

BUKU REFERENSI

TEKNIK SIPIL

BIM, INTERNET OF THINGS, DAN SMART INFRASTRUCTURE

Ir. Hj. Lindawati MZ, S.T., M.T.

Ir. Muhammad Rizka Fadli Wibowo, S.T., M.T.

Ir. Balqis Fataya Said, S.T., M.T.



TEKNIK SIPIL

BIM, *Internet of Things*, dan *Smart Infrastructure*

Ditulis oleh:

Ir. Hj. Lindawati MZ, S.T., M.T.
Ir. Muhammad Rizka Fadli Wibowo, S.T., M.T.
Ir. Balqis Fataya Said, S.T., M.T.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.



ISBN: 978 – 634 – 316 – 048 – 9
Viii + 151 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, Juli 2026

Desain Cover dan Tata Letak:
Muhammad Rasya Aiman Hafizh

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh
PT Media Penerbit Indonesia
Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata
Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131
Telp: 081362150605
Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com
Web: <https://mediapenerbitindonesia.com>
Anggota IKAPI No.088/SUT/2024



KATA PENGANTAR

Buku referensi “Teknik Sipil: BIM, *Internet of Things*, dan *Smart Infrastructure*” ini hadir sebagai respons atas kebutuhan akan literatur teknik sipil yang komprehensif, mutakhir, dan relevan dengan perkembangan transformasi digital di sektor konstruksi dan infrastruktur. Perkembangan teknologi tidak lagi hanya berperan sebagai alat pendukung, tetapi telah menjadi bagian integral dalam perencanaan, pelaksanaan, pengoperasian, dan pemeliharaan infrastruktur yang lebih efisien, berkelanjutan, serta berorientasi pada kebutuhan masyarakat.

Memasuki era Revolusi Industri 4.0 dan *Society 5.0*, dunia teknik sipil mengalami perubahan paradigma melalui penerapan *Building Information Modeling* (BIM), *Internet of Things* (IoT), serta konsep *Smart Infrastructure*. Ketiga pendekatan tersebut mendorong integrasi data, otomatisasi proses, pemantauan kondisi infrastruktur secara real time, serta pengambilan keputusan berbasis informasi yang akurat. Transformasi ini membuka peluang besar untuk meningkatkan kualitas pembangunan, efisiensi biaya, keselamatan konstruksi, ketahanan infrastruktur, dan pengelolaan aset secara berkelanjutan.

Buku ini disusun dengan pendekatan integratif yang menggabungkan landasan teoritis mengenai konsep, prinsip, dan perkembangan teknologi digital dalam teknik sipil dengan berbagai implementasi praktis pada perencanaan, konstruksi, manajemen proyek, operasi, dan pemeliharaan infrastruktur modern. Diharapkan buku ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu teknik sipil, mendukung peningkatan kompetensi akademisi dan praktisi, serta menjadi referensi yang bermanfaat dalam mewujudkan pembangunan infrastruktur yang cerdas, inovatif, dan berkelanjutan.

Salam Hangat

Tim Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii

BAB I	TRANSFORMASI DIGITAL DALAM TEKNIK SIPIL	1
A.	Evolusi Teknik Sipil di Era Digital	1
B.	Industri Konstruksi 4.0 dan <i>Society 5.0</i>	5
C.	Konsep Integrasi BIM, IoT, dan <i>Smart Infrastructure</i>	9
D.	Tantangan dan Peluang Digitalisasi Infrastruktur	15
BAB II	<i>BUILDING INFORMATION MODELING (BIM):</i>	
	KONSEP DAN PERKEMBANGAN	21
A.	Definisi dan Prinsip Dasar BIM	21
B.	Dimensi BIM (3D, 4D, 5D, 6D, dan 7D)	26
C.	Siklus Hidup Proyek Berbasis BIM.....	28
D.	Standar dan Regulasi BIM.....	30
BAB III	IMPLEMENTASI BIM DALAM PROYEK	
	KONSTRUKSI.....	36
A.	Perencanaan dan Desain Berbasis BIM.....	36
B.	Kolaborasi Multi-Disiplin dalam BIM	41
C.	Deteksi Konflik (<i>Clash Detection</i>)	45
D.	Manajemen Proyek dan Pengendalian Biaya Menggunakan BIM.....	50
BAB IV	<i>INTERNET OF THINGS (IOT) DALAM</i>	
	INFRASTRUKTUR	56
A.	Konsep dan Arsitektur IoT	56
B.	Sensor dan Perangkat IoT dalam Teknik Sipil	60
C.	Sistem Akuisisi dan Komunikasi Data	64
D.	Integrasi IoT dengan Sistem Infrastruktur	68

BAB V	<i>SMART INFRASTRUCTURE DAN SMART CITY</i>	76
A.	Definisi dan Karakteristik <i>Smart Infrastructure</i>	76
B.	Infrastruktur Berbasis Data dan Konektivitas.....	81
C.	<i>Smart City</i> dan Infrastruktur Perkotaan	86
D.	Peran Teknologi dalam Infrastruktur Berkelanjutan	93
BAB VI	<i>STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM)</i>.....	100
A.	Konsep Pemantauan Kesehatan Struktur.....	100
B.	Sensor untuk Monitoring Struktur	105
C.	Analisis Data Kerusakan dan Degradasi.....	108
D.	Sistem Peringatan Dini dan Mitigasi Risiko.....	112
BAB VII	BIM DAN IOT UNTUK MANAJEMEN ASET INFRASTRUKTUR	119
A.	<i>Asset Management</i> Berbasis Digital	120
B.	<i>Digital Twin</i> dalam Infrastruktur	124
C.	Pemeliharaan Prediktif dan Preventif	127
D.	Integrasi Data untuk Pengambilan Keputusan.....	130
BAB VIII	<i>BIG DATA DAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM TEKNIK SIPIL</i>.....	135
A.	<i>Big Data</i> untuk Infrastruktur Modern.....	136
B.	<i>Machine Learning</i> dalam Analisis Infrastruktur.....	141
C.	<i>Artificial Intelligence</i> untuk Prediksi Kinerja Infrastruktur	149
D.	Pengambilan Keputusan Berbasis Data	155
BAB IX	<i>SMART TRANSPORTATION DAN INFRASTRUKTUR MOBILITAS</i>	162
A.	Sistem Transportasi Cerdas (<i>Intelligent Transportation System</i>).....	163
B.	IoT dalam Manajemen Lalu Lintas.....	168
C.	Infrastruktur Kendaraan Otonom.....	173
D.	Mobilitas Berkelanjutan dan <i>Smart Mobility</i>	180

BAB X	<i>SMART WATER</i> DAN INFRASTRUKTUR LINGKUNGAN	184
A.	<i>Smart Water Management</i>	184
B.	Monitoring Jaringan Air Bersih dan Limbah	190
C.	IoT untuk Pengelolaan Sumber Daya Air.....	196
D.	Infrastruktur Hijau dan Ketahanan Lingkungan	201
BAB XI	KEAMANAN SIBER DAN TATA KELOLA INFRASTRUKTUR DIGITAL	204
A.	Risiko Keamanan Siber dalam Infrastruktur	204
B.	Perlindungan Data dan Sistem IoT	209
C.	Tata Kelola Infrastruktur Digital	213
D.	Regulasi dan Standarisasi Teknologi Infrastruktur.....	218
BAB XII	<i>SMART CONSTRUCTION</i> DAN OTOMASI KONSTRUKSI.....	223
A.	Otomasi dalam Proses Konstruksi	223
B.	Robotika dan Teknologi Konstruksi Modern	227
C.	Drone untuk Survei dan Monitoring Proyek	231
D.	Konstruksi Berbasis Teknologi Digital	235
BAB XIII	KEBERLANJUTAN DAN KETAHANAN INFRASTRUKTUR	238
A.	Infrastruktur Berkelanjutan.....	238
B.	<i>Resilient Infrastructure</i> Terhadap Bencana	241
C.	Efisiensi Energi dan Pengurangan Emisi Karbon.....	244
D.	Indikator Kinerja Infrastruktur Berkelanjutan	247
DAFTAR PUSTAKA		251
GLOSARIUM		272
INDEKS		278
BIOGRAFI PENULIS.....		284
SINOPSIS		285



BAB I

TRANSFORMASI DIGITAL DALAM TEKNIK SIPIL

Teknik sipil, sebagai salah satu disiplin rekayasa tertua di dunia, tengah mengalami pergeseran paradigma yang fundamental. Praktik perencanaan, perancangan, konstruksi, hingga pengoperasian infrastruktur yang selama lebih dari satu abad bertumpu pada gambar kertas, perhitungan manual, dan pengalaman lapangan kini secara progresif digantikan oleh model informasi digital, sensor jaringan, dan sistem cerdas yang saling terhubung. Transformasi ini tidak sekadar mengganti alat kerja, tetapi mengubah cara insinyur berpikir, berkolaborasi, dan mengambil keputusan sepanjang siklus hidup aset infrastruktur. Landasan konseptual transformasi digital dalam teknik sipil, mulai dari evolusi historisnya, keterkaitannya dengan gagasan *Construction 4.0* dan *Society 5.0*, kerangka integrasi antara *Building Information Modeling* (BIM), *Internet of Things* (IoT), dan *smart infrastructure*, hingga tantangan serta peluang yang menyertainya.

A. Evolusi Teknik Sipil di Era Digital

Perkembangan teknik sipil senantiasa berjalan beriringan dengan kemajuan teknologi pada zamannya. Jika pada abad ke-19 dan ke-20 kemajuan ditandai oleh material baru seperti beton bertulang dan baja struktural serta metode analisis struktur yang lebih rasional, maka pada penghujung abad ke-20 hingga awal abad ke-21 kemajuan paling signifikan justru datang dari ranah komputasi dan digitalisasi informasi. Pergeseran ini oleh sejumlah peneliti disebut sebagai *digital shift* dalam rekayasa sipil, yaitu transisi dari representasi fisik dan analog menuju representasi digital yang terkomputerisasi, dapat disimulasikan, dan dapat dipertukarkan secara elektronik (Biswas, Sim, & Lau, 2024).

1. Dari Era Konvensional Menuju Era Digital

Secara historis, praktik teknik sipil dapat dibagi ke dalam beberapa fase perkembangan yang saling menumpuk (*cumulative*), bukan saling menggantikan secara tuntas. Fase pertama adalah era rekayasa konvensional (pra-1970-an), yang dicirikan oleh perancangan berbasis gambar tangan (*manual drafting*), perhitungan struktur dengan kalkulator atau mistar hitung, dan pengelolaan proyek yang sangat bergantung pada dokumen kertas serta komunikasi tatap muka. Fase kedua adalah era *Computer-Aided Design* (CAD) yang mulai berkembang pesat pada dekade 1980-an hingga 1990-an, ketika gambar dua dimensi mulai dibuat dan disimpan secara elektronik, meskipun esensinya masih berupa representasi geometris tanpa muatan informasi (*data-poor drawing*).

Fase ketiga, yang menjadi inti pembahasan buku ini, adalah era model informasi digital yang dimulai sejak awal 2000-an dengan kemunculan *Building Information Modeling* (BIM) sebagai metodologi kerja baru. Berbeda dengan CAD yang hanya menggambarkan bentuk, BIM merepresentasikan bangunan atau infrastruktur sebagai basis data objek tiga dimensi yang memuat informasi geometris sekaligus non-geometris, material, jadwal, biaya, hingga performa lingkungan (Cerovsek, 2011; Izbash & Babayev, 2024). Fase keempat, yang tengah berlangsung saat ini, adalah era konvergensi digital-fisik atau *cyber-physical convergence*, ketika model digital tidak lagi berdiri sendiri melainkan terhubung secara *real-time* dengan kondisi fisik aset melalui jaringan sensor IoT, membentuk apa yang dikenal sebagai *digital twin* (Jiang, Ma, Broyd, & Chen, 2021).

Tabel 1.1 Tonggak Evolusi Digitalisasi dalam Teknik Sipil

Periode	Fase / Tonggak	Karakteristik Utama
< 1970-an	Era Konvensional	Gambar tangan, perhitungan manual, dokumentasi kertas, komunikasi tatap muka
1980–1990-an	<i>Computer-Aided Design (CAD)</i>	Digitalisasi gambar 2D/3D, penyimpanan elektronik, representasi geometris tanpa data terintegrasi

Periode	Fase / Tonggak	Karakteristik Utama
2000– 2010-an	<i>Building Information Modeling (BIM)</i>	Model objek parametrik 3D berbasis data, kolaborasi multidisiplin, standar pertukaran data (IFC)
2010– 2020-an	Konstruksi 4.0	Otomasi, robotika, <i>big data</i> , <i>cloud computing</i> , sensor IoT pada proyek konstruksi
2020– sekarang	<i>Smart Infrastructure & Digital Twin</i>	Integrasi BIM-IoT <i>real-time</i> , kecerdasan buatan, model siklus hidup aset yang adaptif

Sumber: Diolah dari Cerovsek (2011); Jiang et al. (2021); Izbash & Babayev (2024); Biswas et al. (2024)

2. Pergeseran Paradigma: dari Gambar Kertas ke Model Informasi Digital

Transformasi paling mendasar dalam evolusi teknik sipil bukan terletak pada penggantian pensil dengan *mouse*, melainkan pada perubahan cara informasi direpresentasikan dan dikelola. Pada paradigma lama, gambar kerja (*shop drawing*) merupakan produk akhir yang bersifat statis: setiap perubahan desain menuntut penggambaran ulang secara manual pada seluruh lembar terkait, sehingga rawan inkonsistensi antar-disiplin. Paradigma baru menempatkan model tiga dimensi yang kaya informasi (*information-rich model*) sebagai satu sumber kebenaran tunggal (*single source of truth*), dari mana gambar, jadwal, estimasi biaya, dan dokumen lain diturunkan secara otomatis dan tetap konsisten satu sama lain (Biswas *et al.*, 2024).

