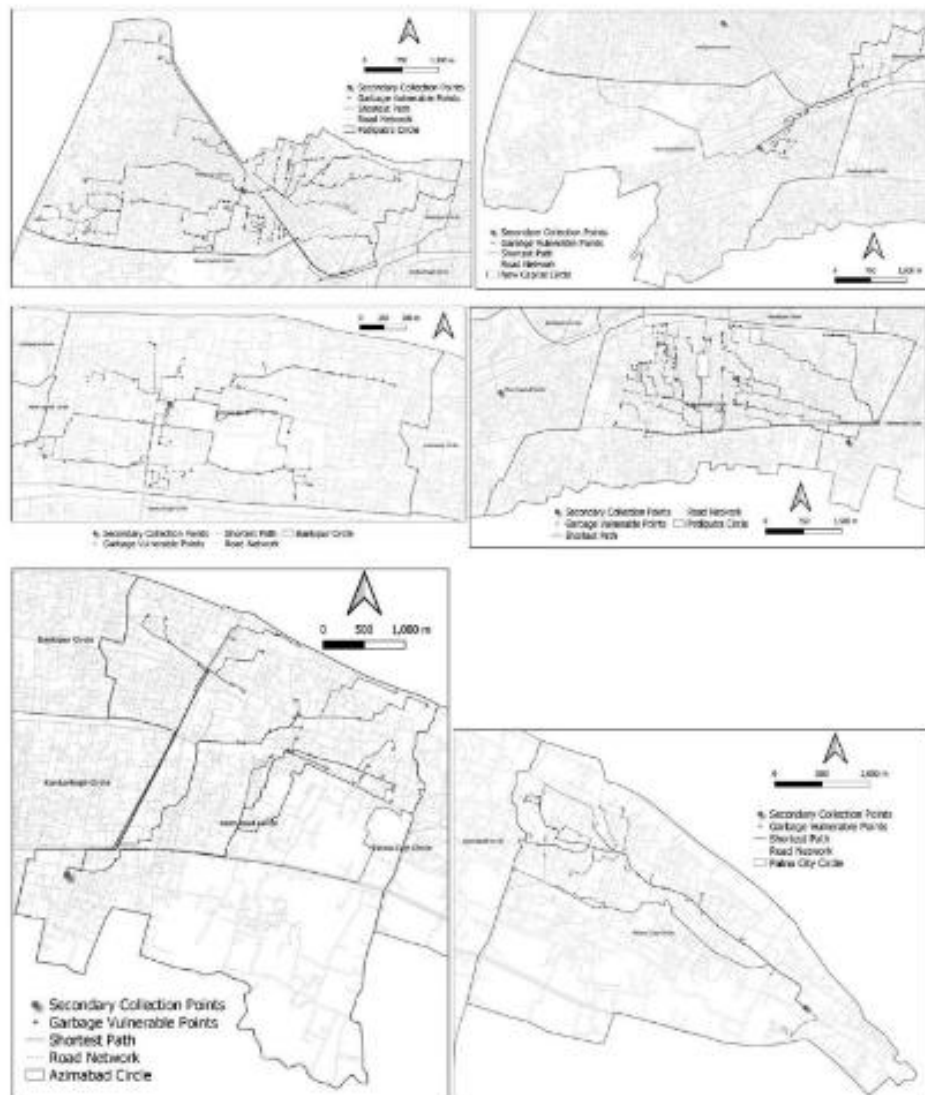
7.5 PEMBAHASAN DALAM PENGELOLAAN SAMPAH

Akibat adopsi gaya hidup kontemporer, pertumbuhan penduduk yang terus meningkat di Patna Municipal Corporation telah menyebabkan peningkatan jumlah sampah padat, yang mengakibatkan degradasi sumber daya tanah, air, dan udara. Sampah padat rumah tangga—juga disebut sebagai sampah atau limbah—adalah sampah padat yang dihasilkan oleh berbagai entitas lokal perkotaan. Semakin banyak kasus yang melibatkan risiko terhadap kesehatan manusia disebabkan oleh pembuangan sampah yang tidak teratur dan tidak tepat. Dalam pengelolaan sampah padat dan tempat pengumpulan sampah, GIS dapat digunakan dengan sukses. Stasiun pengumpulan sekunder harus ditetapkan dengan menentukan jarak kedekatan yang nyaman bagi masyarakat untuk mencegah pembuangan sampah terbuka. Untuk mencegah luapan tempat sampah, ukuran tempat sampah harus dipilih dengan mempertimbangkan jumlah sampah yang dihasilkan dan frekuensi pengumpulan.

Tabel 7.1 Perbandingan Melingkar antara Rute yang Ada dan Rute yang Dioptimalkan

Wilayah	Rute Eksisting	Rute Optimal	Selisih	Efisiensi Penghematan (%)
Bankipur	19,43	13,39	6,04	31,09%
Patna City	22,18	16,40	5,78	26,06%
Azimabad	26,54	19,66	6,88	25,92%
Patliputra	50,62	43,00	7,62	15,05%
New Capital	73,76	61,00	12,76	17,30%
Kankarbagh	56,21	45,74	10,47	18,63%



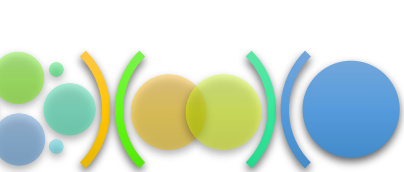


Gambar 7.6 Analisis jalur terpendek melingkar antara titik pengumpulan sekunder dan titik rawan sampah.

Rute pengumpulan sampah dapat ditentukan dengan tepat menggunakan GIS, yang akan menghemat biaya pengumpulan. Selain itu, pendekatan ini membantu mengidentifikasi simpul perantara dari mana jalur terpendek ditentukan. Pengguna dapat dengan mudah menentukan jalur dari mana jarak terpendek dapat diperoleh.

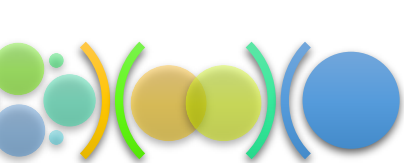
Alat QGIS digunakan dalam penelitian ini untuk membangun optimasi guna meningkatkan efektivitas pengumpulan dan pengangkutan sampah di kotamadya Patna, Bihar. Produksi sampah padat perkotaan (MSW) skala besar pada wilayah metropolitan Patna telah menjadi masalah lingkungan yang signifikan. Pemerintah kotamadya perkotaan berdedikasi untuk menyediakan layanan, tetapi mereka mengalami kesulitan mengelola situasi ini secara efektif karena meningkatnya keparahan masalah.

Masalah utama dalam pengelolaan sampah padat perkotaan (MSW) di PMC disebabkan oleh pemisahan sampah yang tidak memadai di sumbernya, tingkat pengumpulan sampah dari rumah ke rumah yang rendah, banyaknya tempat sampah terbuka, sistem



transportasi sampah yang tidak efektif dengan kendaraan yang sudah usang, pengumpulan yang tidak efektif di area yang baru diperoleh, dan sistem daur ulang informal yang tidak efektif.

Analisis jaringan digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan jalur terbaik untuk mengumpulkan sampah dari berbagai titik pengumpulan sampah di seluruh kota. Namun, pengaruh cuaca dan kondisi jalan terhadap pengemudian tidak diteliti dalam penelitian ini. Dari setiap titik pengambilan ke tempat pembuangan sampah terdekat, kami menghitung jalur terpendek atau terbaik. Menurut penelitian ini, penerapan rute dan prosedur yang efisien dapat menghasilkan penghematan biaya yang signifikan. Hal ini dapat dilakukan dengan mengurangi jarak rute secara keseluruhan.



BAB 8

SPASIALITAS LEISHMANIASIS VISCERAL DI MUZAFFARPUR

8.1 PENDAHULUAN

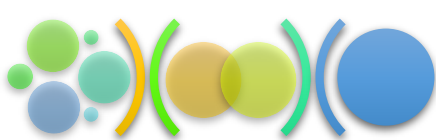
Leishmaniasis visceral (VL) atau kala-azar adalah infeksi terkait kemiskinan, yang menyerang kaum miskin. Pembahasan sebelumnya menunjukkan bahwa kekurangan gizi, pengungsian, perumahan yang buruk, buta huruf, diskriminasi gender, dan penyakit sistem kekebalan tubuh serta kekurangan sumber daya biasanya dikaitkan dengan terjadinya VL. Karakteristik suatu populasi dapat membantu menentukan kemungkinan dampak infeksi VL dan tren serta pola VL di ruang dan waktu. Hubungan antara karakteristik populasi dan infeksi VL sulit diukur; Namun, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa faktor-faktor tertentu memang memengaruhi paparan seseorang terhadap infeksi VL.

Beberapa faktor risiko jelas merupakan buatan manusia, seperti migrasi, deforestasi, urbanisasi, atau perubahan kerentanan inang manusia terhadap infeksi, seperti imunosupresi dan malnutrisi. Alternatifnya, faktor sosioekonomi adalah kondisi yang dapat memengaruhi penularan dan penyebaran VL pada seseorang atau kelompok. Faktor-faktor ini meliputi pendidikan, pekerjaan, dan pendapatan, serta berkaitan dengan infeksi VL. Pembahasan pendahuluan yang dilakukan oleh Kesari dan rekan-rekan. (2010), Costa dan rekan-rekan. (2005), dan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) (2002) menunjukkan bahwa rumah tangga dan karakteristik demografis sangat terkait dengan penularan VL. Hubungan semacam ini penting untuk dipertimbangkan ketika memutuskan apakah ada hubungan antara karakteristik populasi dan hasil VL.

Di daerah endemik VL, peningkatan risiko infeksi diperparah oleh struktur perumahan yang buruk dan kebersihan lingkungan, kebutuhan akan langkah-langkah penguatan personel, serta migrasi dan pekerjaan yang berorientasi ekonomi yang menyebabkan orang-orang terpapar lalat pasir yang terinfeksi. Pentingnya VL sebagai penghambat pembangunan ekonomi masih belum sepenuhnya diakui meskipun tidak diragukan lagi bahwa penyakit ini terkait dengan kemiskinan. Bihar di India, salah satu negara bagian yang paling terbelakang secara ekonomi, di mana 80% keluarga di desa-desa yang terkena VL ditemukan termasuk dalam dua kelompok termiskin dalam hal distribusi kekayaan.

Selama dekade terakhir, setidaknya ada tujuh upaya untuk memperkirakan biaya finansial dan ekonomi yang ditimbulkan oleh kasus VL di India, Nepal atau Bangladesh. Penggerak biaya utama yang diamati adalah hilangnya pendapatan karena penyakit (yaitu biaya tidak langsung), yang mungkin setara dengan 60% dari total pengeluaran rumah tangga.

Dalam penelitian ini, dengan mempertimbangkan karakteristik sosial ekonomi penduduk, penilaian kuantitatif dan kualitatif dilakukan untuk mengukur area penularan kala-azar 'tinggi' dan 'rendah'. Data karakteristik populasi tingkat desa, seperti kepadatan penduduk, tingkat buta huruf, pengangguran, ukuran keluarga, kepadatan pertanian, dan kepadatan gizi dikumpulkan dari data sensus dan penginderaan jauh untuk membatasi zona



penularan kala-azar 'tinggi' dan 'rendah' berdasarkan platform Sistem Informasi Geografis (SIG).

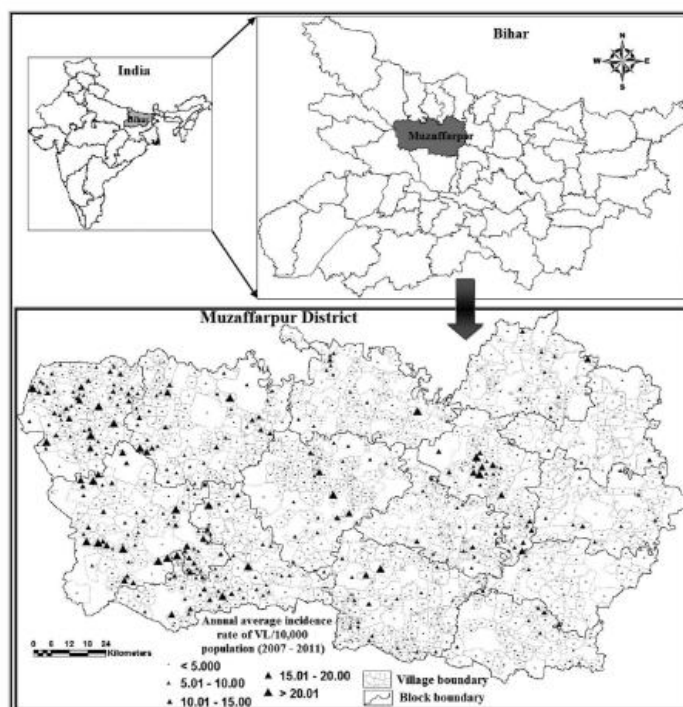
8.2 METODE ANALISIS EPIDEMIOLOGI GEOSPASIAL

Distrik Muzaffarpur terletak di bagian utara Bihar, India, membentang dari garis lintang $25^{\circ}54'33.83''\text{N}$ hingga $26^{\circ}22'57.38''\text{N}$ dan garis bujur $84^{\circ}52'17.07''\text{E}$ hingga $85^{\circ}45'51.34''\text{E}$ (Gambar 8.1). Distrik ini memiliki populasi 4.778.610 jiwa, di mana populasi laki-laki dan perempuan masing-masing sebesar 52,68% dan 47,32%.

Kepadatan penduduk distrik ini adalah 1.506 jiwa/km². Di Distrik Muzaffarpur, total penduduk yang melek huruf adalah 2.601.665 jiwa, di mana laki-laki dan perempuan masing-masing berjumlah 59,16% dan 40,84%. Rata-rata tingkat melek huruf di Muzaffarpur lebih tinggi pada tahun 2011 (65,68%) dibandingkan tahun 2001 (47,95%). Total penduduk usia kerja adalah 37,93% dari total populasi, sedangkan 58,19% laki-laki dan 15,86% perempuan merupakan penduduk usia kerja. Penduduk usia kerja utama adalah 29,81%, sedangkan 62,07% adalah penduduk usia tidak kerja dari total populasi pada wilayah penelitian.

Pengumpulan Data Sensus Dan Persiapan Lapisan Dasar

Dalam penelitian ini, data lokasi dan data sensus untuk distrik Muzaffarpur di tingkat desa dikumpulkan dari Departemen Sensus, Bihar, India. Dalam penelitian ini, data lokasi dan data populasi untuk 2.047 desa di distrik Muzaffarpur dikumpulkan dari catatan sensus. Estimasi populasi tahunan untuk setiap wilayah sensus dihitung dengan persamaan proyeksi pertumbuhan populasi (Persamaan 8.1) dengan komponen tahunan data populasi dari sensus demografis 2001.



Gambar 8.1 Peta lokasi.

Populasi yang diproyeksikan = *Populasi pada tahun sensus demografis*

$$\times \left(1 + \frac{2.38}{100}\right)^{(\text{Population of the estimated year} - 1)} \quad (8.1)$$

Indikator-indikator tersebut dikembangkan untuk mencerminkan beberapa karakteristik kunci yang berkaitan dengan penularan VL, kondisi sosial ekonomi, dan populasi pada wilayah sensus pada periode pembahasan, yaitu (i) kepadatan penduduk, (ii) tingkat buta huruf, (iii) ukuran keluarga, (iv) persentase penduduk yang menganggur, (v) kepadatan pertanian, dan (vi) kepadatan gizi.

Ukuran Tingkat Insidensi Penyakit Tahunan

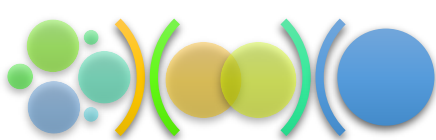
Jumlah kasus VL yang dilaporkan berasal dari rumah sakit, klinik, dan Pusat Kesehatan Masyarakat (PHC) yang dikelola pemerintah dan Masyarakat Kesehatan Negara Bagian, Bihar selama periode 2007–2011. Untuk tujuan pembahasan ini, tingkat insidensi tahunan (CIR) rata-rata lima tahun dihitung per 1.000 penduduk untuk periode 2007–2011. Pembilang dari CIR lima tahun adalah jumlah semua kasus kala-azar yang tercatat selama tahun 2007–2011, dan penyebutnya adalah jumlah rata-rata orang yang berisiko per 1.000 penduduk selama periode ini. Terakhir, tingkat insiden kumulatif untuk setiap wilayah sensus dihitung untuk distrik Muzaffarpur. Untuk melakukan analisis berbasis GIS terhadap distribusi spasial kala-azar, lapisan titik dan poligon tingkat desa dihasilkan. Semua kasus kala-azar di-geo-kode dan dicocokkan dengan lapisan poligon dan titik tingkat desa berdasarkan kode administratif menggunakan perangkat lunak ArcGIS 9.1 (ESRI Inc., Redlands, CA, USA).

Penguraian Dan Analisis Data Satelit

Untuk mengukur kepadatan pertanian dan kepadatan nutrisi pada wilayah, lahan tanaman dan lahan pertanian dibatasi dari data Landsat 5 (resolusi spasial 30 m/interval kunjungan ulang 16 hari) Thematic Mapper (TM) (Jalur/baris – 141/42; Tanggal lintasan – 16-06-2009), yang diperoleh dari USGS Earth Explorer Community. Peta penggunaan lahan dihasilkan menggunakan teknik klasifikasi terawasi berdasarkan algoritma kemungkinan maksimum (MXL) untuk mengidentifikasi lahan tanaman dan lahan pertanian. Peta tersebut telah dikategorikan menjadi tiga kelas, yaitu (i) lahan tanaman, (ii) lahan pertanian, dan (iii) kategori tutupan lahan lainnya. Dari peta penggunaan lahan, lahan tanaman dan lahan pertanian diekstrak secara terpisah berdasarkan teknik pengkodean ulang dalam perangkat lunak ERDAS Imagine (v.9.1). Terakhir, lapisan area kepentingan (.aoi) per desa dihasilkan untuk mengekstrak informasi lahan pertanian dan lahan perkebunan untuk setiap desa. Namun, kepadatan gizi dan kepadatan pertanian desa-desa yang diteliti dihitung menggunakan rumus yang diikuti oleh Trewartha (1953) dan Singh dan Dhillon (2004) dan diintegrasikan dengan basis data GIS untuk analisis lebih lanjut.

Autokorelasi Spasial Dan Penghalusan

Untuk menggambarkan autokorelasi spasial parameter populasi, statistik Moran's I global univariat dihitung untuk memahami apakah desa-desa yang berdekatan memiliki kesamaan yang lebih besar dalam hal indikator target daripada yang diharapkan dengan mempertimbangkan pola berkelompok/acak. Statistik Moran's I dapat mengambil nilai mulai dari -1 hingga +1 dan positif untuk korelasi langsung dan negatif ketika terbalik. Indeks Moran



mengukur apakah area yang bersamaan memiliki kemiripan yang lebih kuat dengan indikator yang dipelajari daripada yang diharapkan dalam distribusi acak.

Namun, permukaan kontinu diperoleh dari sampel diskrit dengan nilai terukur menggunakan metode pembobotan jarak terbalik (IDW). Tujuan interpolasi spasial adalah untuk menciptakan permukaan yang dimaksudkan untuk mewakili realitas empiris dengan sebaik-baiknya, sehingga metode yang dipilih harus dinilai akurasi untuk pembahasan skala lokal. Namun, teknik interpolasi IDW memperkirakan nilai sel dengan merata-ratakan nilai titik data desa di sekitar setiap sel pemrosesan dan sensitif terhadap outlier. Semakin dekat suatu titik ke pusat sel yang didekati, semakin besar bobot, atau pengaruhnya dalam metode perataan.

Proses ini mengasumsikan bahwa parameter yang digambarkan berkurang pengaruhnya dengan jarak dari lokasi sampelnya, dan paling baik dengan fitur spasial yang terdistribusi secara merata. Namun, dengan menggunakan prosedur ini, lapisan poligon yang dihaluskan dihasilkan sehingga menghasilkan lapisan tematik yang kurang heterogen, yang biasanya disebut sebagai lapisan halus. Setiap indikator karakteristik populasi dikategorikan ke dalam kelas tertentu berdasarkan interval geometris.

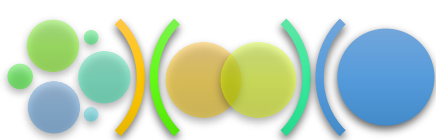
Model Risiko Penularan Kala-Azar

Model kombinasi linier berbobot digunakan dengan mengasumsikan karakteristik sosioekonomi seperti kepadatan penduduk, ukuran keluarga, penduduk pengangguran, tingkat buta huruf, kepadatan pertanian, dan kepadatan gizi di daerah tersebut, baik secara individual maupun kombinasi, diketahui berhubungan dengan terjadinya kala-azar di subkontinen India. Kombinasi linier berbobot, metode yang umum digunakan, diterapkan untuk skala pengukuran nilai yang umum pada berbagai input yang berbeda untuk menghasilkan analisis terintegrasi. Hubungan antara karakteristik populasi dan tingkat kejadian tahunan rata-rata VL per desa diuji dengan metode korelasi peringkat Spearman (ρ) untuk memperkirakan pengaruhnya terhadap penularan VL pada wilayah tertentu ini. Analisis dilakukan dengan $<0,05\%$.

Berdasarkan pentingnya relatif setiap kriteria untuk penularan kala-azar, pembobotan/penilaian sederhana dievaluasi untuk semua variabel masukan, yang mengarah pada model linier berbobot. Kami menggunakan sistem penilaian berdasarkan nilai dari 1 hingga 5, di mana '5' berarti sangat cocok, '4' sangat cocok, '3' cukup cocok, '2' kurang cocok, dan '1' sangat kurang/tidak cocok. Model ini menyesuaikan faktor lingkungan dan sosial ekonomi yang mencakup berbagai variabel yang terkait dengan penularan kala-azar, termasuk kepadatan penduduk yang tinggi, ukuran keluarga yang besar, tingkat buta huruf yang tinggi, jumlah penduduk pengangguran yang besar, kepadatan pertanian, dan kepadatan gizi yang tinggi. Data untuk setiap kriteria distandarisasi melalui transformasi linier (Persamaan 8.2).

$$S \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (8.2)$$

di mana S_i adalah nilai standar untuk nilai asli X_i , X_{min} adalah nilai asli terendah dan X_{max} adalah nilai asli tertinggi. Namun, skor dan bobot setiap variabel ditetapkan sesuai



dengan asosiasi spasial tingkat kejadian VL dengan setiap kategori variabel demografis, yang diperkirakan melalui analisis overlay serta analisis statistik univariat.

Sebaliknya, tidak mungkin menggunakan Persamaan 8.2 karena variabel (yaitu populasi pengangguran) dari model bersifat nominal. Oleh karena itu, prosedur pemeringkatan berdasarkan keahlian dan pengetahuan data dikonversi ke dalam rentang standar seperti, 1–5. Akhirnya, setiap raster input diberi bobot persentase pengaruh berdasarkan kepentingannya terhadap model nilai rho. Total pengaruh untuk semua raster sama dengan 100%. Nilai sel dari setiap raster input kemudian dikalikan dengan bobot raster (Persamaan 8.3).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (8.3)$$

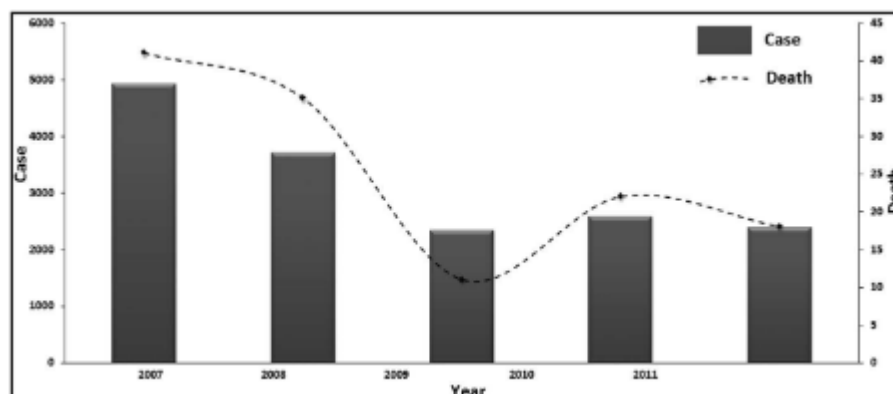
di mana I adalah nilai indeks, n adalah jumlah kriteria, w_i adalah bobot untuk kriteria i , dan x_i adalah nilai standar untuk kriteria i .

Dalam model kombinasi linier berbobot ini, kepadatan penduduk per km² memiliki pengaruh 10%, ukuran keluarga 30%, buta huruf 25%, penduduk pengangguran 15%, kepadatan pertanian 10%, dan kepadatan gizi 10% telah ditetapkan.

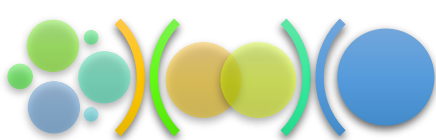
8.3 PEMODELAN RISIKO KALA-AZAR

Insidensi Penyakit Penduduk

Sebanyak 15.905 kasus dan 127 kematian tercatat pada wilayah selama periode 2007–2011. Jumlah kasus tertinggi (4.920) tercatat pada tahun 2007; namun, jumlah kasus menunjukkan tren penurunan (Gambar 8.2). Angka kejadian VL tertinggi juga tercatat pada tahun 2007 (11,40 kasus kala-azar per 10.000 penduduk) dan angka kejadian terendah tercatat pada tahun 2011 (4,99 kasus kala-azar per 10.000 penduduk). Angka kejadian tahunan rata-rata adalah 4,00 per 10.000 penduduk di antara desa-desa di distrik Muzaffarpur, yang tercatat dalam (Tabel 8.1).



Gambar 8.2 Distribusi kasus dan kematian kala-azar berdasarkan tahun di distrik Muzaffarpur.



Tabel 8.1 Karakteristik Populasi Distrik Muzaffarpur

Variabel	Rata-rata	Median	Mode	Standar Error	Standar Deviasi	Kurtosis	Skewness
Rata-rata tingkat kejadian tahunan per 1.000 penduduk	4,00	2,33	1,69	0,14	5,00	17,24	3,46
Ukuran keluarga	5,46	6,05	6,05	0,03	1,42	0,37	-0,52
Tingkat buta aksara (%)	64,67	64,99	100	0,28	12,39	0,68	-0,14
Kepadatan penduduk (km ²)	385,71	119,62	115,6	34,71	1531,39	175,49	11,63
Pendapatan (%)	43,97	43,51	43,10	0,23	10,31	4,77	0,66
Kepadatan pertanian	0,80	0,47	0,45	0,04	1,17	19,35	3,97
Kepadatan gizi	0,09	0,06	0,01	0,005	0,19	14,58	10,71

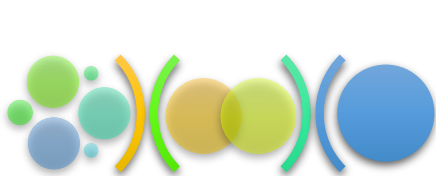
Hubungan Antara Kepadatan Penduduk Dan Rata-Rata Insidensi Tahunan VI

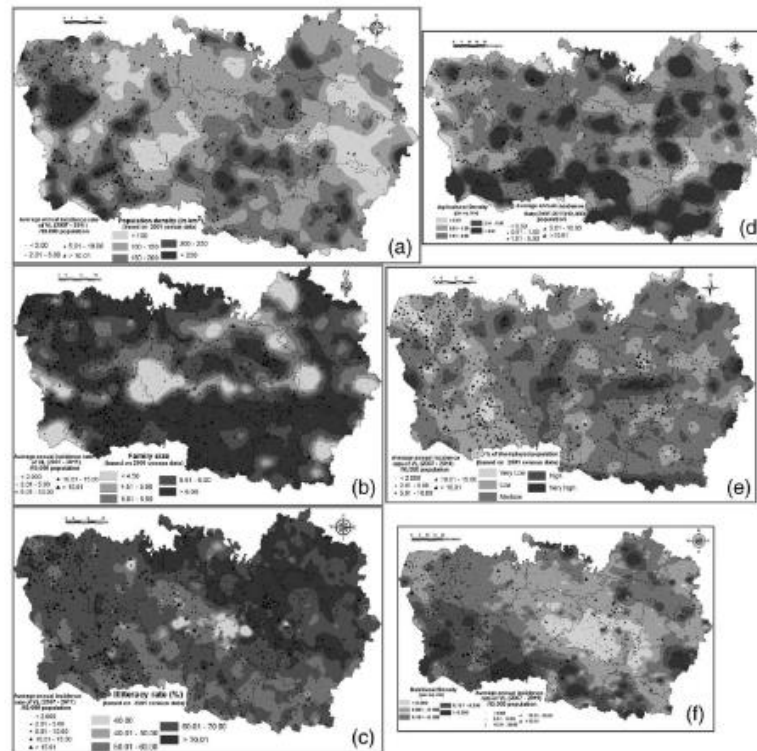
Basis data tingkat desa tentang kepadatan penduduk distrik Muzaffarpur dihasilkan berdasarkan laporan sensus. Hasilnya menunjukkan bahwa kepadatan penduduk distrik Muzaffarpur bervariasi dari 41,20 hingga 1173,85 per km² (Tabel 8.1). Kepadatan tertinggi tercatat di bagian barat distrik, dan beberapa kantong kecil juga tergambar di bagian selatan dan utara distrik. Di distrik tersebut, kepadatan terendah tercatat dari bagian timur dan tengah utara wilayah. Autokorelasi spasial kepadatan penduduk per km² di antara desa-desa yang berdekatan di distrik tersebut menunjukkan pola berkelompok (*Moran's I* = 0,36, skor Z 41,17, $p < 0,01$). Gambar 8.3a juga menunjukkan hubungan antara kepadatan penduduk dan tingkat kejadian tahunan rata-rata VL selama periode 2007–2011 di distrik Muzaffarpur. Diamati bahwa intensitas kejadian meningkat seiring dengan peningkatan kepadatan penduduk pada wilayah penelitian. Analisis kuantitatif distribusi VL dalam kaitannya dengan kepadatan penduduk menunjukkan korelasi positif ($\rho = 0,27$, $p < 0,005$)

Hubungan Antara Ukuran Keluarga Dan Tingkat Kejadian Tahunan Rata-Rata VI

Di distrik Muzaffarpur, hubungan positif dan kuat terjalin antara ukuran keluarga dan kejadian VL ($\rho = 0,47$, $p < 0,000$). Di distrik tersebut, sebagian kecil wilayah menunjukkan ukuran keluarga kurang dari 5,0, yang diamati di bagian tengah dan timur laut (Gambar 8.3b).

Autokorelasi spasial ukuran keluarga di antara desa-desa di seluruh lokasi penelitian menunjukkan pola berkelompok (*Moran's I* = 0,48, skor Z 57,22, $p < 0,01$). Namun, konsentrasi penyakit juga lebih tinggi seiring dengan perluasan wilayah yang disebabkan oleh ukuran keluarga yang lebih besar. Ukuran keluarga pada wilayah ini bervariasi dari 2,02 hingga 10,41, dengan ukuran rata-rata 5,46. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa kejadian VL meningkat seiring dengan peningkatan ukuran keluarga.





Gambar 8.3 Karakteristik populasi distrik Muzaffarpur (a) Kepadatan penduduk vs. insiden tahunan rata-rata VL selama periode 2007 hingga 2011, (b) Ukuran keluarga vs. insiden tahunan rata-rata VL selama periode 2007 hingga 2011, (c) Tingkat buta huruf vs. insiden tahunan rata-rata VL selama periode 2007 hingga 2011, (d) Kepadatan pertanian vs. insiden tahunan rata-rata VL selama periode 2007 hingga 2011, (e) Persentase pengangguran vs. insiden tahunan rata-rata VL selama periode 2007 hingga 2011, (f) Kepadatan gizi vs. insiden tahunan rata-rata VL selama periode 2007 hingga 2011.

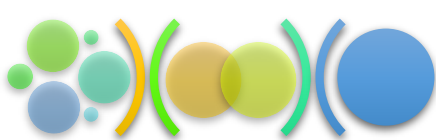
Hubungan Antara Tingkat Buta Huruf Dan Insidensi Tahunan Rata-Rata VI

The Tingkat buta huruf di distrik Muzaffarpur bervariasi dari 12,16% hingga 87,65%, dengan rata-rata 64,67%. Tingkat buta huruf terendah ditemukan di bagian tengah distrik (kurang dari 40%). Pada wilayah penelitian, tingkat buta huruf tertinggi terlihat di bagian utara dan timur laut distrik. Beberapa kantong kecil dengan tingkat buta huruf yang lebih tinggi juga digambarkan di bagian barat dan selatan distrik (Gambar 8.3c).