Pergeseran ini memiliki implikasi epistemologis yang penting bagi profesi insinyur sipil. Jika sebelumnya kompetensi utama seorang insinyur diukur dari kemampuan menggambar dan menghitung secara manual, maka pada era digital kompetensi tersebut bergeser ke arah kemampuan mengelola data, memahami interoperabilitas perangkat lunak, serta berpikir secara sistemik lintas disiplin (Hall *et al.*, 2023). Sejumlah studi bahkan menyebut fenomena ini sebagai transisi dari *engineer as drafter* menuju *engineer as information manager* (Karmakar & Delhi, 2021).

3. Peran Komputasi, Data, dan Konektivitas dalam Praktik Rekayasa Modern

Tiga elemen menjadi tulang punggung evolusi digital dalam teknik sipil, yaitu daya komputasi (*computing power*), ketersediaan data, dan konektivitas jaringan. Peningkatan daya komputasi memungkinkan simulasi struktur, analisis elemen hingga (*finite element analysis*), dan optimasi desain yang sebelumnya membutuhkan waktu berhari-hari kini dapat diselesaikan dalam hitungan menit. Ketersediaan data, baik data desain, data sensor, maupun data historis proyek menjadi bahan baku bagi analitik prediktif dan pembelajaran mesin dalam pengambilan keputusan rekayasa (Hossam & Youssef, 2024).

Sementara itu, konektivitas jaringan, khususnya melalui teknologi *cloud computing* dan komunikasi nirkabel generasi terbaru, memungkinkan kolaborasi lintas lokasi secara *real-time*. Tim perancang di satu kota dapat bekerja pada model BIM yang sama dengan tim konstruksi di lokasi proyek yang berjarak ratusan kilometer, sementara sensor yang terpasang pada struktur mengirimkan data kondisi terkini ke server pusat untuk dianalisis (Ammar *et al.*, 2022). Konvergensi ketiga elemen ini yaitu komputasi, data, dan konektivitas menjadi fondasi teknis bagi seluruh gagasan yang akan dibahas pada subbab-subbab berikutnya, mulai dari Konstruksi 4.0 hingga *smart infrastructure*.

4. Implikasi Evolusi Digital terhadap Pendidikan dan Kompetensi Insinyur Sipil

Evolusi teknologi yang begitu cepat menuntut penyesuaian kurikulum pendidikan teknik sipil secara berkelanjutan. Institusi pendidikan tinggi di berbagai negara mulai mengintegrasikan mata kuliah BIM, analitik data konstruksi, dan dasar-dasar pemrograman ke dalam kurikulum inti, tidak lagi sebagai mata kuliah pilihan semata (Hall *et al.*, 2023). Di Indonesia, kebutuhan ini turut ditegaskan oleh Direktorat Jenderal Bina Konstruksi Kementerian Pekerjaan Umum yang secara konsisten mendorong penguatan kompetensi digital tenaga kerja konstruksi nasional melalui sertifikasi dan pelatihan BIM (Ditjen Bina Konstruksi, 2023).

Kesenjangan kompetensi (*skill gap*) antara kebutuhan industri dan kesiapan lulusan menjadi isu yang berulang kali diangkat dalam literatur, terutama pada negara berkembang yang transisi digitalnya berlangsung lebih lambat dibandingkan negara maju. Oleh karena itu,

pemahaman menyeluruh terhadap evolusi digital, sebagaimana diuraikan pada subbab ini menjadi prasyarat penting sebelum mempelajari konsep-konsep spesifik seperti Konstruksi 4.0, *Society 5.0*, BIM, IoT, dan *smart infrastructure*.

B. Industri Konstruksi 4.0 dan *Society 5.0*

Gagasan mengenai revolusi industri keempat atau *Industry 4.0*, yang pertama kali diperkenalkan di Jerman pada 2011, secara bertahap diadopsi dan diadaptasi oleh sektor konstruksi menjadi konsep yang dikenal sebagai *Construction 4.0*. Pada saat yang hampir bersamaan, Pemerintah Jepang memperkenalkan visi *Society 5.0* sebagai kerangka pembangunan masyarakat yang berpusat pada manusia namun ditopang sepenuhnya oleh teknologi digital. Kedua gagasan ini yaitu satu berorientasi industri, satu berorientasi masyarakat saling melengkapi dan menjadi kerangka rujukan penting dalam memahami arah transformasi digital infrastruktur saat ini (Karmakar & Delhi, 2021; Yitmen, Almusaed, & Alizadehsalehi, 2023).

1. Dari Industri 4.0 Menuju Konstruksi 4.0: Landasan Konseptual

Construction 4.0 dapat dimaknai sebagai penerapan prinsip-prinsip *Industry 4.0* yaitu otomasi, konektivitas siber-fisik, dan pemanfaatan data secara masif ke dalam konteks industri konstruksi yang memiliki karakteristik unik: bersifat proyek per proyek (*project-based*), melibatkan banyak pemangku kepentingan yang terfragmentasi, dan berlangsung di lokasi terbuka yang tidak terkontrol seperti pabrik (Karmakar & Delhi, 2021). Literatur membedakan Konstruksi 4.0 dalam pengertian sempit, yang berfokus pada adopsi teknologi tertentu seperti robotika atau pencetakan tiga dimensi, dan pengertian luas, yang mencakup implikasinya terhadap dimensi sosial, lingkungan, tata kelola, dan teknologi secara menyeluruh dikenal sebagai dimensi *SEGT* (*Social, Environmental, Governance, Technology*) (Karmakar & Delhi, 2021).

Sebagai sebuah paradigma, Konstruksi 4.0 menegaskan pergeseran dari proses konstruksi yang bersifat linier dan terfragmentasi menuju proses yang terintegrasi secara digital sepanjang siklus hidup proyek mulai dari studi kelayakan, perancangan, pengadaan, konstruksi, hingga operasi dan pemeliharaan. Riset bibliometrik menunjukkan bahwa jumlah publikasi terkait Konstruksi 4.0 meningkat secara

eksponensial sejak 2016, dengan lebih dari 80 persen publikasi diterbitkan dalam kurun 2020–2023, menandakan bahwa topik ini masih berada pada fase pertumbuhan aktif dalam wacana akademik maupun praktik industri (Karmakar & Delhi, 2021).

Tabel 1.2 Pilar Teknologi Utama Konstruksi 4.0

No	Pilar Teknologi	Fungsi dalam Rekayasa Sipil
1	<i>Building Information Modeling (BIM)</i>	Pemodelan informasi terintegrasi lintas disiplin sepanjang siklus proyek
2	<i>Internet of Things (IoT)</i>	Pemantauan kondisi struktur dan lingkungan proyek secara <i>real-time</i>
3	<i>Big Data & Analytics</i>	Pengolahan data proyek berskala besar untuk mendukung keputusan berbasis bukti
4	<i>Artificial Intelligence (AI) & Machine Learning</i>	Prediksi risiko, optimasi jadwal, dan deteksi anomali struktur
5	<i>Cloud Computing</i>	Kolaborasi data lintas lokasi dan penyimpanan model berskala besar
6	Robotika & Otomasi Lapangan	Pekerjaan berulang atau berbahaya seperti pengelasan, pengecoran, inspeksi
7	<i>Digital Twin</i>	Replika digital aset fisik yang diperbarui secara dinamis dari data sensor
8	Pemodelan Cetak 3D (<i>3D Printing / Additive Manufacturing</i>)	Fabrikasi komponen konstruksi presisi tinggi dengan limbah minimal

Sumber: Diolah dari Karmakar & Delhi (2021); Baghalzadeh Shishegharkhaneh et al. (2022); Musarat et al. (2023)

2. *Society 5.0*: Masyarakat Super Cerdas Berbasis Teknologi

Society 5.0 merupakan visi kebijakan yang pertama kali dicanangkan Pemerintah Jepang dalam Rencana Dasar Sains dan Teknologi Kelima (Cabinet Office Japan) sebagai kelanjutan dari tahapan evolusi masyarakat manusia: masyarakat berburu (*Society 1.0*), masyarakat agraris (*Society 2.0*), masyarakat industri (*Society 3.0*), masyarakat informasi (*Society 4.0*), hingga masyarakat super cerdas (*Society 5.0*). Berbeda dengan *Industry 4.0* yang berorientasi efisiensi produksi, *Society 5.0* menempatkan manusia sebagai pusat (*human-centric*) dari pemanfaatan teknologi, dengan tujuan akhir menyeimbangkan kemajuan ekonomi dan penyelesaian persoalan sosial secara simultan melalui penggabungan ruang siber dan ruang fisik (Kravets *et al.*, 2021).

Dalam konteks infrastruktur, prinsip *Society 5.0* diterjemahkan menjadi tuntutan agar sistem infrastruktur tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga responsif terhadap kebutuhan masyarakat yang beragam tanpa memandang usia, lokasi geografis, maupun keterbatasan fisik penggunanya. Sistem transportasi cerdas, jaringan energi adaptif, dan bangunan yang responsif terhadap kondisi penghuninya merupakan beberapa manifestasi nyata dari perpaduan antara teknologi Konstruksi 4.0 dan nilai-nilai *Society 5.0* (Ghobakhloo *et al.*, 2022; Xu, Lu, Vogel-Heuser, & Wang, 2021).

3. Konvergensi Menuju Konstruksi 5.0

Perkembangan lebih lanjut memunculkan gagasan *Construction 5.0* atau *Industry 5.0* dalam konteks konstruksi, yang berupaya mengoreksi kecenderungan *Construction 4.0* yang dinilai terlalu berorientasi pada otomasi dan efisiensi semata tanpa cukup memperhatikan aspek keberlanjutan, ketahanan (*resilience*), dan kesejahteraan pekerja (Zizic, Mladineo, Gjeldum, & Celent, 2022). *Construction 5.0* memadukan kolaborasi manusia-mesin (*human-robot collaboration*), kecerdasan buatan yang berpusat pada manusia, serta prinsip keberlanjutan sebagai satu kesatuan paradigma baru yang selaras dengan visi *Society 5.0* (Marinelli, 2023; Yitmen *et al.*, 2023).

Sejumlah peneliti menegaskan bahwa *Construction 5.0* bukan menggantikan, melainkan menyempurnakan *Construction 4.0* dengan menambahkan tiga dimensi tambahan: kesejahteraan pekerja konstruksi (*worker well-being*), ketahanan rantai pasok terhadap gangguan

(*resilience*), dan keberlanjutan lingkungan sepanjang siklus hidup proyek (Ghobakhloo *et al.*, 2022). Dengan demikian, arah perkembangan teknik sipil tidak hanya diukur dari tingkat otomasi teknologi, tetapi sejauh mana memberi manfaat bagi masyarakat luas.

Tabel 1.3 Evolusi *Society* 1.0 menuju *Society* 5.0 dan Keterkaitannya dengan Konstruksi 4.0/5.0

Tahapan	Ciri Masyarakat	Paralel dalam Industri Konstruksi
<i>Society</i> 1.0	Masyarakat berburu-meramu	—
<i>Society</i> 2.0	Masyarakat agraris	Konstruksi tradisional berbasis tenaga manusia
<i>Society</i> 3.0	Masyarakat industri	Mekanisasi alat berat, produksi massal material
<i>Society</i> 4.0	Masyarakat informasi	CAD, basis data proyek, awal digitalisasi dokumen
<i>Society</i> 5.0	Masyarakat super cerdas (integrasi siber-fisik)	Konstruksi 4.0/5.0: BIM–IoT– <i>digital twin</i> , <i>human-centric design</i>

Sumber: Diadaptasi dari Cabinet Office Japan; Kravets *et al.* (2021); Yitmen *et al.* (2023)

4. Perbandingan Prinsip Industri 4.0 dan Industri 5.0 dalam Konteks Konstruksi

Memahami perbedaan mendasar antara prinsip *Industry 4.0* dan *Industry 5.0* penting untuk menempatkan arah perkembangan Konstruksi 4.0 menuju Konstruksi 5.0 secara lebih presisi. *Industry 4.0* pada dasarnya berorientasi pada optimasi proses melalui otomasi dan konektivitas data, dengan manusia sering diposisikan sebagai pengawas sistem otomatis. Sebaliknya, *Industry 5.0* menempatkan manusia kembali sebagai pusat proses produksi, dengan teknologi berperan sebagai penguat kapabilitas manusia (*augmentation*), bukan penggantinya (Xu *et al.*, 2021; Zizic *et al.*, 2022).

Tabel 1.4 Perbandingan Prinsip Industri 4.0 dan Industri 5.0 dalam Konteks Konstruksi

Aspek	Industri 4.0 / Konstruksi 4.0	Industri 5.0 / Konstruksi 5.0
Fokus utama	Otomasi, efisiensi, dan produktivitas	Kolaborasi manusia-mesin dan kesejahteraan pekerja
Posisi manusia	Pengawas sistem otomatis	Mitra aktif teknologi (<i>human-in-the-loop</i>)
Orientasi nilai	Efisiensi ekonomi dan kecepatan produksi	Keberlanjutan, ketahanan, dan inklusivitas sosial
Teknologi kunci	IoT, <i>big data</i> , robotika, <i>cloud computing</i>	Kolaborasi robot-manusia, AI etis, <i>digital twin</i> adaptif
Ukuran keberhasilan	Penurunan biaya dan waktu proyek	Keseimbangan efisiensi, keselamatan, dan dampak sosial

Sumber: Diolah dari Xu, Lu, Vogel-Heuser & Wang (2021); Zizic, Mladineo, Gjeldum & Celent (2022); Yitmen et al. (2023)

C. Konsep Integrasi BIM, IoT, dan *Smart Infrastructure*

Jika subbab sebelumnya menempatkan BIM, IoT, dan *smart infrastructure* sebagai bagian dari pilar teknologi konstruksi 4.0 secara umum, subbab ini membahas ketiganya secara lebih mendalam sebagai satu kesatuan kerangka konseptual yang saling terintegrasi. Ketiga teknologi tersebut, apabila diterapkan secara terpisah, memberikan manfaat yang terbatas; namun ketika diintegrasikan, ketiganya membentuk ekosistem digital yang mendukung pengelolaan aset infrastruktur secara cerdas sepanjang siklus hidupnya, mulai dari tahap perencanaan hingga pembongkaran (Baghalzadeh Shishehgarkhaneh, Keivani, Moehler, Jelodari, & Roshdi Laleh, 2022).

1. *Building Information Modeling* (BIM): Definisi dan Dimensi

Building Information Modeling (BIM) didefinisikan sebagai proses kolaboratif untuk menciptakan dan mengelola informasi suatu

aset bangunan atau infrastruktur sepanjang siklus hidupnya, dengan model digital tiga dimensi yang kaya data sebagai intinya (Izbash & Babayev, 2024). Standar internasional ISO 19650 menegaskan BIM bukan sekadar perangkat lunak, melainkan metodologi manajemen informasi yang mengatur bagaimana data dihasilkan, divalidasi, dipertukarkan, dan diarsipkan oleh seluruh pemangku kepentingan proyek (ISO, 2020).

BIM umumnya dijelaskan melalui konsep dimensi yang berkembang dari representasi geometris murni menuju representasi yang semakin kaya informasi. Dimensi 3D merepresentasikan geometri, 4D menambahkan aspek waktu atau penjadwalan, 5D menambahkan estimasi biaya, 6D berkaitan dengan analisis keberlanjutan dan efisiensi energi, sedangkan 7D berkaitan dengan pengelolaan fasilitas pascakonstruksi (*facility management*) (Biswas *et al.*, 2024). Pemahaman terhadap dimensi-dimensi ini penting karena menunjukkan bahwa BIM bukan sekadar alat visualisasi, melainkan platform manajemen informasi yang menopang keputusan pada setiap tahap siklus hidup proyek.

Tabel 1.5 Dimensi *Building Information Modeling* (BIM)

Dimensi	Fokus Informasi	Manfaat Utama
3D	Geometri dan visualisasi spasial	Deteksi benturan antar-disiplin (<i>clash detection</i>)
4D	Penjadwalan dan urutan pekerjaan (<i>time</i>)	Simulasi tahapan konstruksi, optimasi jadwal
5D	Estimasi biaya (<i>cost</i>)	Pengendalian anggaran secara dinamis dan akurat
6D	Keberlanjutan dan efisiensi energi	Analisis jejak karbon dan performa lingkungan bangunan
7D	Pengelolaan fasilitas (<i>facility management</i>)	Pemeliharaan aset berbasis data pascakonstruksi

Sumber: Diolah dari Biswas *et al.* (2024); ISO 19650 (2020)

2. *Internet of Things* (IoT) dalam Konteks Infrastruktur Sipil

Internet of Things (IoT) merujuk pada jaringan perangkat fisik yaitu sensor, aktuator, kamera, hingga peralatan berat yang dilengkapi kemampuan untuk mengumpulkan, mengirim, dan menerima data melalui jaringan internet tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung (Waqar *et al.*, 2024). Dalam konteks infrastruktur sipil, IoT berperan sebagai indera digital yang memungkinkan struktur fisik ‘berbicara’ mengenai kondisinya secara *real-time*, mulai dari regangan pada elemen struktur, getaran akibat beban dinamis, kelembapan material, hingga tingkat polusi udara di sekitar proyek (Hu, Olgun, & Assaad, 2024).

Penerapan IoT dalam praktik teknik sipil dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama: pemantauan kesehatan struktur (*structural health monitoring*), manajemen keselamatan kerja di lokasi proyek, pelacakan aset dan material melalui teknologi identifikasi frekuensi radio (*RFID*), serta pemantauan lingkungan proyek (Waqar *et al.*, 2023; 2024). Studi bibliometrik terbaru menunjukkan tren integrasi IoT dengan BIM meningkat pesat sejak 2018, mencerminkan kesadaran industri bahwa data sensor akan jauh lebih bermakna apabila dikaitkan langsung dengan model informasi bangunan, bukan berdiri sebagai aliran data yang terpisah (Baghalzadeh Shishehgarkhaneh *et al.*, 2022).

Tabel 1.6 Jenis Sensor IoT yang Umum Digunakan pada Infrastruktur Sipil

Jenis Sensor	Parameter yang Diukur	Aplikasi Utama
<i>Strain gauge</i>	Regangan dan tegangan elemen struktur	Pemantauan kesehatan struktur jembatan dan gedung tinggi
Akselerometer	Percepatan dan getaran struktur	Deteksi respons dinamis terhadap beban gempa dan angin
<i>Tiltmeter</i> / inklinometer	Kemiringan dan pergeseran elemen	Pemantauan stabilitas lereng, dinding penahan tanah, menara

Jenis Sensor	Parameter yang Diukur	Aplikasi Utama
Sensor kelembapan & suhu	Kondisi lingkungan material	Deteksi korosi tulangan, retak akibat pengaruh cuaca
GNSS/GPS presisi tinggi	Posisi dan pergeseran global	Pemantauan deformasi bendungan dan lereng skala besar
Kamera termal & visual (CCTV/IoT)	Citra visual dan suhu permukaan	Pengawasan keselamatan kerja dan deteksi anomali visual
LiDAR / pemindai laser	Geometri permukaan tiga dimensi	Pemantauan progres konstruksi dan deformasi permukaan

Sumber: Diolah dari Hu, Olgun & Assaad (2024); Bado, Casas & Kaklauskas (2022); Waqar et al. (2024)

Pemilihan jenis sensor pada suatu proyek infrastruktur sangat bergantung pada karakteristik risiko dan mode kegagalan yang paling relevan bagi aset tersebut. Jembatan bentang panjang, misalnya, umumnya diprioritaskan pada kombinasi *strain gauge* dan akselerometer untuk memantau perilaku struktural dinamis, sementara bendungan dan lereng lebih mengutamakan sensor GNSS presisi tinggi dan *tiltmeter* untuk mendeteksi pergeseran tanah secara dini (Bado *et al.*, 2022). Kombinasi data dari berbagai jenis sensor inilah yang kemudian disinkronkan dengan model BIM untuk membentuk representasi *digital twin* yang komprehensif, sebagaimana dibahas pada subbab berikut.

3. *Smart Infrastructure* dan *Digital Twin* sebagai Puncak Integrasi

Smart infrastructure dapat dipahami sebagai aset infrastruktur fisik seperti jembatan, jalan, gedung, bendungan, jaringan air bersih yang dilengkapi kemampuan penginderaan, pemrosesan data, dan pengambilan keputusan secara otonom atau semi-otonom untuk mengoptimalkan kinerja, keselamatan, dan efisiensinya sepanjang siklus hidup (Hakimi, Liu, & Abudayyeh, 2023). Konsep ini merupakan hasil evolusi dari penerapan BIM dan IoT secara terpadu, kemudian bermuara pada bentuk representasi digital paling matang, yaitu *digital twin*.

Digital twin didefinisikan sebagai replika virtual dari suatu aset fisik yang diperbarui secara dinamis melalui aliran data sensor secara *real-time*, sehingga model digital tersebut senantiasa mencerminkan kondisi aktual aset fisiknya (Jiang *et al.*, 2021; Megahed & Hassan, 2022). Berbeda dengan model BIM konvensional yang bersifat statis setelah konstruksi selesai, *digital twin* terus ‘hidup’ sepanjang masa operasional aset, memungkinkan simulasi skenario pemeliharaan, prediksi kegagalan struktur, dan optimasi keputusan manajemen aset berbasis data aktual, bukan asumsi (Honghong, Gang, Haijiang, Tian, & Annan, 2023).

Penerapan *digital twin* pada infrastruktur jembatan, misalnya, memungkinkan integrasi data pemodelan informasi jembatan (*Bridge Information Modeling/BrIM*) dengan sistem pendukung keputusan untuk manajemen aset yang lebih presisi (Mohammadi, Rashidi, Yu, & Samali, 2023). Studi pada sektor energi perkotaan juga menunjukkan bahwa integrasi *digital twin* dengan sistem energi regional dapat meningkatkan efisiensi operasional kawasan perkotaan secara signifikan (Huang, Zhang, & Zeng, 2022).

4. Kerangka Konseptual Integrasi BIM–IoT–Smart Infrastructure

Untuk memahami bagaimana ketiga elemen tersebut saling terhubung, dapat digambarkan sebuah kerangka konseptual berlapis yang menunjukkan alur data dari sumber fisik hingga menjadi keputusan rekayasa. Lapisan pertama adalah lapisan fisik (*physical layer*), yaitu aset infrastruktur itu sendiri beserta jaringan sensor IoT yang terpasang padanya. Lapisan kedua adalah lapisan konektivitas (*connectivity layer*), yang mentransmisikan data sensor melalui jaringan nirkabel menuju server atau *cloud*. Lapisan ketiga adalah lapisan model informasi (*BIM/data layer*), tempat data sensor tersebut disinkronkan dengan model BIM untuk membentuk representasi digital yang termutakhirkan. Lapisan keempat adalah lapisan analitik dan kecerdasan (*analytics layer*), tempat algoritma analitik data dan kecerdasan buatan mengolah data terintegrasi tersebut menjadi wawasan (*insight*) yang dapat ditindaklanjuti. Lapisan kelima adalah lapisan keputusan dan tindakan (*decision layer*), tempat insinyur, manajer aset, atau sistem otonom mengambil tindakan berdasarkan wawasan yang dihasilkan (disintesis dari Jiang *et al.*, 2021; Hakimi *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2024).

Tabel 1.7 Kerangka Konseptual Integrasi BIM, IoT, dan *Smart Infrastructure*

Lapisan (<i>Layer</i>)	Komponen Utama	Peran dalam Integrasi
1. Fisik	Struktur, jembatan, jalan, bangunan, sensor IoT terpasang	Sumber data kondisi nyata aset infrastruktur
2. Konektivitas	Jaringan nirkabel, protokol komunikasi, gerbang data (<i>IoT gateway</i>)	Transmisi data sensor menuju penyimpanan pusat
3. Model Informasi (BIM)	Model 3D parametrik, basis data <i>Common Data Environment (CDE)</i>	Representasi digital terpadu aset infrastruktur
4. Analitik & Kecerdasan	<i>Machine learning</i> , analitik prediktif, algoritma deteksi anomali	Mengubah data mentah menjadi wawasan rekayasa
5. Keputusan & Tindakan	Insinyur, manajer aset, sistem kendali otomatis	Tindakan pemeliharaan, perbaikan, atau optimasi operasi

Sumber: Disintesis dari Jiang et al. (2021); Hakimi et al. (2023); Hu, Olgun & Assaad (2024)

Kerangka berlapis ini menegaskan bahwa integrasi BIM, IoT, dan *smart infrastructure* bukanlah penggabungan tiga teknologi yang berdiri sendiri, melainkan satu rantai nilai data (*data value chain*) yang berkesinambungan. Kegagalan pada satu lapisan, misalnya konektivitas jaringan yang tidak stabil di lokasi terpencil dapat menghambat keseluruhan manfaat integrasi, betapapun canggihnya model BIM atau algoritma analitik yang digunakan (Hakimi *et al.*, 2023).

D. Tantangan dan Peluang Digitalisasi Infrastruktur

Sebagaimana halnya transformasi teknologi pada sektor-sektor lain, digitalisasi infrastruktur melalui BIM, IoT, dan *smart infrastructure* tidak terlepas dari berbagai tantangan implementasi, sekaligus membuka peluang strategis yang signifikan bagi kemajuan industri konstruksi. Subbab ini menguraikan tantangan tersebut ke dalam tiga kategori utama yaitu teknis, sumber daya manusia dan budaya organisasi, serta regulasi dan pembiayaan, sebelum membahas peluang yang dapat dioptimalkan serta peta jalan strategis ke depan.

1. Tantangan Teknis dan Interoperabilitas

Tantangan teknis paling mendasar dalam integrasi BIM, IoT, dan *smart infrastructure* adalah persoalan interoperabilitas, yaitu kemampuan berbagai perangkat lunak, perangkat keras, dan format data untuk saling bertukar informasi tanpa kehilangan makna atau integritas data (Hall *et al.*, 2023). Meskipun standar seperti *Industry Foundation Classes (IFC)* telah dikembangkan untuk mengatasi persoalan ini, kenyataannya masih banyak vendor perangkat lunak yang menggunakan format data eksklusif (*proprietary format*), sehingga menghambat kolaborasi lintas platform (Aladag, Demirdögen, & Isık, 2016; Izbash & Babayev, 2024).