Namun, distribusi spasial kelompok buta huruf di seluruh distrik menunjukkan pola berkelompok ($Moran's I = 0,73$, skor $Z 86,47$, $p < 0,01$). Selain itu, frekuensi kejadian VL pada wilayah penelitian menunjukkan hubungan positif dan signifikan ($\rho = 0,38$, $p < 0,05$) dengan tingkat buta huruf, menunjukkan bahwa kedua variabel ini cenderung meningkat bersamaan.

Hubungan Antara Populasi Penganggur Dan Rata-Rata Insidensi Tahunan VI

Distribusi spasial populasi pengangguran di distrik Muzaffarpur menunjukkan pola berkelompok ($Moran's I = 0,67$, skor $Z 79,64$, $p < 0,01$). Gambar 8.3e menunjukkan bahwa persentase populasi pengangguran tertinggi berada di bagian barat distrik; beberapa kantong kecil juga ditemukan di bagian timur dan utara. Persentase di seluruh distrik bervariasi dari



17,3 hingga 98,73. Analisis overlay menunjukkan bahwa ketika persentase populasi pengangguran meningkat, tingkat kejadian VL juga meningkat. Analisis statistik dengan metode koefisien korelasi peringkat Spearman mengkonfirmasi hubungan positif yang kuat antara kedua variabel ini. Koefisien korelasi (ρ) sebesar 0,37 dengan $p < 0,001$ ditemukan, menunjukkan bahwa kedua variabel cenderung meningkat bersamaan.

Hubungan Antara Kepadatan Pertanian Dan Rata-Rata Insidensi Tahunan VI

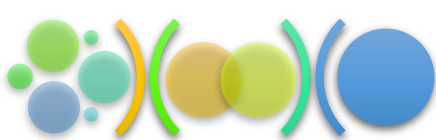
Kepadatan pertanian di distrik Muzaffarpur bervariasi dari 0,01 hingga 9,28 ($SD \pm 1,17$). Autokorelasi spasial desa-desa dengan kepadatan pertanian menunjukkan pola berkelompok ($Moran's I = 0,51$, skor Z 37,26, $p < 0,01$) di seluruh distrik. Berdasarkan nilai kepadatan pertanian, distrik tersebut dibagi menjadi lima kategori menggunakan interval geometris, seperti (1) kurang dari 0,5 – kepadatan pertanian sangat rendah, (2) 0,51–1,00 – kepadatan pertanian rendah, (3) 1,01–2,00 – kepadatan pertanian sedang, (4) 2,01–5,00 – kepadatan pertanian tinggi, dan (5) lebih dari 5,01 – wilayah dengan kepadatan pertanian sangat tinggi (Gambar 8.3d). Wilayah dengan kepadatan pertanian tinggi tergambar di bagian selatan distrik, dan beberapa kantong kecil di bagian timur dan utara distrik. Selain itu, bagian barat dan tengah distrik ditutupi oleh desa-desa dengan kepadatan pertanian sangat rendah hingga rendah. Hubungan linier sederhana ditarik antara desa-desa dengan kepadatan pertanian dan tingkat kejadian tahunan kasus VL dan menunjukkan hubungan yang signifikan ($\rho = 0,29$, $p < 0,003$).

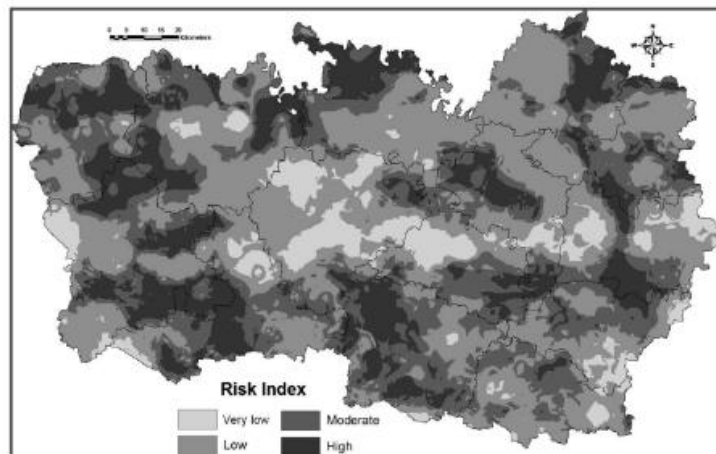
Hubungan Antara Kepadatan Gizi Dan Rata-Rata Kejadian Tahunan VI

Kepadatan gizi distrik Muzaffarpur berkisar antara 0,01 hingga 3,6 ($SD \pm 1,19$). Berdasarkan nilai kepadatan gizi, wilayah dibagi menjadi lima kelas menggunakan interval geometris. Wilayah dengan nilai gizi kurang dari 0,050 dianggap sebagai kepadatan gizi rendah, sedangkan nilai lebih dari 0,30 dianggap sebagai kepadatan gizi tinggi desa. Kepadatan maksimum tercatat di bagian barat daya dan selatan distrik. Beberapa kantong kecil dengan kepadatan gizi yang lebih tinggi juga tercatat di bagian timur dan utara wilayah penelitian (Gambar 8.3f). Bagian tengah distrik menunjukkan kepadatan gizi yang sangat rendah. Autokorelasi spasial antara desa-desa dengan kepadatan gizi serupa menunjukkan pola berkelompok ($Moran's I = 0,46$, Z-score 34,05, $p < 0,01$). Hubungan spasial antara desa-desa yang terdampak VL dan kepadatan gizi menunjukkan hubungan yang signifikan ($\rho = 0,26$, $p < 0,033$).

Analisis Model Risiko Penularan Kala-Azar

Peta risiko penularan kala-azar distrik Muzaffarpur yang diperoleh melalui karakteristik populasi ditunjukkan pada Gambar 8.4 dan kepentingan relatif dari setiap kriteria dan kategorisasinya ditunjukkan pada Tabel 8.2. Nilai indeks risiko berkisar dari 12,5 hingga 48,0. Berdasarkan interval geometris, nilai indeks risiko dikategorikan menjadi (i) area risiko 'tinggi' (nilai indeks risiko $> 0,40$), (ii) area risiko 'sedang' (nilai indeks risiko 34,55–39,39), (iii) area risiko 'rendah' (nilai indeks risiko 25,12–34,54) dan (iv) area risiko 'sangat rendah' (nilai indeks risiko $< 25,12$).



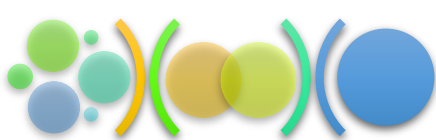


Gambar 8.4 Model risiko penularan kala-azar berbasis raster yang dikembangkan melalui karakteristik demografis distrik Muzaffarpur

Area ‘risiko tinggi’ pada peta ditunjukkan dengan warna ‘hitam pekat’, sedangkan area ‘risiko rendah’ ditunjukkan dengan warna ‘abu-abu muda’. Namun, area risiko tinggi sebagian besar ditemukan di bagian barat, selatan, dan beberapa kantong kecil di bagian timur dan utara distrik. Di sisi lain, bagian tengah wilayah tersebut menunjukkan risiko penularan kalazar yang sangat rendah.

Tabel 8.2 Model Indeks Berbasis Raster dengan Menghitung Nilai Indeks dan Menjumlahkan Nilai Sel Tertimbang dari Karakteristik Demografis untuk Penularan Kala-Azar di Distrik Muzaffarpur

Tema Input	Kriteria Bobot	Label	Bobot
Kepadatan penduduk	10	Kurang dari 100	1
		101–150	2
		151–200	3
		201–250	4
		Lebih dari 250	5
Ukuran keluarga	30	Kurang dari 4,50	1
		4,51–5,00	2
		5,01–5,50	3
		5,51–6,00	4
		Lebih dari 6,01	5
Tingkat buta aksara	25	Kurang dari 40,00	1
		40,01–50,00	2
		50,01–60,00	3
		60,01–70,00	4
		Lebih dari 70,01	5
Persentase populasi menganggur	15	Sangat rendah	5
		Rendah	4
		Sedang	3



Kepadatan pertanian	10	Tinggi	2
		Sangat tinggi	1
		Kurang dari 0,50	1
		0,51–1,00	2
		1,01–5,00	3
		5,01–10,00	4
		Lebih dari 10,00	5
Kepadatan gizi	10	Kurang dari 0,050	1
		0,051–0,100	2
		0,101–0,150	3
		0,151–0,300	4
		Lebih dari 0,301	5

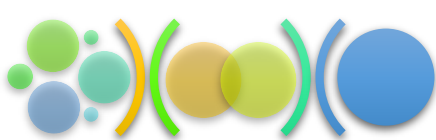
8.4 PEMBAHASAN LEISHMANIASIS VISCERAL (VL)

Distrik Muzaffarpur di Bihar, India, memiliki sejarah epidemi kala-azar selama abad ke-20 dan pembunuhan ribuan orang miskin dalam setiap wabah. Untuk melawan penyakit dan menghentikan penyebaran epidemi, individu yang terinfeksi VL harus menjalani perawatan medis yang mahal. Sayangnya, sebagian besar penduduk di lokasi penelitian tidak memiliki akses ke perawatan kesehatan yang terjangkau dan mudah diakses karena kondisi sosial ekonomi yang sangat buruk.

Beberapa hipotesis telah diuraikan melalui penilaian kualitatif dan kuantitatif bahwa penyakit VL mungkin sangat terkait dengan variabel sosial ekonomi. Dalam penelitian ini, parameter seperti kepadatan penduduk, ukuran keluarga, tingkat buta huruf, populasi pengangguran, kepadatan pertanian, dan kepadatan gizi dipertimbangkan dan hubungan spasialnya digambarkan yang dapat memberikan pedoman tentang bagaimana mengalokasikan sumber daya dengan lebih baik untuk berbagai tindakan pengendalian VL dan peningkatan faktor-faktor tersebut dapat memberikan dampak terbesar pada pengendalian penyebaran penyakit. Alternatifnya, karena sifat patriarkal komunitas Musahar di Bihar, orang-orang yang melek huruf dapat merumuskan penilaian kesehatan yang lebih informatif untuk keluarga, dan karenanya secara optimis memengaruhi prevalensi penyakit VL.

Kepadatan penduduk (yaitu populasi per kilometer persegi) berkorelasi positif dengan kejadian yang dilaporkan selama periode tersebut. Vektor lalat pasir di India, *Phlebotomus argentipes*, bersifat endofagik (misalnya, gigitan terjadi di dalam rumah) dan menggigit pada sore dan malam hari. Di sisi lain, peningkatan populasi manusia yang hidup dalam kondisi padat penduduk dengan perumahan dan fasilitas sanitasi yang tidak memadai meningkatkan kemungkinan infeksi VL. Dengan demikian, misalnya, kepadatan yang lebih tinggi dalam hal jumlah anggota rumah tangga per ruangan dapat menarik lebih banyak lalat pasir, meningkatkan paparan anggota keluarga terhadap lalat pasir dan, akibatnya, kemungkinan menerima gigitan yang terinfeksi.

Ukuran keluarga, secara umum, juga merupakan variabel signifikan untuk penularan VL pada wilayah ini. Hasil kami menunjukkan bahwa ukuran keluarga yang besar berhubungan positif dengan insiden tahunan rata-rata VL di lokasi penelitian. Hal ini tampaknya masuk akal



karena ketika lalat pasir lebih aktif, peluang gigitan lalat pasir dan penularan penyakit meningkat. Pembahasan sebelumnya, yang dilakukan oleh Ranjan et al. (2005), melaporkan bahwa kejadian VL lebih tinggi di antara kasus-kasus dengan riwayat kala-azar di antara anggota keluarga dalam setahun terakhir. Kehadiran kasus VL dalam keluarga dapat membantu penularan penyakit ini dengan adanya vektor lalat pasir dan kondisi lain yang menguntungkan untuk penyelesaian siklus penularan di dalam rumah.

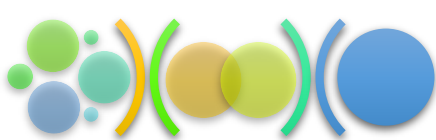
Perbedaan geografis tingkat buta huruf (baik laki-laki maupun perempuan) dianggap sebagai indikator sosioekonomi penting untuk penularan VL. Faktor-faktor populasi, seperti tingkat melek huruf, keunggulan ekonomi, pada kejadian VL pada skala yang berbeda telah digambarkan oleh peneliti dan ilmuwan lain. Dalam pembahasan sebelumnya di Asia Selatan, telah disarankan adanya hubungan yang kuat antara kala-azar dan kemiskinan.

Hasil analisis kami menunjukkan bahwa daerah dengan populasi pengangguran dan tingkat buta huruf yang lebih tinggi diukur sebagai daerah yang sangat berisiko terhadap penularan kala-azar. Hal ini mungkin disebabkan oleh individu yang tidak mengetahui gejala penyakit dan tidak menyadari teknik pencegahan penyakit. Di sisi lain, tingkat melek huruf perempuan sangat penting untuk memahami dampak VL karena perempuan baru berobat pada tahap akhir penyakit, yang terutama disebabkan oleh stigma sosial dan ekonomi.

Selain itu, populasi pengangguran yang lebih tinggi dianggap sebagai indikator status pendapatan wilayah geografis yang mencerminkan standar hidup yang lebih rendah dan meningkatkan risiko penularan. Rumah-rumah yang dibangun dengan buruk mudah diserang oleh lalat pasir dan menjadi tempat favorit untuk berkembang biak. Rata-rata, rumah tangga menghabiskan Rp1.340.000 untuk pengobatan anggota keluarga yang menderita kala-azar. Ini mewakili lebih dari 50% dari pengeluaran untuk anggota keluarga dalam setahun penuh. Kekurangan konsekuensi dari parameter sosioekonomi dapat mencerminkan homogenitas relatif wilayah dan fakta bahwa di tingkat desa, faktor-faktor yang lebih berdekatan menentukan risiko penularan penyakit. Kepadatan pertanian sangat penting dalam geografi terutama untuk alasan ekonomi.

Hal ini telah terbukti sebagai indeks yang berguna dari hubungan manusia-lahan terutama dalam konteks pertanian. Kepadatan pertanian yang lebih tinggi menunjukkan bahwa lahan pertanian yang tersedia (yaitu lahan pertanian) digunakan oleh lebih banyak orang dan mungkin mencapai batas produksinya lebih cepat daripada negara yang memiliki kepadatan pertanian lebih rendah. Sebaliknya, daerah dengan kepadatan pertanian rendah pada dasarnya memiliki prospek produksi pertanian yang lebih tinggi. Kami menunjukkan bahwa sebagian besar kasus VL terjadi pada wilayah dengan kepadatan pertanian yang lebih tinggi. Mengingat hubungan signifikan yang ditunjukkan antara kepadatan pertanian dan kejadian VL harus dipertimbangkan ketika memodelkan area risiko penularan kala-azar.

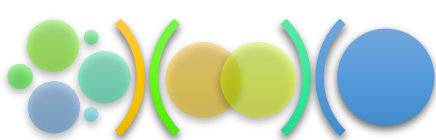
Selanjutnya, ini adalah rasio antara total populasi dan luas lahan yang ditanami, yang dinyatakan dalam satuan orang per km² lahan yang ditanami. Selain itu, kepadatan gizi dianggap sebagai indikasi standar hidup suatu wilayah. Kepadatan gizi yang tinggi mungkin disebabkan oleh hasil panen yang lebih besar dan beberapa tanaman dalam setahun. Pembahasan kami menunjukkan, nilai kepadatan gizi kurang dari 0,15 rentan terhadap



penularan kala-azar yang tinggi. Akhirnya, berdasarkan indikator proksi variabel demografis, model indeks berbasis raster komposit dikembangkan dengan kombinasi semua faktor ini (misalnya, kepadatan penduduk, ukuran keluarga, tingkat buta huruf, populasi pengangguran, kepadatan pertanian, dan kepadatan gizi), yang menunjukkan risiko penularan kala-azar yang 'tinggi' dan 'rendah'.

Meskipun demikian, terdapat beberapa keterbatasan dalam penelitian ini, seperti (i) variasi cakupan insiden VL selama bertahun-tahun mungkin menyebabkan pengakuan yang keliru terhadap area berisiko atau tidak berisiko VL; (ii) penelitian ini didasarkan pada data sekunder yang tersedia dalam catatan sensus dan dengan demikian analisis ini didasarkan pada deteksi kasus pasif yang dapat menghambat untuk mengesampingkan kemungkinan pelaporan kasus yang kurang. Namun, model kami tidak bertujuan untuk menilai prevalensi penyakit, tetapi hanya untuk mengenali pada tingkat mikro, dan area yang menunjukkan potensi risiko tinggi penularan VL dalam kaitannya dengan karakteristik populasi. Selain itu, model ini didasarkan pada basis data sekunder, dan tidak diperlukan survei lapangan konvensional untuk mengumpulkan karakteristik populasi. Demikian pula, teknik penginderaan jauh membantu memperkirakan tanaman dan lahan pertanian di area pembahasan, untuk menggambarkan kepadatan pertanian dan gizi.

Namun, peta risiko yang diperoleh melalui variabel proksi demografis dapat membantu mengendalikan kala-azar dengan menggambarkan area penularan kala-azar yang memungkinkan untuk memperkuat strategi pengendalian. Dapat juga disarankan bahwa tidak semua orang yang hidup dengan risiko penularan harus 'menular' karena faktor-faktor lain mungkin terlibat, seperti lingkungan sekitar, reservoir, dan faktor biologis lainnya. Meskipun demikian, risiko penularan kala-azar yang relatif tinggi dapat secara konsisten diharapkan dengan meningkatnya nilai 'risiko' seperti yang digambarkan oleh model ini. Informasi ini mungkin bermanfaat bagi praktisi kesehatan dan perencana kesehatan, yang dapat menggunakan peta ini serta informasi untuk menentukan dan merencanakan kegiatan pengawasan kala-azar serta untuk memerlukan program mitigasi untuk intervensi yang terfokus.



BAB 9

OPTIMASI LOKASI PLTA BERKELANJUTAN DI PNG

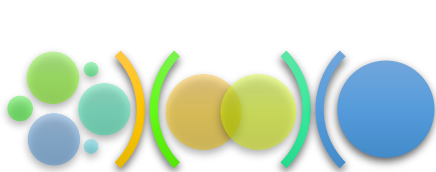
9.1 PENDAHULUAN

Sebagian besar negara yang memiliki pasokan listrik penuh (90–100%) mengalami peningkatan dramatis di sektor ekonomi dan kemakmurannya. Untuk meningkatkan kehidupan masyarakat di daerah pedesaan, akses listrik yang andal dan terjangkau merupakan kebutuhan dasar. Proses sistem perawatan kesehatan dan pendidikan termasuk pertumbuhan ekonomi akan sangat meningkat melalui ketersediaan dan keandalan listrik. Pengembangan dan penerapan elektrifikasi perlu dipertimbangkan secara cermat dalam hal peluang investasi dan keberlanjutan. Listrik atau energi berkelanjutan melibatkan pembangkitan, distribusi, dan pemanfaatan sumber daya energi yang bertanggung jawab untuk memenuhi kebutuhan saat ini sambil melindungi kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri.

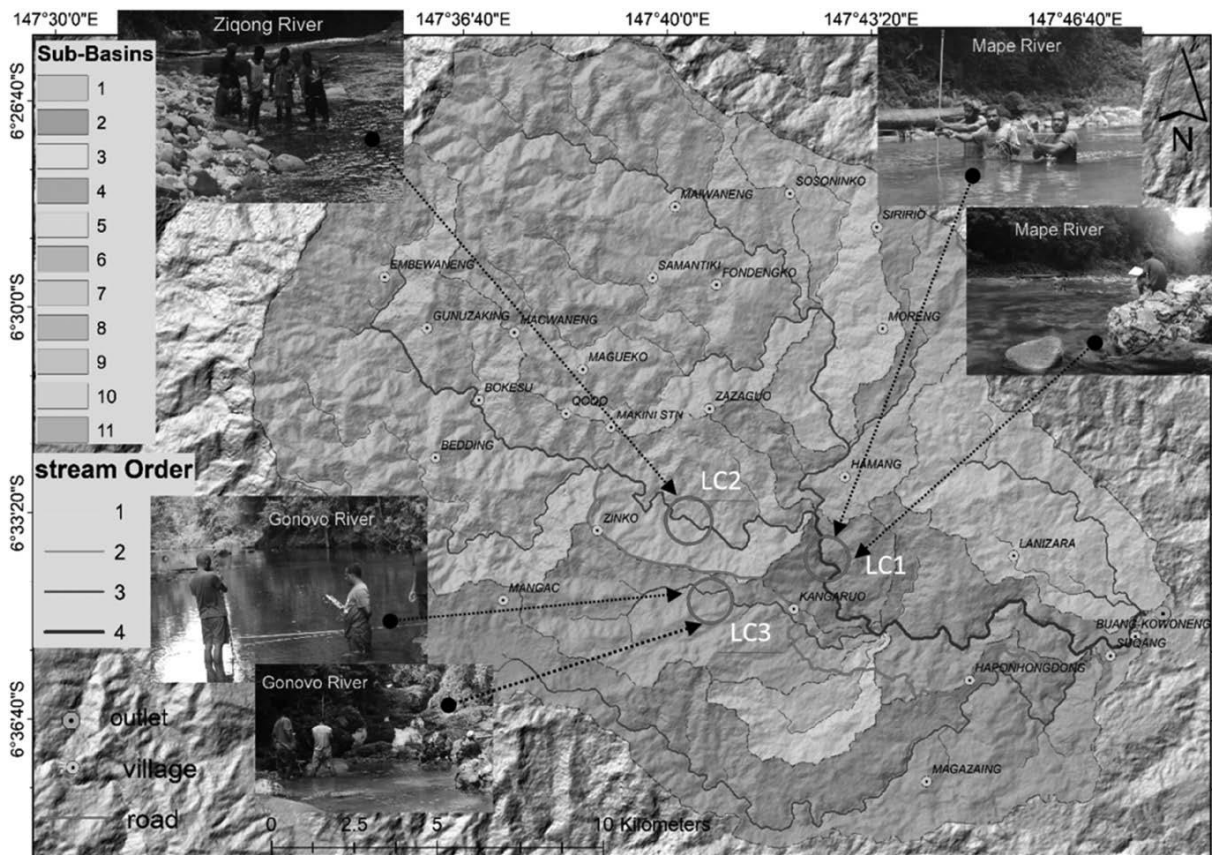
Produksi listrik berkelanjutan berputar di sekitar pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, air, dan panas bumi, yang secara alami diperbarui dan menghasilkan emisi gas rumah kaca minimal. Praktik-praktik tersebut memprioritaskan efisiensi energi, konservasi, dan pengurangan dampak lingkungan. Ini termasuk mempromosikan adopsi teknologi bersih, meningkatkan infrastruktur energi, dan menerapkan kebijakan yang mendukung penyebaran energi terbarukan.

Selain itu, inisiatif energi berkelanjutan bertujuan untuk mendorong kesetaraan sosial, pembangunan ekonomi, dan pengelolaan lingkungan, memastikan bahwa akses energi terjangkau, andal, dan adil bagi semua masyarakat. Dengan beralih ke sistem energi berkelanjutan, masyarakat dapat mengurangi ketergantungan pada sumber daya bahan bakar fosil yang terbatas, mengurangi perubahan iklim, dan membangun masa depan yang lebih tangguh dan sejahtera.

Oleh karena itu, menurut Nerini dan rekan-rekan. (2016), perencanaan menyeluruh untuk opsi elektrifikasi, lokasi lahan, konstruksi, dan distribusi sangat diperlukan. Perencanaan tersebut harus bertujuan untuk berkelanjutan dari sudut pandang sosial, ekonomi, dan lingkungan. Listrik merupakan sumber daya vital bagi penduduk, bisnis, dan industri di seluruh dunia. Saat ini, teknologi yang muncul dan canggih menawarkan alternatif untuk daya yang terhubung ke jaringan listrik, dengan mengeksplorasi sumber energi terbarukan lainnya. Adopsi energi terbarukan menawarkan beberapa keuntungan substansial, termasuk pengurangan konsumsi bahan bakar fosil dan pemanfaatan sumber daya yang mudah tersedia. Terdapat upaya bersama untuk memperluas akses listrik bahkan ke daerah-daerah terpencil, dengan fokus pada pemanfaatan sistem koneksi hibrida yang mengintegrasikan sumber energi terbarukan sambil tetap menggabungkan infrastruktur jaringan konvensional. Lebih lanjut, Papua Nugini (PNG) termasuk di antara negara-negara yang diklasifikasikan sebagai negara terbelakang dalam hal infrastruktur dan penyediaan layanan penting serta kebutuhan pokok.



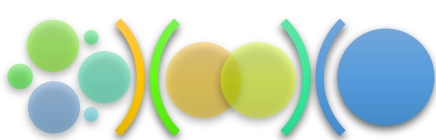
Telah ditekankan bahwa tantangan yang terkait dengan produksi dan pasokan listrik ke daerah terpencil di PNG bersifat multifaset. Kendala ini terutama disebabkan oleh jarak yang luas yang dibutuhkan untuk jalur transmisi listrik dan distribusi tiang, topografi yang rumit dan menantang yang mempersulit pemasangan infrastruktur tersebut, sehingga mengakibatkan biaya yang tinggi. Selain itu, masalah yang berkaitan dengan kepemilikan tanah, kepadatan penduduk yang rendah pada wilayah tersebut, tingkat pendidikan yang terbatas, kepadatan beban yang rendah, dan pendapatan yang tidak mencukupi semakin memperparah tantangan.



Gambar 9.1 Sub-cekungan dan lokasi pemantauan aliran di tempat.

Lebih lanjut, tidak adanya infrastruktur pasar yang kuat menghambat daya tarik investor swasta untuk produksi dan pasokan listrik. Pemerintah PNG kini telah menetapkan kebijakan elektrifikasi nasional (NEP) untuk mengendalikan dan menciptakan jalur serta solusi menuju pelaksanaan elektrifikasi di daerah pedesaan. Hal ini sejalan dengan mendukung dan menegakkan pilar-pilar nasional yang diajukan dan visi 2050 untuk memasok listrik dari energi terbarukan dan sumber energi berkelanjutan.

Cara yang paling memungkinkan untuk membangun elektrifikasi pedesaan adalah melalui pengembangan sistem hibrida seperti yang diilustrasikan pada Gambar 9.1. Cara lain yang memungkinkan untuk penyediaan elektrifikasi pedesaan adalah melalui subsidi biaya modal pemerintah nasional untuk mengurangi biaya instalasi generator dan distribusi jaringan, sehingga tarif yang terjangkau dapat dikenakan terutama untuk masyarakat pedesaan, sehingga mereka mampu membayar untuk memelihara pasokan dan distribusi.



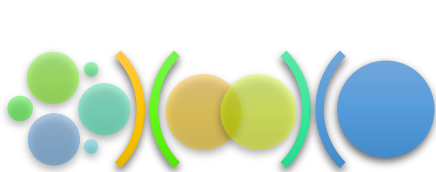
Untuk mengembangkan dan membangun program elektrifikasi pedesaan dalam lingkungan yang kompleks seperti PNG, pendekatan penelitian merupakan platform kunci. Melalui pendekatan tersebut, jalur yang bermakna dapat ditemukan. Hal ini dapat dilakukan untuk mencapai tujuan elektrifikasi 70% pada tahun 2030 dan 100% pada tahun 2050. Lebih banyak data dan informasi dapat dikumpulkan melalui hasil penelitian untuk membantu perencanaan dan pengambilan keputusan yang efisien untuk elektrifikasi pedesaan.

Melalui penelitian dan pengembangan, potensi energi terbarukan dapat diperkirakan termasuk lokasi yang layak untuk pembangunan dan pasokan, evaluasi efikasi generator, turbin hidro, panel surya, penyimpanan baterai, dan evaluasi energi alam yang tersedia. Sejalan dengan itu, faktor terpenting yang paling umum adalah populasi dan/atau status sosial ekonomi masyarakat umum. Melalui penelitian, perilaku penduduk, respons, distribusi penduduk, tingkat pendapatan rumah tangga, dan lain-lain., harus dievaluasi sepenuhnya untuk dipahami dan pada saat yang sama sebagai sarana kesadaran yang ditujukan kepada masyarakat umum.

Penelitian saat ini merupakan langkah signifikan, di antara berbagai inisiatif, dalam upaya mengejar strategi yang layak untuk elektrifikasi pedesaan. Penelitian ini terutama berfokus pada penilaian mendalam tentang potensi energi terbarukan. Mengambil daerah aliran sungai Mape di Distrik Finschhafen, PNG sebagai kasus. Dalam pembahasan ini, secara ekstensif dilakukan evaluasi terhadap status ekonomi dan kondisi masyarakat atau desa yang berada di daerah aliran sungai tersebut. Selain itu, penelitian ini juga mencakup investigasi menyeluruh terhadap perhitungan dan estimasi tingkat konsumsi listrik rumah tangga dan permintaan listrik di dalam masyarakat.

Lebih jauh lagi, tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi PLTA dan membangun korelasi dengan permintaan listrik, keterjangkauan, dan keberlanjutan penyediaan listrik bagi masyarakat tersebut. Untuk memperkirakan potensi PLTA, pembahasan ini terutama melibatkan perhitungan awal debit aliran dengan menggunakan alat penilaian tanah dan air (SWAT) Cüceloğlu dan rekan-rekan. (2021), dan Strauch dan rekan-rekan. (2012), untuk wilayah aliran sungai dan melakukan analisis topografi yang detail. Dalam hal tingkat konsumsi dan permintaan listrik, serta penilaian status ekonomi masyarakat, data survei rumah tangga berfungsi sebagai masukan utama untuk perhitungan.

Pembahasan kasus ini dilakukan pada wilayah DAS Mape di Distrik Finschhafen, PNG. Wilayah yang luas ini mencakup 432,10 kilometer persegi dan, berdasarkan data sensus 2011 dan survei lapangan baru-baru ini, dihuni oleh sekitar 7.621 jiwa lebih. Area pembahasan terutama terdiri dari medan pegunungan dengan jaringan sungai dan aliran air yang rumit. Aksesibilitas merupakan tantangan yang signifikan, dengan sebagian besar wilayah tidak memiliki koneksi jalan yang memadai. Transportasi, di banyak bagian wilayah ini, terutama bergantung pada perjalanan kaki. Masyarakat pada wilayah pembahasan tidak memiliki akses ke pasokan listrik terpusat. Sebaliknya, mereka bergantung pada panel surya milik pribadi dan generator pribadi untuk penerangan dan pengisian daya. Tanaman komersial utama yang dibudidayakan pada wilayah ini adalah kopi, kakao, dan vanili.



Budidaya padi juga memainkan peran ganda, berfungsi sebagai sumber pendapatan dan makanan pokok untuk konsumsi sehari-hari. Sekitar 80% dari wilayah ditutupi oleh lahan berhutan, sementara 60% didedikasikan untuk pertanian atau budidaya tanaman, menunjukkan komitmen yang disengaja terhadap praktik berkebun. Beberapa area memiliki vegetasi dengan kepadatan rendah. Sekitar 2% dari wilayah terdiri dari lahan terbangun atau lahan tandus, yang berfungsi sebagai zona untuk komunitas desa, jaringan jalan, dan infrastruktur lainnya.

9.2 ANALISIS HIDROLOGI & BEBAN

Untuk memperkirakan potensi daya di lokasi tertentu, berbagai lapisan data dikumpulkan, diproses, dan dianalisis. Data masukan utama untuk memperkirakan potensi daya meliputi debit aliran dalam meter kubik per detik (mG/s) dan tinggi muka air efektif dalam meter (m). Debit aliran di dalam wilayah tangkapan air diperkirakan menggunakan plugin QSWAT di QGIS 3.16.1 dan dikalibrasi serta divalidasi di platform SWAT-CUP. Para peneliti memasukkan data aliran observasi lapangan selama tiga tahun untuk kalibrasi dan validasi. Penelitian ini selanjutnya berfokus pada evaluasi kinerja model SWAT dalam simulasi aliran. Evaluasi kinerja model dilakukan di tiga lokasi dalam wilayah daerah aliran area sungai– Lokasi-1 (LC1), LC2, dan LC3 (lihat Gambar 9.1). Metode Efisiensi Nash-Sutcliffe (NSE) dan koefisien korelasi (R^2) digunakan untuk evaluasi ini. Persamaan di bawah ini menyoroti proses evaluasi kinerja model.

$$NSE = \frac{\sum_{i=0}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=0}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} R^2 \frac{[\sum_{i=0}^n (Q_m - \bar{Q}_m) (Q_m - \bar{Q}_s)]}{\sum_{i=0}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=0}^n (Q_m - \bar{Q}_s)^2}$$

di mana:

Q_m = Aliran Terukur/Teramati (cms).