Pada sisi IoT, tantangan teknis meliputi keterbatasan infrastruktur jaringan di lokasi proyek yang terpencil, konsumsi daya perangkat sensor, keamanan siber terhadap data sensitif infrastruktur kritikal, serta volume data yang sangat besar (*big data*) yang memerlukan kapasitas penyimpanan dan pemrosesan memadai (Waqar *et al.*, 2024; Chen & Luo, 2022). Ketika seluruh tantangan teknis ini digabungkan dalam upaya membangun *digital twin* yang menyeluruh, kompleksitas integrasi sistem menjadi berlipat ganda dan menuntut keahlian rekayasa perangkat lunak yang sebelumnya tidak lazim dimiliki oleh insinyur sipil konvensional (Ozturk, 2021).

Isu keamanan siber (*cybersecurity*) layak mendapat perhatian khusus mengingat semakin banyaknya infrastruktur kritikal seperti jaringan air bersih, sistem transportasi, jaringan listrik yang terhubung ke internet melalui sensor IoT. Setiap titik konektivitas pada dasarnya merupakan potensi celah keamanan (*attack surface*) yang, jika dieksploitasi pihak yang tidak berwenang, dapat mengakibatkan

gangguan operasional serius atau bahkan membahayakan keselamatan publik (Chen & Luo, 2022). Kerangka regulasi seperti Peraturan Kecerdasan Buatan Uni Eropa (*AI Act*) mulai mengatur penggunaan sistem cerdas pada infrastruktur berisiko tinggi, termasuk sistem pemantauan konstruksi berbasis kecerdasan buatan, sebagai langkah antisipatif terhadap risiko tersebut. Sektor konstruksi, yang secara historis belum terbiasa dengan praktik keamanan siber tingkat tinggi, perlu mengadopsi standar keamanan data yang setara dengan sektor teknologi informasi pada umumnya seiring meningkatnya derajat konektivitas infrastruktur fisik.

2. Tantangan Sumber Daya Manusia dan Budaya Organisasi

Selain tantangan teknis, resistensi terhadap perubahan (*resistance to change*) kerap menjadi penghambat utama adopsi teknologi digital dalam industri konstruksi yang secara historis bersifat konservatif dan sangat bergantung pada metode kerja konvensional (Liao & Teo, 2018). Profesional yang telah lama menguasai metode kerja tradisional cenderung memandang BIM dan teknologi digital lainnya sebagai ancaman terhadap keahlian dan otoritas profesional mereka, sebuah fenomena yang oleh beberapa peneliti disebut sebagai negosiasi psikologis identitas profesi (Ahmed, 2018; Mercer, 2019).

Di sisi lain, kesenjangan kompetensi digital (*digital skill gap*) menjadi persoalan struktural, terutama di negara berkembang. Ketersediaan tenaga ahli yang benar-benar menguasai perangkat lunak BIM dan analitik data konstruksi masih terbatas, sementara program pelatihan yang tersedia belum sepenuhnya menjangkau seluruh pelaku industri, khususnya pada perusahaan skala kecil dan menengah (Era Digitalisasi Konstruksi, 2020; PT. Buana Enjiniring Konsultan, 2025). Kepemimpinan organisasi yang tidak memiliki visi jangka panjang terhadap transformasi digital turut memperlambat proses adopsi teknologi secara menyeluruh (Hall *et al.*, 2023).

3. Tantangan Regulasi, Kebijakan, dan Pembiayaan

Kerangka regulasi yang belum sepenuhnya adaptif terhadap teknologi baru turut menghambat digitalisasi infrastruktur. Ketidadaan standar wajib penggunaan BIM pada seluruh jenjang proyek pemerintah, misalnya, menyebabkan penerapannya bersifat sukarela dan tidak merata antarwilayah maupun antarsektor (Chacón, 2021). Selain itu,

ketidakjelasan kerangka hukum mengenai kepemilikan data, tanggung jawab atas kesalahan model digital, serta perlindungan data yang dihasilkan sistem IoT pada infrastruktur kritikal turut menjadi sumber kekhawatiran para pemangku kepentingan (Chen & Luo, 2022).

Dari sisi pembiayaan, investasi awal yang dibutuhkan untuk penerapan BIM, sensor IoT, dan platform *digital twin*, mencakup perangkat lunak, perangkat keras, infrastruktur jaringan, hingga pelatihan sumber daya manusia kerap dipandang sebagai beban biaya jangka pendek yang sulit dijustifikasi, terutama oleh perusahaan konstruksi berskala kecil dengan margin keuntungan yang tipis (Hall *et al.*, 2023). Padahal, sejumlah kajian menunjukkan bahwa digitalisasi penuh pada sektor konstruksi berpotensi menghasilkan penghematan biaya tahunan sebesar 13 hingga 21 persen pada tahap desain dan konstruksi, serta 10 hingga 17 persen pada tahap operasional (Bado *et al.*, 2022).

Tabel 1.8 Ringkasan Tantangan Digitalisasi Infrastruktur

Kategori	Tantangan Utama	Contoh Manifestasi
Teknis	Interoperabilitas data, keterbatasan jaringan, keamanan siber	Format data eksklusif antarvendor, sinyal lemah di lokasi terpencil
SDM & Budaya	Resistensi terhadap perubahan, kesenjangan kompetensi digital	Preferensi metode kerja konvensional, minimnya tenaga ahli BIM
Regulasi & Kebijakan	Standar belum wajib, ketidakjelasan tata kelola data	Penerapan BIM masih bersifat sukarela pada banyak proyek
Pembiayaan	Biaya investasi awal tinggi, ketidakpastian pengembalian investasi	Perusahaan skala kecil kesulitan mendanai transisi digital

Sumber: Diolah dari Hall *et al.* (2023); Chen & Luo (2022); tinjauan *hambatan BIM* (2025)

Tabel 1.9 Ilustrasi Kasus: Pemantauan Terowongan Berbasis IoT dan BIM

Elemen	Uraian
Konteks	Terowongan jalan raya sepanjang beberapa kilometer yang melintasi kawasan perbukitan dengan risiko rembesan air dan pergerakan tanah
Teknologi diterapkan	Model BIM terowongan yang disinkronkan dengan sensor kelembapan, <i>tiltmeter</i> , dan sensor kualitas udara terowongan
Manfaat operasional	Deteksi dini rembesan air sebelum berkembang menjadi kerusakan struktural; pemantauan kualitas udara untuk keselamatan pengguna jalan
Tantangan yang dihadapi	Keterbatasan sinyal jaringan di dalam terowongan; kebutuhan catu daya mandiri untuk sensor pada lokasi terpencil
Pembelajaran utama	Integrasi BIM-IoT paling efektif ketika direncanakan sejak tahap desain, bukan ditambahkan setelah konstruksi selesai

Sumber: Disintesis dari prinsip pemantauan struktur pada Hu, Olgun & Assaad (2024); Bado, Casas & Kaklauskas (2022)

Ilustrasi pada kotak diatas menegaskan sebuah prinsip penting yang berlaku umum dalam penerapan *smart infrastructure*: integrasi teknologi digital akan memberikan manfaat optimal apabila direncanakan secara terpadu sejak tahap perencanaan dan perancangan (*integrated design thinking*), bukan sekadar ditambahkan sebagai pelengkap setelah konstruksi fisik rampung. Prinsip inilah yang akan menjadi, khususnya ketika membahas metodologi penerapan BIM dan IoT secara lebih teknis dan operasional.

Di Indonesia, dasar regulasi penerapan BIM secara wajib mulai diletakkan melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 22/PRT/M/2018 tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara, yang mewajibkan penggunaan BIM pada bangunan gedung negara tidak sederhana dengan kriteria luas di atas 2.000 meter persegi dan lebih dari dua lantai. Ketentuan ini kemudian diperkuat melalui Peraturan Pemerintah Nomor 16 Tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung, yang mewajibkan penggunaan BIM hingga dimensi kelima

untuk pekerjaan padat teknologi dan hingga dimensi kedelapan untuk pekerjaan padat modal. Pada sektor jalan dan jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga turut menerbitkan Surat Edaran Nomor 11/SE/Db/2021 tentang Penerapan *Building Information Modelling* pada Perencanaan Teknis, Konstruksi, dan Pemeliharaan Jalan dan Jembatan.

Meskipun kerangka regulasi tersebut menunjukkan komitmen pemerintah yang jelas, cakupan penerapannya masih terbatas pada bangunan gedung negara berskala tertentu dan proyek jalan-jembatan nasional, sehingga belum menjangkau secara menyeluruh proyek swasta maupun proyek pemerintah daerah berskala kecil-menengah. Kesenjangan cakupan regulasi semacam ini merupakan pola umum yang juga ditemukan pada negara berkembang lain dalam tahap awal transisi menuju digitalisasi konstruksi wajib dan menyeluruh (Chacón, 2021).

4. Peluang Strategis Digitalisasi Infrastruktur

Di balik berbagai tantangan tersebut, digitalisasi infrastruktur membuka peluang strategis yang signifikan. Pertama, peningkatan produktivitas dan efisiensi biaya melalui deteksi dini kesalahan desain (*clash detection*), optimasi jadwal konstruksi, dan pengurangan pekerjaan ulang (*rework*) yang selama ini menjadi sumber pemborosan utama dalam industri konstruksi (Sholeh, Fauziyah, & Khasani, 2020). Kedua, peningkatan keselamatan kerja melalui pemantauan kondisi lokasi proyek secara *real-time* dan peringatan dini terhadap potensi bahaya (Wu, Hou, & Zhang, 2022).

Ketiga, pengelolaan aset infrastruktur yang lebih proaktif dan berbasis data melalui pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*), yang memungkinkan intervensi dilakukan sebelum kerusakan menjadi kritis, sekaligus memperpanjang umur layan aset dan mengurangi biaya pemeliharaan reaktif jangka panjang (Hussain, Ye, Chi, & Hsu, 2024). Keempat, kontribusi terhadap keberlanjutan lingkungan melalui optimasi penggunaan material, pengurangan limbah konstruksi, dan analisis jejak karbon bangunan sepanjang siklus hidupnya (dimensi 6D BIM) (Biswas *et al.*, 2024). Kelima, peningkatan kualitas pengambilan keputusan melalui basis bukti data yang lebih objektif, transparan, dan dapat ditelusuri dibandingkan pengambilan keputusan berbasis intuisi maupun pengalaman semata (Hossam & Youssef, 2024).

Keenam, terbukanya model bisnis dan peluang kewirausahaan baru di bidang jasa konsultasi BIM, penyediaan platform *digital twin*,

serta pengembangan perangkat sensor IoT yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik infrastruktur tropis dan kepulauan seperti Indonesia. Peluang ini secara khusus relevan bagi perusahaan rintisan teknologi konstruksi (*construction technology startups*) yang dapat mengisi celah pasar antara vendor perangkat lunak global dengan kebutuhan operasional pelaku konstruksi lokal.

Tabel 1.10 Perbandingan Manfaat Kuantitatif Pendekatan Konvensional dan Digital

Indikator Kinerja	Pendekatan Konvensional	Pendekatan Terdigitalisasi
Potensi penghematan biaya tahap desain-konstruksi	Basis rujukan (tanpa optimasi digital)	Estimasi penghematan 13–21% (Bado et al., 2022)
Potensi penghematan biaya tahap operasional	Basis rujukan (tanpa optimasi digital)	Estimasi penghematan 10–17% (Bado et al., 2022)
Deteksi konflik desain antardisiplin	Umumnya ditemukan saat konstruksi berjalan	Terdeteksi pada tahap desain melalui <i>clash detection</i> BIM
Pendekatan pemeliharaan aset	Reaktif, berbasis jadwal inspeksi tetap	Prediktif, berbasis kondisi aktual dari data sensor

Sumber: Diolah dari Bado, Casas & Kaklauskas (2022); Hu, Olgun & Assaad (2024)



BAB II

BUILDING INFORMATION MODELING (BIM): KONSEP DAN PERKEMBANGAN

Jika Bab 1 membahas transformasi digital teknik sipil secara luas, termasuk keterkaitan antara *Building Information Modeling* (BIM), *Internet of Things* (IoT), dan *smart infrastructure*, maka Bab 2 ini memfokuskan pembahasan secara mendalam pada BIM sebagai fondasi utama dari seluruh ekosistem digital tersebut. BIM bukan sekadar perangkat lunak pemodelan tiga dimensi, melainkan sebuah metodologi kerja kolaboratif yang mengubah cara insinyur, arsitek, kontraktor, dan pemilik aset merencanakan, merancang, membangun, dan mengelola infrastruktur sepanjang siklus hidupnya (Izbash & Babayev, 2024).

A. Definisi dan Prinsip Dasar BIM

Sebelum membahas dimensi, siklus hidup, dan regulasi BIM secara lebih teknis, penting untuk membangun pemahaman yang kokoh mengenai apa sesungguhnya BIM itu, prinsip-prinsip apa yang mendasarinya, serta bagaimana BIM secara fundamental berbeda dari pendekatan pemodelan digital sebelumnya seperti *Computer-Aided Design* (CAD). Pemahaman konseptual ini menjadi fondasi bagi seluruh pembahasan teknis pada subbab-subbab berikutnya.