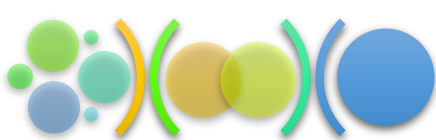
Q_s = Debit Simulasi (cms).

$\bar{Q}_m$ = Rata-rata Aliran Terukur/Teramati (cms).

$\bar{Q}_s$ = Rata-rata Debit Simulasi (cms).

Masukan data untuk estimasi aliran dalam QSWAT terutama terdiri dari data iklim, data topografi, dan data tanah, termasuk Penggunaan Lahan dan Tutupan Lahan (LULC). Data untuk estimasi tinggi muka air efektif (dalam meter) diperoleh dari Model Elevasi Digital (DEM) yang disediakan oleh Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Jenis data tambahan yang digunakan dalam penelitian ini termasuk data lapangan, seperti lokasi GPS rumah tangga, data sosial ekonomi rumah tangga, beban dan permintaan listrik rumah tangga, dan informasi tentang peralatan listrik. Data ini digunakan untuk mengevaluasi potensi ekonomi dan menilai pasokan-permintaan listrik.

Estimasi potensi tenaga air melibatkan penentuan debit dalam meter kubik per detik dan tinggi muka air efektif dalam meter. Estimasi debit dilakukan menggunakan model SWAT, sedangkan DEM digunakan untuk estimasi head efektif (He). Di dalam wilayah DAS, jaringan



sungai dan topografi dinilai untuk mengidentifikasi titik masuk, yang diasumsikan sebagai bendungan atau bendung, dan titik keluar, yang diasumsikan sebagai lokasi pembangkit listrik dengan saluran pembuangannya. Perbedaan elevasi antara titik-titik ini dianggap sebagai head efektif (H_e) untuk perhitungan daya, menggunakan persamaan: $\text{Daya (kW)} = p \cdot g \cdot Q \cdot H_e \cdot \eta$, di mana ' Q ' adalah debit dalam m^3/s , ' p ' dan ' g ' adalah densitas dan gravitasi air, H_e adalah head efektif, dan η adalah efisiensi turbin.

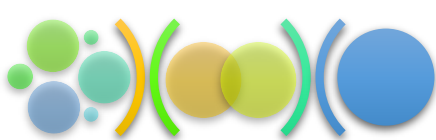
Selain itu, efisiensi turbin dipertimbangkan berdasarkan kurva efisiensi turbin di bawah berbagai kondisi debit total (Q) dan head efektif (H_e). Jenis turbin yang dipasang di bagian keluar atau pembangkit listrik sangat memengaruhi efisiensi turbin. Berbagai jenis turbin digunakan dalam sistem PLTA mini, kecil, dan besar, dan pemilihan turbin yang paling tepat sangat penting selama proses desain dan implementasi pengembangan PLTA. Turbin Turgo dan Pelton umumnya digunakan untuk ketinggian air yang tinggi melebihi 50 m dengan laju aliran kecil, sedangkan turbin Francis dan Crossflow lebih cocok untuk ketinggian air di bawah 50 m dengan berbagai laju aliran. Untuk ketinggian air kurang dari 10 m dengan laju aliran tinggi, turbin Kaplan digunakan.

Dalam mengidentifikasi lokasi yang layak untuk pembangunan PLTA, pertimbangan meliputi kendala hidrologi, variasi topografi, faktor lingkungan, pertimbangan ekonomi, dan kedekatan dengan infrastruktur. Pengamatan lapangan memainkan peran penting, dengan tim peneliti secara ekstensif menjelajahi berbagai lokasi pada wilayah DAS Mape (lihat Gambar 9.1). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengumpulkan data dan menentukan lokasi potensial yang sesuai untuk pembangunan bendungan PLTA kecil hingga besar. Alat-alat seperti GPS, formulir kuesioner, meteran aliran digital, dan drone UAV memfasilitasi pengumpulan data yang efisien. Gambar 9.1 secara visual menampilkan wilayah DAS Mape di Distrik Finschhafen, PNG, dan lokasi potensial di mana aliran air dipantau secara terus menerus.

Berdasarkan pengamatan lapangan dan dipandu oleh kriteria yang telah ditentukan, tim peneliti dengan cermat memilih lokasi potensial yang layak di setiap tempat. Proses pemilihan lokasi berlangsung dari hulu ke hilir, dengan memperhatikan kriteria seperti menjaga jarak yang baik antara saluran masuk dan keluar (200–300 m untuk bendungan PLTA besar), memastikan ketinggian efektif 20 m, nilai akumulasi aliran ambang batas 3.000 ke atas, dan kelayakan jaringan sungai utama. Selain itu, topografi, kemiringan, dan kedekatan dengan masyarakat dan infrastruktur (misalnya, jalan) di sekitarnya merupakan pertimbangan penting.

Tujuan utama lain dari penelitian ini adalah untuk menilai beban atau permintaan, termasuk kondisi sosial-ekonomi masyarakat pedesaan pada wilayah. Menurut Singh, metode yang paling akurat untuk menilai permintaan rumah tangga untuk elektrifikasi pedesaan melibatkan interaksi langsung dengan masyarakat. Singh menekankan penggunaan metode Participatory Rural Appraisal (PRA) untuk interaksi masyarakat tersebut. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas pengembangan dan penyediaan elektrifikasi, mendorong keberlanjutan, keandalan, kelayakan, keamanan, dan kesepakatan tentang kesediaan untuk membayar.

Selama penilaian permintaan, tim survei secara aktif terlibat dengan masyarakat melalui kunjungan lapangan ke setidaknya enam desa, menggunakan berbagai metode untuk



mengumpulkan berbagai jenis data, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 9.1 dan 9.2. Dengan menggunakan formulir kuesioner dan teknik wawancara dalam metode PRA, tim mengumpulkan data rumah tangga yang ekstensif, termasuk populasi, pendapatan bulanan, tanaman komersial yang dibudidayakan, sumber pendapatan, rencana UKM di masa depan, peralatan listrik yang diantisipasi, dan kesediaan untuk membayar listrik (dengan tarif 0,50 t–0,73 t kWh). Selain itu, tim survei menandai lokasi setiap rumah tangga dengan titik GPS.



(a) Community discussions for Improving cash crop growing and marketing



(b) Orthophoto and DEM Capture and generation—UAV flight



(c) Hydropower Potential sites investigation



(d) Household Survey



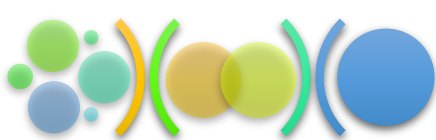
(e) Peak Flood Monitoring

Gambar 9.2 Tugas umum yang dilakukan selama kunjungan lapangan pada wilayah DAS Mape; (a) pertemuan dan diskusi masyarakat, (b) pengambilan data UAV, (c) investigasi lokasi potensial PLTA, (d) survei rumah tangga, dan (e) pemantauan puncak banjir.

Para peneliti melakukan pertemuan dan diskusi masyarakat di setiap desa untuk secara proaktif meningkatkan kesadaran tentang potensi manfaat, keberlanjutan, dan rencana tarif yang terkait dengan pasokan dan permintaan listrik. Sebagai pelengkap upaya ini, drone UAV digunakan untuk mengambil gambar udara dari semua desa yang dikunjungi. Data yang dikumpulkan menjalani penyempurnaan dan penilaian yang ketat untuk presentasi dan visualisasi yang efektif. Wawasan yang diperoleh melalui metode PRA sangat penting untuk perencanaan dan pengambilan keputusan di berbagai aspek elektrifikasi pedesaan, menekankan pendekatan yang berpusat pada komunitas yang diadopsi selama survei.

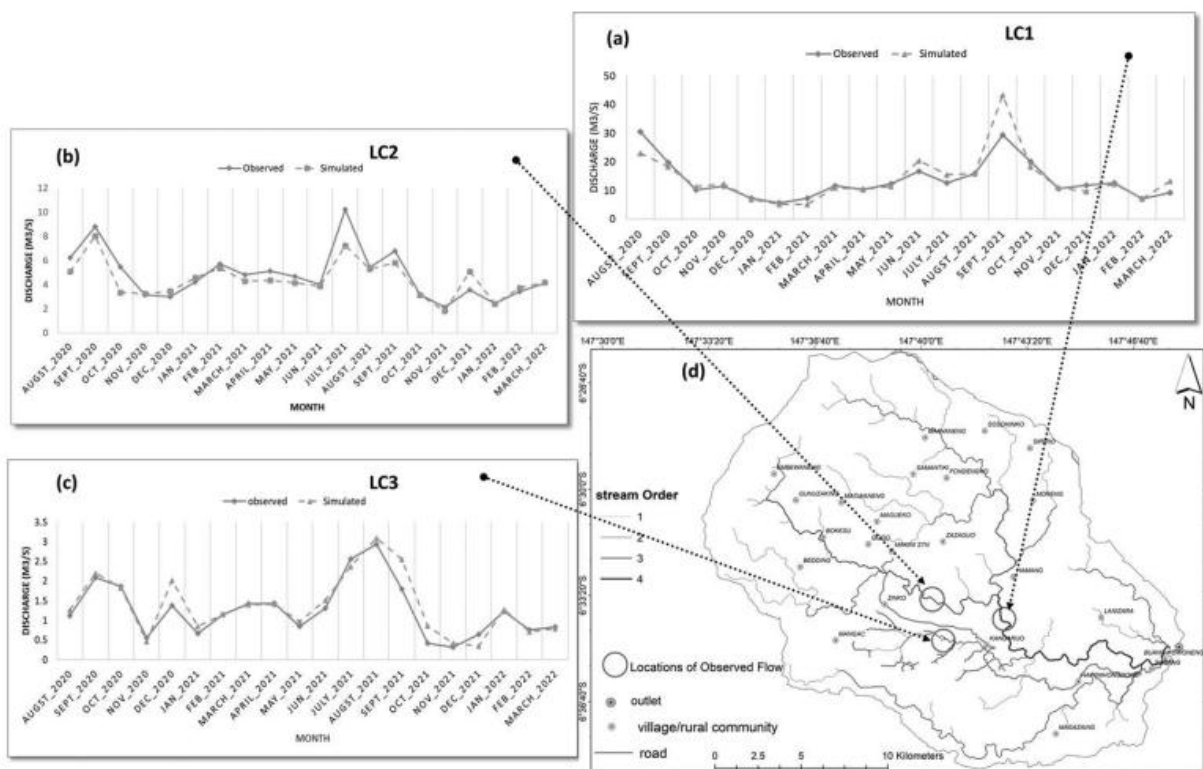
9.3 POTENSI HIDRO DAN BEBAN LISTRIK DESA

Wilayah tangkapan air yang lebih besar meningkatkan kemungkinan ketersediaan air yang cukup untuk pengembangan PLTA yang sukses dan berkelanjutan. Selama survei



lapangan, setiap aliran atau jaringan sungai yang dihasilkan diperiksa. Lihat Gambar 9.1, di mana pengamatan berdasarkan wawasan lapangan dan perhitungan perangkat lunak GIS menggunakan akumulasi aliran menunjukkan bahwa aliran orde 1 diklasifikasikan sebagai aliran kecil, sedangkan orde 2, 3, dan 4 diklasifikasikan sebagai sungai yang mengalir terus menerus dengan ukuran sedang hingga besar.

Hasil kalibrasi dan validasi ditemukan memuaskan. Oleh karena itu, data debit dimasukkan ke dalam perhitungan daya, pertama dalam kilowatt (kW) dan kemudian dikonversi ke megawatt (MW) untuk tujuan penyajian.

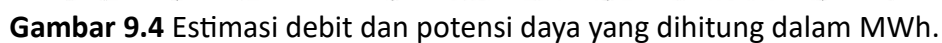


Gambar 9.3 Hasil kalibrasi dan validasi; (a) Lokasi 1 (LC 1), (b) Lokasi 2 (LC2), (c) Lokasi 3 (LC3), dan (d) peta lokasi aliran yang diamati.

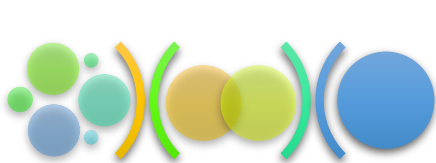
Debit yang dihitung, dikalibrasi, dan divalidasi yang digunakan untuk perhitungan daya ditunjukkan pada Gambar 9.3. Gambar 9.4 mengilustrasikan hasil validasi dan kalibrasi di setiap lokasi spesifik tempat aliran diamati.

Hasil analisis statistik kalibrasi NSE untuk aliran yang diamati dan disimulasikan adalah 0,75, 0,87, dan 0,77 untuk LC1, LC2, dan LC3, masing-masing. Selain itu, hasil analisis statistik validasi NSE untuk aliran yang diamati dan disimulasikan adalah 0,89, 0,78, dan 0,87 untuk LC1, LC2, dan LC3, masing-masing. Dalam kasus kalibrasi R2, hasil analisis statistik untuk aliran yang diamati dan disimulasikan adalah 0,94, 0,79, dan 0,85 untuk LC1, LC2, dan LC3. Selanjutnya, hasil analisis statistik validasi R2 untuk aliran yang diamati dan disimulasikan adalah 0,88, 0,83, dan 0,89 untuk LC1, LC2, dan LC3. Sebagian besar korelasi linier yang hampir sempurna diamati termasuk hasil NSE yang memuaskan. LC3 menunjukkan penyimpangan besar antara yang diamati dan yang disimulasikan dalam bulan Agustus dan November 2021 dan termasuk bulan

Untuk mengidentifikasi lokasi potensial dan menentukan tinggi muka air (He) di dalam daerah aliran sungai, kriteria digunakan sebagai panduan, dan tinggi muka air potensial dalam meter (m) dihitung. Setiap jaringan sungai/aliran dinilai secara individual dari hulu hingga hilir. Lihat Gambar 9.1 dan 9.2 untuk jaringan sungai atau aliran. Lokasi spesifik di dalam jaringan sungai/aliran dianggap sebagai lokasi potensial jika memenuhi kriteria. Lokasi hulu awal ditetapkan sebagai bendungan, dan lokasi hilir selanjutnya diakui sebagai saluran keluar atau pembangkit listrik. Saat bergerak ke hilir, lokasi tersebut dianggap sebagai titik akhir ketika titik akhir sungai atau aliran tercapai. Lihat Gambar 9.4.



Daya yang dihitung berkisar dari 0,0291 hingga 24,9862 MW, dengan aliran sungai yang lebih kecil menunjukkan daya keluaran yang lebih rendah dan sungai yang lebih besar menunjukkan daya keluaran yang lebih tinggi pada wilayah. Faktor utama yang memengaruhi daya keluaran dalam MW adalah debit aliran (Q) dan tinggi muka air efektif (He). Lokasi yang lebih dekat dengan desa dianggap lebih berharga, karena masyarakat dapat memperoleh manfaat dari daya yang dihasilkan. Pertimbangan ini mengarah pada tujuan lain dari penelitian



ini: memperkirakan tingkat konsumsi daya dan permintaan desa atau masyarakat pedesaan pada wilayah DAS.

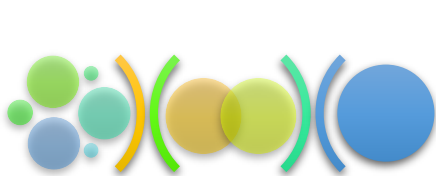
Dalam proses penilaian dan perhitungan untuk skema pembangkit listrik tenaga air aliran sungai, dua lokasi potensial atau layak muncul sebagai pilihan untuk bendungan pembangkit listrik tenaga air besar. Lokasi tersebut ditandai sebagai S1 dan S2, lihat Gambar 9.4. Pilihan ini dipengaruhi oleh kemiringan yang cukup curam antara lokasi-lokasi yang berdekatan ini. Output daya berkisar antara 8 hingga 23 MW. Sebagian besar lokasi lain dikategorikan sebagai skema pembangkit listrik tenaga air aliran sungai.

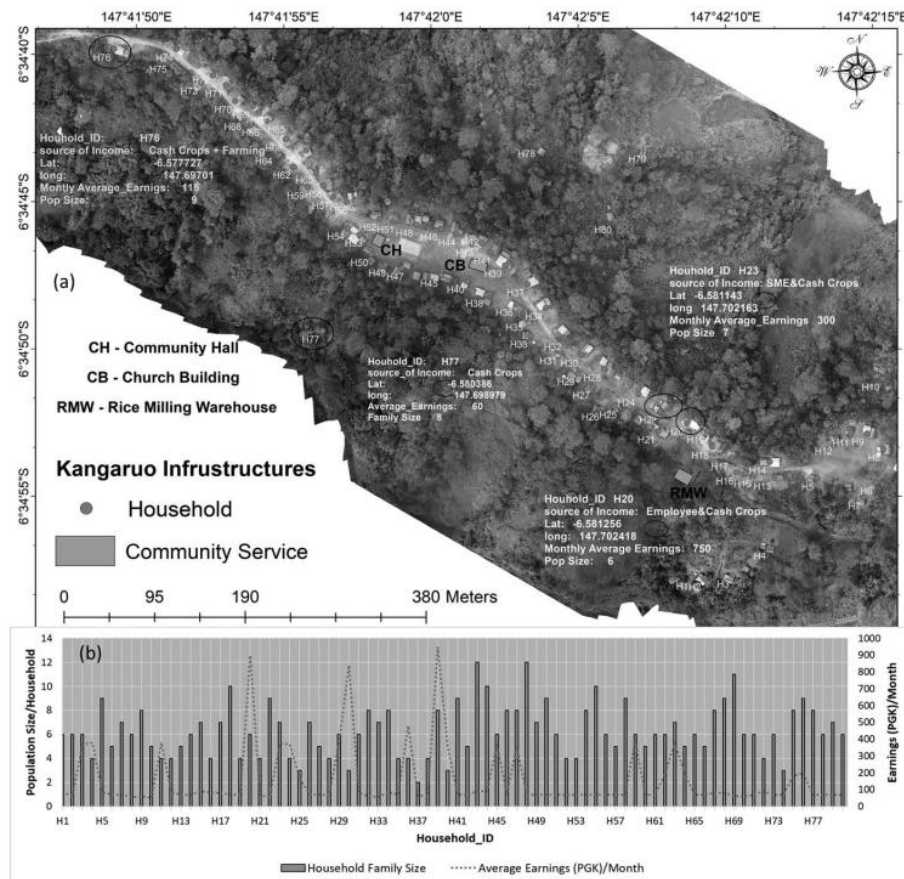
Sosio-Ekonomi Dan Penawaran-Permintaan Listrik

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kelayakan dan keterjangkauan penggunaan sistem tenaga air untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat setempat. ini bertujuan untuk menentukan kebutuhan listrik masyarakat sekitar, dengan empat masyarakat dipilih sebagai sampel representatif untuk analisis terperinci. Gambar 9.5 mengilustrasikan masyarakat Kangaruo, yang terdiri dari 84 rumah tangga beserta infrastruktur publiknya. Masyarakat lain diperiksa menggunakan metode yang sama. Pembahasan ini melibatkan evaluasi faktor-faktor kunci seperti pendapatan rumah tangga, ukuran populasi, peralatan dan beban listrik, sumber pendapatan, dan permintaan.

Lebih lanjut, pembahasan ini berupaya untuk menilai minat setiap rumah tangga dalam menghubungkan listrik ke rumah mereka dan untuk mengevaluasi apakah rumah tangga memiliki sumber daya yang cukup untuk mempertahankan dan mendukung pasokan listrik jangka panjang. Sebanyak 379 rumah tangga di empat masyarakat pedesaan, termasuk infrastruktur publik yang ada, diselidiki. Sebagian besar jenis perumahan di masyarakat merupakan campuran bahan bangunan tradisional dan bahan bangunan modern dengan atap logam. Untuk komunitas Kangaruo,

Gambar 9.5a dan b mengilustrasikan distribusi spasial rumah tangga, ukuran rumah tangga rata-rata, dan pendapatan bulanan, sementara Tabel 9.1 memberikan rincian tentang jumlah peralatan yang digunakan per rumah tangga. Ditemukan bahwa 62 rumah tangga menghasilkan pendapatan melalui penjualan tanaman komersial, 7 rumah tangga menggabungkan pekerjaan dengan budidaya tanaman komersial, dan 10 rumah tangga menjalankan usaha kecil, termasuk budidaya tanaman. metode yang sama diterapkan pada tiga komunitas lainnya.



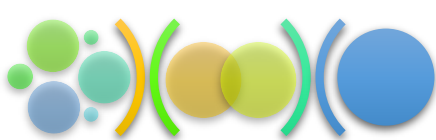


Gambar 9.5 Data rumah tangga komunitas Kangaroo: (a) lokasi rumah tangga dan (b) ukuran populasi dan pendapatan per bulan.

Tabel 9.1 Peringkat Rata-Rata Peralatan Listrik untuk Komunitas Kangaroo

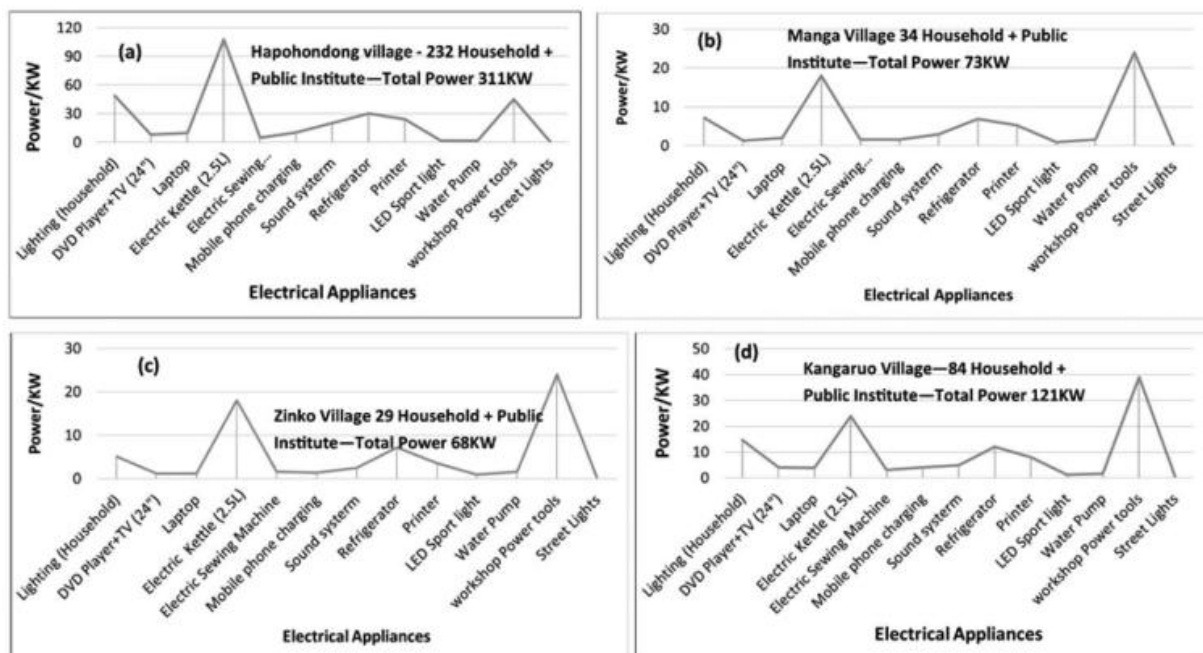
Peralatan Listrik	Jumlah Rumah/ Institusi	Alat per Rumah/ Institusi	Tarif Alat (Watt) Rata-rata
Pencahayaan (Lighting)	84	4	35
Pemutar DVD + TV (24 inci)	50	1	53
Laptop	30	1	65
Teko Listrik (2,5 L)	20	1	1.200
Mesin jahit listrik	18	1	100
Pengisian daya ponsel	82	2	25
Sistem suara (Sound system)	65	1	100
Kulkas	15	1	300
Printer	2	1	200
Lampu sorot LED	4	3	100
Alat bengkel bertenaga listrik	15	1	1.500
Pompa air	1	1	1.000
Lampu jalan	1	30	20

Penilaian permintaan tidak memperhitungkan variasi musiman. Meskipun tidak ada rumah tangga pada wilayah yang memiliki akses ke listrik, beberapa bergantung pada generator dan panel surya milik pribadi untuk penerangan dan pengisian daya. Pembahasan ini melakukan evaluasi menyeluruh terhadap permintaan beban energi untuk komunitas



pedesaan dengan secara cermat mengembangkan dan menilai berbagai peralatan listrik umum, seperti yang tercantum dalam Tabel 9.1. Peralatan ini dipilih berdasarkan penelitian oleh Singh dan Rushman dan rekan-rekan. (2019), komunikasi lapangan yang ekstensif dengan komunitas lokal, dan wawasan yang diperoleh dari proyek-proyek sebelumnya.

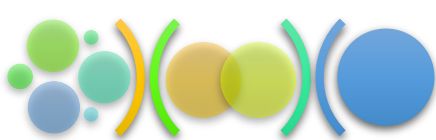
Di antara perangkat atau peralatan listrik penting dan umum yang banyak digunakan di setiap rumah tangga dan lembaga publik tertentu adalah televisi, sistem suara, sistem penerangan, dan pengisi daya telepon. Peralatan ini dipilih berdasarkan tanggapan masyarakat. Responden yang memiliki rencana untuk Usaha Kecil dan Menengah (UKM) menyebutkan peralatan tambahan seperti yang tercantum dalam Tabel 9.1. Setelah memahami penggunaan peralatan tersebut, kebutuhan daya rumah tangga dihitung. Kebutuhan daya yang dihitung untuk empat desa diilustrasikan pada Gambar 9.6. Komunitas Hopohondong dengan 232 rumah tangga, total kebutuhan dayanya mencapai 311 kW. 121, 73, dan 68 kW untuk komunitas Kangaruo, Manga, dan Zinko. Gambar 9.4 mengilustrasikan lokasi potensi daya yang dihitung dan juga mengilustrasikan kedekatan setiap komunitas dengan lokasi potensial.



Gambar 9.6 Kebutuhan daya komunitas pedesaan: (a) Komunitas Hapohondong, (b) Komunitas Manga, (c) Komunitas Zinko, dan (d) Komunitas Kangaruo.

9.4 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian saat ini bertujuan untuk menciptakan jalur menuju pengembangan elektrifikasi pedesaan berkelanjutan dengan solusi energi bersih. Sebagian besar aliran dan sungai alami belum dieksplorasi potensi tenaga airnya. Lebih jauh lagi, sumber daya energi lain seperti tenaga surya, angin, dan lain-lain, juga belum dieksplorasi di berbagai lokasi. Melakukan penelitian untuk mengevaluasi dan memahami sumber daya energi tersebut dan potensinya akan memberikan dampak positif yang lebih besar terhadap pengembangan

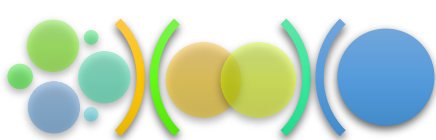


elektrifikasi di seluruh negeri PNG di masa mendatang. Isu dampak perubahan iklim semakin meningkat di era modern. Menciptakan solusi untuk mengurangi dampak tersebut sangat dibutuhkan. Pembahasan yang sedang berlangsung mencakup dua fase. Fase utama melibatkan perhitungan dan identifikasi lokasi potensial tenaga air, diikuti oleh fase kedua, yang berfokus pada evaluasi permintaan energi rumah tangga. Baik teknik survei pustaka maupun survei lapangan dilakukan untuk menyelesaikan tugas ini.

Melalui proses analisis yang cermat, 29 lokasi potensial yang paling layak dipilih dengan saksama, dan potensi daya dihitung. Daya yang dihitung menunjukkan kisaran dari 29 kW hingga 25.000 kW yang mengesankan. Setelah identifikasi lokasi potensial PLTA ini, perhitungan diperluas secara mulus untuk menilai permintaan beban energi yang rumit dari komunitas pada wilayah. Sebanyak 379 rumah tangga dinilai memiliki total permintaan daya sebesar 573 kW. Pendekatan yang sama diadopsi untuk komunitas lain pada wilayah untuk kebutuhan daya mereka.

Implementasi aturan tarif yang diusulkan berfungsi sebagai mekanisme strategis untuk mengelola penggunaan daya secara proaktif. Lebih lanjut, langkah-langkah pengendalian tambahan diantisipasi untuk diterapkan, termasuk pengendalian peralatan atau penetapan peraturan yang mengatur penggunaan peralatan rumah tangga untuk memfasilitasi pendekatan pembagian beban yang seimbang. Langkah-langkah proaktif ini diharapkan memainkan peran penting dalam mengurangi stres terkait masalah pembayaran.

Metode penelitian menggunakan strategi komprehensif untuk meningkatkan kesadaran di antara individu di komunitas pedesaan tentang keuntungan menghubungkan rumah mereka ke listrik. Pendekatan ini berfokus pada penjelasan tentang keberlanjutan, keterjangkauan, dan rencana tarif (jumlah pembayaran) yang terkait dengan memiliki sambungan listrik. Temuan ini berkontribusi pada wacana yang lebih luas tentang pengembangan energi terbarukan di daerah terpencil, menyoroti pentingnya solusi yang disesuaikan yang mengintegrasikan keahlian teknis dengan pendekatan berbasis komunitas. Melalui optimasi lokasi strategis dan pengambilan keputusan inklusif, transisi menuju energi berkelanjutan di PNG dapat dipercepat, mendorong pembangunan ekonomi dan pengelolaan lingkungan di PNG dan sekitarnya.



BAB 10

IOT DAN SENSOR PINTAR UNTUK KESEHATAN STRUKTUR KOMPOSIT

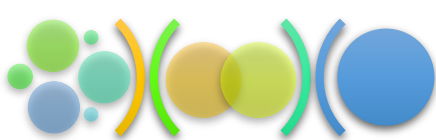
10.1 PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi dan rekayasa modern mencakup Internet of Things (IoT) yang sangat membutuhkan pemantauan kesehatan struktural (SHM) struktur komposit menggunakan sensor pintar. Mari kita bedah setiap ide untuk memahami bagaimana mereka bekerja bersama. Istilah "IoT" menggambarkan jaringan objek fisik, termasuk mobil, peralatan, dan hal-hal lain, yang ditanami sensor, perangkat lunak, elektronik, dan konektivitas untuk memungkinkan mereka berkomunikasi dan berbagi data. IoT penting untuk SHM karena memungkinkan berbagai bagian sistem pemantauan untuk berkomunikasi satu sama lain tanpa gangguan. Elemen penting IoT dalam SHM terdiri dari perangkat (sensor atau aktuator), konektivitas (nirkabel atau berkabel), dan platform pemrosesan data (cloud atau server lokal).

Material hasil rekayasa yang terdiri dari dua atau lebih fase material dikenal sebagai material komposit. Karena rasio kekuatan terhadap berat yang sangat baik dan ketahanan terhadap korosi, material ini sering digunakan dalam industri maritim, otomotif, kedirgantaraan, dan konstruksi. Struktur komposit adalah struktur yang terbuat dari material komposit. Tujuan SHM adalah untuk memantau kondisi struktur guna mengidentifikasi kerusakan, mengevaluasi tingkat kerusakan nya, dan memproyeksikan berapa lama struktur tersebut akan bertahan. Teknik SHM konvensional seringkali hanya memberikan gambaran sporadis tentang kesehatan struktural dan dapat mahal serta memakan waktu. Sensor pintar yang terintegrasi ke dalam struktur komposit memantau variabel, termasuk kadar air, suhu, getaran, dan regangan, dan memberikan data tentang kinerja struktural secara real-time sehingga kerusakan atau anomali dapat ditemukan sejak dini.

Di seluruh struktur, sejumlah sensor bekerja sama untuk membangun jaringan yang mengirimkan data secara nirkabel ke platform berbasis cloud atau unit pemrosesan pusat. Untuk transfer data yang efektif dan aman, protokol seperti MQTT, CoAP, atau HTTP digunakan. Komputasi awan digunakan oleh platform IoT untuk menyimpan, menganalisis, dan memvisualisasikan data, untuk mengidentifikasi tren, mengantisipasi kemungkinan kerusakan, dan meningkatkan rencana pemeliharaan; algoritma memeriksa data sensor.

Pemeriksaan keausan dan regangan pada badan pesawat dan sayap pesawat terbang atau mengawasi retakan, deformasi, atau cacat struktural pada bangunan, jembatan, dan infrastruktur lainnya dimungkinkan dengan sistem yang kohesif ini. Penggunaan sensor pintar dan SHM yang didukung IoT untuk memantau dan mengontrol kesehatan struktur komposit merupakan perubahan paradigma. Industri dapat meningkatkan keselamatan, memperpanjang umur struktur, dan memaksimalkan upaya pemeliharaan dengan memanfaatkan data waktu nyata dan analitik yang canggih. Teknologi IoT berpotensi untuk secara signifikan meningkatkan kekokohan, efisiensi, dan keandalan struktur komposit di berbagai industri sekaligus menetapkan tolok ukur baru untuk SHM dan prosedur pemeliharaan.



Dalam hal IoT dan SHM struktur komposit, sensor pintar sangat penting. Berikut beberapa fungsi penting yang mereka mainkan: akuisisi data (DAQ) dan penginderaan, pemantauan waktu nyata, deteksi kerusakan dini, penilaian kondisi, integrasi dengan platform IoT, efektivitas biaya, kustomisasi, dan skalabilitas. Dalam konteks ini, peran IoT dalam SHM (Structural Health Monitoring) struktur komposit dengan sensor pintar akan dibahas di bagian selanjutnya.

10.2 AKUISISI DATA DAN PENGINDERAAN

Berbagai perangkat penginderaan, termasuk pengukur regangan, sensor suhu, akselerometer, dan lainnya, terintegrasi ke dalam sensor pintar, memungkinkan mereka untuk secara langsung mendeteksi karakteristik fisik yang vital bagi stabilitas struktur komposit. Mereka terus mengumpulkan informasi tentang faktor lingkungan dan reaksi struktural. Prosedur keseluruhan dapat diuraikan dalam tiga aspek utama, yaitu **akuisisi data, penginderaan, integrasi, dan aplikasi**.

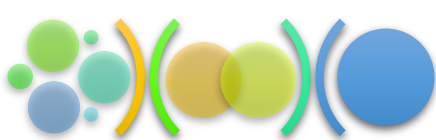
Gambaran terintegrasi dari keseluruhan proses ditunjukkan pada Gambar 10.1. Akuisisi data (DAQ) dan penginderaan adalah dua operasi utama dalam topik ini. Saat ini, tahap operasional lain yang penting adalah integrasi dan aplikasi, yang menunjukkan unit yang kohesif dengan banyak sensor dan instrumen di mana data dikumpulkan, diproses, dan ditransmisikan untuk aplikasi. Dengan cara ini, integrasi dan aplikasi termasuk dalam DAQ dan penginderaan. Hal ini secara singkat disajikan di bawah ini untuk penjelasan lebih lanjut tentang aspek ini.



Gambar 10.1 Akuisisi data, penginderaan, integrasi, dan aplikasi.

Akuisisi Data

Pengambilan data (DAQ) adalah proses pengambilan sampel sinyal yang mewakili situasi fisik sebagaimana adanya di dunia nyata dan mengubahnya menjadi nilai digital yang dapat diolah oleh komputer. Komponen tipikal yang terlibat dalam proses ini biasanya terdiri dari sensor (digunakan untuk mendeteksi besaran fisik), sistem DAQ yang mengawasi proses pengambilan sampel dan digitalisasi, pengkondisian sinyal (digunakan untuk mengubah sinyal analog menjadi bentuk digital), dan konverter analog-ke-digital (ADC).



Penginderaan

Penginderaan adalah penggunaan sensor untuk mengidentifikasi karakteristik fisik suatu lingkungan atau objek. Banyak variabel, termasuk cahaya, gerakan, tekanan, suhu, dan banyak lagi, dapat diukur menggunakan sensor. Berbagai jenis sensor digunakan untuk mencapai berbagai tujuan tersebut. Lebih spesifiknya, berikut adalah jenis-jenis sensor beserta aplikasinya.

Jenis Sensor

Tergantung pada apa yang ingin dideteksi, terdapat banyak jenis sensor, termasuk sensor jarak, tekanan, suhu, dan gerak. Berbagai jenis sensor merupakan komponen kunci dalam sistem operasional penginderaan yang akan dijelaskan lebih detail sebagai berikut.

1. Sensor Gerak

Sebagai komponen penting dari SHM (Structural Health Monitoring), sensor gerak mengidentifikasi dan mengukur getaran dan gerakan pada struktur seperti bangunan, jembatan, bendungan, dan infrastruktur lainnya. Sensor gerak digunakan dalam SHM dengan cara berikut:

a. Memantau Integritas Struktural

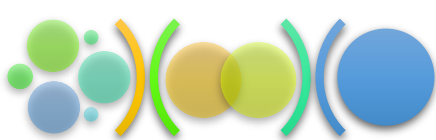
Perilaku dinamis struktur terus dipantau oleh sensor gerak. Sensor ini mendeteksi getaran dari sumber internal seperti kerusakan atau deformasi struktural serta sumber eksternal seperti angin, lalu lintas, atau aktivitas seismik.

b. Jenis Sensor Gerak yang Digunakan

- **Akselerometer** Akselerometer adalah sensor multi-sumbu yang mengukur percepatan. Sensor ini sering digunakan untuk memantau getaran dan reaksi dinamis suatu struktur.
- **Pengukur Regangan** Meskipun penggunaan utamanya adalah untuk mengukur regangan, pengukur regangan juga dapat digunakan untuk mendeteksi gerakan dan getaran pada struktur secara tidak langsung.
- **Inklinometer** Penggunaan inklinometer untuk mengukur kemiringan atau inklinasi bagian struktural dapat mengungkapkan penurunan atau deformasi pada struktur.
- **Vibrometer Doppler Laser Sensor non-kontak** yang akurat memantau getaran permukaan; sangat baik untuk investigasi dinamis mendalam pada lokasi struktural tertentu.
- **Penggunaan Sensor Gerak untuk Deteksi Kerusakan SHM:** Sensor gerak dapat membantu mendeteksi kerusakan atau penurunan struktural dengan melacak variasi pola getaran dari waktu ke waktu.

Pemantauan Kesehatan: Pengamatan berkelanjutan memungkinkan untuk mengevaluasi kesehatan struktural secara real-time dan menemukan kemungkinan masalah sebelum menjadi tidak terkendali.

Penilaian Kinerja: Informasi dari sensor digunakan untuk menilai seberapa baik sistem struktural bekerja di bawah berbagai beban dan kondisi lingkungan.



Menganalisis dan Menginterpretasikan Data

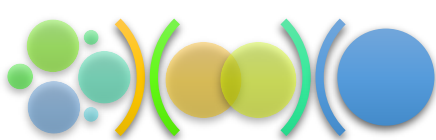
- *Analisis Frekuensi*: Transformasi Fourier dan metode analisis spektrum lainnya sering digunakan untuk memeriksa data sensor gerak guna menentukan frekuensi dan mode getaran yang menonjol.
- *Pengenalan Pola*: Penyimpangan dari pola getaran normal atau spektrum frekuensi dapat menunjukkan kerusakan atau ketidakberaturan struktural.
- *Analisis Komparatif*: Dengan membandingkan kondisi saat ini dengan data historis dan pengukuran dasar, seseorang dapat mengevaluasi bagaimana kesehatan struktural telah berubah dari waktu ke waktu.
- *Konektivitas dengan Integrasi Sistem SHM*: Sistem SHM yang lebih besar dengan perangkat pengumpulan data, perangkat lunak pemrosesan, dan modul komunikasi sering kali menggabungkan sensor gerak.

Sistem tersebut dapat dihubungkan ke jaringan untuk memberi insinyur struktur akses ke data waktu nyata, memfasilitasi penjadwalan pemeliharaan dan pengambilan keputusan yang cepat. Secara keseluruhan, sensor gerak menawarkan informasi yang mendalam tentang perilaku dinamis dan kesehatan struktural bangunan, yang membantu memastikan pengelolaan aset infrastruktur yang lebih aman dan efektif dari waktu ke waktu.

2. Sensor Jarak Dekat

Untuk memantau kondisi dan integritas benda atau komponen struktural, sensor jarak dekat sangat penting untuk SHM (Structural Health Monitoring). Sensor ini mendeteksi dan mengukur kedekatan suatu objek atau komponen. Aplikasi umum sensor jarak dekat dalam SHM adalah sebagai berikut.

- Deteksi Pergeseran*. Sensor jarak dekat mampu mendeteksi gerakan atau pergeseran kecil di dalam struktur. Sensor ini digunakan untuk mengukur jarak antara komponen atau antara bagian struktural dan lingkungannya. Informasi ini berguna untuk mengevaluasi stabilitas struktur dan mengidentifikasi gerakan tidak biasa yang mungkin menunjukkan kerusakan struktural di masa mendatang.
- Pemantauan Getaran*. Getaran struktur dapat diamati menggunakan sensor jarak. Variasi pola getaran dapat menjadi tanda keausan, kerusakan, atau modifikasi pada dinamika struktural. Insinyur dapat mengevaluasi kondisi struktur dan mengidentifikasi anomali apa pun yang mungkin memerlukan penelitian lebih lanjut dengan terus memantau getaran.
- Penyelarasan dan Pemosisian*. Sensor jarak kadang-kadang digunakan untuk memastikan bahwa komponen struktural diposisikan atau disejajarkan dengan benar. Untuk mencegah masalah struktural selama tahap konstruksi atau pemeliharaan, sensor ini sangat penting untuk mendeteksi penyimpangan dari posisi atau penyelarasan yang diinginkan.
- Integritas Material*. Sensor jarak yang mengandalkan arus eddy atau induksi elektromagnetik, misalnya, mampu menentukan integritas material. Sensor ini



mampu mengidentifikasi perubahan karakteristik material atau keberadaan cacat seperti korosi atau retakan di bawah permukaan bangunan.

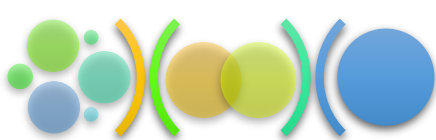
- e. *Pemantauan Real-Time Data* tentang kondisi struktur disediakan secara real-time oleh sensor jarak. Melalui pengamatan berkelanjutan, para insinyur dapat melihat pola dan tren yang mungkin menunjukkan degradasi atau kerusakan bertahap dari waktu ke waktu. Hal ini memungkinkan pemeliharaan dan intervensi yang cepat untuk mencegah kegagalan yang fatal.
- f. *Integrasi dengan IoT dan Analisis*. Data Untuk memfasilitasi pemantauan jarak jauh dan pemeliharaan prediktif, sensor jarak dapat dikombinasikan dengan platform IoT dan alat analisis data. Data sensor dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja struktural secara keseluruhan, mengoptimalkan jadwal pemeliharaan, dan memprediksi kegagalan di masa mendatang.
- g. *Penggunaan pada Berbagai Struktur*. Karena kemampuan adaptasinya, sensor jarak dapat digunakan pada berbagai struktur, seperti pipa, bangunan, jembatan, bendungan, dan fasilitas industri. Sensor ini meningkatkan umur pakai dan keamanan dengan menawarkan informasi yang mendalam tentang kondisi dan fungsi infrastruktur vital.

Singkatnya, sensor jarak merupakan instrumen penting untuk melacak kesehatan struktural bangunan. Sensor ini memberikan informasi penting yang dapat digunakan oleh para insinyur untuk mengevaluasi integritas struktural bangunan, mendeteksi kerusakan atau penurunan kualitas sejak dini, dan merencanakan jadwal pemeliharaan yang akan menjaga kinerja dan keamanan infrastruktur dalam jangka panjang.

3. Sensor Suhu

Sensor suhu sangat penting untuk SHM karena memberikan informasi yang berguna untuk mengevaluasi kekuatan struktural bendungan, bangunan, jembatan, dan infrastruktur lainnya. Berikut adalah penggunaan sensor suhu dalam SHM.

- a. *Mengukur Ekspansi dan Kontraksi*. Termal Material mengembang dan menyusut sebagai respons terhadap variasi suhu. Pengamatan berkelanjutan terhadap perubahan ini dapat mengidentifikasi regangan internal dalam struktur yang pada akhirnya dapat menyebabkan deformasi atau kegagalan.
- b. *Menemukan Titik Panas*. Variasi suhu lokal dapat menunjukkan kemungkinan masalah, seperti panas berlebih akibat gesekan mekanis, masalah listrik, atau aliran udara yang tidak mencukupi.
- c. *Memantau Kondisi Lingkungan*. Daya tahan jangka panjang suatu struktur dapat dipengaruhi oleh banyak kondisi lingkungan, termasuk sinar matahari, angin, dan kelembapan, yang dapat dievaluasi melalui penggunaan data suhu.
- d. *Kalibrasi Model Struktur* Pengukuran suhu diperlukan untuk mengkalibrasi simulasi dan model struktural. Pengukuran ini memberikan bukti empiris untuk mendukung prediksi teoritis mengenai perilaku material pada berbagai suhu.

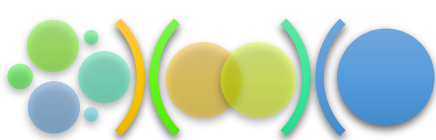


- e. *Peringatan Dini Masalah Struktural* Perubahan suhu yang tidak terduga atau tiba-tiba terkadang dapat menjadi tanda masalah struktural seperti korosi, masuknya air, atau kegagalan isolasi.
 - f. *Integrasi dengan Sensor Lain* Untuk memberikan pengetahuan yang lebih menyeluruh tentang perilaku struktural, data suhu sering melengkapi data dari sensor lain (seperti pengukur regangan, akselerometer, atau sensor kelembaban).
 - g. *Sensor Suhu Jarak Jauh* Dengan memungkinkan pemantauan berkelanjutan tanpa perlu campur tangan manusia, sensor suhu jarak jauh memfasilitasi deteksi anomali dini dan intervensi pemeliharaan yang cepat.
 - h. *Evaluasi Kinerja Jangka Panjang* Dengan memantau tren suhu selama beberapa bulan atau tahun, para insinyur dapat mengevaluasi kesehatan dan kinerja jangka panjang struktur dan menjadwalkan pemeliharaan atau peningkatan yang sesuai.
- Kesimpulannya, sensor suhu dalam SHM memainkan peran penting dalam efektivitas biaya, keselamatan, dan keandalan infrastruktur secara keseluruhan dengan menyediakan informasi penting untuk manajemen risiko dan pemeliharaan proaktif.

4. Sensor Tekanan

Sensor tekanan merupakan bagian penting dari sistem SHM karena memberikan informasi berguna yang dapat digunakan oleh para insinyur untuk mengevaluasi fungsi dan kondisi berbagai jenis struktur. Berikut adalah beberapa fungsi dan penggunaan penting sensor tekanan dalam SHM.

- a. *Memantau Beban Struktural* Sensor tekanan digunakan untuk memantau beban struktural. Sensor ini menangkap gaya yang bekerja pada suatu struktur, seperti angin, tekanan fluida (seperti air di bendungan), atau tekanan tanah (seperti dalam pemantauan pondasi). Data ini dapat menunjukkan kemungkinan kelebihan beban atau cacat struktural dan membantu para insinyur dalam memahami bagaimana beban eksternal memengaruhi struktur.
- b. *Mengidentifikasi Deformasi Struktural* Pergeseran tekanan dapat menjadi tanda pergerakan atau deformasi struktural, seperti konsolidasi tanah, penurunan pondasi, atau kemiringan struktur. Sensor tekanan membantu dalam deteksi dini perubahan ini, memungkinkan penanganan segera untuk menghentikan kerusakan lebih lanjut.
- c. *Memantau Level dan Aliran Fluida* Sensor tekanan memantau tekanan hidrolik, level fluida, dan laju aliran pada struktur seperti bendungan, jembatan, dan pipa. Informasi ini sangat penting dalam mengevaluasi keselamatan operasional dan integritas struktural infrastruktur tersebut.
- d. *Mendeteksi Kebocoran* Sensor tekanan mampu mengidentifikasi penurunan tekanan yang tidak normal, yang dapat menunjukkan adanya kerusakan atau kebocoran pada sistem tertutup seperti tangki penyimpanan, pipa, atau wadah bertekanan. Deteksi dini membantu menghindari gangguan operasional dan kerusakan lingkungan.



- e. Mengevaluasi Kinerja Struktural di Bawah Beban Dinamis Perubahan tekanan dinamis yang disebabkan oleh getaran industri, lalu lintas, atau aktivitas seismik diukur oleh sensor tekanan. Informasi ini berguna untuk menilai ketahanan struktur terhadap perubahan beban dan untuk optimasi desain yang meningkatkan kinerja.
- f. Integrasi dengan Model Struktural Untuk memverifikasi asumsi beban, meningkatkan model prediktif, dan mengoptimalkan desain struktural untuk efisiensi dan keselamatan, data tekanan dari sensor diintegrasikan ke dalam model dan simulasi struktural.
- g. Sistem Peringatan Dini Pemeliharaan proaktif dan tindakan keselamatan dimungkinkan oleh pemantauan tekanan waktu nyata, yang menawarkan peringatan dini terhadap kegagalan struktural atau keadaan berbahaya.
- h. Pemantauan Jarak Jauh dan Pencatatan Data Kemampuan pemantauan nirkabel atau jarak jauh untuk sensor tekanan memungkinkan pengumpulan dan pencatatan data secara terus menerus, yang memungkinkan analisis dan pengambilan keputusan secara waktu nyata tanpa memerlukan inspeksi langsung.

Singkatnya, sensor tekanan dalam sistem SHM sangat penting untuk menjaga kekuatan, umur panjang, dan keselamatan struktur karena menawarkan informasi yang berguna tentang beban, deformasi, dinamika fluida, dan kondisi operasi. Hal ini sangat penting untuk rencana pengelolaan infrastruktur kontemporer karena memungkinkan pemeliharaan preventif dan mengurangi kemungkinan kerusakan struktural.

Aplikasi

Sensor digunakan dalam berbagai bidang, seperti elektronik konsumen (misalnya, ponsel pintar), sistem otomotif (misalnya, deteksi tabrakan), perawatan kesehatan (misalnya, perangkat pemantauan medis), dan pemantauan lingkungan (misalnya, stasiun cuaca). Terakhir, integrasi dan aplikasinya disajikan sebagai tahap penting di zaman modern untuk memperoleh data selanjutnya.

5. Integrasi Dan Aplikasi

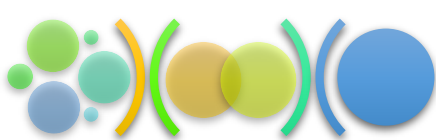
Integrasi

Sistem pengumpulan data kontemporer menggabungkan sejumlah sensor dan instrumen untuk membentuk entitas terpadu dengan kemampuan untuk mengumpulkan, memproses, dan mengirim data secara instan.

Aplikasi

Informasi yang diperoleh dari sensor dan sistem pengumpulan data digunakan untuk analisis, pemantauan, sistem kontrol, dan pengambilan keputusan di berbagai sektor, mulai dari manufaktur industri (misalnya, kontrol kualitas) hingga penelitian ilmiah (misalnya, eksperimen fisika).

Selain DAQ dan penginderaan, sensor pintar dengan kemampuan IoT membantu dalam pemantauan kesehatan struktur komposit secara real-time. Fungsi IoT ini dibahas di bagian berikut.



10.3 PEMANTAUAN SECARA REAL-TIME

Sensor pintar dengan kemampuan IoT dapat mengirim data ke sistem berbasis cloud atau terpusat secara real-time. Hal ini menghilangkan kebutuhan akan inspeksi fisik dan memungkinkan pemantauan berkelanjutan terhadap kinerja dan integritas struktural konstruksi komposit.

SHM real-time dimungkinkan oleh sensor pintar yang terhubung ke IoT. Hal ini memungkinkan pengumpulan, analisis, dan pemeliharaan preventif data secara berkelanjutan pada infrastruktur, termasuk bangunan, jembatan, dan aset vital lainnya. Inilah cara mereka berkolaborasi.

Teknologi Sensor

Berbagai macam sensor, termasuk pengukur regangan, sensor suhu, sensor kelembaban, dan akselerometer, terintegrasi ke dalam sensor pintar. Sensor-sensor ini terus menerus mengumpulkan informasi tentang perilaku struktur, termasuk fluktuasi suhu, tingkat regangan, dan getaran, yang semuanya merupakan penanda penting dari kesehatan struktur.

Penggunaan sensor pintar untuk SHM (Structural Health Monitoring) real-time pada konstruksi komposit adalah cara inovatif untuk menjamin daya tahan, keandalan, dan keamanan material mutakhir ini. Struktur komposit menghadirkan tantangan khusus karena mekanisme kegagalannya yang rumit dan kerentanannya terhadap kerusakan dari berbagai sumber, termasuk benturan, kelelahan, dan variabel lingkungan. Struktur komposit sering digunakan dalam aplikasi kedirgantaraan, otomotif, kelautan, dan teknik sipil.

1. Sensor Pintar SHM: Jenis Sensor Pintar

Sensor Serat Optik

Ini adalah sensor dengan mikroprosesor yang mengukur suhu, tegangan, dan terkadang kerusakan menggunakan serat optik yang diikat atau ditanamkan dalam struktur komposit.

Sensor Piezoelektrik

Sensor ini digunakan untuk mengidentifikasi regangan dan menemukan serta mengidentifikasi kerusakan (seperti delaminasi) dengan mengubah tegangan mekanis menjadi sinyal listrik.

2. Sensor yang Mengukur Impedansi Elektromekanis (EMI)

Sensor ini menggunakan variasi impedansi listrik untuk mendeteksi perubahan terkait kerusakan pada karakteristik struktural.

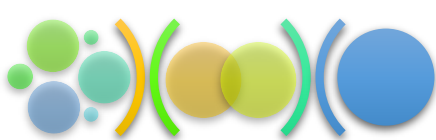
Kegunaan

a. Pemantauan Waktu Nyata

Sensor cerdas melacak perubahan yang dapat menjadi tanda-tanda kerusakan atau penurunan kualitas dengan terus memantau regangan, suhu, dan getaran struktur.

b. Akuisisi Data

Untuk analisis, sensor mengumpulkan dan mengirim data ke sistem berbasis cloud atau unit pemrosesan pusat.



Deteksi Kerusakan: Sistem SHM mampu menemukan dan mengidentifikasi kerusakan dengan menggunakan algoritma canggih atau dengan membandingkan variasi pembacaan sensor dengan data dasar.

Penilaian Kondisi: SHM menawarkan informasi tentang kondisi struktur saat ini, memungkinkan tindakan pemeliharaan atau perbaikan yang cepat.

Keuntungan

Deteksi Dini: Meningkatkan keselamatan dan keandalan dengan memungkinkan intervensi cepat sebelum kerusakan mencapai tingkat bencana.

Efektivitas Biaya: Menurunkan biaya pemeliharaan dengan memungkinkan perbaikan yang tepat sasaran dan mengurangi waktu henti.

Peningkatan Kinerja: Meningkatkan umur konstruksi komposit dan memaksimalkan efisiensi operasional.

Integrasi: Dapat dipasang kembali ke struktur yang sudah ada atau dimasukkan ke dalam tahap desain.

3. Masalah dalam integrasi Sensor

Memastikan sensor tersebut kompatibel dengan material komposit dan tidak membahayakan integritas struktural.

Interpretasi Data

Membuat algoritma yang tepat untuk menganalisis data sensor dan membedakan efek lingkungan dari kerusakan.

Keandalan

Memastikan bahwa sensor berfungsi secara konsisten dalam kondisi lingkungan yang menantang, seperti yang terlihat dalam aplikasi kedirgantaraan dan maritim, dikenal sebagai keandalan.

Biaya

Keuntungan jangka panjang mungkin lebih besar daripada biaya pengaturan dan pemeliharaan yang lebih tinggi dalam jangka pendek.

Kegunaan

Memeriksa retakan kelelahan atau kerusakan akibat benturan pada bilah rotor, badan pesawat, dan sayap pesawat terbang.

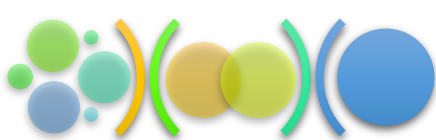
Otomotif

Memeriksa kelelahan atau kerusakan akibat benturan pada bagian plastik yang diperkuat serat karbon (CFRP).

Kelautan: Memeriksa korosi dan keausan pada lambung dan elemen struktural penting.

Teknik Sipil: Pemantauan integritas struktural bilah turbin angin, bangunan, dan jembatan.

Singkatnya, untuk struktur komposit, SHM (Structural Health Monitoring) waktu nyata dengan sensor pintar menghadirkan sejumlah manfaat dalam hal efektivitas biaya, efisiensi, dan keamanan. Kemajuan berkelanjutan dalam teknologi sensor



dan analitik data sangat penting untuk meningkatkan keandalan dan fleksibilitas sistem ini di berbagai industri.

10.4 DETEKSI KERUSAKAN DINI

Anomali atau penyimpangan dari perilaku normal dapat ditemukan sejak dini dengan memeriksa data dari sensor pintar. Dengan mengantisipasi kemungkinan malfungsi atau kerusakan sebelum memburuk, deteksi dini meningkatkan keselamatan dan mengurangi kebutuhan akan perbaikan yang mahal.

Salah satu fitur terpenting dari SHM yang meningkatkan umur pakai, keandalan, dan keselamatan infrastruktur adalah deteksi kerusakan dini melalui sensor pintar. Berikut cara sensor pintar membantu prosedur ini.

Pemantauan Terus Menerus

Data waktu nyata tentang suhu, regangan, getaran, tingkat korosi, dan faktor lainnya dikumpulkan oleh sensor pintar, yang memungkinkan pemantauan struktur secara terus menerus. Kemampuan untuk memperhatikan perubahan kecil yang dapat menunjukkan awal kerusakan atau degenerasi dimungkinkan oleh pemantauan berkelanjutan ini.

Analisis Data Dan Pengenalan Pola

Algoritma canggih menganalisis informasi yang dikumpulkan oleh sensor cerdas untuk menemukan tren atau penyimpangan yang dapat menunjukkan kemungkinan kerusakan. Kumpulan data besar dapat dianalisis menggunakan teknik pembelajaran mesin, yang juga dapat digunakan untuk mendeteksi indikator peringatan dini yang mungkin tidak langsung terlihat hanya dari penilaian visual.

Lokalisasi Kerusakan

Sensor cerdas dapat digunakan untuk menemukan kerusakan di dalam struktur. Insinyur dapat secara tepat menentukan lokasi kerusakan atau konsentrasi tegangan dengan menggunakan triangulasi untuk memeriksa data dari beberapa sensor yang ditempatkan di seluruh struktur.

Sinyal Peringatan Dini

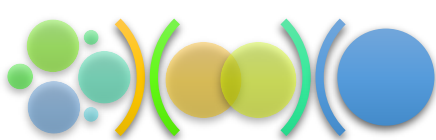
Sensor cerdas memiliki kemampuan untuk mengirimkan sinyal peringatan dini ketika anomali atau kemungkinan kerusakan teridentifikasi. Dengan memicu inspeksi tambahan atau tindakan pencegahan sebelum kerusakan mencapai tingkat kritis, sinyal-sinyal ini membantu insinyur menghindari perbaikan yang mahal atau kerusakan yang fatal.

Efektivitas Biaya Dan Keamanan

Sensor pintar membantu menghemat biaya dengan memfasilitasi deteksi dini, yang mengurangi kebutuhan akan perbaikan yang mahal dan memakan waktu yang diperlukan jika kerusakan dibiarkan terus berlanjut tanpa terkendali. Selain itu, sensor pintar meningkatkan keselamatan dengan menawarkan informasi yang cepat yang memungkinkan pemeliharaan preventif dan pengurangan risiko.

Pemantauan Jangka Panjang Dan Analisis Tren

Dengan melacak perilaku dan kinerja struktural dari waktu ke waktu, sensor pintar mempermudah analisis tren. Insinyur dapat menggunakan data longitudinal ini untuk



mengevaluasi efektivitas rencana pemeliharaan dan membuat pilihan yang tepat mengenai umur panjang dan keandalan bangunan.

Singkatnya, deteksi kerusakan dini dengan sensor pintar dalam SHM (Structural Health Monitoring) meningkatkan prosedur pemeliharaan, meningkatkan umur operasional struktur, dan meningkatkan keselamatan dan keandalan infrastruktur secara keseluruhan. Ini adalah contoh strategi manajemen struktural proaktif yang memanfaatkan teknologi untuk mengurangi risiko dan meningkatkan produktivitas.

10.5 PENILAIAN KONDISI

Dengan memanfaatkan data yang terkumpul, sensor pintar menawarkan wawasan tentang kondisi terkini konstruksi komposit. Penilaian kesehatan struktural, identifikasi kebutuhan perawatan, dan memaksimalkan efektivitas operasional semuanya dapat dilakukan dengan bantuan data ini.

Untuk menjamin kinerja dan keamanan jangka panjang struktur komposit, evaluasi kondisi menggunakan sensor pintar dalam SHM sangat penting. Karena rasio kekuatan terhadap berat yang sangat baik dan ketahanan terhadap korosi, material komposit, seperti CFRP atau polimer yang diperkuat serat kaca (FRP), sering digunakan dalam aplikasi kedirgantaraan, otomotif, kelautan, dan teknik sipil. Berikut adalah beberapa cara sensor pintar membantu penilaian kondisi struktur ini.

Memantau Integritas Struktural

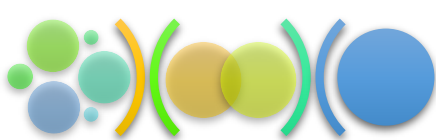
Dalam struktur komposit, sensor pintar terus-menerus melacak faktor-faktor penting, termasuk tegangan, getaran, suhu, dan kelembaban. Deteksi dini variasi dari kondisi operasi tipikal yang dapat menunjukkan kerusakan atau penurunan kualitas dimungkinkan oleh pemantauan waktu nyata ini. Contohnya ditunjukkan pada Gambar 10.2 untuk sistem tenaga angin.

Menemukan Dan Mengidentifikasi Retak Dan Delaminasi

Dua bentuk kerusakan yang umum terjadi pada konstruksi komposit adalah retak dan delaminasi, atau pemisahan lapisan. Perubahan distribusi regangan atau emisi akustik dapat menjadi tanda-tanda awal dan perkembangan delaminasi atau retak, dan dapat dideteksi oleh sensor pintar. Deteksi dini memfasilitasi dimulainya perawatan atau perbaikan dengan cepat untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.

Deteksi Kerusakan Lokal

Para insinyur dapat mengidentifikasi kerusakan lokal dengan menempatkan sensor pintar secara hati-hati di lokasi-lokasi penting pada struktur komposit, seperti di dekat zona konsentrasi tegangan atau di antarmuka. Pemantauan khusus ini membantu menentukan kondisi area tertentu dan memberikan informasi untuk pemilihan teknik restorasi yang tepat.





Gambar 10.2 Penilaian kondisi.

Pemantauan Korosi

Korosi merupakan bahaya utama bagi struktur komposit yang mengandung komponen logam (seperti baut dan fitting). Ketika tingkat korosi meningkat di atas batas yang dapat diterima, sensor pintar yang dilengkapi dengan sensor atau probe korosi dapat melacak laju kerusakan dan memberi tahu staf pemeliharaan. Pemantauan proaktif membantu mencegah keruntuhan struktural yang disebabkan oleh bagian-bagian yang lemah.

Pemantauan Lingkungan

Sensor pintar juga mampu memantau variabel, termasuk kelembaban, suhu, paparan UV, dan paparan bahan kimia. Daya tahan dan kinerja jangka panjang material komposit dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan tertentu. Insinyur dapat mengevaluasi pengaruh lingkungan terhadap struktur dan mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan dengan memantau aspek-aspek ini.