1. Definisi BIM dari Berbagai Perspektif

Tidak terdapat satu definisi tunggal yang disepakati secara universal mengenai *Building Information Modeling*, karena istilah ini dipahami secara berbeda tergantung sudut pandang akademik, industri, maupun regulator. Dari perspektif teknologi, BIM didefinisikan sebagai representasi digital karakteristik fisik dan fungsional suatu fasilitas yang berfungsi sebagai sumber pengetahuan bersama untuk mendukung

pengambilan keputusan sepanjang siklus hidupnya, mulai dari konsepsi awal hingga pembongkaran (Cerovsek, 2011). Dari perspektif proses, BIM dipahami sebagai metodologi kolaboratif yang mengatur bagaimana informasi proyek dihasilkan, divalidasi, dipertukarkan, dan dikelola oleh seluruh pemangku kepentingan (ISO, 2020).

Dari perspektif kebijakan Indonesia, dokumen Panduan Adopsi BIM dalam Organisasi yang diterbitkan Pusat Penelitian dan Pengembangan Kebijakan dan Penerapan Teknologi Kementerian PUPR mendefinisikan BIM sebagai representasi digital dari karakter fisik dan karakter fungsional suatu bangunan atau objek BIM, yang menjadi sumber pengetahuan bersama untuk menghasilkan keputusan yang andal sepanjang siklus hidup proyek. Ketiga sudut pandang tersebut yaitu teknologi, proses, dan kebijakan, pada dasarnya saling melengkapi dan menegaskan bahwa BIM harus dipahami secara holistik, bukan direduksi hanya sebagai perangkat lunak pemodelan 3D semata (Biswas, Sim, & Lau, 2024).

Tabel 2.1 Definisi BIM dari Berbagai Perspektif

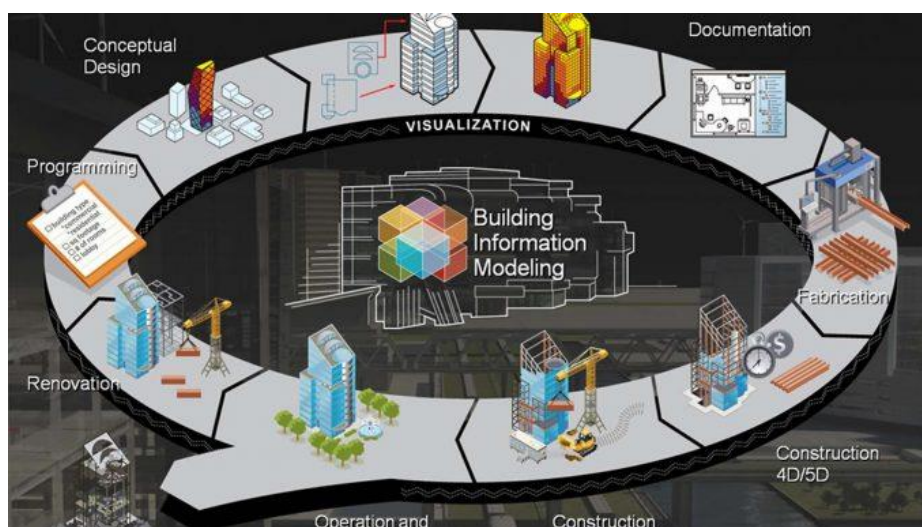
Perspektif	Fokus Definisi	Sumber Rujukan
Teknologi	Representasi digital 3D kaya informasi sebagai basis data objek bangunan	Cerovsek (2011); Biswas et al. (2024)
Proses	Metodologi kolaboratif pengelolaan informasi sepanjang siklus hidup aset	ISO 19650 (2020)
Kebijakan Indonesia	Representasi digital karakter fisik-fungsional sebagai sumber pengetahuan bersama	Panduan Adopsi BIM, Kementerian PUPR (2018)
Manajemen Proyek	Alat kolaborasi lintas disiplin untuk efisiensi biaya dan waktu proyek	Sholeh, Fauziyah & Khasani (2020)

Perbedaan definisi antarlembaga standar turut mencerminkan penekanan yang berbeda-beda dalam memahami cakupan BIM. *National Building Information Model Standard* (NBIMS) di Amerika Serikat mendefinisikan BIM sebagai representasi digital karakteristik fisik dan

fungsional suatu fasilitas yang berfungsi sebagai basis pengetahuan bersama untuk mendukung keputusan sepanjang siklus hidupnya. Sementara itu, *buildingSMART International* ialah organisasi nirlaba internasional yang mengembangkan standar IFC, menekankan definisi BIM pada aspek keterbukaan dan interoperabilitas data lintas platform sebagai prasyarat kolaborasi digital yang efektif. Ketiga rujukan ini dapat diperkaya dengan penekanan NBIMS dan buildingSMART, yang bersama-sama menegaskan bahwa BIM adalah konsep multidimensi yang tidak dapat direduksi menjadi definisi tunggal yang sederhana.

2. BIM sebagai Proses, Bukan Sekadar Perangkat Lunak

Kesalahpahaman yang paling umum terjadi di kalangan praktisi pemula adalah menyamakan BIM dengan perangkat lunak tertentu, seperti *Autodesk Revit*, *ArchiCAD*, atau *Tekla Structures*. Padahal, perangkat lunak tersebut hanyalah alat (*tools*) yang memfasilitasi penerapan BIM sebagai sebuah proses. BIM yang sesungguhnya mencakup keseluruhan alur kerja kolaboratif, mulai dari penetapan kebutuhan informasi oleh pemilik proyek (*Employer's Information Requirements/EIR*), penyusunan rencana pelaksanaan BIM (*BIM Execution Plan/BEP*), hingga mekanisme pertukaran dan validasi data antarpemangku kepentingan (ISO, 2020).



Gambar 2.1 Teknologi *Building Information Modelling*

Penekanan pada BIM sebagai proses ini memiliki implikasi praktis yang signifikan. Sebuah organisasi dapat memiliki lisensi perangkat lunak BIM termutakhir, namun jika tidak disertai perubahan pada alur kerja, budaya kolaborasi, dan tata kelola informasi, maka manfaat BIM tidak akan terealisasi secara optimal (Hall *et al.*, 2023). Sebaliknya, penerapan BIM yang matang justru ditandai oleh perubahan mendasar pada cara tim proyek berkomunikasi dan berbagi tanggung jawab, jauh melampaui sekadar penguasaan teknis perangkat lunak (Karmakar & Delhi, 2021).

3. Prinsip-Prinsip Dasar BIM

Sedikitnya terdapat lima prinsip dasar yang menjadi fondasi penerapan BIM secara efektif. Pertama, prinsip *single source of truth*, yaitu keberadaan satu model informasi terpadu yang menjadi rujukan tunggal bagi seluruh pemangku kepentingan, sehingga meminimalkan inkonsistensi data antardisiplin. Kedua, prinsip kolaborasi berbasis data (*data-driven collaboration*), yang menempatkan pertukaran informasi terstruktur sebagai inti proses kerja, bukan sekadar pertukaran dokumen statis (Biswas *et al.*, 2024).

Ketiga, prinsip interoperabilitas, yaitu kemampuan model dan data untuk dipertukarkan secara konsisten antarplatform perangkat lunak yang berbeda melalui format data terbuka seperti *Industry Foundation Classes (IFC)*. Keempat, prinsip informasi yang terstruktur secara bertahap (*progressive information development*), yang tercermin dalam konsep *Level of Development (LOD)* dan *Level of Information Need (LOIN)*, model dikembangkan secara bertahap sesuai kebutuhan pada setiap fase proyek, bukan langsung didetailkan secara menyeluruh di awal (Godager, Onstein, & Huang, 2022). Kelima, prinsip keberlanjutan informasi sepanjang siklus hidup (*lifecycle information continuity*), yang menegaskan bahwa data yang dihasilkan pada tahap desain harus tetap dapat digunakan dan diperkaya pada tahap konstruksi maupun operasi, tanpa perlu dibangun ulang dari nol (Jiang, Ma, Broyd, & Chen, 2021).

Tabel 2.2 Lima Prinsip Dasar *Building Information Modeling*

No	Prinsip	Penjelasan Ringkas
1	<i>Single Source of Truth</i>	Satu model informasi terpadu sebagai rujukan tunggal seluruh pemangku kepentingan
2	Kolaborasi Berbasis Data	Pertukaran informasi terstruktur sebagai inti proses kerja, bukan dokumen statis
3	Interoperabilitas	Data dapat dipertukarkan antarplatform melalui format terbuka seperti <i>IFC</i>
4	Pengembangan Informasi Bertahap	Model dikembangkan bertahap sesuai kebutuhan fase proyek (LOD/LOIN)
5	Kesinambungan Informasi Siklus Hidup	Data desain tetap dapat digunakan dan diperkaya pada tahap konstruksi-operasi

Sumber: Disintesis dari ISO 19650 (2020); Biswas et al. (2024); Godager, Onstein & Huang (2022); Jiang et al. (2021)

4. Komponen Utama Ekosistem BIM: Manusia, Proses, dan Teknologi

Penerapan BIM yang berhasil senantiasa bertumpu pada keseimbangan tiga komponen utama, yaitu manusia (*people*), proses (*process*), dan teknologi (*technology*). Komponen manusia mencakup kompetensi, kesediaan berkolaborasi, dan pemahaman peran masing-masing pihak dalam ekosistem BIM, mulai dari *BIM Manager*, *BIM Coordinator*, hingga *BIM Modeler*. Komponen proses mencakup alur kerja, standar penamaan berkas, protokol pertukaran data, dan mekanisme validasi informasi yang disepakati bersama. Komponen teknologi mencakup perangkat lunak pemodelan, platform *Common Data Environment* (CDE), serta infrastruktur perangkat keras dan jaringan pendukungnya (Hall et al., 2023; Karmakar & Delhi, 2021).

Kegagalan penerapan BIM pada banyak organisasi umumnya bukan disebabkan oleh keterbatasan teknologi, melainkan oleh ketidakseimbangan ketiga komponen tersebut, misalnya investasi besar

pada perangkat lunak tanpa disertai pelatihan sumber daya manusia yang memadai, atau sebaliknya, tim yang kompeten namun tidak didukung proses kerja yang terstruktur. Oleh karena itu, strategi implementasi BIM yang matang senantiasa mempertimbangkan pengembangan ketiga komponen tersebut secara simultan dan seimbang.

B. Dimensi BIM (3D, 4D, 5D, 6D, dan 7D)

Salah satu karakteristik paling khas dari BIM dibandingkan pemodelan digital konvensional adalah kemampuannya untuk mengakomodasi berbagai lapisan informasi yang dikenal sebagai dimensi BIM. Setiap dimensi menambahkan kategori data tertentu di atas model geometris dasar, sehingga model BIM berevolusi dari sekadar representasi visual menjadi platform manajemen informasi proyek yang komprehensif (Revizto, 2026; Sompolgrunk, Banihashemi, Golzad, & Le Nguyen, 2024).

1. Dimensi 3D: Model Geometris Terintegrasi

Dimensi 3D merupakan fondasi dasar BIM, yaitu representasi geometris tiga dimensi yang menggambarkan bentuk, ukuran, dan posisi spasial elemen bangunan secara akurat. Berbeda dengan model 3D pada CAD konvensional yang bersifat representasi visual semata, model 3D dalam BIM bersifat parametrik, setiap elemen memiliki hubungan logis dengan elemen lain, sehingga perubahan pada satu elemen akan secara otomatis memengaruhi elemen terkait lainnya (Biswas *et al.*, 2024). Pada dimensi ini, elemen arsitektur, struktur, dan *mechanical-electrical-plumbing* (MEP) dimodelkan dalam satu lingkungan digital bersama, memungkinkan deteksi konflik antardisiplin (*clash detection*) dilakukan secara otomatis sebelum konstruksi dimulai (Neuroject, 2024).

2. Dimensi 4D: Simulasi Waktu dan Penjadwalan Konstruksi

Dimensi 4D menambahkan informasi waktu ke dalam model 3D, menghubungkan setiap elemen bangunan dengan jadwal pelaksanaan konstruksinya. Melalui integrasi ini, tim proyek dapat mensimulasikan urutan tahapan konstruksi secara visual sebelum pekerjaan fisik dimulai, sehingga potensi konflik penjadwalan, keterbatasan ruang kerja, maupun kebutuhan sumber daya dapat diidentifikasi lebih awal (Revizto, 2026). Tinjauan sistematis terhadap manfaat BIM 4D menegaskan bahwa

penerapannya secara konsisten menurunkan risiko keterlambatan proyek melalui peningkatan akurasi desain, deteksi dini konflik, serta penguatan kolaborasi antarpemangku kepentingan.

Simulasi 4D juga bermanfaat sebagai alat komunikasi visual antara tim proyek dengan pemangku kepentingan non-teknis, seperti pemilik proyek atau masyarakat terdampak, karena mampu menggambarkan proses pembangunan secara naratif dan mudah dipahami dibandingkan jadwal berbentuk tabel atau diagram batang konvensional.