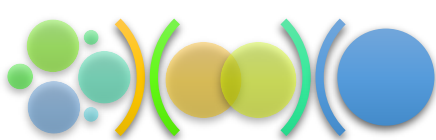
Pemeliharaan Prediktif Dan Analisis Data

Sejumlah besar data yang dikumpulkan oleh sensor pintar dapat dianalisis menggunakan metode analitik data yang canggih, seperti algoritma pembelajaran mesin. Algoritma ini mampu mengenali pola, memprediksi mode kegagalan, dan mengoptimalkan jadwal pemeliharaan. Dengan mengurangi waktu henti dan biaya perbaikan, pemeliharaan prediktif berdasarkan data sensor memperpanjang umur operasional struktur komposit.

Integrasi Dengan Desain Dan Pengujian Struktural

Untuk memverifikasi kinerja struktural di bawah kondisi operasi simulasi, sensor pintar dapat diintegrasikan ke dalam tahap desain dan pengujian struktur komposit. Melalui integrasi ini, data yang berguna tersedia untuk meningkatkan parameter desain dan menjamin bahwa struktur memenuhi persyaratan kinerja dan keselamatan selama masa pakainya.

Kesimpulannya, sensor pintar sangat penting untuk evaluasi status struktur komposit karena memungkinkan rencana pemeliharaan proaktif, identifikasi kerusakan dini, dan pemantauan berkelanjutan. Dalam berbagai aplikasi industri, para insinyur dapat



meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan keandalan struktur komposit dengan memanfaatkan analitik canggih dan teknologi sensor.

10.6 INTEGRASI DENGAN PLATFORM IOT

Untuk memungkinkan pengumpulan, penyimpanan, dan analisis data, sensor pintar sering diintegrasikan dengan platform IoT. Interoperabilitas dan konektivitas yang lancar dengan sistem dan perangkat IoT lainnya dimungkinkan oleh integrasi ini.



Gambar 10.3 Integrasi dengan platform IoT.

Gambar 10.3 menyajikan struktur yang mewakili inovasi perumahan, di mana rumah-rumah dilengkapi dengan perangkat dan sistem terhubung yang dapat dikontrol dari jarak jauh. Kemampuan pemantauan, analisis, dan proses pengambilan keputusan meningkat ketika platform IoT diintegrasikan ke dalam SHM (Structural Health Monitoring) struktur komposit. Sistem IoT membantu SHM konstruksi komposit dengan cara-cara berikut.

Akuisisi Data Dan Konektivitas

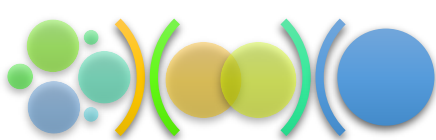
Sensor pintar yang ditanamkan dalam struktur komposit dapat dihubungkan dan diintegrasikan dengan lebih mudah dengan bantuan platform IoT. Sensor-sensor ini mengumpulkan informasi tentang sejumlah variabel, termasuk suhu, kelembaban, getaran, dan tegangan. IoT memungkinkan untuk dengan mudah memperoleh data dari sensor yang tersebar melalui jaringan nirkabel, menjamin pemantauan berkelanjutan dan waktu nyata.

Manajemen Dan Penyimpanan Data Terpusat

Solusi IoT menawarkan penyimpanan data terpusat di lokasi atau berbasis cloud. Volume besar data sensor yang dikumpulkan dari berbagai arsitektur komposit kini dapat dikelola secara efektif. Penilaian kondisi komprehensif dan analisis tren dimungkinkan oleh kemampuan para insinyur dan tim pemeliharaan untuk mengakses data historis dan waktu nyata dari lokasi mana pun.

Pemantauan Dan Peringatan Waktu Nyata

Solusi IoT memungkinkan metrik kesehatan struktural dipantau secara waktu nyata. Platform ini mampu secara instan menilai data sensor yang masuk melalui integrasi dengan



algoritma dan analitik cerdas. Mereka mampu mengidentifikasi ketidaknormalan, mengantisipasi masalah apa pun, dan memberikan peringatan atau pemberitahuan kepada staf pemeliharaan sehingga mereka dapat bertindak dengan cepat.

Fleksibilitas Dan Skalabilitas

Platform IoT cukup fleksibel untuk diperluas guna memantau lebih banyak struktur sesuai kebutuhan dan cukup skalabel untuk menggabungkan lebih banyak sensor. Selain itu, platform ini mudah beradaptasi karena dapat mengakomodasi berbagai jenis sensor dan protokol komunikasi, menjamin kompatibilitas dengan beragam material komposit dan spesifikasi pemantauan.

Keamanan Dan Privasi Data

Platform IoT dirancang dengan fitur keamanan yang kuat untuk melindungi data SHM pribadi dari peretas atau akses tidak sah. Sensor, platform IoT, dan pengguna akhir dapat mentransfer data dengan percaya diri, berkat enkripsi data, metode otentikasi, dan protokol koneksi yang aman.

Pemantauan Sepanjang Masa Pakai Dan Optimasi Kinerja

Mulai dari instalasi awal hingga penggunaan operasional dan masalah akhir masa pakai, solusi IoT memungkinkan pemantauan menyeluruh sepanjang masa pakai struktur komposit. Pemeliharaan proaktif, optimasi kinerja, dan pengambilan keputusan yang tepat mengenai opsi perbaikan, pemasangan ulang, atau penggantian dimungkinkan oleh wawasan berbasis data yang berkelanjutan. Terakhir, menggabungkan platform IoT dengan SHM (Structural Health Monitoring) struktur komposit meningkatkan kinerja struktural struktur sepanjang masa pakainya, memungkinkan pemeliharaan proaktif, dan memperkuat kemampuan pemantauan. Para insinyur dapat mengelola struktur komposit secara lebih efisien, aman, dan andal dalam berbagai aplikasi industri dengan memanfaatkan teknologi IoT.

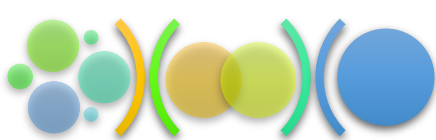
10.7 SISTEM SHM JARAK JAUH

Para pemangku kepentingan (insinyur, staf pemeliharaan, dan lain-lain.) dapat mengakses data historis dan data waktu nyata pada struktur komposit dari jarak jauh berkat sistem SHM yang menggunakan sensor pintar. Rencana pemeliharaan proaktif dan pengambilan keputusan yang cepat didukung oleh aksesibilitas ini.

Kemampuan untuk mengakses dan mengelola data dan sistem SHM dari jarak jauh dikenal sebagai akses jarak jauh dengan sensor pintar dalam SHM struktur komposit. Meningkatkan efisiensi operasional, memfasilitasi pengambilan keputusan yang cepat, dan menurunkan biaya perawatan semuanya bergantung pada karakteristik ini. Berikut adalah beberapa cara sensor pintar dan akses jarak jauh meningkatkan SHM struktur komposit.

Pemantauan Real-Time

Sensor pintar yang terintegrasi ke dalam struktur komposit mengumpulkan informasi tentang berbagai faktor, termasuk suhu, kelembaban, getaran, dan tegangan, secara terus menerus. Insinyur dan staf perawatan dapat memantau parameter ini dari jarak jauh secara real-time dari lokasi mana pun dengan akses internet. Mereka dapat mengamati tren, anomali, dan situasi terkini tanpa harus berada di lokasi struktur secara fisik.



Deteksi Dini

Identifikasi dini masalah atau anomali struktural dimungkinkan dengan akses jarak jauh ke data SHM. Ketika sensor mengidentifikasi anomali yang dapat menunjukkan kemungkinan kerusakan atau penurunan kualitas, para insinyur dapat langsung mendapatkan peringatan atau pemberitahuan melalui antarmuka web atau perangkat seluler. Dengan mengambil sikap proaktif, kemungkinan perbaikan mahal atau kerusakan struktural berkurang dengan memungkinkan intervensi cepat dan pemeliharaan preventif.

Diagnostik Dan Pemecahan Masalah Yang Efektif

Akses jarak jauh memungkinkan para insinyur untuk mengakses alat diagnostik dari jarak jauh dan melakukan proses pemecahan masalah jika terjadi alarm atau pembacaan yang tidak terduga dari sensor. Mereka dapat mengevaluasi data sensor, mengukur tingkat keparahan masalah, dan memilih tindakan terbaik. Fitur ini mempersingkat waktu reaksi dan meminimalkan waktu henti yang terkait dengan kunjungan di lokasi atau pemeriksaan manual.

Penjadwalan Pemeliharaan Yang Dioptimalkan

Tim pemeliharaan dapat mendasarkan jadwal pemeliharaan mereka pada data kinerja nyata daripada interval yang telah ditentukan sebelumnya dengan mengakses data historis dan laporan analisis tren dari jarak jauh. Dengan memastikan bahwa pemeliharaan dilakukan saat dibutuhkan, metode berbasis data ini memaksimalkan umur operasional struktur komposit dan mengurangi biaya pemeliharaan yang tidak perlu.

Operasi Yang Efektif Biaya

Pengumpulan data manual dan inspeksi di lokasi yang berulang menjadi kurang diperlukan ketika aksesibilitas dicapai dari jarak jauh. Keuntungan finansial ini sangat penting untuk struktur komposit yang besar atau tersebar luas, karena mengurangi biaya perjalanan dan waktu henti yang terkait dengan tugas pemeliharaan.

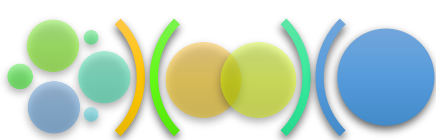
Peningkatan Keamanan Dan Keandalan

Keamanan dan keandalan struktur komposit ditingkatkan dengan akses cepat ke data SHM dan prosedur pemeliharaan proaktif yang difasilitasi oleh akses jarak jauh. Insinyur dapat dengan cepat menerapkan tindakan korektif, mengurangi bahaya, dan menjamin bahwa struktur tetap dalam kondisi prima selama masa pakainya.

Integrasi Dengan Platform Iot Dan Cloud

Integrasi sensor pintar dengan sistem SHM berbasis cloud dan platform IoT memungkinkan akses jarak jauh. Solusi ini memberikan skalabilitas, integritas data, dan kepatuhan standar keamanan sambil menawarkan akses aman ke data sensor melalui antarmuka web atau aplikasi seluler.

Singkatnya, insinyur dan tim pemeliharaan sekarang dapat memantau, mengevaluasi, dan mengelola data kesehatan struktural dari jarak jauh berkat sensor pintar dalam SHM struktur komposit. Dalam berbagai aplikasi industri, hal ini meningkatkan keandalan dan keamanan jangka panjang struktur komposit, memperkuat efisiensi operasional, dan memfasilitasi pengambilan keputusan proaktif.



10.8 EFEKTIVITAS BIAYA

Dengan mengurangi frekuensi inspeksi fisik dan menawarkan pemantauan berkelanjutan, sensor pintar memberikan alternatif yang lebih hemat biaya daripada metode inspeksi tradisional, yang dapat menyebabkan waktu henti dan biaya tenaga kerja.

Perangkat IoT sensor pintar merupakan pilihan yang disukai perusahaan yang mencari teknik pemeliharaan yang hemat biaya karena memberikan berbagai keuntungan dibandingkan pilihan lain dalam hal SHM (Structural Health Monitoring) struktur komposit. Berikut adalah cara utama sensor pintar meningkatkan efektivitas biaya SHM struktur komposit.

Deteksi Dini Dan Pemeliharaan Preventif

Karakteristik struktural termasuk suhu, getaran, dan tegangan dipantau secara terus menerus oleh sensor pintar. Sensor ini memfasilitasi intervensi pemeliharaan preventif dengan mengidentifikasi indikator awal kerusakan atau degradasi. Dengan menangani masalah sejak dini, Anda dapat menurunkan kemungkinan kegagalan fatal yang dapat menyebabkan waktu henti yang mahal atau bahaya keselamatan, serta biaya perbaikan yang terkait dengan kerusakan yang lebih parah.

Biaya Inspeksi Yang Lebih Rendah

Tenaga kerja manual, peralatan khusus, dan waktu henti untuk akses struktural seringkali dibutuhkan untuk metode inspeksi tradisional. Kemampuan pemantauan berkelanjutan dari sensor pintar menghilangkan kebutuhan akan pemeriksaan fisik secara berkala. Penurunan frekuensi inspeksi ini menghindari gangguan operasional dan mengurangi biaya personel, khususnya untuk konstruksi komposit yang besar atau terpencil.

Perencanaan Pemeliharaan Berbasis Data

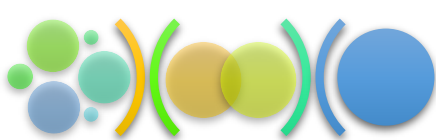
Sejumlah besar data historis dan waktu nyata mengenai kinerja struktur dikumpulkan oleh sensor pintar. Tim pemeliharaan dapat mengoptimalkan jadwal pemeliharaan dan memprioritaskan tugas berdasarkan kondisi struktural aktual, bukan interval berbasis kalender, dengan menganalisis data ini. Dengan meminimalkan tugas pemeliharaan yang tidak perlu dan mengoptimalkan efektivitas upaya pemeliharaan, strategi ini menghemat waktu dan sumber daya.

Umur Struktur Yang Lebih Panjang

Konstruksi komposit memiliki umur operasional yang lebih panjang berkat pemantauan proaktif dan pemeliharaan cepat yang dimungkinkan oleh sensor pintar. Sensor pintar membantu meminimalkan kerusakan seiring waktu dengan menyelesaikan masalah dengan cepat dan memaksimalkan kinerja. Pengurangan biaya jangka panjang sangat signifikan karena frekuensi perbaikan besar atau penggantian bangunan lebih awal berkurang karena perpanjangan umur pakai ini.

Pemantauan Dan Manajemen Jarak Jauh

Para insinyur dan staf pemeliharaan dapat memantau dan mengelola struktur dari lokasi mana pun dengan akses internet berkat kemampuan sensor pintar untuk membuat data SHM dapat diakses dari jarak jauh. Fitur ini memungkinkan waktu reaksi yang lebih cepat terhadap alarm atau pembacaan anomali dan menurunkan biaya perjalanan yang terkait



dengan inspeksi di lokasi. Melalui kemampuan untuk membuat keputusan dan mengambil tindakan lebih cepat, pemantauan jarak jauh juga meningkatkan efisiensi operasional.

Fleksibilitas dan Skalabilitas

Sistem sensor pintar berbasis IoT cukup fleksibel untuk menambahkan lebih banyak sensor atau meningkatkan kapasitas pemantauannya sesuai kebutuhan. Karena skalabilitasnya, solusi SHM dapat memperluas atau mengubah infrastruktur tanpa perlu mengganti atau menyesuaikan sistem pemantauan yang mahal.

Solusi pemeliharaan prediktif dimungkinkan melalui integrasi sensor pintar dan alat analitik prediktif. Analitik prediktif dapat mengantisipasi kemungkinan masalah dan menyarankan prosedur pemeliharaan preventif dengan memeriksa pola dan tren dalam data sensor. Dengan meminimalkan waktu henti yang tidak terjadwal dan perbaikan darurat, metode prediktif ini memaksimalkan efektivitas operasional sekaligus menurunkan biaya pemeliharaan secara keseluruhan.

Kesimpulannya, dengan memfasilitasi deteksi dini, pengambilan keputusan berbasis data, pemantauan jarak jauh, dan pemeliharaan prediktif, sensor pintar sebagai perangkat IoT dalam SHM (Structural Health Monitoring) struktur komposit menawarkan keuntungan yang sangat hemat biaya. Keuntungan ini meningkatkan umur pakai, keamanan, dan keandalan struktur komposit dalam berbagai aplikasi industri, di samping menurunkan biaya operasional.

10.9 IMPLIKASI BAGI AKADEMISI DAN IMPLIKASI BAGI PRAKTIKSI

Meskipun implikasi dibahas di semua bagian di atas, mulai dari bagian terakhir Bagian 10.1 hingga Bagian 10.8, beberapa implikasi spesifik bagi praktisi dan akademisi disajikan dalam sub-bagian berikut.

Kustomisasi Dan Skalabilitas

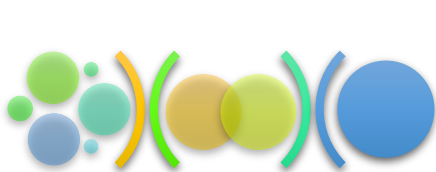
Sensor pintar dengan kemampuan IoT dapat disesuaikan untuk memenuhi persyaratan pemantauan unik dari berbagai struktur komposit. Selain itu, sensor ini dapat diskalakan, memungkinkan perluasan kemampuan pemantauan melalui penambahan sensor sesuai kebutuhan.

Untuk meningkatkan fleksibilitas dan skalabilitas dalam struktur komposit menggunakan sensor pintar untuk SHM, IoT sangat penting. Berikut cara IoT memungkinkan hal-hal ini.

Personalisasi Sistem Pengawasan: Pemilihan dan Konfigurasi Sensor

IoT menyediakan berbagai pilihan sensor pintar yang sesuai dengan persyaratan pemantauan tertentu, memungkinkan kustomisasi sistem SHM. Bergantung pada fitur dan kelemahan konstruksi komposit, para insinyur dapat memilih sensor berdasarkan faktor-faktor seperti regangan, getaran, suhu, dan korosi.

Integrasi dengan Infrastruktur Saat Ini: Sistem IoT menyediakan integrasi sensor pintar dengan infrastruktur saat ini untuk pemantauan. Dengan menambahkan sensor ke berbagai konstruksi komposit, integrasi ini memungkinkan kustomisasi untuk aplikasi di bidang teknik sipil, otomotif, kedirgantaraan, dan kelautan.



Pengumpulan dan Interpretasi Data Secara Real-Time

Pemantauan Konstan: Pengumpulan data secara real-time dimungkinkan oleh sensor pintar yang diaktifkan IoT, yang mampu memantau faktor struktural secara terus menerus. Aliran data yang berkelanjutan ini memungkinkan identifikasi anomali atau penyimpangan dari kondisi operasi tipikal dengan cepat, yang memungkinkan intervensi tepat waktu dan pemeliharaan preventif.

Penggabungan dan Analisis Data: Sistem IoT mempermudah penggabungan dan evaluasi data dari banyak sumber dan sensor. Data ini diproses menggunakan metode analitik canggih, seperti algoritma pembelajaran mesin, untuk menemukan tren, korelasi, dan kemungkinan masalah dalam konstruksi komposit. Insinyur dapat mengekstrak pengetahuan praktis yang dapat diterapkan untuk memaksimalkan efisiensi dan memperpanjang umur struktur.

Skalabilitas dalam Berbagai Aplikasi

Penyebaran Fleksibel: Sistem SHM berbasis IoT dapat diperluas dan disesuaikan agar sesuai dengan berbagai struktur komposit dan penggunaan. IoT memungkinkan penyebaran sensor secara terukur, mendukung berbagai ukuran, jenis, dan lingkungan, baik untuk memantau satu struktur maupun jaringan struktur.

Kemampuan Perluasan

Dengan memperkenalkan sensor baru atau memodernisasi sensor lama, IoT memungkinkan skalabilitas sistem SHM seiring perkembangan atau pertumbuhan infrastruktur. Karena skalabilitasnya, solusi pemantauan dapat berkembang untuk mengikuti perkembangan infrastruktur tanpa memerlukan perbaikan atau penggantian yang signifikan.

Kontrol Jarak Jauh dan Aksesibilitas

Pemantauan Jarak Jauh: Insinyur dan pemangku kepentingan dapat memantau struktur komposit dari lokasi mana pun dengan konektivitas internet berkat kemampuan IoT untuk menyediakan akses jarak jauh ke data SHM. Kapasitas ini memfasilitasi pengambilan keputusan yang cepat, respons yang siaga, dan manajemen kesehatan struktural yang efektif.

Kontrol Terpusat

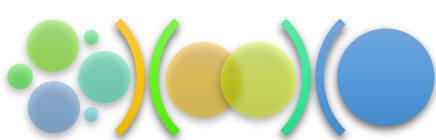
Sistem manajemen dan pemantauan data terpusat di bawah platform IoT. Dengan melakukan diagnostik, menyesuaikan parameter pemantauan, dan mengkonfigurasi sensor dari jarak jauh, para insinyur dapat meningkatkan efisiensi operasional dan menurunkan biaya pemeliharaan yang terkait dengan inspeksi di lokasi.

Peningkatan Keandalan dan Keamanan

Pemeliharaan Proaktif: IoT mendukung taktik pemeliharaan proaktif dengan memungkinkan skalabilitas, kustomisasi, dan pemantauan waktu nyata. Berdasarkan wawasan berbasis data, para insinyur dapat menerapkan langkah-langkah pencegahan untuk mengurangi bahaya dan menjamin umur panjang keamanan dan keandalan konstruksi komposit.

Analisis Prediktif

Dengan mengintegrasikan IoT, analisis prediktif dapat digunakan untuk mengantisipasi kemungkinan masalah dan meningkatkan rencana pemeliharaan. Wawasan prediktif yang



berasal dari data IoT mengurangi waktu henti, mencegah perbaikan yang mahal, dan memperpanjang umur pakai konstruksi komposit.

Singkatnya, IoT memungkinkan solusi pemantauan yang disesuaikan, pengumpulan dan analisis data secara real-time, penerapan yang fleksibel di berbagai aplikasi, akses jarak jauh, dan teknik pemeliharaan proaktif, yang semuanya meningkatkan kustomisasi dan skalabilitas dalam SHM (Structural Health Monitoring) struktur komposit. Keterampilan ini memungkinkan para insinyur untuk mengelola struktur komposit di berbagai sektor industri secara hemat biaya, sekaligus memaksimalkan kinerja dan memastikan keselamatan.

Tantangan Dan Tren Yang Muncul

Beberapa tren, hambatan, dan kesimpulan baru disajikan oleh penerapan IoT pada SHM struktur komposit menggunakan sensor pintar.

Tren yang Sedang Berkembang

Integrasi perangkat IoT dengan integrasi sensor pintar untuk pengumpulan dan analisis data waktu nyata dalam SHM struktur komposit: Ini adalah tren yang sedang berkembang. Deteksi dini kelainan struktural dan pemantauan berkelanjutan dimungkinkan oleh integrasi ini.

Jaringan Sensor Nirkabel

Jaringan sensor skala besar dapat dipasang di dalam konstruksi komposit berkat perkembangan teknologi komunikasi nirkabel. Jaringan ini memungkinkan pengiriman data jarak jauh tanpa banyak kabel.

Analisis Data dan Kecerdasan Buatan (AI)

Menggunakan data yang dikumpulkan dari sensor IoT, algoritma pembelajaran mesin dan kecerdasan buatan (AI) digunakan untuk deteksi anomali dan pemeliharaan prediktif. Akurasi dan efektivitas sistem SHM ditingkatkan oleh tren ini.

Komputasi tepi adalah praktik pemrosesan data di dekat sensor, di tepi jaringan, berbeda dengan pengiriman semua data mentah ke satu server pusat. Komputasi tepi mempercepat pengambilan keputusan dengan menurunkan latensi dan konsumsi bandwidth.

Pemantauan dan Kontrol Jarak Jauh

Konstruksi komposit dapat dipantau dan dikendalikan dari jarak jauh dengan sistem SHM yang diaktifkan IoT. Fitur ini sangat membantu untuk bangunan di daerah berbahaya atau terpencil.

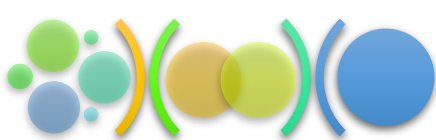
Standardisasi dan Protokol

Untuk menjamin interoperabilitas dan kemudahan integrasi dalam aplikasi SHM, upaya sedang dilakukan untuk mendefinisikan protokol dan antarmuka standar untuk perangkat IoT dan sensor pintar.

Tantangan/Masalah

Keamanan Data

Salah satu tantangan terbesar yang dihadapi perangkat IoT adalah memastikan keamanan dan integritas data yang ditransmisikan dan disimpan olehnya. Kerentanan jaringan IoT dapat membahayakan kerahasiaan dan keandalan data SHM.



Manajemen Daya

Karena lokasi terpencil atau tidak terjangkau sering terjadi pada perangkat dan sensor IoT dalam aplikasi SHM, manajemen daya dan efisiensi energi sangat penting untuk pengoperasian jangka panjang.

Akurasi dan Kalibrasi Sensor

Keefektifan sistem SHM bergantung pada kemampuan sensor pintar untuk tetap akurat dan andal dari waktu ke waktu. Penting untuk mengkalibrasi dan memantau kesehatan sensor secara teratur.

Skalabilitas

Desain penempatan sensor, arsitektur jaringan, dan prosedur manajemen data yang cermat sangat diperlukan untuk meningkatkan skala sistem SHM yang didukung IoT guna memantau struktur besar atau kompleks.

Biaya

Biaya pengaturan awal mungkin tinggi dan mencakup pembelian sensor, perangkat IoT, dan infrastruktur. Investasi dalam IoT untuk SHM perlu dibenarkan oleh solusi yang hemat biaya.

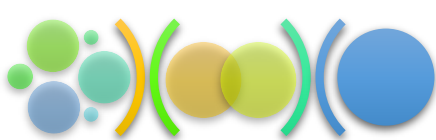
Interoperabilitas

Untuk integrasi dan pengoperasian sistem SHM yang lancar, sangat penting untuk memastikan interoperabilitas di antara berbagai perangkat IoT dan sensor dari berbagai produsen.

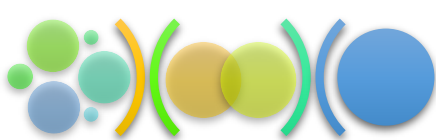
10.10 KESIMPULAN

Kesimpulannya, penggunaan IoT untuk SHM struktur komposit yang didukung sensor pintar berpotensi untuk sepenuhnya mengubah cara struktur ini dipelihara dan diamati. Sistem SHM dapat menawarkan wawasan waktu nyata tentang kesehatan struktural dengan memanfaatkan teknologi IoT, seperti komputasi tepi, analitik data, dan jaringan sensor nirkabel. Hal ini memungkinkan pemeliharaan preventif dan menurunkan kemungkinan kegagalan yang fatal. Wawasan yang dikembangkan dari bab ini memfasilitasi pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan dengan memanfaatkan AI dan IoT. Dengan menggunakan sensor pintar dan SHM berbasis IoT, infrastruktur akan bertahan lebih lama dengan mengurangi emisi gas rumah kaca dari konstruksi baru, dan konversi lebih banyak lahan menjadi infrastruktur manusia.

Selain itu, hal ini akan memungkinkan akses ke teknologi dan infrastruktur modern bagi semua orang, sehingga memfasilitasi SDG 9: Industri, Inovasi, dan Infrastruktur Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). Lebih jauh lagi, ini akan meningkatkan pencapaian tujuan 11—kota dan komunitas berkelanjutan—serta tujuan 12—konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab dari PBB karena transmisi data waktu nyata, analisis, dan pengambilan keputusan ekonomi yang terinformasi untuk umur struktur komposit yang lebih panjang. Namun, untuk memanfaatkan IoT sepenuhnya dalam SHM, masalah termasuk keamanan data, keandalan sensor, skalabilitas, dan keterjangkauan harus diatasi. Untuk mengatasi hambatan-hambatan



ini dan mendorong adopsi solusi SHM berbasis IoT di masa mendatang, pengembangan teknologi harus terus berlanjut, begitu pula kolaborasi industri dan inisiatif standardisasi.



BAB 11

KONDISI DATA GEOSPASIAL UNTUK TATA KELOLA LINGKUNGAN

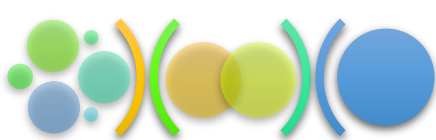
11.1 PENDAHULUAN

Pembangunan ekonomi secara berkelanjutan ditekankan dalam kebijakan makro dan strategi sektoral di Bangladesh. Dokumen-dokumen kebijakan ini memberikan arahan dan pilihan untuk mengembangkan susunan kelembagaan yang diperlukan, dengan menyebutkan kebutuhan data geospasial untuk melakukan kegiatan yang berkaitan dengan pembangunan berkelanjutan di berbagai sektor. Bangladesh telah membuat kemajuan yang baik dalam mencapai Tujuan Pembangunan Milenium (MDGs) dan sekarang berfokus pada pencapaian target Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Target SDGs berbeda dari target MDGs dalam hal area tematik, cakupan, dan kelengkapan.

Secara luas dipahami bahwa salah satu tantangan terpenting yang berkaitan dengan pencapaian SDGs adalah menghasilkan data yang dibutuhkan sehingga kemajuan yang dibuat dalam mencapai target SDGs dapat dipantau, dibagikan, dan dilaporkan dengan benar. Dalam melakukan hal itu, Divisi Statistik Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNSD) menyediakan instrumen seperti Alat Penilaian Mandiri Statistik Lingkungan (ESSAT) untuk mengatasi tantangan pembuatan, berbagi, dan pelaporan data bagi negara-negara anggota, termasuk Bangladesh. Sehubungan dengan hal ini, lembaga-lembaga penghasil data di Bangladesh seperti Biro Statistik Bangladesh (BBS) telah berupaya menyelaraskan arsitektur penghasil data lingkungan, khususnya arsitektur data geospasial, termasuk sistem manajemen dan pelaporan terkait di Bangladesh, sesuai dengan pedoman yang diberikan oleh UNSD.

BBS adalah lembaga utama dan yang diberi mandat di Bangladesh untuk menghasilkan data tentang berbagai tema lingkungan. Namun, banyak lembaga lain yang bekerja di bidang seperti sumber daya air (misalnya, Organisasi Perencanaan Sumber Daya Air, WARPO), meteorologi (misalnya, Departemen Meteorologi Bangladesh, BMD), tanah (misalnya, Institut Pengembangan Sumber Daya Tanah, SRDI) dan pertanian (misalnya, Dewan Penelitian Pertanian Bangladesh, BARC) menghasilkan berbagai jenis data lingkungan spasial dan non-spasial. Dengan demikian, indikator lingkungan dihasilkan oleh berbagai lembaga sesuai dengan kebutuhan mereka dengan mengadopsi metode yang berbeda; variasi Metode ini terkadang menciptakan hambatan (misalnya, ketidaksesuaian) untuk mengasimilasi data ketika ada kebutuhan.

Selain itu, data dihasilkan pada skala yang berbeda dengan ketentuan disaggregasi yang terbatas (misalnya, disaggregasi geografis, gender, dan disaggregasi berdasarkan pendapatan). BBS baru-baru ini mengembangkan Kerangka Statistik Lingkungan Bangladesh (BESF) 2016–2030 mengikuti pedoman yang diberikan oleh Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk Pengembangan Statistik Lingkungan (UN-FDES) dan Sistem Akuntansi Ekonomi Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UN-SEEA) sehingga data yang dikumpulkan dari berbagai sumber dapat digunakan untuk mengembangkan data untuk pelaporan dan pemantauan kemajuan pencapaian SDGs. Tinjauan literatur dan proses kelembagaan tentang



pembangkitan data lingkungan di Bangladesh menunjukkan bahwa kurangnya komitmen kelembagaan dalam pembangkitan dan berbagi data (geospasial), pendanaan yang dibutuhkan, tingkat pergantian staf yang tinggi di antara lembaga-lembaga, kesenjangan keterampilan dan pengetahuan dalam metode dan teknik pembangkitan data masih tetap menjadi hambatan utama dalam menyelaraskan ketentuan pembangkitan data yang ada.

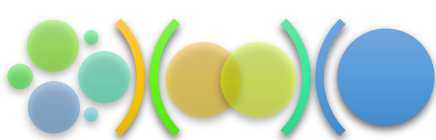
11.2 KONTEKS LINGKUNGAN NASIONAL DAN PEMBANGUNAN DATA

Keberlangsungan hidup dan keamanan sebagian besar penduduk, pengaturan dan kondisi kehidupan mereka di Bangladesh sangat bergantung pada ketersediaan, akses, dan kualitas sumber daya alam (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [MoEF] 2018). Sumber daya alam ini seperti (i) lahan dengan sifat-sifat yang menguntungkan seperti kesuburan tanah, kapasitas penahan kelembaban, sistem drainase yang baik, (ii) keanekaragaman hayati dan sumber daya yang menyediakan berbagai pilihan untuk budidaya tanaman oleh petani, (iii) sumber daya air yang memastikan fasilitas irigasi, pasokan unsur hara penting bagi tumbuhan dan hewan, dan (iv) kondisi iklim seperti suhu optimal, curah hujan yang memadai, arah dan pola aliran angin, sinar matahari yang dibutuhkan, semuanya secara gabungan menciptakan lingkungan yang mendukung sistem produksi primer berbasis sumber daya alam di negara ini.