3. Dimensi 5D: Estimasi dan Pengendalian Biaya

Dimensi 5D mengintegrasikan informasi biaya ke dalam model BIM, memungkinkan estimasi anggaran dihasilkan secara otomatis berdasarkan kuantitas elemen yang termodelkan (*automated quantity take-off*). Setiap perubahan pada desain, baik penambahan, pengurangan, maupun modifikasi elemen akan secara langsung memperbarui estimasi biaya proyek secara real-time, jauh lebih cepat dan akurat dibandingkan proses estimasi manual berbasis gambar 2D (Snaptrude, 2025). Kemampuan ini secara signifikan meningkatkan akurasi pengendalian anggaran sepanjang siklus proyek dan mengurangi risiko pembengkakan biaya akibat kesalahan estimasi (Sholeh *et al.*, 2020). Kemampuan ini secara signifikan meningkatkan akurasi pengendalian anggaran sepanjang siklus proyek dan mengurangi risiko pembengkakan biaya akibat kesalahan estimasi (Sholeh *et al.*, 2020).

4. Dimensi 6D: Keberlanjutan dan Kinerja Energi

Dimensi 6D memperluas cakupan BIM ke aspek keberlanjutan lingkungan, dengan mengintegrasikan data konsumsi energi, jejak karbon, dan penilaian siklus hidup material (*life cycle assessment*) ke dalam model. Melalui simulasi performa energi sejak tahap desain awal, tim proyek dapat membandingkan berbagai alternatif material dan sistem bangunan berdasarkan dampak lingkungannya, sehingga keputusan desain yang berkelanjutan dapat diambil jauh lebih dini dibandingkan pendekatan konvensional yang baru mengevaluasi aspek lingkungan setelah desain selesai (Neuroject, 2024). Studi kualitatif terbaru mengenai penerapan BIM 6D pada sektor konstruksi menegaskan bahwa integrasi dimensi ini secara langsung mendukung pencapaian target keberlanjutan yang selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan

(*Sustainable Development Goals/SDGs*) yang dicanangkan Perserikatan Bangsa-Bangsa.

C. Siklus Hidup Proyek Berbasis BIM

Salah satu kekuatan utama BIM terletak pada kemampuannya mendukung kesinambungan informasi sepanjang seluruh siklus hidup aset infrastruktur, mulai dari gagasan awal hingga aset tersebut akhirnya dibongkar atau direnovasi total. Subbab ini menguraikan bagaimana model BIM berkembang dan berperan berbeda pada setiap tahap siklus hidup proyek, serta bagaimana *Common Data Environment* (CDE) berfungsi sebagai tulang punggung yang menjaga konsistensi informasi antartahap.

1. Tahap Perencanaan dan Studi Kelayakan

Pada tahap paling awal siklus hidup proyek, BIM berperan dalam mendukung studi kelayakan dan perencanaan konseptual. Model pada tahap ini umumnya dikembangkan pada tingkat LOD 100, berupa representasi generik yang menggambarkan volume, luas lantai, dan tata letak kasar tanpa detail geometris yang presisi. Meskipun sederhana, model konseptual ini telah dapat dimanfaatkan untuk analisis kelayakan lokasi, estimasi biaya awal secara garis besar, serta simulasi masif bangunan terhadap kondisi lingkungan sekitar seperti pencahayaan matahari dan pola angin (BIMForum, 2023).

Pada tahap ini pula, pemilik proyek merumuskan kebutuhan informasi (*Employer's Information Requirements/EIR*) yang menjadi acuan bagi seluruh tim proyek dalam mengembangkan model pada tahap-tahap berikutnya. Kejelasan EIR sejak tahap perencanaan terbukti menjadi faktor penentu keberhasilan implementasi BIM secara keseluruhan, karena kesalahan atau ambiguitas pada tahap ini akan terus dibawa dan membesar pada tahap-tahap selanjutnya (ISO, 2020).

2. Tahap Perancangan (*Design Development*)

Tahap perancangan merupakan fase ketika model BIM berkembang secara signifikan, umumnya melalui peningkatan bertahap dari LOD 200 menuju LOD 300 dan LOD 350. Pada fase skematik (LOD 200), tim perancang mengembangkan geometri perkiraan dengan dimensi dan orientasi umum untuk mengeksplorasi berbagai alternatif

desain. Memasuki fase detail desain (LOD 300), geometri disempurnakan menjadi presisi sesuai sistem koordinat proyek, siap untuk dikoordinasikan secara menyeluruh antardisiplin arsitektur, struktur, dan MEP.

Koordinasi antardisiplin pada tahap ini difasilitasi oleh proses deteksi konflik (*clash detection*) yang dilakukan secara berkala melalui pertemuan koordinasi BIM (*BIM coordination meeting*), di mana seluruh disiplin menggabungkan model masing-masing ke dalam satu model gabungan (*federated model*) untuk diperiksa konsistensinya. Praktik ini terbukti secara signifikan mengurangi jumlah permintaan informasi (*Request for Information/RFI*) dan pekerjaan ulang pada tahap konstruksi dibandingkan pendekatan koordinasi manual berbasis gambar 2D (Sholeh *et al.*, 2020).

3. Tahap Konstruksi dan Fabrikasi

Memasuki tahap konstruksi, model BIM berkembang menuju LOD 400, yang memuat informasi presisi tinggi untuk keperluan fabrikasi dan pemasangan elemen di lapangan. Pada tahap ini, model BIM tidak lagi hanya berfungsi sebagai alat visualisasi desain, melainkan menjadi instrumen kerja operasional bagi kontraktor dan pabrikan, mulai dari perencanaan urutan pemasangan elemen prafabrikasi, koordinasi logistik material, hingga panduan kerja bagi operator alat berat berbasis model (*model-based construction*) (Karmakar & Delhi, 2021).

Integrasi BIM dengan teknologi pemindaian laser (*laser scanning*) dan fotogrametri pada tahap ini memungkinkan verifikasi kesesuaian kondisi terbangun dengan model desain secara berkala, sehingga penyimpangan dapat dideteksi dan dikoreksi sedini mungkin sebelum berdampak pada tahapan pekerjaan selanjutnya. Pada akhir tahap konstruksi, model dimutakhirkan menjadi LOD 500 atau model *as-built*, yang merepresentasikan kondisi bangunan terverifikasi sesuai realisasi di lapangan, bukan lagi sekadar rencana desain.

4. Tahap Serah Terima dan Operasi (*Handover*)

Tahap serah terima (*handover*) merupakan titik kritis dalam siklus hidup proyek berbasis BIM, karena pada tahap inilah model *as-built* yang kaya informasi geometris diperkaya lebih lanjut dengan data operasional untuk membentuk model informasi aset (*Asset Information Model/AIM*). Data yang disertakan mencakup manual operasi peralatan,

sertifikat garansi, jadwal pemeliharaan preventif, hingga kontak teknis pemasok dan subkontraktor terkait (Revizto, 2026).

Kualitas proses serah terima informasi ini sangat menentukan efektivitas pengelolaan fasilitas pada tahap berikutnya. Riset menunjukkan bahwa proyek dengan proses *handover* BIM yang terstruktur dengan baik mengalami pengurangan signifikan pada waktu yang dibutuhkan staf pengelola fasilitas untuk menemukan informasi aset dibandingkan proyek yang hanya menyerahkan dokumentasi kertas konvensional (Hu *et al.*, 2024).

D. Standar dan Regulasi BIM

Penerapan BIM secara konsisten dan dapat dipertukarkan lintas organisasi maupun lintas negara hanya dapat terwujud melalui keberadaan standar dan regulasi yang jelas. Subbab ini membahas standar internasional yang menjadi acuan global, kerangka regulasi di berbagai negara, kebijakan spesifik di Indonesia, serta sistem sertifikasi kompetensi sumber daya manusia di bidang BIM.

1. Standar Internasional: ISO 19650 dan Seri Pendukungnya

ISO 19650 merupakan seri standar internasional untuk manajemen informasi menggunakan BIM sepanjang siklus hidup aset terbangun, yang dikembangkan berdasarkan standar Inggris PAS 1192 dan diadopsi secara internasional sejak 2018. Seri ISO 19650 terdiri atas beberapa bagian dengan cakupan yang saling melengkapi, mulai dari konsep dan prinsip dasar hingga panduan keamanan informasi.

Tabel 2.3 Struktur Seri Standar ISO 19650

Bagian	Judul/Cakupan	Fokus Utama
ISO 19650-1	Konsep dan Prinsip Dasar	Kerangka kerja umum, terminologi, dan prinsip manajemen informasi
ISO 19650-2	Fase Pengiriman Aset (<i>Delivery Phase</i>)	Proses dan tanggung jawab selama desain dan konstruksi

Bagian	Judul/Cakupan	Fokus Utama
ISO 19650-3	Fase Operasional Aset	Manajemen informasi selama masa operasional, pemeliharaan, dan perbaikan
ISO 19650-4	Pertukaran Informasi	Proses berbasis CDE untuk menjamin kualitas informasi sebelum dan sesudah pertukaran
ISO 19650-5	Keamanan Informasi	Pendekatan keamanan untuk manajemen informasi pada aset sensitif
ISO 7817-1 (LOIN)	Level of Information Need	Spesifikasi kebutuhan informasi geometris dan non-geometris

Sumber: Diolah dari ISO 19650 Series (2018–2024)

Prinsip utama yang ditegaskan ISO 19650-1 adalah pembentukan budaya kolaboratif yang didukung oleh *Common Data Environment*, dengan konsistensi yang dicapai melalui proses standar, format data terstruktur, dan kendali versi yang ketat, sehingga informasi dapat digunakan kembali secara efisien sepanjang siklus hidup aset sekaligus mencegah kesalahan akibat data yang usang atau keliru penamaan.

2. *Industry Foundation Classes (IFC) dan Interoperabilitas Data*

Selain ISO 19650 yang mengatur proses manajemen informasi, interoperabilitas data BIM antarplatform perangkat lunak yang berbeda diwujudkan melalui format data terbuka *Industry Foundation Classes* (IFC), yang dikembangkan dan dipelihara oleh organisasi nirlaba internasional *buildingSMART*. IFC memungkinkan model BIM yang dibuat pada satu perangkat lunak dapat dibuka, diperiksa, dan dianalisis pada perangkat lunak lain tanpa kehilangan data geometris maupun atribut informasinya.

Untuk mendukung validasi kebutuhan informasi non-geometris secara terprogram, *buildingSMART* turut mengembangkan *Information Delivery Specification* (IDS) sebagai mekanisme penyusunan dan validasi persyaratan informasi yang terikat pada skema IFC, serta *buildingSMART Data Dictionary* (bsDD) yang menyediakan alur kerja

standar untuk menjamin kualitas data, konsistensi informasi, dan interoperabilitas lintas bahasa dan budaya. Ketiga komponen ini yaitu IFC, IDS, dan bsDD membentuk ekosistem *openBIM* yang menjadi alternatif terbuka terhadap format data eksklusif (*proprietary format*) milik vendor perangkat lunak tertentu.

3. Regulasi BIM di Berbagai Negara

Berbagai negara menempuh pendekatan regulasi yang berbeda dalam mewajibkan penggunaan BIM pada proyek konstruksi, khususnya proyek sektor publik. Inggris menjadi salah satu negara perintis dengan mewajibkan BIM Level 2 pada seluruh proyek pemerintah pusat sejak 2016, yang kemudian menjadi cikal bakal pengembangan standar PAS 1192 dan selanjutnya diinternasionalisasi menjadi ISO 19650. Singapura melalui *Building and Construction Authority* (BCA) mewajibkan pengajuan gambar regulasi berbasis BIM untuk proyek dengan luas lantai kotor di atas ambang batas tertentu, disertai insentif pendanaan bagi perusahaan yang mengadopsi BIM secara sukarela pada tahap awal kebijakan (Hall *et al.*, 2023).

Pendekatan yang berbeda ditempuh banyak negara berkembang, yang cenderung menerapkan kebijakan bertahap, memulai dari proyek pemerintah berskala besar sebagai proyek percontohan sebelum memperluas cakupan kewajiban ke proyek yang lebih kecil maupun sektor swasta (Izbash & Babayev, 2024). Pola bertahap inilah yang juga tercermin dalam perkembangan regulasi BIM di Indonesia.

Tabel 2.4 Perbandingan Pendekatan Regulasi BIM di Berbagai Negara

Negara/Kawasan	Pendekatan Regulasi	Karakteristik Utama
Inggris	Mandat penuh pada proyek pemerintah pusat sejak 2016	Perintis standar PAS 1192, cikal bakal ISO 19650
Singapura	Mandat berbasis ambang luas lantai bangunan	Kombinasi mandat dan insentif pendanaan awal
Uni Eropa (umumnya)	Mandat bervariasi antarnegara anggota	Mendorong harmonisasi melalui adopsi ISO 19650

Negara/Kawasan	Pendekatan Regulasi	Karakteristik Utama
Negara berkembang (umum)	Mandat bertahap dimulai dari proyek pemerintah besar	Fokus pada proyek percontohan sebelum perluasan cakupan
Indonesia	Mandat bertahap berbasis kriteria luas dan kompleksitas	Diatur melalui Permen PUPR dan Peraturan Pemerintah

Sumber: Diolah dari Hall et al. (2023); Izbash & Babayev (2024)

4. Regulasi dan Kebijakan BIM di Indonesia

Dasar regulasi penerapan BIM di Indonesia mulai diletakkan melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 22/PRT/M/2018 tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara, yang mewajibkan penggunaan BIM pada bangunan gedung negara tidak sederhana dengan kriteria luas di atas 2.000 meter persegi dan lebih dari dua lantai. Keluaran perancangan yang diwajibkan mencakup hasil desain menggunakan BIM untuk gambar arsitektur, struktur, dan utilitas, lengkap dengan rincian volume pekerjaan dan rencana anggaran biaya (Permen PUPR No. 22/PRT/M/2018).