Ketahanan pangan dan mata pencaharian jutaan orang secara langsung dan tidak langsung bergantung pada proses produksi primer ini. Dampak pada sumber daya alam dan sistem fisik yang disebabkan oleh aktivitas pembangunan yang tidak berkelanjutan, polusi dan degradasi lingkungan, bencana termasuk perubahan iklim mengakibatkan destabilisasi sistem produksi (pertanian), yang menyebabkan kerawanan pangan, kemiskinan, dan menciptakan ketegangan sosial (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [MoEF] 2017).

Ketergantungan mendalam masyarakat Bangladesh pada sumber daya alam menunjukkan bahwa pembangunan berkelanjutan adalah pendekatan paling pragmatis untuk diikuti di Bangladesh karena akan membantu menjaga integritas lingkungan dan pada saat yang sama memungkinkan pembangunan ekonomi untuk terus berlanjut. Instrumen kebijakan makro Bangladesh seperti Rencana Perspektif 2041, Rencana Lima Tahun ke-8 telah menganjurkan pembangunan berkelanjutan dan menyebutkan rencana pembangunan hijau sebagai jalur yang paling tepat saat menerapkan program pembangunan.

Sejumlah laporan telah dikembangkan oleh lembaga-lembaga terkait di Bangladesh sejak tahun 2001 yang berisi berbagai data lingkungan untuk mendukung tata kelola lingkungan, perencanaan dan pengelolaan sumber daya alam. Sebagai contoh, BBS berencana untuk mengembangkan 15 set laporan baru (mengikuti pedoman UN-FDES) di mana sejumlah laporan berfokus pada lingkungan, bencana, dan dampak perubahan iklim. Laporan pertama tentang keadaan lingkungan di Bangladesh dikembangkan dan diterbitkan oleh Departemen Lingkungan (DoE) dengan dukungan UNEP pada tahun 2001 berdasarkan data yang tersedia hingga tahun 1995 untuk tujuan pengembangan Laporan Keadaan Lingkungan Global, 2002. Laporan tersebut mengambil data dari berbagai sumber dan menyajikan fakta dalam bentuk naratif tentang degradasi lahan, polusi dan kelangkaan air, polusi udara, keanekaragaman



hayati, dan bencana alam menggunakan kerangka analitis yang dikenal sebagai tekanan-keadaan-dampak-respons (PSIR).

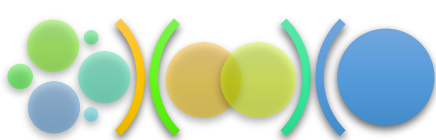
Laporan tersebut juga menunjukkan bahwa masalah lingkungan, sosial, dan pembangunan bersifat multifaset dan membutuhkan data yang lebih lengkap (bukan parsial), tepat, analitis, dan terhubung/relasional dengan benar sehingga tindakan manusia dan dampak pembangunan yang dihasilkan dapat dipahami dengan benar. Laporan tersebut juga merekomendasikan untuk menciptakan dan mengembangkan mekanisme jangka panjang untuk memantau dan menilai dampak kebijakan hijau terhadap kualitas lingkungan dan kualitas hidup manusia. Laporan tersebut dapat dianggap sebagai dasar kondisi lingkungan di Bangladesh.

Analisis Lingkungan Negara untuk Bangladesh diterbitkan oleh Bank Pembangunan Asia (ADB) pada tahun 2004. Laporan tersebut berfokus pada masalah lingkungan, terutama polusi air dan udara, membahas tentang pelepasan bahan kimia padat, berbahaya/beracun, limbah rumah sakit, kontaminasi arsenik dalam air tanah, degradasi lahan dan kualitas tanah (misalnya, intrusi salinitas, penurunan kesuburan, ketidakseimbangan nutrisi, hilangnya bahan organik), masalah hilangnya lapisan tanah atas, dan lain-lain. Laporan tersebut menyebutkan tentang kerangka hukum, kelembagaan, dan kebijakan yang berkaitan dengan lingkungan di Bangladesh. Laporan tersebut menunjukkan bahwa sekitar 200 undang-undang lingkungan tersedia di Bangladesh.

BBS menerbitkan Kompendium Statistik Lingkungan Bangladesh pada tahun 2009 di bawah pengembangan kapasitas kelembagaan. Laporan tersebut berisi data tentang keanekaragaman hayati, variabel iklim, sumber daya lahan dan air, pemukiman manusia, informasi tentang limbah dan polusi (misalnya, polusi udara, tanah, suara, air, dan radioaktif) serta dampak bencana dan perubahan iklim. BBS menerbitkan Statistik Terkait Bencana pada tahun 2015 untuk mencatat dampak bencana alam, termasuk bencana yang disebabkan oleh perubahan iklim terhadap kehidupan dan mata pencaharian manusia.

Pembahasan ini berfokus pada 12 jenis bencana besar yang terjadi di berbagai wilayah Bangladesh. Laporan tersebut menunjukkan bahwa sekitar 56,52% rumah tangga pernah mengalami bencana besar sekali seumur hidup mereka, sementara 26,57% dan 16,91% melaporkan pengalaman mereka masing-masing dua dan tiga kali (BBS 2015). Banjir tampaknya menjadi bencana yang paling mengganggu dan merusak dibandingkan dengan semua bencana lainnya, karena 24,44% responden melaporkan bahwa mereka terkena dampak banjir, diikuti oleh 15,10% yang terkena dampak siklon dan 10,59% yang menyebutkan dampak badai petir.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, BESF (2016–2030) mengikuti prinsip dan pedoman yang diberikan oleh UN-FDES dan SEEA. Tujuan BESF adalah (i) mengidentifikasi aspek-aspek utama lingkungan yang dapat diukur secara kuantitatif, (ii) mengidentifikasi komponen, sub-komponen, dan topik yang relevan dan layak secara statistik sesuai dengan kebutuhan dan prioritas nasional yang telah ditentukan, (iii) memfasilitasi pengembangan program statistik lingkungan nasional, (iv) berkontribusi pada penilaian kebutuhan data, sumber, ketersediaan, dan kesenjangan, (v) memandu pengembangan basis data yang dapat

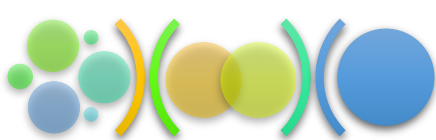


digunakan untuk berbagai tujuan, dan (vi) membantu koordinasi dan pengorganisasian statistik lingkungan mengingat sifat antarlembaga dari bidang ini.

Dalam BESF disebutkan bahwa BBS akan menyiapkan 15 set laporan (Tabel 11.1) pada tahun 2030. Penting untuk disebutkan bahwa Divisi Ekonomi Umum (GED) Komisi Perencanaan juga melakukan laporan tentang analisis kesenjangan data SDG dan menilai ketersediaan indikator dengan 62 lembaga/kementerian pemerintah dalam hal data yang tersedia, sebagian tersedia, dan tidak tersedia. Pengembangan BESF (2016–2030) berkonsultasi dengan semua dokumen terkait, termasuk laporan GED ini dalam menguraikan judul yang diusulkan untuk (15 set) laporan.

Tabel 11.1 Laporan Nasional tentang Statistik Lingkungan Hidup Bangladesh sejak 2001 dan Judul Laporan yang Diterbitkan dan Diusulkan di bawah BESF 2016–2030

No.	Judul Laporan	Tahun Terbit	Dukungan Eksternal
1.	Laporan Kondisi Lingkungan (State of Environment - SoE)	2001	UNEP berkolaborasi dengan DoE, BCAS, SACEP, dan NORAD
2.	Analisis Lingkungan Negara: Bangladesh	2004	Bank Pembangunan Asia (Asian Development Bank)
3.	Bangladesh – Analisis Lingkungan Negara	2006	Bank Dunia (World Bank)
4.	Kompendium Statistik Lingkungan Bangladesh	2009	Proyek Pengembangan Kapasitas Biro Statistik Bangladesh
5.	Statistik Terkait Bencana 2015 (Perspektif Perubahan Iklim dan Bencana Alam)	2015	Program Dampak Perubahan Iklim terhadap Kehidupan Manusia (ICCHI)
6.	Kerangka Kerja Statistik Lingkungan Bangladesh (BESF)	2017	UNEP dan UNDP
Laporan yang Akan Dikembangkan (Diusulkan dalam BESF 2016–2030)			
1.	Kompendium Statistik Lingkungan		
2.	Kompilasi Akun Sumber Daya mengikuti SEEA (tanah/tanah, air, hutan, gas alam, energi, ikan)		
3.	Statistik Terkait Perubahan Iklim dan Bencana Alam		
4.	Kompilasi Matriks Akuntansi Sosial		
5.	Akun Lingkungan Kemiskinan (Poverty Environment Accounts - PEA) sesuai dengan SEEA		
6.	Akun Ekosistem Eksperimental (EEA) sesuai dengan SEEA-CF		
7.	Survei Rumah Tangga tentang Kesehatan dan Sanitasi pada wilayah Rawan Bencana di Bangladesh		
8.	Survei Pengelolaan, Daur Ulang, dan Produksi Sampah Perkotaan/Pedesaan		
9.	Akun Pengeluaran Perlindungan Lingkungan dan Manajemen Sumber Daya		
10.	Akun Pengeluaran Pengurangan Risiko Bencana		
11.	Indeks Kerentanan Dampak Perubahan Iklim dan Bencana Alam		
12.	Alat Pengumpulan Data Pra-krisis sebagai Informasi Dasar (Baseline)		
13.	Survei Dampak Perubahan Iklim dan Bencana Alam		
14.	Survei Penggunaan dan Pengelolaan Air Perkotaan/Pedesaan		



15.	Pengembangan Pelaporan Berbagi Data Berbasis Web dan Menjamin Akses bagi Pemangku Kepentingan
-----	---

11.3 REGULASI & INSTITUSI LINGKUNGAN

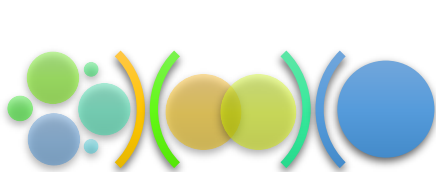
Hampir semua sektor di Bangladesh memiliki masalah lingkungan dalam berbagai bentuk, terutama yang berkaitan dengan tindakan dalam pengelolaan sumber daya alam seperti tanah dan air. Dewan Lingkungan Nasional didirikan di Bangladesh, diketuai oleh perdana menteri. Dewan ini berfungsi melalui Komite Menteri Eksekutif yang dipimpin oleh Kementerian Lingkungan Hidup, Kehutanan, dan Perubahan Iklim (MoEFCC) dan Komite Lingkungan Divisi yang dipimpin oleh Komisioner Divisi. MoEFCC terutama bertanggung jawab atas perlindungan lingkungan, juga bertanggung jawab atas perumusan dan pemantauan kebijakan dan perundang-undangan lingkungan.

Kementerian ini bertindak sebagai otoritas pengendali semua lembaga pelaksana seperti DoE, Departemen Kehutanan (FD), Institut Penelitian Kehutanan Bangladesh (BFRI), Perusahaan Pengembangan Industri Kehutanan Bangladesh (BFIDC), dan Institut Kehutanan dan Ilmu Lingkungan (IFESCU). Selain itu, kementerian ini mengkoordinasikan isu-isu lingkungan antar kementerian lainnya (misalnya, air, industri, transportasi, dan pertambangan). Kementerian Kehutanan (FD) bertindak sebagai lembaga pelaksana untuk perlindungan, pengendalian, konservasi, perluasan, dan pemeliharaan sumber daya hutan nasional.

Selain itu, sejumlah Kementerian mempertimbangkan isu lingkungan sebagai isu lintas sektoral. Ini termasuk Kementerian Perencanaan, Kementerian Pemerintah Daerah, Pembangunan Pedesaan dan Koperasi (MoLGRD & C), Kementerian Sumber Daya Air, Kementerian Pertanian, Kementerian Kesehatan dan Kesejahteraan Keluarga, Departemen Teknik Kesehatan Masyarakat, Otoritas Penyediaan Air dan Sanitasi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.¹ Rencana Aksi Manajemen Lingkungan Nasional (NEMAP) 1992 dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (MoEF) mengusulkan tindakan untuk mencapai tujuan yang dinyatakan dalam Kebijakan Lingkungan Nasional 1992. Tindakan ini mencakup banyak bidang yang beragam terkait dengan lingkungan dengan penekanan pada partisipasi publik dalam proses penyusunan rencana aksi.

Undang-Undang Konservasi Lingkungan Hidup tahun 1995 memberi wewenang kepada MoEF untuk merumuskan peraturan dan pedoman untuk pengelolaan lingkungan. Hal ini juga menetapkan DoE bertanggung jawab untuk menegakkan prosedur EIA 1997 untuk mengendalikan polusi udara, polusi air, dan polusi suara. Proses EIA dikategorikan menjadi empat kelas, yaitu hijau, kuning A, kuning B, dan merah² (Tabel 11.2).

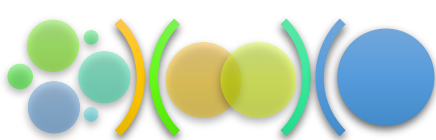
Penting untuk dicatat bahwa kerangka hukum yang berkaitan dengan lingkungan di Bangladesh dipenuhi dengan sejumlah besar dokumen. Namun, Kebijakan Lingkungan Bangladesh 1992,³ Kebijakan Hutan 1994 (UU Hutan 2021), Kebijakan Air 1999, Kebijakan Tata Guna Lahan Nasional 2001, Kebijakan Perikanan Nasional 1998, Rencana Aksi Manajemen Lingkungan Nasional (NEMAP) 1995 adalah kebijakan utama yang berperan dalam memberikan pedoman yang diperlukan dalam merumuskan undang-undang, strategi,



rencana, dan untuk mengeluarkan peraturan terkait tentang isu-isu lingkungan. Kebijakan-kebijakan tersebut juga memberikan arahan dalam membangun arsitektur kelembagaan dan merumuskan mandat kelembagaan untuk mencapai tujuan kebijakan. Hal penting yang perlu disebutkan di sini adalah bahwa sebagian besar kebijakan dikembangkan sebelum tahun 2000 dalam konteks dan kebutuhan pada saat itu, sehingga arsitektur kelembagaan, sumber daya manusia, dan mandat yang ingin dicapai masih ketinggalan zaman. Sebaliknya, kebijakan yang dirumuskan atau diubah setelah tahun 2000 lebih serius memasukkan isu-isu konservasi lingkungan dan keanekaragaman hayati.

Tabel 11.2 Beberapa Undang-Undang Lingkungan Utama di Bangladesh

Hukum dan Peraturan	Relevansi terhadap Lingkungan
Undang-Undang Konservasi Lingkungan Bangladesh, 1995	Memberdayakan MOEF untuk merumuskan aturan dan pedoman pengelolaan lingkungan. Menetapkan DOE sebagai penanggung jawab penegakan prosedur AMDAL (EIA) 1997.
Aturan Konservasi Lingkungan, 1997	Polusi udara, polusi air, kebisingan.
Ordonansi Pengendalian Pencemaran Lingkungan, 1997	Standar kualitas air nasional sesuai pedoman WHO, standar kualitas udara, kebisingan, manajemen limbah padat.
Ordonansi Hama Pertanian, 1962	Zat beracun dan berbahaya.
Ordonansi Hutan Swasta, 1950	Konservasi Hutan.
Undang-Undang Perhutanan, 1927	Konservasi hutan, konservasi keanekaragaman hayati, konservasi tanah.
Undang-Undang Pelestarian Satwa Liar, 1973	Konservasi satwa liar, pengelolaan lahan basah, konservasi keanekaragaman hayati.
Undang-Undang Satwa Liar (Konservasi dan Keamanan), 2012	
Aturan Manajemen Limbah Medis, 2009	Pengelolaan limbah medis yang dihasilkan di rumah sakit, klinik, dan pusat diagnostik.
Ordonansi Perikanan Laut, 1983	Manajemen sumber daya pesisir, konservasi keanekaragaman hayati, pencemaran laut.
Undang-Undang Wilayah Perairan dan Zona Maritim, 1974	Manajemen sumber daya pesisir, pencemaran laut.
Ordonansi Otoritas Pasokan Air dan Saluran Limbah, 1963	Manajemen sumber daya air.
Aturan Pembongkaran Kapal dan Manajemen Limbah Berbahaya 2010	
Aturan Manajemen Balu Mohal (Tambang Pasir) dan Tanah 2011	
Dana Ketahanan Perubahan Iklim Bangladesh 2011	
Aturan Transit Hutan 2011	
Rancangan Undang-Undang Konservasi Sungai Nasional 2011	
Undang-Undang Konservasi dan Keamanan Satwa Liar Bangladesh 2012	
Rancangan Undang-Undang Konservasi Pohon 2012	
Undang-Undang Manajemen Bencana 2012	
Undang-Undang Kehutanan (Amandemen) 2012	



Undang-Undang Otoritas Pengembangan Energi Berkelanjutan & Terbarukan (SREDA) (Rancangan) 2012

Undang-Undang Zonasi Lahan (Rancangan) 2012

Undang-Undang Air Nasional (Rancangan) 2012

Undang-Undang Produksi Bata (Rancangan) 2012

Rencana Induk Haor (Lahan Basah) 2012–2032

Rancangan Aturan Manajemen Limbah Elektronik (e-Waste) 2018

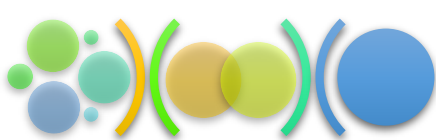
Hal ini menunjukkan bahwa dokumen hukum yang disahkan sebelumnya kurang selaras dengan tujuan dan target nasional dan internasional yang berkaitan dengan konservasi lingkungan, termasuk target hijau SDG. Kepadatan dan struktur dokumen hukum yang sudah usang ini berdampak pada cara penanganan masalah lingkungan oleh lembaga terkait.

11.4 PEMANFAATAN DATA SPASIAL & PENGAMATAN BUMI

Komisi Statistik Perserikatan Bangsa-Bangsa (DK PBB) dan Komite Ahli Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Manajemen Informasi Geospasial Global (UN-GGIM) telah mengakui kebutuhan untuk mengelola dan mengintegrasikan informasi geospasial dan statistik secara efektif di tingkat nasional dan global. Penting untuk disebutkan di sini bahwa penerapan penginderaan jauh satelit, fotogrametri untuk menganalisis foto udara telah digunakan di Bangladesh sejak tahun 1980 dengan pengembangan Organisasi Penelitian Antariksa dan Penginderaan Jauh (SPARRSO) dan kemudian munculnya serta kontribusi Lingkungan dan GIS (EGIS) di sektor air pada tahun 1990.

Selain itu, Survei Bangladesh (SoB), SRDI, BARC adalah beberapa lembaga yang memiliki kapasitas untuk menggunakan metode, data, dan alat geospasial di Bangladesh. SPARRO telah menggunakan data dari satelit meteorologi seperti National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA-AVHRR) untuk memprediksi curah hujan, tornado, dan siklon, dan hasilnya diberikan kepada BMD dan BBS untuk keperluan pelaporan dan penyebaran informasi. SoB menghasilkan peta administratif dan topografi dengan skala 1:50.000 dan foto udara yang mencakup seluruh negeri diarsipkan untuk tahun-tahun seperti 1974–1975 (skala 1:30.000), 1983/1984 (skala 1:50.000) dan 1999–2000 (skala 1:25.000).

Namun, penggunaan data ini memerlukan izin dari Kementerian Pertahanan Bangladesh. Lembaga bernama EGIS, yang kemudian berganti nama menjadi CEGIS, memiliki keahlian yang diperlukan untuk menggunakan data radar untuk pemantauan banjir; lembaga ini juga berkontribusi di bidang penelitian dataran banjir, dinamika morfologi sungai, zonasi penggunaan lahan, dan penilaian dampak lingkungan. Selain itu, pemetaan sumber daya alam, pemantauan, estimasi tanaman, penilaian dampak pasca bencana adalah beberapa bidang di mana lembaga-lembaga ini memainkan peran penting dalam menghasilkan data primer. Bangladesh saat ini memiliki kapasitas yang diperlukan untuk menghasilkan dan menangani data berbasis ruang angkasa dan GIS yang dapat menggabungkan data bencana bersama dengan data sosial-ekonomi yang terpisah untuk pembuatan kebijakan berbasis bukti. Tabel 11.3 dan 11.4 menunjukkan jenis penggunaan data GIS terapan oleh SoB.



Tabel 11.3 dan 11.4 menunjukkan bahwa terdapat sejumlah besar data geospasial yang tersedia di Bangladesh melalui berbagai organisasi sektor publik dan swasta yang dihasilkan untuk memfasilitasi tanggung jawab yang diamanatkan kepada mereka. Hampir setiap tahun permintaan akan peta dan data geospasial meningkat di Bangladesh karena meningkatnya jumlah organisasi pemerintah terkemuka di Bangladesh yang menggunakan fasilitas GIS di bidang aplikasi masing-masing, meskipun sebagian besar pengguna ini mengembangkan basis data GIS secara terpisah.

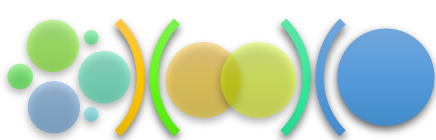
Hal ini menciptakan redundansi, inkonsistensi, dan duplikasi data bersama dengan biaya overhead awal yang sangat tinggi.⁴ Menurut Undang-Undang Statistik 2013, BBS diamanatkan untuk membangun Sistem Informasi Geografis Terpadu. BBS kini bekerja sama erat dengan SoB dan organisasi berbasis GIS lainnya untuk membangun sistem informasi geografis terintegrasi.

Tabel 11.3 Ketersediaan Data Geospasial yang Dikumpulkan oleh SoB
Skala Peta: 5.000 dan 25.000 (Sedang Diimplementasikan)

Kategori	Ringkasan Lapisan (Layers)
1 Batas Administrasi	Internasional, Divisi, Distrik, Upazila (Kecamatan) beserta pilar dan batas lembar topografi
2 Bangunan dan Struktur	Bangunan, atap bangunan, bangunan berkelompok, kawasan terbangun, monumen, dan lain-lain
3 Fasilitas	Fasilitas keagamaan, pendidikan, kesehatan, pemerintahan, dan lain-lain
4 Titik Kontrol Geodesi	Titik kontrol vertikal dan horizontal di seluruh wilayah negara
5 Hidrografi	Sungai, lahan basah, pulau/tanah Char, dan lain-lain
6 Industri	Lokasi industri utama beserta tipenya
7 Relief	Kontur, titik ketinggian (spot heights), dan lain-lain
8 Transportasi	Jalan, rel kereta api, jembatan, pelabuhan, dan lain-lain
9 Vegetasi	Hutan, area budidaya (pertanian) dan area non-budidaya

Tabel 11.4 Penggunaan Data Geospasial yang Dikumpulkan oleh SoB

Bidang Aplikasi	Aktivitas Penggunaan
<i>Pertanian</i>	Pemantauan, evaluasi, dan manajemen.
<i>Lingkungan</i>	Pemantauan, pemodelan, dan manajemen degradasi lahan; pemodelan cuaca dan iklim; prediksi erosi sungai dan pantai; manajemen banjir, dan lain-lain.
<i>Kesehatan</i>	Distribusi spasial berbagai penyakit terkait faktor lingkungan; visualisasi perubahan terjadinya penyakit dari waktu ke waktu, dan lain-lain.
<i>Intelijen</i>	Pemantauan, pelacakan, evaluasi, dan manajemen.
<i>Kehutanan</i>	Manajemen, perencanaan; penyiapan peta untuk kesesuaian lokasi spesifik, dan lain-lain.
<i>Perencanaan Regional/Lokal</i>	Pengembangan rencana, pemeliharaan, manajemen; program pengembangan infrastruktur, pendaftaran tanah, dan lain-lain.



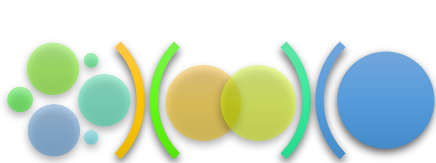
<i>Penelitian dan Pendidikan</i>	Berbagai solusi dari tingkat pribadi hingga nasional, dan lain-lain.
<i>Sumber Daya</i>	Manajemen, perencanaan, pemantauan, pencatatan, dan lain-lain.
<i>Pembahasan Sosial</i>	Analisis tren demografi dan perkembangan, dan lain-lain.
<i>Jaringan Transportasi</i>	Perencanaan dan manajemen, dan lain-lain.
<i>Penggunaan Militer</i>	IPB (Persiapan Intelijen Medan Perang), DMP (Proses Pengambilan Keputusan), perencanaan pertempuran, analisis medan, pengerahan, dan lain-lain.
<i>Penggunaan Lainnya</i>	Pemetaan tematik, pemetaan topografi, informasi lokasi dan situs, layanan konsultasi, dan lain-lain.

Selanjutnya, dalam Strategi Nasional untuk Pengembangan Statistik (NSDS), telah diidentifikasi ruang lingkup untuk modernisasi GIS dan pengembangan sistem pemetaan GIS berbasis web dengan atribut statistik lainnya.

11.5 METODE PENJAMINAN KUALITAS DAN VALIDASI

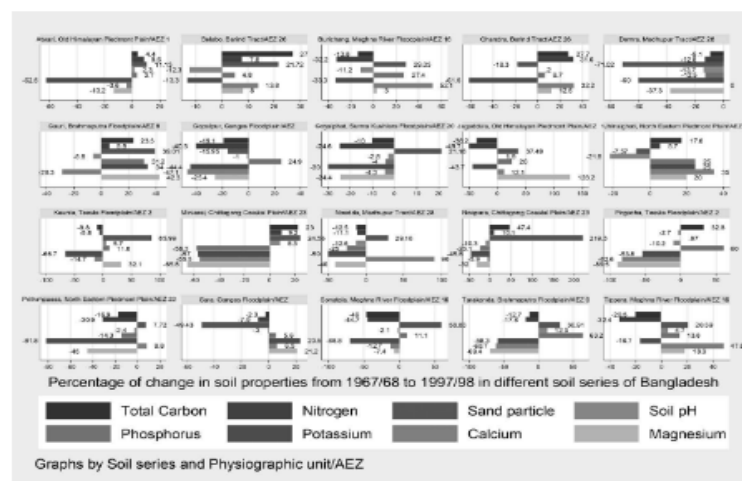
Masalah kualitas data muncul dalam berbagai cara di Bangladesh. Masalah kualitas ini dapat diuraikan pertama sebagai kekurangan dan kelemahan metode pengumpulan data, kedua sebagai pengenalan kesalahan manusia selama proses pengumpulan data, dan terakhir sebagai kurangnya pembaruan data secara berkala yang dapat menyebabkan hilangnya relevansi penggunaan data. Data tentang demografi (melalui survei sensus), tanaman pertanian, indikator sosial ekonomi, dan variabel spesifik sektor (misalnya, kesehatan dan sanitasi, pertumbuhan industri, dan angka kemiskinan) telah dikumpulkan oleh BBS sejak kemerdekaan Bangladesh. Dalam melakukan survei sensus (misalnya, populasi, pertanian), BBS menggunakan metode pengumpulan data dari rumah ke rumah, sedangkan survei lain seperti Survei Pendapatan dan Pengeluaran Rumah Tangga (HIES) lembaga tersebut didasarkan pada survei sampel representatif untuk pengumpulan data melalui sejumlah Unit Sampel Primer (PSU). Ini menunjukkan bahwa hasil survei sensus dapat memberikan informasi hingga tingkat terendah di negara tersebut, tetapi HIES mungkin hanya berlaku untuk pelaporan tingkat distrik (tidak terlalu efektif untuk digunakan di bawah tingkat distrik). BBS menyediakan pelatihan pada dua tingkatan (mengembangkan pelatih utama yang melatih enumerator dan operator entri data) untuk mengurangi kesalahan dan memastikan kualitas dalam menghasilkan data.

Lembaga seperti SoB, SRDI, Departemen Catatan Tanah dan Survei (DLRS) juga menghasilkan data tentang kepemilikan tanah dan aspek kualitas tanah. Tetapi karena kurangnya pembaruan data, beberapa data menjadi tidak relevan dan dengan demikian memberikan keadaan fenomena yang membingungkan. Sebagai contoh, data yang dihasilkan mengenai berbagai karakteristik tanah pada tahun 1960-an masih digunakan dalam pembuatan basis data agroekologi (basis data AEZ) Bangladesh, dan kumpulan data ini masih digunakan untuk perencanaan produksi tanaman pertanian dan estimasi panen. Karim dan Iqbal menunjukkan bahwa sifat-sifat tanah di berbagai AEZ Bangladesh telah berubah secara signifikan (Gambar 11.1) dan berkomentar bahwa tanpa pembaruan data tanah dan basis data AEZ terkait, penggunaan data ini untuk perencanaan pertanian mungkin memiliki sedikit



manfaat/dampak. Kemudian, selama tahun 1990-an, penggunaan data dan teknik geospasial serta data yang relevan oleh sejumlah lembaga di Bangladesh menambahkan dimensi baru dalam integrasi data non-spasial dengan variabel non-spasial dan untuk melakukan berbagai jenis analisis spasial dan aktivitas pemetaan.

Data yang dihasilkan mengenai indikator lingkungan (misalnya, badan air dan hutan) oleh ESPAN (sekarang dikenal sebagai CEGIS), basis data AEZ termasuk peta yang dikembangkan oleh BARC, proyek percontohan yang diimplementasikan oleh DLRS, data infrastruktur dan fasilitas layanan yang dihasilkan oleh Departemen Pemerintah Daerah dan Teknik (LGED) adalah beberapa contoh produksi data geospasial di Bangladesh. Namun, kumpulan data ini (baik spasial maupun non-spasial) dihasilkan beberapa dekade yang lalu dan menjadi kurang relevan saat ini karena bentang alam Bangladesh (misalnya, pengaturan geomorfologi dan badan air/sungai) sangat dinamis dan konfigurasi lahan berubah dengan cepat yang tidak dapat ditangkap dalam basis data tanpa ketentuan pembaruan secara berkala.

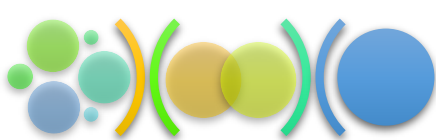


Gambar 11.1 Perubahan sifat tanah di berbagai Zona Agro-Ekologi Bangladesh.

11.6 DATASET LINGKUNGAN DARI PENGGUNA DATA

Secara umum, lembaga yang menghasilkan data lingkungan (yaitu bertindak sebagai produsen) juga menggunakan data yang sama (yaitu bertindak sebagai pengguna) untuk pelaporan publik, perencanaan dan pengelolaan sumber daya alam dan dalam beberapa kasus untuk memberikan peringatan dini bencana kepada masyarakat. Misalnya, BMD menghasilkan data tentang berbagai indikator meteorologi berdasarkan catatan harian, informasi satelit dan catatan lama untuk analisis tren iklim dan pada saat yang sama menggunakan informasi mereka sendiri untuk prakiraan jangka panjang dan analisis tren.

BMD menggunakan data satelit seperti National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA-AVHRR) dan satelit lainnya untuk memprediksi curah hujan dan peringatan siklon. Dinas Kehutanan Bangladesh juga berperan sebagai produsen dan pengguna data. Namun, lembaga seperti Pusat Prakiraan dan Peringatan Banjir (FFWC) dari Dewan Pengembangan Air Bangladesh (BWDB) tidak



menghasilkan data primer tetapi menggunakan data hidrometeorologi dan morfologi lahan yang dihasilkan oleh BWDB dan BMD, serta menggunakan data altimeter satelit untuk memprediksi sinyal peringatan banjir bagi berbagai pemangku kepentingan seperti masyarakat, kapal yang berlayar, dan para profesional serta sukarelawan penanggulangan bencana.

Lembaga lain seperti Departemen Manajemen Bencana (DDM), Palang Merah Bangladesh, mitra pembangunan seperti UNDP, UNEP, FAO menggunakan data lingkungan yang dihasilkan oleh berbagai lembaga pemerintah dan membantu berbagai lembaga dengan mengembangkan program kemitraan sehingga mereka dapat memberikan layanan yang lebih efektif kepada masyarakat.

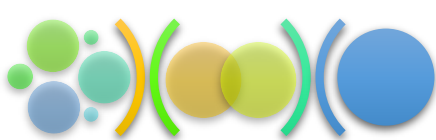
Program-program seperti Program Manajemen Bencana Komprehensif (CDMP, Fase I dan II), yang berjalan dari tahun 2003 hingga 2015, dan Aliansi Nasional untuk Inisiatif Pengurangan dan Respons Risiko (NARRI), yang berjalan sejak tahun 2010, adalah beberapa inisiatif utama yang diimplementasikan di Bangladesh yang didukung oleh konsorsium donor. Program-program ini menggunakan berbagai jenis data lingkungan dan memberikan dukungan penuh kepada lembaga pemerintah di garis depan untuk pengembangan kapasitas mereka dan memungkinkan mereka untuk memberikan dukungan masyarakat secara efektif. DDM, dengan dukungan mitra pembangunan, melakukan penilaian risiko bencana yang disebut Penilaian Risiko Komunitas (Community Risk Assessment/CRA) yang melakukan latihan sembilan langkah menggunakan berbagai jenis data lingkungan dan akhirnya menyiapkan Rencana Aksi Pengurangan Risiko (Risk Reduction Action Plan/RRAP) di tingkat akar rumput.

Selain itu, lembaga DDM ini menghasilkan data penilaian dampak pascabencana menggunakan alat pengumpulan data tingkat lapangan yang disebut "Formulir D" yang berisi 27 jenis kategori informasi kerugian dan kerusakan (Tabel 11.5) yang harus diisi oleh perwakilan pemerintah di tingkat upazila dan komisioner distrik di tingkat distrik dan dikirim ke Pusat Operasi Darurat (Emergency Operation Center/EOC) dalam waktu tiga minggu setelah terjadinya bencana. EOC kemudian mengumpulkan semua data yang dikumpulkan dari lapangan dan mengembangkan basis data kerugian dan kerusakan nasional dan meneruskannya ke Pusat Koordinasi Tanggap Bencana Nasional (National Disaster Response Coordination Center/NDRCC) yang berbasis di Kementerian Manajemen Bencana dan Bantuan (Ministry of Disaster Management and Relief/MoDMR) untuk disebarluaskan lebih luas.

11.7 TANTANGAN & KENDALA DATA LINGKUNGAN

Tantangan dan kendala yang ada di berbagai kementerian dan lembaga dalam mengumpulkan dan mengelola statistik lingkungan umumnya meliputi kekurangan sumber daya manusia yang berpengetahuan dan terlatih secara kompeten, ditambah dengan kurangnya kapasitas teknis dan keterbatasan sumber daya keuangan yang parah. Lebih spesifik lagi, tantangan utama untuk memiliki sistem pengelolaan dan pelaporan data lingkungan yang efektif di antara berbagai pemangku kepentingan meliputi hal-hal berikut:

- Kurangnya kesepakatan dan koordinasi antar kementerian/lembaga tentang bagaimana bekerja sama dan mengumpulkan, mengelola, dan berbagi data.

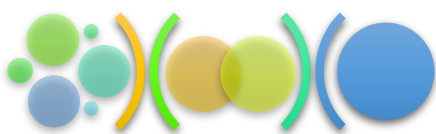


Kementerian, lembaga, dan organisasi memiliki berbagai jenis data lingkungan, tetapi karena kurangnya koordinasi dan kesepakatan formal, tidak mungkin untuk mengakses atau menggunakan data ini secara strategis;

- Kurangnya format standar atau umum dan platform berbagi/penyebaran untuk data lingkungan administratif;
- Tidak ada jaminan/pedoman kualitas data yang tersedia saat ini dan akibatnya lembaga enggan untuk memastikan kualitas data yang mereka berikan atau gunakan;
- Kurangnya anggaran tetap dan memadai telah menjadi salah satu isu penting untuk pengumpulan, kompilasi, pengolahan, dan penyebaran data lingkungan; dan
- Tidak adanya atau tidak beroperasinya kementerian, lembaga, atau organisasi yang ditunjuk sebagai titik fokus yang memiliki tanggung jawab resmi untuk pengelolaan data statistik lingkungan dan informasi lainnya.

Tabel 11.5 Kategori Informasi Kerugian dan Kerusakan yang Terdapat dalam Formulir “D”

Informasi Kategori	Deskripsi Informasi	Informasi Kategori	Deskripsi Informasi
1	Nama upazila dan distrik yang terdampak bencana	15	Kerusakan menara telepon seluler
2	Jumlah kelurahan/serikat (ward/union) yang terdampak	16	Kerusakan struktur institusi keagamaan
3	Luas area yang terdampak (dalam kilometer persegi)	17	Informasi kerusakan jaringan jalan berbagai kategori
4	Orang yang terdampak (laki-laki, perempuan, anak-anak)	18	Jumlah kerusakan jembatan dan gorong-gorong
5	Penyandang disabilitas (laki-laki, perempuan, anak-anak)	19	Kerusakan tanggul (dalam kilometer)
6	Rumah tangga yang terdampak (sebagian, total)	20	Luas area hutan yang terdampak (dalam hektar)
7	Jumlah rumah yang terdampak (beton, semi-beton, atap rumbia)	21	Jumlah institusi pendidikan yang terdampak
8	Tempat penampungan bencana yang terdampak (sebagian, total)	22	Industri yang terdampak (pertanian dan non-pertanian)
9	Nilai ternak yang hilang (kambing, domba)	23	Jumlah sumur bor yang terdampak
10	Nilai ternak yang hilang (sapi, kerbau)	24	Toilet/kakus yang terdampak
11	Nilai unggas yang hilang (ayam, bebek)	25	Jumlah reservoir air yang terdampak
12	Tanaman dan persemaian yang terdampak (dalam hektar)	26	Pusat kesehatan yang terdampak (RS, klinik, puskesmas)
13	Kerusakan tambak lainnya (misal: penetasan udang)	27	Kehilangan perahu nelayan dan peralatan (perahu, pukot, jaring)
14	Kerusakan saluran listrik (sebagian, total)		

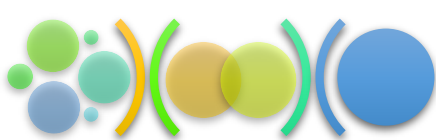


Catatan: Formulir ini digunakan oleh Departemen Manajemen Bencana (DDM) untuk mengumpulkan data kerugian dan kerusakan akibat dampak bencana.

11.8 KESIMPULAN DAN LANGKAH KE DEPAN

Meskipun memiliki sejumlah instrumen tata kelola yang baik seperti kebijakan, hukum, peraturan, dan ketentuan, degradasi lingkungan tidak dapat dihentikan seperti yang diharapkan. Selain itu, bencana yang terjadi secara cepat dan lambat dalam konteks perubahan iklim terus menimbulkan ancaman terhadap sistem dan proses fisik (Islam dan Neelim 2010). Penting untuk dicatat di sini bahwa data yang diperbarui dalam skala besar dapat membantu memahami situasi dengan benar dan mengidentifikasi pendorong perubahan tepat waktu, yang dapat memfasilitasi pengambilan rencana aksi yang tepat untuk menghentikan degradasi lebih lanjut. Pemerintah Bangladesh telah mengadopsi UN-ESSAT, UN-FDES, UN-SEEA untuk menguraikan proses pembuatan data lingkungan dan memanfaatkan alat dan metode geospasial menuju tata kelola yang efektif sehingga tekanan produksi primer didukung oleh basis sumber daya alam dan masyarakat dapat hidup dalam kondisi lingkungan yang lebih baik dengan kesehatan yang baik.

Terakhir, sejumlah rekomendasi dibuat untuk memperkuat kapasitas pembuatan data lingkungan dari lembaga/profesional dan untuk mengembangkan sistem manajemen, berbagi, dan pelaporan yang lebih baik di Bangladesh. Berikut ini adalah poin-poin pentingnya: (i) Komitmen kelembagaan diperlukan untuk menyelaraskan kegiatan pengumpulan data dan meningkatkan mekanisme berbagi data (misalnya, menugaskan petugas untuk manajemen data, menyebarluaskan data melalui portal web). (ii) Koordinasi antar lembaga harus efisien dan efektif. (iii) Berbagi data harus gratis (karena data dihasilkan menggunakan sumber daya publik) sehingga berbagi data tidak terhambat. NSDS 2013, Undang-Undang Statistik 2013, Infrastruktur Data Spasial Nasional (NSDI) harus diselaraskan dengan UN-FDES dan UN-SEEA. Selain itu, pengumpulan data juga harus diselaraskan dengan DRSF (statistik bencana yang diusulkan oleh UNESCAP) dan protokol integrasi lingkungan kemiskinan (PEI) sehingga tumpang tindih dalam pengumpulan data dapat dihindari. (iv) Masalah kualitas data harus diatasi dengan mengidentifikasi sumber kesalahan (misalnya, kekurangan metode pengumpulan data dan penggunaan teknologi untuk mengurangi kesalahan manusia). Metadata harus dipelihara untuk semua jenis data yang dihasilkan. (v) Strategi/metode pengumpulan data harus dikembangkan sesuai dengan kebutuhan skala sehingga elemen-elemen yang diperlukan dapat dipertimbangkan (pada skala tersebut) untuk pembangkitan data. (vi) Pembaruan data yang ada sangat penting karena data lama dapat menyesatkan pemantauan kemajuan dan ketentuan perencanaan. (vii) Metode akuisisi data baru, seperti penginderaan jauh satelit, harus diintegrasikan dalam proses pembangkitan data. Selain itu, data (sejauh mungkin) yang dihasilkan untuk berbagai variabel harus diacu secara geografis dan disajikan serta diarsipkan dalam kerangka pemetaan geokode sehingga variabel lingkungan dapat didistribusikan secara spasial dan analisis spasial dapat dilakukan.



BAB 12

INOVASI PADI TAHAN SIKLON UNTUK EKOSISTEM SUNDARBANS

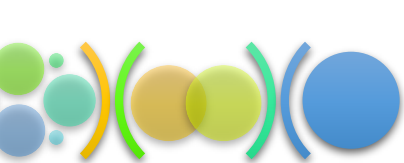
12.1 PENDAHULUAN

Siklon tropis semakin sering terjadi pada wilayah pesisir India akhir-akhir ini, dengan siklon seperti Aila (Mei 2009), Fani (April 2019), 'Bulbul' (November 2019), 'Umphun' (Mei 2020), 'Yaas' (Mei 2021), yang menyebabkan kerusakan. Penelitian terbaru Chowdhury dan rekan-rekan. menunjukkan sampel air dari sungai-sungai terdekat, termasuk 'Bidya', 'Matla', 'Hooghly', dan 'Raimangal' menunjukkan tingkat salinitas yang lebih tinggi di Sundarbans. Dalam pembahasan yang berbeda, Tenhunen dan rekan-rekan. menemukan bahwa kondisi pasca-Aila menyebabkan peningkatan signifikan pada kadar salinitas yang diukur di perairan pasang surut Sundarbans.

Tingkat air permukaan meningkat yang mungkin disebabkan oleh kecepatan kenaikan permukaan laut yang mengejutkan di Sundarbans, yang diprediksi sebesar 3,5 mm per tahun, serta seringnya terjadi siklon tropis seperti 'Aila', 'Umphun', 'Yaas' dan Sitrang yang sangat baru pada Oktober 2022 yang menyebabkan banjir air asin ke lahan pertanian, mengakibatkan ribuan hektar lahan yang tidak dapat digunakan dan tidak cocok untuk pertanian. Kerentanan tanaman padi (*Oryza sativa* L.) terhadap tekanan salinitas, yang merupakan kontributor utama bagi perekonomian pertanian pada wilayah tersebut, memperburuk masalah bagi penduduk pedesaan.

Peningkatan salinitas tanah memengaruhi hasil panen dan menyebabkan krisis pangan. Pada tahun 2050, salinitas tanah dapat menghancurkan 50% dari seluruh lahan pertanian di dunia, menurut Organisasi Pangan dan Pertanian. Sebanyak 86 juta hektar lahan di India telah rusak akibat salinitas. Produksi padi di daerah tersebut dapat sangat sulit untuk ditingkatkan atau bahkan dipertahankan ketika berada di bawah tekanan garam. Produksi padi tetap normal hingga kadar garam mencapai 3 dS m^{-1} , di luar level ini, produksi menurun hampir 13% untuk setiap kenaikan satu unit salinitas. Tanaman utama di daerah ini, padi, terhambat oleh air yang masuk ke lahan pertanian bersama pasang surut, yang menyebabkan musim tanam 'Kharif' (musim hujan) dilanda genangan air, sedangkan karena kenaikan kapiler sumber 'air tanah' di dalam lahan sawah, tanaman Boro (musim dingin) terhambat oleh tekanan garam yang signifikan.

Komponen paling penting dari lingkungan yang asin adalah NaCl. Tingkat NaCl yang tinggi telah dikaitkan dengan berbagai efek negatif, termasuk ketidakseimbangan dalam penyerapan K^+ dan Ca^{2+} oleh tanaman padi, inaktivasi enzim, penghambatan sintesis protein, penuaan dini daun, laju fotosintesis dan respirasi yang lebih rendah, dan tingkat spesies oksigen reaktif (ROS) yang lebih tinggi. Efek lainnya termasuk metabolisme nitrogen, ketersediaan air, penyerapan ion. Salinitas juga berkontribusi pada sejumlah masalah perkecambahan pada biji dan propagul.



Proses peroksidasi lipid, yang dipicu oleh tingkat ROS tinggi yang terkait dengan stres dan menyebabkan kerusakan DNA dan protein, sangat merugikan sel tanaman dan menghancurkan lipid membran. Produksi ROS dan/atau penekanan sistem yang melindungi terhadapnya dianggap setidaknya sebagian besar bertanggung jawab atas konsekuensi buruk dari berbagai tekanan lingkungan ini.

Sebagian besar tekanan abiotik, seperti suhu dingin, toksisitas logam berat), kekeringan, dan garam, tampaknya mengakibatkan peningkatan ROS, yang juga dihasilkan selama metabolisme aerobik. Mekanisme pertahanan tanaman meliputi pelepasan enzim seperti katalase (EC 1.11.1.6), glutathione reduktase (EC 1.6.4.2), askorbat peroksidase (EC 1.11.1.11), dan glutathione reduktase (EC 1.15.1.1), serta antioksidan hidrofilik dan hidrofobik (α -tokoferol, karotenoid), asam askorbat, dan glutathione. Untuk menjaga keseimbangan ROS, tanaman menghasilkan enzim antioksidan 'SOD' dan 'CAT', tetapi 'prolin' membantu tanaman melawan 'stres osmotik'.

Sistem antioksidatif yang lebih efektif biasanya dikaitkan dengan ketahanan yang lebih besar terhadap tantangan lingkungan. Ketika konsentrasi garam atau suhu tidak menguntungkan, osmo-protektan meningkatkan 'tekanan osmotik' sitoplasma dan menjalankan fungsi vital dalam 'stabilisasi' 'protein' dan 'membran'. Osmo-protektan terdiri dari tiga jenis utama: betain dan senyawa terkait, 'poliol dan gula', dan asam amino seperti 'prolin'.

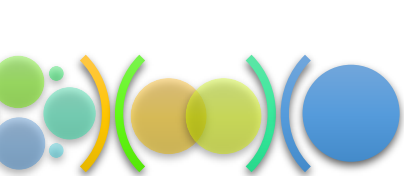
Tanaman yang mengalami stres garam atau air menghasilkan lebih banyak 'prolin', yang telah dikaitkan dengan kemampuan suatu spesies untuk menahan stres osmotik. Meskipun beberapa peneliti percaya bahwa pentingnya prolin dalam meningkatkan ketahanan terhadap stres garam masih dapat diperdebatkan; hal ini mungkin merupakan indikasi cedera akibat stres daripada pengukuran toleransi stres. Oleh karena itu, analisis yang lebih mendalam tentang fungsi penumpukan 'prolin' dalam stres garam diperlukan. Menurut Dubey dan Rani, padi adalah tanaman dengan toleransi garam sedang yang hadir dalam berbagai kultivar sensitif salinitas.

Salinitas merupakan masalah serius yang tidak hanya menurunkan potensi pertanian tetapi juga berdampak pada metode mata pencaharian petani pada wilayah Sundarbans. Produksi varietas padi lokal telah terpengaruh secara negatif oleh peningkatan salinitas tanah, dan telah terjadi pergeseran ke arah kultivar dan praktik yang toleran terhadap garam. Jadi, di sini muncul pertanyaan bagaimana stres garam memengaruhi aktivitas enzim stres dan kandungan prolin pada bibit padi di lingkungan pesisir? Untuk menjawab pertanyaan penelitian tersebut, pembahasan ini bertujuan untuk memeriksa kemampuan Nona Bokra dan IET 4786 (kontrol) dalam mengatasi dampak 'stres garam' pada tingkat perkecambahan, aktivitas enzim antioksidan, dan pembentukan 'prolin'.

12.2 UJI TOLERANSI SALINITAS PADI

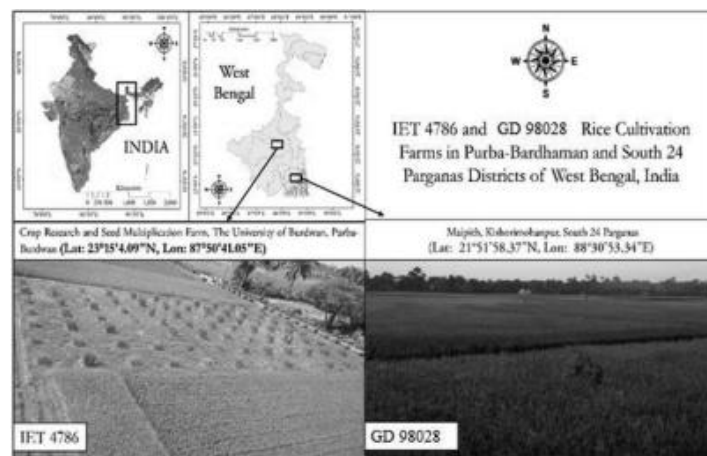
Lokasi Dan Pengumpulan Benih

Benih dari varietas 'IET 4786' dan varietas 'Nona Bokra' dipertimbangkan untuk percobaan ini. Untuk pengumpulan benih, penelitian ini berfokus pada 'Crop Research and



Seed Multiplication Farm (CRSMF)', (Lat: 23°15'4.09"N, Lon: 87°50'41.05"E) di Distrik Purba Burdwan dan Maipith (Lat: 21°51'58.37"N, Lon: 88°30'53.34"E) di Distrik South 24 Parganas, Sundarbans, negara bagian Benggala Barat, India (Gambar 12.1). Benih varietas padi 'IET 4786' dikumpulkan dari CRSMF dan benih *Nona Bokra* dikumpulkan dari Maipith oleh petani setempat. Salinitas tanah di CRSMF adalah 2,45 g l⁻¹, sedangkan di daerah pertanian Maipith, salinitasnya adalah 14,78 g l⁻¹.

'*Nona Bokra*' adalah salah satu varietas yang banyak digunakan, berdaya hasil tinggi, dan toleran terhadap salinitas yang telah ditemukan di India sejauh ini dan disarankan untuk budidaya spesifik lokasi di lingkungan salin. Setelah sterilisasi selama 24 jam dengan konsentrat '0,05% prochloraz emulsifiable', benih dibilas secara menyeluruh dengan air keran untuk menghilangkan pestisida.



Gambar 12.1 Lokasi penelitian varietas padi var. 'IET 4786' dan var. 'GD 98028'.

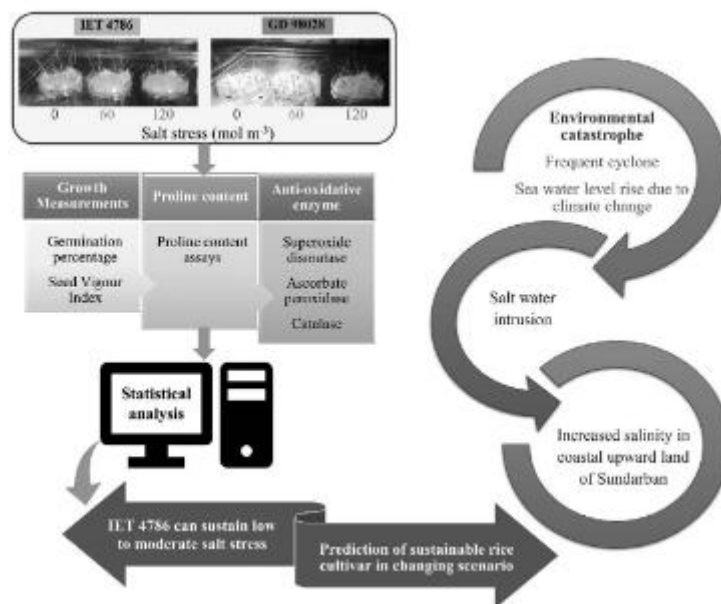
Desain Eksperimental Dan Pembahasan Perkecambahan Benih

Untuk menilai stres NaCl pada perkecambahan, pada kertas saring Whatman No. 2, 20 benih dari setiap kultivar didistribusikan ke dalam cawan petri berukuran 10 cm. Ke dalam cawan petri tersebut ditambahkan 5 ml air suling (digunakan sebagai kontrol) atau larutan NaCl. Benih disimpan dalam ruang lingkungan pada suhu 30°C dengan pencahayaan 12 jam selama 72 jam. Volume 5 ml air suling (kontrol) atau larutan NaCl (60 dan 120 mol m⁻³) ditambahkan ke dalam cawan petri setelah dua, tiga, dan empat hari. Selama enam hari, jumlah benih yang berkecambah dihitung setiap hari.

Perlakuan Stres NaCl Pada Bibit

Bibit kemudian dipelajari untuk menguji bagaimana stres NaCl membatasi pertumbuhan bibit. Di dalam 'ruang lingkungan' yang diatur, periode fotoperiod 16 jam dipertahankan pada suhu 30°C di siang hari dan 22°C di malam hari, serta kelembaban relatif 70%. Hal ini dilakukan dengan menggunakan lampu metal halida. Penelitian ini dilakukan selama 15 hari selanjutnya. Larutan nutrisi tersebut terdiri dari 0,88 mol m⁻³ K₂SO₄, 1 mol m⁻³ Ca(NO₃)₂, 1 mol m⁻³ (NH₄)₂SO₄, 1 mol m⁻³ MgSO₄, 0,25 mol m⁻³ KHPO₄, 0,1 mol m⁻³ KCl, 40 mol m⁻³ Fe-EDTA, 10 mol m⁻³ H₃BO₄, 1 mol m⁻³ MnSO₄, 1 mol m⁻³ ZnSO₄, 0,1 mol m⁻³ CuSO₄,

dan $0,01 \text{ mol m}^{-3}$ KCl ($(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_{24}$). Larutan ini diganti setiap dua hari, dan 1 N HCl digunakan untuk menyesuaikan pH menjadi 6. Tanaman diberi larutan nutrisi NaCl 0, 60, atau 120 mol m^{-3} hingga 15 hari. Pada hari ke-8, ke-11, dan ke-14 setelah terpapar garam, sampel daun dan akar diambil (Gambar 12.2). Sampel daun dikumpulkan, ditimbang, dan disimpan di dalam freezer untuk diperiksa aktivitas enzim antioksidan dan 'prolin'. Setiap percobaan dilakukan secara independen setidaknya tiga kali.



Gambar 12.2 Kondisi kontrol dan stres salinitas setelah delapan hari perkecambahan biji pada varietas padi 'IET 4786' dan 'GD 98028'.

Pengukuran Pertumbuhan

Untuk sampel bibit padi yang diberi perlakuan garam yang dipilih secara acak, rasio pertumbuhan dihitung. Setelah pengeringan, berat segar dan panjang akar dihitung dengan menghitung interval antara awal dan akhir perlakuan NaCl.

Pengujian Enzim Antioksidatif Dan Kandungan 'Prolin'

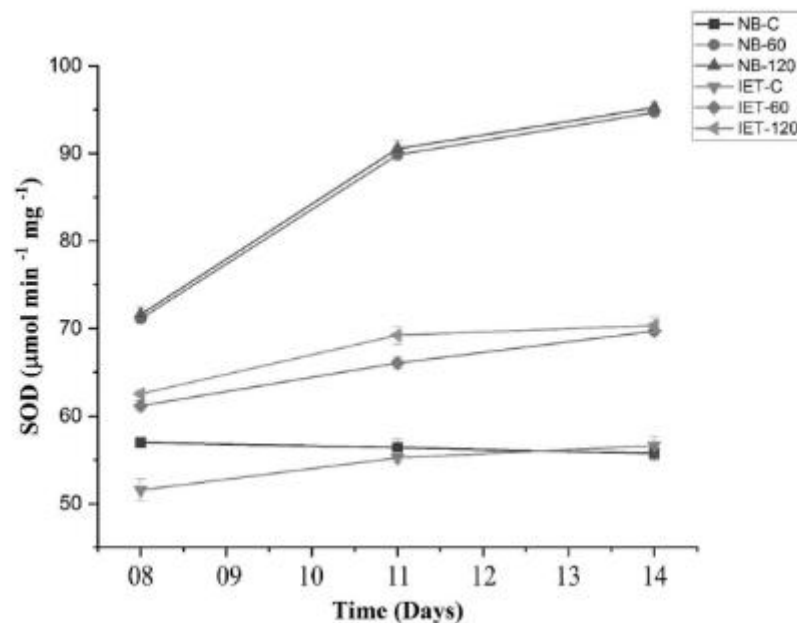
Untuk pengujian enzim antioksidan dan kandungan 'prolin', sampel daun sebanyak 0,5 g dibekukan menggunakan nitrogen cair dan digiling halus. Aktivitas superoksida dismutase ('SOD', EC 1.15.1.1) diuji mengikuti metode McCord dan Fridovich. Untuk memastikan aktivitas APX, laju oksidasi askorbat pada 290 nm diukur. Aktivitas katalase ('CAT', EC 1.11.1.6) diukur dengan mengamati penurunan absorbansi pada 240 nm yang disebabkan oleh oksidasi H_2O_2 . Kandungan 'prolin' ditentukan menggunakan protokol yang telah ditentukan.

Analisis Statistik

Data yang dikumpulkan dari berbagai enzim dianalisis menggunakan analisis varians dua arah (ANOVA) dengan menggunakan paket analisis statistik: SPSS (Versi 23).

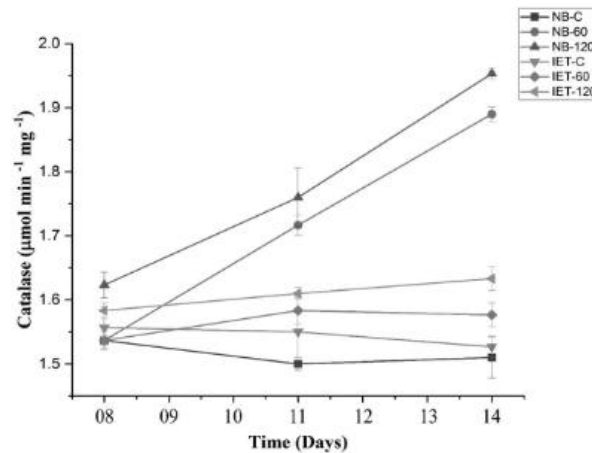
12.3 MEKANISME SALINITAS PADI

Tanpa adanya tekanan NaCl, benih padi 'IET 4786' berkecambah lebih cepat daripada 'Nona Bokra' (Gambar 12.3), laju perkecambahan untuk kedua kultivar melambat seiring dengan peningkatan konsentrasi NaCl. Berbeda dengan 'Nona Bokra', 'IET 4786' memiliki dampak penghambatan yang lebih kuat. Misalnya, laju perkecambahan 'Nona Bokra' tetap 80% setelah enam hari tekanan garam, dengan adanya 120 mol m⁻³ NaCl, sedangkan untuk 'IET 4786', hanya sekitar 10% pada 120 mol m⁻³ NaCl.



Gambar 12.3 Aktivitas superoksida dismutase (SOD) dari varietas 'IET 4786' dan varietas 'GD 98028'. Di sini NB-C = GD 98028 pada kondisi kontrol, NB-60 = GD 98028 pada 60 mol m⁻³ NaCl, NB-120 = GD 98028 pada 120 mol m⁻³ NaCl, IET C = IET 4786 pada kontrol, IET 60 = IET 4786 pada 60 mol m⁻³ NaCl, IET 120 = IET 4786 pada 120 mol m⁻³ NaCl.

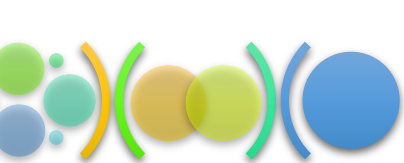
Aktivitas 'SOD' meningkat secara bertahap seiring peningkatan salinitas pada 'Nona Bokra' maupun 'IET 4786'. Namun, 'Nona Bokra' menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan 'IET 4786' ($p < 0,05$). Selain itu, tingkat aktivitas 'SOD' basal pada kultivar toleran garam 'Nona Bokra' secara substansial lebih tinggi daripada kultivar sensitif garam 'IET 4786'. Nilainya adalah $69,7 \pm 0,35$, $70,37 \pm 0,95$, $94,68 \pm 0,31$ dan $95,23 \pm 0,64$ $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ protein berat segar pada akhir percobaan 14 hari dalam kasus perlakuan NaCl 60 dan 120 mol m⁻³, masing-masing untuk 'IET 4786' dan 'Nona Bokra' (Gambar 12.4).

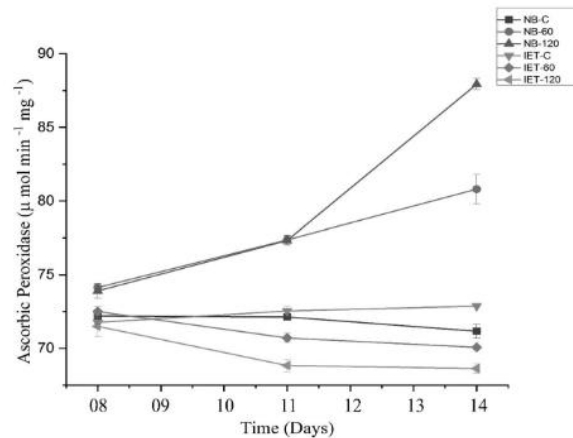


Gambar 12.4 Aktivitas katalase (CAT) dari var. 'IET 4786' dan var. 'GD 98028'. Di sini NB-C = GD 98028 pada kondisi kontrol, NB-60 = GD 98028 pada 60 mol m⁻³ NaCl, NB-120 = GD 98028 pada 120 mol m⁻³ NaCl, IET C = IET 4786 pada kontrol, IET 60 = IET 4786 pada 60 mol m⁻³ NaCl, IET 120 = IET 4786 pada 120 mol m⁻³ NaCl.

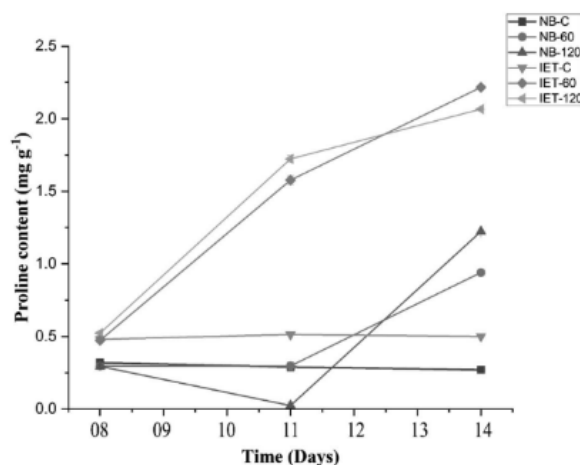
Mirip dengan 'SOD', pada daun tanaman yang tidak mengalami stres, aktivitas 'CAT' lebih tinggi pada kultivar toleran '*Nona Bokra*' yaitu $1,89 \pm 0,02$ dan $1,95 \pm 0,01$ $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ protein berat segar dibandingkan dengan kultivar sensitif garam IET 4786 yaitu $1,58 \pm 0,02$ dan $1,63 \pm 0,02$ $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ protein berat segar pada akhir percobaan 14 hari dalam perlakuan NaCl 60 mol m⁻³ dan 120 mol m⁻³ (Gambar 12.5).