Ketentuan tersebut diperkuat melalui Peraturan Pemerintah Nomor 16 Tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung, yang secara eksplisit membedakan kewajiban BIM berdasarkan kategori pekerjaan: BIM hingga dimensi kelima diwajibkan untuk pekerjaan padat teknologi, yaitu bangunan bertingkat menengah-tinggi dengan risiko tinggi dan kebutuhan peralatan mekanikal-elektrikal; sedangkan BIM hingga dimensi kedelapan diwajibkan untuk pekerjaan padat modal, yaitu bangunan pencakar langit super tinggi dengan teknologi dan risiko yang lebih kompleks (Kompasiana, 2022). Pada sektor jalan dan jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga menerbitkan Surat Edaran Nomor 11/SE/Db/2021 tentang Penerapan BIM pada Perencanaan Teknis, Konstruksi, dan Pemeliharaan Jalan dan Jembatan, memperluas cakupan mandat BIM ke infrastruktur transportasi.

Tabel 2.5 Kerangka Regulasi BIM di Indonesia

Regulasi	Tahun	Cakupan Utama
Permen PUPR No. 22/PRT/M/2018	2018	Mewajibkan BIM pada bangunan gedung negara luas >2.000 m ² dan >2 lantai
PP No. 16 Tahun 2021	2021	Mewajibkan BIM dimensi 5 (padat teknologi) dan dimensi 8 (padat modal)
SE Ditjen Bina Marga No. 11/SE/Db/2021	2021	Penerapan BIM pada perencanaan, konstruksi, pemeliharaan jalan-jembatan
SKKNI No. 3 Tahun 2023	2023	Standar kompetensi kerja nasional bidang BIM

Meskipun kerangka regulasi tersebut menunjukkan komitmen pemerintah yang progresif, cakupan penerapannya saat ini masih terkonsentrasi pada bangunan gedung negara berskala tertentu serta proyek jalan-jembatan nasional, sehingga belum menjangkau secara menyeluruh proyek swasta maupun proyek pemerintah daerah berskala kecil-menengah. Kesenjangan cakupan ini sejalan dengan pola umum yang juga ditemukan pada negara berkembang lain dalam tahap awal transisi menuju digitalisasi konstruksi yang wajib dan menyeluruh (Chacón, 2021).

Tabel 2.6 Ilustrasi Kasus: Penerapan BIM pada Proyek Infrastruktur Skala Nasional

Elemen	Uraian
Konteks	Proyek infrastruktur pemerintah berskala nasional yang mensyaratkan koordinasi antarkementerian dan multikontraktor
Penerapan BIM	Mandat BIM diterapkan sejak tahap perencanaan untuk gedung-gedung fasilitas publik utama sesuai kriteria Permen PUPR No. 22/2018
Manfaat terukur	Koordinasi desain antarpaket pekerjaan yang dikerjakan kontraktor berbeda menjadi lebih terstruktur melalui model federasi

Elemen	Uraian
Tantangan lapangan	Keterbatasan tenaga ahli bersertifikat BIM di lokasi proyek yang jauh dari pusat kota besar
Pembelajaran utama	Mandat regulasi perlu diiringi investasi pelatihan SDM lokal agar manfaat BIM dapat terealisasi secara merata

Ilustrasi pada tabel diatas menggambarkan pola umum yang sering ditemukan pada penerapan mandat BIM berskala besar di negara berkembang: regulasi yang progresif pada tataran kebijakan tidak serta-merta menjamin keberhasilan implementasi di lapangan tanpa disertai investasi paralel pada pengembangan kapasitas sumber daya manusia. Kesenjangan antara ambisi regulasi dan kesiapan implementasi inilah yang mendasari pentingnya kerangka sertifikasi kompetensi.



BAB III

IMPLEMENTASI BIM DALAM PROYEK KONSTRUKSI

Setelah Bab 2 membahas konsep, dimensi, siklus hidup, serta standar dan regulasi BIM secara konseptual, Bab 3 ini beralih pada aspek praktik: bagaimana BIM benar-benar diterapkan dalam operasional sehari-hari proyek konstruksi. Fokus bab ini adalah pada empat area penerapan yang paling menentukan keberhasilan proyek berbasis BIM, yaitu perencanaan dan desain, kolaborasi multidisiplin, deteksi konflik antarelelemen model, serta manajemen proyek dan pengendalian biaya.

Keempat area ini saling berkaitan erat dan pada praktiknya berlangsung secara simultan, bukan berurutan secara kaku. Perencanaan dan desain yang baik menuntut kolaborasi multidisiplin yang efektif; kolaborasi yang efektif menghasilkan deteksi konflik yang lebih dini dan menyeluruh; sedangkan seluruh proses tersebut pada akhirnya harus terikat pada kerangka manajemen proyek dan pengendalian biaya yang disiplin agar nilai BIM benar-benar terealisasi dalam bentuk proyek yang selesai tepat waktu, tepat biaya, dan sesuai spesifikasi mutu (Elghaish, Abrishami, & Hosseini, 2021).

A. Perencanaan dan Desain Berbasis BIM

Tahap perencanaan dan desain merupakan fase dengan pengaruh terbesar terhadap keseluruhan kinerja proyek, mengingat keputusan yang diambil pada tahap ini, meskipun berbiaya rendah untuk diubah akan menentukan sebagian besar biaya, jadwal, dan kualitas yang terjadi pada tahap konstruksi selanjutnya. BIM mengubah secara fundamental bagaimana proses perencanaan dan desain berlangsung, dari pendekatan linier yang terfragmentasi menuju proses iteratif yang terintegrasi dan berbasis data (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2020).

Prinsip ini secara konseptual dikenal luas melalui kurva MacLeamy, yang menggambarkan bahwa kemampuan memengaruhi biaya dan kinerja proyek berada pada titik tertinggi di tahap paling awal desain, sementara biaya untuk melakukan perubahan justru berada pada titik terendah pada tahap tersebut, kondisi yang berbalik sepenuhnya ketika proyek memasuki tahap konstruksi. BIM mendorong pergeseran usaha desain (*effort*) agar terkonsentrasi lebih awal, memanfaatkan momen ketika perubahan masih murah dan pengaruh terhadap hasil akhir masih besar, alih-alih menunda keputusan penting hingga tahap dokumentasi konstruksi sebagaimana lazim terjadi pada alur kerja konvensional (Eastman *et al.*, 2020).

Tabel 3.1 Perbandingan Distribusi Usaha Desain: Alur Kerja Konvensional vs Berbasis BIM

Tahap Proyek	Alur Kerja Konvensional	Alur Kerja Berbasis BIM (Kurva MacLeamy)
Konsep & Skematik	Usaha desain rendah	Usaha desain tinggi, keputusan besar diambil lebih awal
Detail Desain	Usaha desain memuncak	Usaha desain menurun, fokus pada penyempurnaan dan koordinasi
Dokumentasi Konstruksi	Usaha desain sangat tinggi, rawan perubahan mendadak	Usaha desain rendah karena keputusan besar telah difinalisasi
Konstruksi	Perubahan desain mahal dan sering terjadi	Perubahan desain minimal karena konflik telah terdeteksi dini

Sumber: Diadaptasi dari Konsep Kurva MacLeamy dalam Eastman, Teicholz, Sacks & Liston (2020)

1. Peran BIM pada Tahap Perencanaan Awal

Pada tahap perencanaan awal dalam konteks LOD 100, BIM digunakan untuk mendukung studi kelayakan melalui pemodelan konseptual yang memungkinkan evaluasi cepat terhadap berbagai

skenario tapak, orientasi bangunan, dan program ruang. Kemampuan ini memungkinkan tim perencana mengeksplorasi lebih banyak alternatif dalam waktu yang jauh lebih singkat dibandingkan pendekatan konvensional berbasis sketsa dan perhitungan manual (Borrmann, König, Koch, & Beetz, 2020).

Selain evaluasi tapak, tahap perencanaan awal berbasis BIM juga mencakup analisis kelayakan finansial awal melalui estimasi biaya kasar (*rough order of magnitude*) yang diturunkan dari volume bangunan pada model konseptual, serta analisis keberlanjutan awal seperti potensi pencahayaan alami dan orientasi terhadap arah matahari. Seluruh analisis ini dilakukan sebelum satu batu bata pun diletakkan, sehingga keputusan strategis proyek dapat diambil berdasarkan data kuantitatif, bukan sekadar intuisi perancang (Abanda & Byers, 2021).

Tabel 3.2 Ringkasan Manfaat Analisis Kelayakan Berbasis Model Konseptual BIM

Jenis Analisis Awal	Data yang Dimanfaatkan	Manfaat bagi Pengambilan Keputusan
Evaluasi Tapak	Topografi, orientasi, batas kavling	Pemilihan posisi bangunan optimal sejak konsep awal
Estimasi Biaya Kasar	Volume massa bangunan LOD 100	Verifikasi kelayakan anggaran sebelum investasi desain lanjut
Potensi Pencahayaan Alami	Orientasi dan volume massa awal	Indikasi awal kebutuhan strategi desain hemat energi
Kapasitas Program Ruang	Luas lantai total dan distribusi fungsi	Verifikasi kesesuaian kebutuhan fungsional pemilik proyek

Sumber: Abanda & Byers (2021); Borrmann et al., (2020)

2. Proses Desain Iteratif Berbasis BIM

Salah satu keunggulan mendasar BIM dibandingkan pendekatan desain konvensional adalah kemampuannya mendukung proses iteratif, siklus berulang antara pembuatan alternatif desain, evaluasi, dan penyempurnaan, secara jauh lebih cepat dan murah. Karena model BIM

bersifat parametrik, perubahan pada satu parameter desain (misalnya ketinggian lantai atau jarak antarkolom) akan secara otomatis terpropagasi ke seluruh elemen terkait, tanpa perlu menggambar ulang secara manual (Biswas, Sim, & Lau, 2024).

Proses iteratif ini umumnya berlangsung melalui siklus yang dikenal sebagai *design-analyze-refine*: tim perancang mengembangkan alternatif desain awal, menganalisisnya menggunakan berbagai alat simulasi (struktural, energi, biaya), kemudian menyempurnakan desain berdasarkan hasil analisis tersebut sebelum siklus berulang kembali. Kecepatan siklus ini memungkinkan eksplorasi desain yang jauh lebih menyeluruh dalam rentang waktu yang sama dibandingkan proses desain konvensional, sehingga meningkatkan kemungkinan ditemukannya solusi desain yang optimal (Doukari, Lee, & Park, 2022).

Tabel 3.3 Perbandingan Proses Desain Konvensional dan Proses Desain Iteratif Berbasis BIM

Aspek	Proses Desain Konvensional	Proses Desain Iteratif Berbasis BIM
Jumlah alternatif dieksplorasi	Terbatas akibat waktu penggambaran ulang yang lama	Lebih banyak berkat propagasi perubahan otomatis
Kecepatan evaluasi desain	Lambat, evaluasi manual per gambar	Cepat melalui simulasi terintegrasi dalam model
Konsistensi antardokumen	Rawan inkonsistensi antar gambar turunan	Konsisten otomatis dari satu model sumber
Keterlibatan data kuantitatif	Terbatas pada tahap akhir desain	Tersedia sejak tahap konseptual awal

Sumber: Diolah dari Biswas et al. (2024); Doukari, Lee & Park (2022); Borrmann et al. (2020)

3. Analisis dan Simulasi Desain Berbasis BIM

BIM memungkinkan berbagai jenis analisis dan simulasi teknis dilakukan secara langsung terhadap model, tanpa perlu membangun model analisis terpisah dari awal. Analisis struktural memanfaatkan

geometri dan properti material yang telah tertanam dalam model untuk menghitung beban, tegangan, dan perilaku struktur terhadap berbagai skenario pembebanan. Analisis energi memanfaatkan data selubung bangunan, orientasi, dan material untuk mensimulasikan konsumsi energi dan kenyamanan termal.

Analisis pencahayaan alami (*daylighting analysis*) dan analisis akustik ruang turut dapat dilakukan berbasis model yang sama, memungkinkan perancang mengevaluasi kualitas lingkungan dalam ruang sejak tahap desain skematik. Integrasi berbagai jenis analisis ini ke dalam satu lingkungan model terpadu menghilangkan kebutuhan membangun ulang geometri pada setiap perangkat lunak analisis yang berbeda, sebuah proses yang pada pendekatan konvensional rawan menimbulkan inkonsistensi data antara model desain dan model analisis (Asadi & Sacks, 2023).