Berbeda dengan kultivar 'IET 4786' yang sensitif terhadap garam, kultivar '*Nona Bokra*' yang toleran terhadap garam menunjukkan peningkatan kadar 'APX' yang signifikan, yaitu $80,8 \pm 1,00$ dan $87,93 \pm 0,38$ $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ protein berat segar seperti yang terlihat pada profil aktivitas 'APX' (Gambar 12.6) pada akhir percobaan 14 hari dalam perlakuan NaCl 60 mol m⁻³ dan 120 mol m⁻³, sedangkan IET 4786 menurun seiring dengan peningkatan stres salinitas menjadi $70,07 \pm 0,03$ dan $68,63 \pm 0,32$ $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ protein berat segar, masing-masing. Meskipun aktivitas 'APX' meningkat pada 'IET 4786' di bawah tekanan garam hingga 120 mol m⁻³, aktivitas tersebut masih jauh lebih rendah daripada pada daun '*Nona Bokra*' yang tidak mengalami tekanan (Tabel 12.1 dan 12.2). Indeks daya kecambah benih (SVI) dan persentase perkecambahan dihitung dan nilainya disajikan dalam Tabel 12.3. SVI untuk 'IET 4786' ditemukan menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi NaCl. Namun, SVI konsisten untuk varietas '*Nona Bokra*' pada konsentrasi NaCl 0 dan 60 mol m⁻³.





Gambar 12.5 Aktivitas askorbat peroksidase (APX) dari varietas 'IET 4786' dan varietas 'GD 98028'. Di sini, NB-C = GD 98028 pada kondisi kontrol, NB-60 = GD 98028 pada 60 mol m⁻³ NaCl, NB-120 = GD 98028 pada 120 mol m⁻³ NaCl, IET C = IET 4786 pada kontrol, IET 60 = IET 4786 pada 60 mol m⁻³ NaCl, IET 120 = IET 4786 pada 120 mol m⁻³ NaCl.

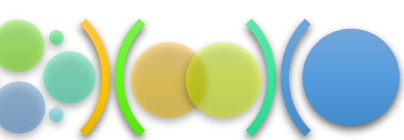


Gambar 12.6 Kandungan prolin dalam akar varietas 'IET 4786' dan varietas 'GD 98028'. Di sini, NB-C = GD 98028 pada kondisi kontrol, NB-60 = GD 98028 pada 60 mol m⁻³ NaCl, NB-120 = GD 98028 pada 120 mol m⁻³ NaCl, IET C = IET 4786 pada kontrol, IET 60 = IET 4786 pada 60 mol m⁻³ NaCl, IET 120 = IET 4786 pada 120 mol m⁻³ NaCl.

Akumulasi 'prolin' sudah terlihat pada kedua kultivar, meskipun secara konsisten lebih tinggi pada kultivar 'IET 4786' yang sensitif terhadap garam daripada '*Nona Bokra*' yang toleran terhadap garam setelah 11 dan 14 hari perlakuan stres ($p < 0,05$) (Gambar 12.7). Dibandingkan dengan akar, daun memiliki kandungan 'prolin' yang lebih tinggi ($p < 0,05$) (Gambar 12.7).

Tabel 12.1 Analisis Varians ANOVA Dua Arah dari Desain Acak Lengkap (Analisis Varians Dua Arah), di mana Varietas dan Perlakuan (Konsentrasi NaCl) dan Interaksinya pada Hari ke-0

Statistics



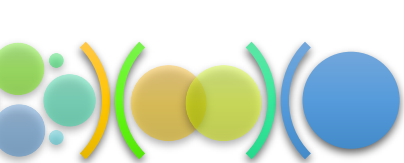
Variabel	Sumber Variasi	Rata-rata Kuadrat	Nilai-F	Nilai-P	R^2 Adj
SOD	Varietas	298.250	167.118	<0.05	0.968
	Perlakuan	306.004	171.463	<0.05	
	Varietas x Perlakuan	8.750	4.903	<0.05	
CAT	Varietas	0.000	0.214	>0.05	0.466
	Perlakuan	0.008	8.310	<0.05	
	Varietas x Perlakuan	0.001	1.500	>0.05	
AP	Varietas	9.976	14.791	<0.05	0.565
	Perlakuan	2.672	3.961	<0.05	
	Varietas x Perlakuan	1.474	2.185	>0.05	

Tabel 12.2 Analisis Varians ANOVA Dua Arah dari Desain Acak Lengkap (Analisis Varians Dua Arah) di mana Varietas dan Perlakuan (Konsentrasi NaCl) dan Interaksinya Diwakili pada Hari ke-6

Variabel	Sumber Variasi	Statistics			R^2 Adj
		Rata-rata Kuadrat	Nilai-F	Nilai-P	
SOD	Varietas	298.250	167.118	<0.05	0.968
	Perlakuan	306.004	171.463	<0.05	
CAT	Varietas	0.000	0.214	>0.05	0.466
	Perlakuan	0.008	8.310	<0.05	
AP	Varietas	401.389	544.051	<0.05	0.990
	Perlakuan	59.067	80.061	<0.05	
	Varietas x Perlakuan	167.244	226.686	<0.05	

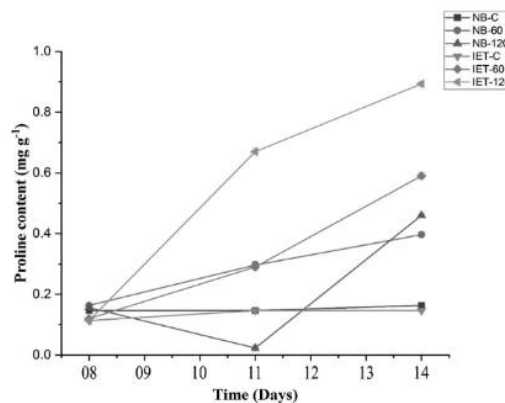
Tabel 12.3 Indeks Daya Tumbuh Benih dan Persentase Perkecambahan Varietas Padi IET 4786 dan GD 98028 dalam Berbagai Kondisi Stres Garam

Cekaman Garam	Varietas Padi	Indeks Vigor Benih (SVI)	Perkecambahan (%)
0 mol m ⁻³	GD 98028/Nona Bokra	2.60 ± 0.07	87 ± 1.22
	IET 4786	2.77 ± 0.03	97 ± 2.87
60 mol m ⁻³	GD 98028/Nona Bokra	2.60 ± 0.10	88 ± 1.44
	IET 4786	2.27 ± 0.22	78 ± 3.86
120 mol m ⁻³	GD 98028/Nona Bokra	2.21 ± 0.08	82 ± 1.65
	IET 4786	0.26 ± 0.05	10 ± 1.54

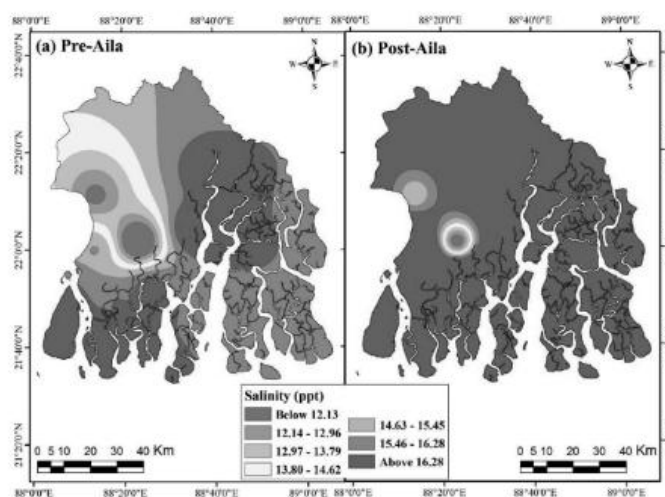


Kadar 'prolin' tertinggi terdapat pada daun kultivar sensitif garam 'IET 4786' ketika diberi dosis NaCl menengah yaitu 60 mol m^{-3} setelah 14 hari stres, dan sedikit lebih rendah pada perlakuan stres tertinggi pada 120 mol m^{-3} .

Distribusi salinitas tanah dicatat di seluruh Sundarbans sebelum dan sesudah peristiwa siklon 'Aila' terjadi (Gambar 12.8).



Gambar 12.7 Kandungan prolin pada daun varietas 'IET 4786' dan varietas 'GD 98028'. Di sini, NB-C = GD 98028 pada kondisi kontrol, NB-60 = GD 98028 pada 60 mol m^{-3} NaCl, NB-120 = GD 98028 pada 120 mol m^{-3} NaCl, IET C = IET 4786 pada kondisi kontrol, IET 60 = IET 4786 pada 60 mol m^{-3} NaCl, IET 120 = IET 4786 pada 120 mol m^{-3} NaCl.



Gambar 12.8 Distribusi skenario salinitas Sundarbans (a) sebelum 'Aila' dan (b) setelah 'Aila'.

12.4 MEKANISME ADAPTASI & TOLERANSI SALINITAS

Stres garam memengaruhi hampir semua fungsi fisiologis tanaman. Tanaman yang mengalami kondisi stres lingkungan seperti itu sering menderita kerusakan oksidatif karena ketidakseimbangan antara produksi ROS seperti radikal superoksida, hidrogen peroksida, dan radikal hidroksil dan aksi timbal balik antioksidan.

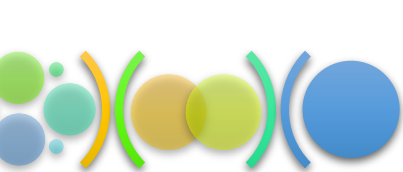
Mohammed dan Sen berhipotesis bahwa stres osmotik atau toksisitas ion tertentu menyebabkan penurunan perkecambahan dalam media salin. Kebalikan dari reaksi ini terjadi ketika biji dipindahkan dari 'air garam' ke 'air suling'. Dalam penelitian ini, '*Nona Bokra*' menunjukkan perkecambahan yang lebih unggul selama periode perlakuan salinitas daripada 'IET 4786', menunjukkan bahwa yang terakhir lebih tahan terhadap stres yang disebabkan oleh NaCl. Secara umum diyakini bahwa kemampuan tanaman untuk mengendalikan atau menghalangi masuknya ion Na dari akar ke daun menentukan seberapa tahan tanaman tersebut terhadap salinitas. Keseimbangan nutrisi dan kontrol osmotik sering terganggu oleh kandungan natrium yang lebih tinggi, yang mengakibatkan toksisitas ion spesifik.

Tingkat produksi radikal superoksida dan hidrogen peroksida dalam kondisi salinisasi merupakan indikator terbaik dari tingkat keparahan stres oksidatif. Enzim sistem antioksidan diteliti pada daun kultivar yang sensitif terhadap garam dan yang toleran terhadap garam untuk memastikan fungsi sistem pembersihan ROS dalam mencegah stres oksidatif. Temuan mengenai aktivitas 'SOD' ini sesuai dengan temuan sebelumnya pada '*Solanum tuberosum*', '*Brassica juncea*', dan '*Najas graminea*', di mana tanaman sensitif menunjukkan tingkat aktivitas enzim basal yang lebih rendah daripada kultivar toleran. Aktivitas 'SOD' meningkat pada kultivar gandum yang toleran garam, kapas, dan '*Catharanthus roseus*' sedangkan menurun pada kultivar yang sensitif terhadap garam, yang serupa dengan temuan saat ini.

Namun, juga telah diamati bahwa salinitas meningkatkan aktivitas 'SOD' baik pada kultivar B. juncea yang toleran garam maupun yang sensitif garam, dengan tingkat basal yang lebih besar pada kultivar yang toleran garam. Peningkatan aktivitas 'SOD' diamati pada semua kultivar resisten yang mampu menahan 'stres oksidatif'. Pada kultivar yang 'sensitif garam', penurunan aktivitas 'SOD' dapat menekan kemampuan untuk melawan 'stres oksidatif'. Dengan menyimpulkan peran potensial suatu enzim ketika terpapar salinitas, aktivitas 'SOD' meningkat dan dengan aktivitas basal yang tinggi pada '*Nona Bokra*'.

'CAT' adalah enzim detoksifikasi yang memecah hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen. Hasil penelitian ini mendukung temuan Pal et al. dan Mutlu et al., di mana peningkatan aktivitas 'CAT' diamati pada kultivar padi dan gandum yang 'toleran garam' dan 'sensitif garam'. Menurut Azooz dan rekan-rekan., jenis jagung yang toleran garam menunjukkan peningkatan progresif dalam lonjakan 'CAT' dengan meningkatnya tekanan salinitas, tetapi kultivar yang sensitif garam menunjukkan penurunan yang cukup besar. Ketika makrofit air dikenai tekanan NaCl 200 mol m^{-3} , Rout dan Shaw dan Dolatabadian dan rekan-rekan. juga mencatat peningkatan aktivitas 'CAT'.

Terdapat hubungan yang berbanding lurus antara aktivitas 'CAT' dan pembentukan H_2O_2 dalam kondisi salinitas. Menurut hasil penelitian, genotipe buncis yang toleran terhadap garam menunjukkan lonjakan 'CAT' yang jauh lebih besar dibandingkan dengan genotipe yang sensitif baik sebelum maupun setelah berbunga, yang membantu genotipe ini untuk mendetoksifikasi H_2O_2 yang dihasilkan dalam kondisi salin. Aktivitas 'CAT' yang tinggi ditemukan pada kultivar padi di tanah salin. Jika dibandingkan dengan IR 29, varietas yang rentan terhadap salinitas, 'Pokkali' (varietas yang toleran terhadap salinitas) menghasilkan hasil yang identik dengan '*Nona Bokra*' dari temuan saat ini.



Benavídes dan rekan-rekan. menunjukkan tingkat basal 'APX' yang lebih tinggi pada klon kentang toleran garam dibandingkan pada klon sensitif garam, yang konsisten dengan temuan ini. Dengan cara yang serupa, Meneguzzo dan rekan-rekan. menemukan bahwa di bawah tekanan NaCl, kultivar gandum sensitif garam meningkatkan aktivitas 'APX' mereka secara signifikan lebih banyak daripada kultivar gandum toleran garam. Rout dan Shaw mengamati tingkat aktivitas 'APX' yang tinggi pada 'makrofit air' 'sensitif garam' sebagai respons terhadap perlakuan NaCl, dan penurunan aktivitas pada kultivar resisten.

Sebaliknya, Chawla dan rekan-rekan. menunjukkan peningkatan aktivitas yang lebih besar pada daun genotipe jagung yang toleran garam daripada yang sensitif garam. 'Gandum', 'kapas', dan halofit 'Cakile maritima' juga menunjukkan peningkatan aktivitas 'APX' dengan peningkatan stres garam, menunjukkan bahwa tingkat basal 'APX' yang tinggi dan peningkatan lonjakan 'APX' yang diinduksi garam mungkin dapat memberikan toleransi dengan mendetoksifikasi H₂O₂ yang dihasilkan ketika tanaman terpapar kondisi salin.

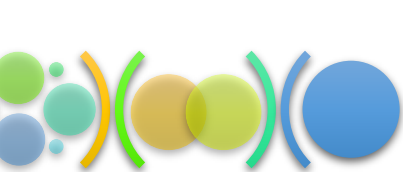
Salah satu perubahan adaptasi yang paling menonjol yang diamati pada banyak tanaman sebagai respons terhadap berbagai stresor biotik/abiotik adalah akumulasi 'prolin'. Konsentrasi 'prolin' juga terakumulasi lebih sedikit pada kultivar tahan garam 'IET 4786', menunjukkan bahwa penyesuaian osmotik mungkin merupakan faktor dalam cedera stres daripada komponen penumpukan 'prolin' sebagai akibat dari ketahanan garam. Karena fungsinya yang penting sebagai pengkelat logam, antioksidan, osmolit yang sesuai, dan molekul pensinyalan, tingkat seluler 'prolin' yang lebih tinggi sering dikaitkan dengan kinerja tanaman yang lebih baik dalam kondisi stres. Pengurangan pemecahan 'prolin', sintesis *de novo*, atau keduanya mungkin bertanggung jawab atas penumpukan 'prolin' yang responsif terhadap stres. Selain itu, hasil pembahasan ini sejalan dengan temuan sebelumnya dari Lutts *et al.*

Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa var. IET 4786 dapat dipromosikan ke zona salinitas sedang di Sundarbans (situasi tanah pasca-Aila, Gambar 12.8), yang sebelumnya tidak dipraktikkan pada wilayah ini. Pembahasan ini menemukan bahwa varietas IET 4786 dibudidayakan pada wilayah dengan salinitas di bawah 13 ppt. Namun, perubahan pasca-Aila memaksa tanah pertanian menuju zona yang lebih salin, di mana varietas IET 4786 memenuhi syarat sebagai pilihan yang lebih baik selain kultivar Nona Bokra.

Dalam pembahasan ini, varietas IET 4786 disorot karena memiliki permintaan pasar yang baik. Namun, pembahasan tentang sifat biokimia varietas toleran salinitas lainnya dapat memberikan hasil yang berbeda dan tentu saja menimbulkan ketidakpastian terkait dengan penelitian ini. Percobaan yang dilakukan dalam pembahasan ini dilanjutkan hingga 15 hari di ruang lingkungan untuk mengamati pola perkecambahan dan pertumbuhan, tetapi kondisi lapangan sebenarnya dapat bervariasi dari musim ke tahun sehingga mengakibatkan variasi hasil.

12.5 IMPLIKASI BAGI AKADEMISI DAN IMPLIKASI BAGI PRAKTISI

Dalam pembahasan ini mengungkapkan prinsip fisiologis dan biokimia dari kultivar padi toleran garam. Padi toleran garam '*Nona Bokra*' dan padi sensitif garam 'IET 4786'



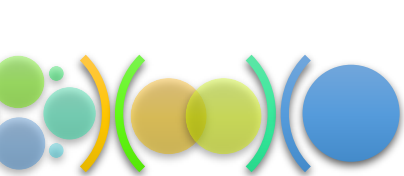
berbeda dalam penumpukan prolin, aktivitas enzim antioksidan, dan tingkat perkecambahan, yang dapat mengungkapkan fisiologi stres tanaman. Dengan data ini, para ilmuwan dapat mempelajari akar genetik dan molekuler dari varietas toleran garam dan menciptakan varietas padi yang lebih tahan. Pembahasan ini juga menunjukkan bahwa enzim stres (SOD, CAT, dan APX) dan osmo-protaktan (prolin) penting dalam menganalisis bagaimana tanaman bereaksi terhadap stres abiotik, membuka jalan bagi penelitian biokimia tanaman dan adaptasi stres.

Petani, terutama di lokasi pesisir seperti Sundarbans, dapat memanfaatkan temuan pembahasan ini untuk memilih dan menanam varietas padi toleran garam. Karena '*Nona Bokra*' toleran terhadap kondisi salinitas tinggi, varietas ini mungkin merupakan tanaman yang layak di daerah dengan salinitas tinggi, dan sudah dibudidayakan. Dalam beberapa waktu terakhir, Sundarbans sering mengalami badai siklon ringan dan berat. Perubahan iklim global menyebabkan kenaikan permukaan air laut dan Sundarbans sebagai pulau pesisir menghadapi tantangan intrusi air asin.

Bencana lingkungan ini menyebabkan peningkatan salinitas di dataran tinggi Sundarbans. Di daerah tersebut, varietas padi tradisional yang sensitif terhadap garam sebagian besar dibudidayakan, dan untuk mengatasi skenario perubahan ini, adaptasi varietas toleran garam ('*Nona Bokra*') lebih sulit daripada fokus pada varietas sensitif garam yang ada ('IET 4786') yang dapat bertahan di daerah dengan salinitas ringan hingga sedang. Pengetahuan tentang fungsi prolin dan enzim antioksidan dalam respons stres tanaman dapat memengaruhi taktik pengelolaan toleransi stres tanaman. Strategi yang mempertahankan atau meningkatkan aktivitas enzim dapat meningkatkan ketahanan tanaman.

12.6 KESIMPULAN

Temuan percobaan ini menunjukkan variasi yang signifikan antara respons perkecambahan dan pertumbuhan dua kultivar padi. Hasil untuk enzim antioksidan 'SOD', 'APX', dan 'aktivitas konstitutif dan terinduksi garam' CAT juga menunjukkan bahwa enzim-enzim tersebut tidak berkontribusi secara signifikan terhadap perolehan toleransi garam pada *Nona Bokra*. Jumlah akumulasi 'prolin' yang jauh lebih besar akibat stres pada 'IET 4786' juga menunjukkan dengan jelas bahwa tanaman yang terpapar NaCl memiliki kadar asam amino tersebut yang lebih tinggi. Benih '*Nona Bokra*' juga menunjukkan kandungan 'prolin' yang lebih tinggi karena tingkat perkecambahannya yang lebih tinggi. Selain itu, konsentrasi 'prolin' meningkat lebih sedikit pada kultivar '*Nona Bokra*', menunjukkan bahwa penyesuaian osmotik mungkin merupakan faktor yang berkontribusi terhadap kerusakan akibat stres, bukan sebagai produk sampingan dari perkembangan 'prolin' sebagai hasil dari resistensi garam. Oleh karena itu, kultivar padi 'IET 4786' dapat direkomendasikan untuk budidaya dalam kondisi stres garam ringan hingga sedang di ekosistem Sundarbans, yang belum dilaporkan hingga saat ini.

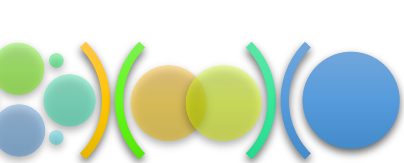


Implikasi Pembangunan Berkelanjutan

Pembahasan ini mengungkapkan bahwa 'IET 4786' berkelanjutan dalam kondisi stres garam ringan hingga sedang. Untuk menemukan varietas lain yang serupa, diperlukan penelitian berbasis uji coba dan kesalahan yang ekstensif, yang merupakan perjuangan berat. Identifikasi varietas tersebut menggunakan pemodelan prediktif berbasis pembelajaran mesin dengan fitur varietas sensitif garam yang teridentifikasi yang dapat bertahan dalam peningkatan salinitas mungkin sangat berguna serta solusi yang hemat biaya dan waktu. Model berbasis kecerdasan buatan (AI) semacam itu dapat memprediksi produktivitas pertanian setelah perubahan lingkungan. Pemerintah, ilmuwan, dan otoritas terkait lainnya dapat menggunakan model ini untuk mengembangkan praktik dan manajemen pertanian berkelanjutan untuk menghadapi perubahan iklim dan stresor lainnya.

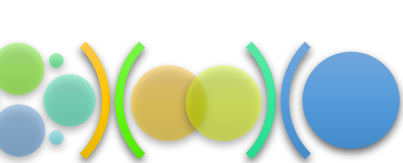
Kumpulan data besar dari eksperimen seperti ini dapat membantu sistem berbasis AI untuk memprediksi kinerja kultivar padi dalam berbagai kondisi stres. Hal ini dapat membantu mengidentifikasi jenis optimal untuk lokasi tertentu, meningkatkan produksi pertanian dan mengurangi pemborosan sumber daya.

Untuk memastikan ketahanan pangan global dalam situasi iklim yang berubah, diperlukan lebih banyak varietas padi yang toleran terhadap garam. Selain menemukan varietas yang sudah ada, diperlukan juga beberapa varietas hasil rekayasa genetika baru yang memiliki toleransi garam tinggi dan produktivitas tinggi. Model prediksi berbasis ML dapat menyarankan kombinasi optimal dari karakteristik genetik yang dapat mempercepat penemuan varietas baru.

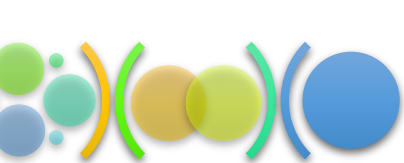


DAFTAR PUSTAKA

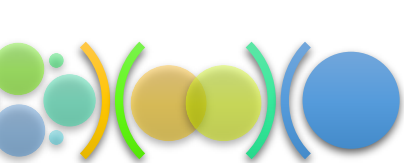
- Alamoodi, A. H. et al. (2024). Exploring the integration of multi criteria decision analysis in the clean energy biodiesels applications: A systematic review and gap analysis. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 108023.
- Al-Awadhi, T., Ramimi, A., Al Jabri, W., Abulibdeh, A. & K. (2025). Solar farms suitability analysis using GIS-Based analytic hierarchy process (AHP) multi-criteria: A case study of al Duqm–Oman. *Renew. Energi.* 122295.
- Anik, Vega Vitianingsih, Suryana Nanna, and Othman Zahriah. (2021). "Spatial analysis model for traffic accident-prone roads classification: a proposed framework." *International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)* 10, no. 2: 365–73.
- Arifin, H. S., Syartinilia, Prasetyo, L. B., & Tsuyuki, S. (2010). Application of Multi Criteria Decision Making (MCDM) and Geographical Information System (GIS) on The Cultivated Land Use Evaluation (Case Study: The Upper Stream of Ciliwung Watershed, Bogor District, West Java). Institut Pertanian Bogor.
- Aydoğan, H. & Ozkir, V. A. (2024). Fermatean fuzzy MCDM method for selection and ranking problems: case studies. *Expert Syst. Appl.* 121628.
- Berry, J. K., 1986, Learning computer assisted map-analysis. *Journal of Forestry*, 84, 3943.
- Brown, C. A., Grant R. W., and Stinson, D. P., 1986, Multi-Attribute Tradeoff System. Personal computer version user's manual. Public and Social Evaluations Office, Division of Planning and Technical Services, Engineering and Research Centre (Denver, CO: Bureau of Reclamation, USDI).
- Das, Abhijeet. 2023. "Anthropogenic Effects on Surface Water Quality Assessment in Baitarani River Basin, Odisha Using GIS and MCDM Techniques." In *Integrated Water Resources Management for Quality Enhancement*. Grinrey Publishing.
- Demir, A., Dinçer, A. E. & Yılmaz, K. (2024). A novel procedure for the AHP method for the site selection of solar PV farms. *International Journal of Energy Research*, 5535398.
- Elhosni, Soumaya, and Sami Faiz. 2021. "GIS-Based Evolutionary Approaches Using Multiple-Criteria Decision Analysis for Spatial Issues." In *Interdisciplinary Approaches to Spatial Optimization Issues*. IGI Global.
- Erdin, Ceren, and Halil Emre Akbaş. (2019). "A Comparative Analysis of Fuzzy TOPSIS and Geographic Information Systems (GIS) for the Location Selection of Shopping Malls: A Case Study from Turkey." *Sustainability* 11, no. 14: 3837.
- Hashemizadeh, A., Ju, Y. & Dong, P. (2020). A combined geographical information system and Best–Worst method approach for site selection for photovoltaic power plant projects. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2027–2042.



- Islam, M. R., Aziz, M. T., Alauddin, M., Kader, Z. & Islam, M. R. Site suitability assessment for solar power plants in bangladesh: A GIS-based analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach. *Renew. Energy*, 119595 (2024).
- Javanbarg, M. B., et al. (2026). A GIS-based MCDM approach to achieve optimal cropping pattern (theory and application in a semi-arid region). *Scientific Reports*, 16.
- Kalt, G., Wiedenhofer, D., Görg, C. & Haberl, H. (2019). Conceptualizing energy services: A review of energy and well-being along the energy service cascade. *Energy Res. Social Sci.*, 47–58.
- Khan, A., Ali, Y. & Pamucar, D. (2023). Solar PV power plant site selection using a GIS-based non-linear multi-criteria optimization technique. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 57378–57397.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726.
- Mallik, Santanu, Shivam, and Umesh Mishra. (2019). "Assessment of Spatial Variations in Groundwater Quality of Agartala, Tripura for Drinking Employing GIS and MCDA Techniques." In *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Singapore,
- Marques-Perez, I., Guaita-Pradas, I., Gallego, A. & Segura, B. (2020). Territorial planning for photovoltaic power plants using an outranking approach and GIS. *J. Clean. Prod.*, 120602.
- Mensour, O. N., Ghazzani, E., Hlimi, B., Ihlal, A. & B. (2019). Geographical information system-based multi-criteria method for the evaluation of solar farms locations: A case study in Souss-Massa area, Southern Morocco. *Energy*, 900–919.
- Mukhtarov, S., Mikayilov, J. I., Maharramov, S., Aliyev, J. & Suleymanov, E. (2022). Higher oil prices, are they good or bad for renewable energy consumption: the case of iran? *Renew. Energi.* 411–419.
- Nabiollahi, Kamal, Ndiye M. Kebonye, Fereshteh Molani, et al. (2024). "Assessment of Land Suitability Potential Using Ensemble Approaches of Advanced Multi-Criteria Decision Models and Machine Learning for Wheat Cultivation." *Remote Sensing* 16, no. 14: 2566.
- Noorollahi, E., Fadaei, D., Akbarpour Shirazi, M. & Ghodsipour, S. H. (2016). Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)—a case study of Iran. *Energies*, 643.
- Pereira, J. M. C., & Duckstein, L. (1993). A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. *International Transactions in Operational Research*.
- Samuel Omefe. (2025). "Optimization of urban walkability indices and their correlation with pedestrian safety outcomes using multi-criteria decision-making techniques." *International Journal of Science and Research Archive* 16, no. 1: 788–802.
- Shekar, Padala Raja, Aneesh Mathew, Fahdah Falah Ben Hasher, Kaleem Mehmood, and Mohamed Zhran. (2025). "Towards Sustainable Development: Ranking of Soil Erosion-



- Prone Areas Using Morphometric Analysis and Multi-Criteria Decision-Making Techniques." *Sustainability* 17, no. 5: 2124.
- Shen, J. et al. A high Spatial resolution suitability layers to support feasible power plant site selection in China. *Sci. Data*, 608 (2025).
- Syartinilia. (2004). Penerapan multi criteria decision making (MCDM) dan geographical information system (GIS) pada evaluasi peruntukan lahan (studi kasus: DAS Ciliwung Hulu, Kab. Bogor, Jawa Barat). Institut Pertanian Bogor.
- Ureña, R., Chiclana, F., et al. (Eds.). (2025). *Artificial Intelligence, Geographic Information Systems, and Multi-Criteria Decision Making for Sustainable Development*. Taylor & Francis.
- uška, A., Stević, Ž. & Pamučar, D. (2022). Evaluation and selection of healthcare waste incinerators using extended sustainability criteria and multi-criteria analysis methods. *Environ Dev Sustain*, 11195–11225.10.1007/s10668-021-01902-2.
- Uyan, M. & Dogmus, O. L. (2023). An integrated GIS-based ANP analysis for selecting solar farm installation locations: case study in Cumra region, Turkey. *Environ. Model. Assess.* 105–119.
- Wang, C. N., Dang, T. T. & Wang, J. W. (2022). A combined data envelopment analysis (DEA) and grey based multiple criteria decision making (G-MCDM) for solar PV power plants site selection: A case study in Vietnam. *Energy Rep.* 1124–1142.
- Yildirim, Ridvan Ertugrul, and Aziz Sisman. (2025). "Spatial Decision Support for Determining Suitable Emergency Assembly Places Using GIS and MCDM Techniques." *Sustainability* 17, no. 5: 2144.
- Zandi, I. & Lotfata, A. (2025). Evaluating solar power plant sites using integrated GIS and MCDM methods: a case study in Kermanshah Province. *Sci. Rep.* 3288.
- Zandi, I., et al. (2025). A GIS-based fermatean fuzzy MCDM approach for identifying suitable locations for solar power plants. *PMC*.



Pengambilan Keputusan Multi Kriteria (MCDM) menggunakan AI dan GIS

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

BIO DATA PENULIS



Penulis memiliki berbagai disiplin ilmu yang diperoleh dari Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang. dan dari Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) Salatiga. Disiplin ilmu itu antara lain teknik elektro, komputer, manajemen dan ilmu sosiologi. Penulis memiliki pengalaman kerja pada industri elektronik dan sertifikasi keahlian dalam bidang Jaringan Internet, Telekomunikasi, Artificial Intelligence, Internet Of Things (IoT), Augmented Reality (AR), Technopreneurship, Internet Marketing dan bidang pengolahan dan analisa data (komputer statistik).

Penulis adalah pendiri dari Universitas Sains dan Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) dan juga seorang dosen yang memiliki Jabatan Fungsional Akademik Lektor Kepala (Associate Professor) yang telah menghasilkan puluhan Buku Ajar ber ISBN, HAKI dari beberapa karya cipta dan Hak Paten pada produk IPTEK. Sejak tahun 2023 penulis tercatat sebagai Dosen luar biasa di Fakultas Ekonomi & Bisnis (FEB) Universitas Diponegoro Semarang. Penulis juga terlibat dalam berbagai organisasi profesi dan industri yang terkait dengan dunia usaha dan industri, khususnya dalam pengembangan sumber daya manusia yang unggul untuk memenuhi kebutuhan dunia kerja secara nyata.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

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

ISBN 978-634-7227-89-8 (PDF)



9

786347

227898