Tabel 3.4 Jenis Analisis dan Simulasi yang Umum Diintegrasikan dengan Model BIM

Jenis Analisis	Data Model yang Dimanfaatkan	Keluaran Analisis
Analisis Struktural	Geometri elemen, properti material, beban rencana	Tegangan, defleksi, dan faktor keamanan struktur
Analisis Energi	Selubung bangunan, orientasi, material, sistem HVAC	Estimasi konsumsi energi dan kenyamanan termal
Analisis Pencahayaan Alami	Geometri bukaan, orientasi, material kaca	Tingkat iluminasi ruang pada berbagai waktu
Analisis Akustik	Geometri ruang, material permukaan interior	Tingkat kebisingan dan waktu dengung ruang
Analisis Evakuasi/Keselamatan	Tata letak ruang, lebar koridor dan tangga darurat	Simulasi waktu evakuasi pada skenario darurat

Sumber: Disintesis dari Asadi & Sacks (2023)

4. Desain Generatif dan Optimasi Berbasis Algoritma

Perkembangan mutakhir dalam desain berbasis BIM mengarah pada penerapan desain generatif (*generative design*), yaitu pendekatan yang memanfaatkan algoritma komputasional untuk menghasilkan dan mengevaluasi ratusan hingga ribuan alternatif desain secara otomatis berdasarkan parameter dan batasan yang ditetapkan perancang luas lantai minimum, anggaran maksimum, orientasi optimal terhadap matahari, dan sebagainya (Sompolgrunk, Banihashemi, Golzad, & Le Nguyen, 2024). Algoritma kemudian mengevaluasi setiap alternatif berdasarkan kriteria kinerja yang ditetapkan, dan menyajikan sejumlah solusi terbaik kepada perancang untuk dipertimbangkan lebih lanjut.

Pendekatan mutakhir juga mengintegrasikan kecerdasan buatan generatif (*generative AI*) dengan teknologi realitas campuran (*mixed reality*) untuk memungkinkan interaksi simbiosis antara ruang virtual dan ruang nyata dalam proses perubahan desain, membuka kemungkinan kolaborasi desain yang jauh lebih intuitif antara perancang manusia dan sistem algoritmik. Meskipun demikian, penting ditegaskan bahwa desain generatif berfungsi sebagai alat bantu eksplorasi bagi perancang, bukan pengganti penilaian profesional insinyur dan arsitek.

B. Kolaborasi Multi-Disiplin dalam BIM

1. Konsep Kolaborasi dalam Lingkungan BIM

Kolaborasi dalam konteks BIM berbeda secara mendasar dari kolaborasi pada pendekatan konvensional. Pada pendekatan konvensional, setiap disiplin bekerja secara relatif terisolasi menggunakan gambar dan dokumen masing-masing, dengan koordinasi dilakukan secara periodik melalui pertemuan tatap muka atau pertukaran dokumen cetak. Pendekatan ini rawan menghasilkan inkonsistensi, karena perubahan pada satu disiplin tidak serta-merta diketahui oleh disiplin hingga pertemuan berikutnya (Karmakar & Delhi, 2021).

Sebaliknya, kolaborasi berbasis BIM menempatkan seluruh disiplin bekerja pada lingkungan data bersama, *Common Data Environment* di mana setiap perubahan pada satu model disiplin dapat segera terlihat oleh disiplin lain melalui mekanisme model federasi

(*federated model*). Pendekatan ini menggeser sifat kolaborasi dari episodik dan reaktif menjadi kontinu dan proaktif, memungkinkan konflik antardisiplin terdeteksi jauh lebih dini.

Penting dicatat bahwa keberhasilan model federasi sangat bergantung pada disiplin seluruh tim dalam menjaga sistem koordinat dan titik referensi (*shared coordinate system*) yang konsisten sejak awal proyek. Ketidaksesuaian titik referensi antarmodel disiplin, meskipun tampak sepele tetapi dapat menyebabkan seluruh elemen suatu disiplin bergeser posisinya ketika digabungkan ke dalam model federasi, menghasilkan ribuan konflik palsu yang sesungguhnya hanya disebabkan oleh kesalahan penempatan titik acuan, bukan konflik desain yang nyata (Borrmann *et al.*, 2020). Oleh karena itu, penetapan protokol titik referensi bersama sejak pertemuan kickoff proyek menjadi salah satu langkah teknis paling mendasar namun kerap terabaikan dalam praktik kolaborasi BIM.

2. Model Federasi dan Peran Setiap Disiplin

Model federasi (*federated model*) merupakan penggabungan visual dari model-model disiplin terpisah yaitu arsitektur, struktur, MEP, ke dalam satu tampilan gabungan tanpa menggabungkan kepemilikan data masing-masing model. Pendekatan ini memungkinkan setiap disiplin mempertahankan kendali penuh atas modelnya sendiri, sambil tetap dapat melihat dan berkoordinasi dengan model disiplin lain secara visual (Borrmann, König, Koch, & Beetz, 2020).

Tabel 3.5 Peran dan Kontribusi Setiap Disiplin dalam Model Federasi BIM

Disiplin	Elemen Model Utama	Ketergantungan terhadap Disiplin Lain
Arsitektur	Denah, fasad, tata ruang, elemen interior	Menentukan batasan spasial bagi struktur dan MEP
Struktur	Kolom, balok, pelat, pondasi, elemen penahan beban	Bergantung pada tata letak arsitektur, memengaruhi jalur MEP

Disiplin	Elemen Model Utama	Ketergantungan terhadap Disiplin Lain
Mekanikal (HVAC)	Sistem tata udara, jaringan duktus, unit pendingin	Membutuhkan ruang bebas dari struktur dan disiplin lain
Elektrikal	Panel listrik, jaringan kabel, sistem pencahayaan	Berkoordinasi dengan mekanikal dan plumbing pada jalur <i>shaft</i>
Plumbing	Jaringan pipa air bersih, air kotor, sistem pemadam kebakaran	Rawan berkonflik dengan jalur struktur dan mekanikal

Sumber: Diolah dari Borrmann, König, Koch & Beetz (2020); Karmakar & Delhi (2021)

3. *Common Data Environment* sebagai Platform Kolaborasi Operasional

Common Data Environment (CDE) berfungsi sebagai platform teknis yang memungkinkan kolaborasi multidisiplin berlangsung secara operasional. Dalam praktik sehari-hari, setiap disiplin mengunggah model kerja terbarunya ke area *Work in Progress* pada CDE, kemudian memindahkannya ke area *Shared* ketika siap dikoordinasikan dengan disiplin lain melalui pertemuan koordinasi BIM yang terjadwal secara rutin, biasanya mingguan atau dua mingguan tergantung fase proyek (ISO, 2020).

Pada pertemuan koordinasi tersebut, seluruh model disiplin digabungkan menjadi model federasi untuk diperiksa konsistensinya, konflik yang teridentifikasi didokumentasikan dan didistribusikan kembali kepada disiplin terkait untuk diperbaiki, dan siklus tersebut berulang hingga model federasi mencapai tingkat konsistensi yang memadai untuk melanjutkan ke tahap desain berikutnya. Efektivitas siklus kolaborasi ini sangat bergantung pada kedisiplinan seluruh tim dalam mematuhi jadwal pembaruan model dan protokol komunikasi yang telah disepakati dalam *BIM Execution Plan* (Paneru *et al.*, 2023).

Tabel 3.6 Kategori Platform Kolaborasi Berbasis *Cloud* untuk Proyek BIM

Kategori Platform	Fungsi Utama	Contoh Kapabilitas
Platform <i>Common Data Environment</i>	Penyimpanan, versi, dan distribusi model terpusat	Kendali status WIP-Shared-Published-Archived otomatis
Platform Peninjauan Model 3D	Visualisasi dan navigasi model federasi berbasis web	Akses model tanpa memerlukan perangkat lunak otoritatif penuh
Platform Manajemen Isu (BCF)	Pelacakan dan penugasan isu/konflik antartim	Integrasi langsung dengan perangkat lunak pemodelan
Platform Kolaborasi Dokumen	Pengelolaan dokumen non-model (kontrak, RFI, laporan)	Alur persetujuan dan riwayat revisi dokumen terstruktur

4. *BIM Collaboration Format* (BCF) sebagai Protokol Komunikasi Isu

Salah satu inovasi teknis penting yang mendukung kolaborasi multidisiplin adalah *BIM Collaboration Format* (BCF), sebuah standar terbuka yang dikembangkan oleh Solibri dan Tekla pada 2009 dan kemudian diadopsi sebagai standar resmi buildingSMART International. BCF memungkinkan berbagai perangkat lunak BIM saling bertukar informasi mengenai suatu isu atau konflik tanpa perlu mengirimkan keseluruhan model, cukup dengan mereferensikan elemen IFC, sudut pandang kamera, dan tangkapan layar terkait isu tersebut.

Sebelum keberadaan BCF, komunikasi mengenai suatu konflik desain lazim dilakukan melalui tangkapan layar yang disematkan pada laporan PDF atau dijelaskan secara lisan dalam pertemuan koordinasi, pendekatan yang rawan kehilangan konteks dan sulit dilacak status penyelesaiannya. Dengan BCF, setiap isu tercatat dengan pengenal unik, mencakup deskripsi, pihak yang bertanggung jawab, status (*Open*, *In Progress*, *Closed*), serta tautan langsung ke tampilan model yang relevan, sehingga anggota tim dapat langsung diarahkan ke lokasi persis isu tersebut dalam perangkat lunak pemodelan masing-masing tanpa perlu mencarinya secara manual (BIMcollab, 2026).

Tabel 3.7 Perbandingan Komunikasi Isu Konvensional dan Berbasis BCF

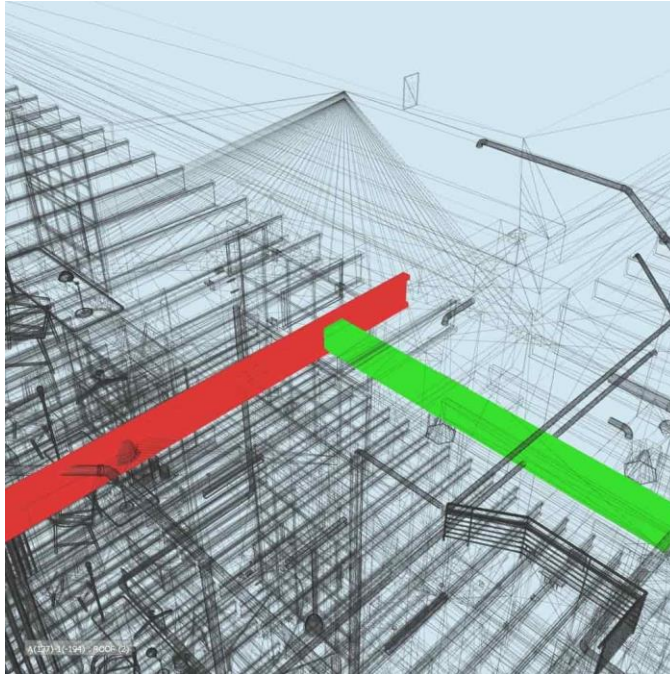
Aspek	Komunikasi Konvensional	Komunikasi Berbasis BCF
Media komunikasi	Tangkapan layar dalam laporan PDF atau email	Berkas terstruktur (XML) tertaut langsung ke model
Pelacakan status	Manual, rawan terlewat atau terduplikasi	Status <i>Open/In Progress/Closed</i> otomatis tertelusuri
Konteks isu	Deskripsi tekstual, rawan ambiguitas	Sudut pandang kamera dan elemen IFC presisi
Interoperabilitas	Bergantung format dokumen yang disepakati manual	Standar terbuka lintas perangkat lunak BIM manapun

C. Deteksi Konflik (*Clash Detection*)

Deteksi konflik atau *clash detection* merupakan salah satu penerapan BIM yang paling langsung memberikan nilai terukur bagi proyek konstruksi. Subbab ini membahas konsep, jenis, alur kerja, perangkat lunak pendukung, hingga manfaat kuantitatif dari proses deteksi konflik berbasis BIM.

1. Konsep dan Jenis-Jenis *Clash*

Clash detection adalah proses identifikasi konflik antarelemen model digital tiga dimensi, yang terjadi ketika dua atau lebih elemen dari disiplin berbeda menempati ruang yang sama atau saling bertentangan secara fungsional (Strand & Co., 2026). Konflik desain semacam ini secara historis merupakan sumber utama kesalahan konstruksi dan pekerjaan ulang, karena pada pendekatan berbasis gambar 2D konvensional, konflik antardisiplin, misalnya jalur pipa yang menembus balok struktur sangat sulit dideteksi hingga pekerjaan fisik di lapangan telah berlangsung (Neuroject, 2024).



Gambar 3.1 *Clash Detection in BIM*

Biaya yang ditimbulkan oleh konflik yang tidak terdeteksi hingga tahap konstruksi jauh lebih besar dibandingkan biaya resolusinya pada tahap desain, sejalan dengan prinsip kurva MacLeamy. Sebuah konflik sederhana antara jalur pipa dan balok struktur yang hanya memerlukan penyesuaian beberapa sentimeter pada model desain dapat berubah menjadi pekerjaan pembongkaran dan pemasangan ulang yang mahal, melibatkan penundaan jadwal, serta berpotensi menimbulkan perselisihan kontraktual antara kontraktor dan subkontraktor mengenai pihak yang bertanggung jawab atas kesalahan tersebut, apabila konflik yang sama baru ditemukan setelah elemen fisik terpasang di lapangan (Neuroject, 2024; Strand & Co., 2026).

Literatur membedakan tiga jenis utama konflik dalam konteks BIM. Pertama, konflik keras (*hard clash*), yaitu tumpang tindih fisik langsung antara dua elemen model, seperti pipa yang menembus kolom struktur. Kedua, konflik lunak (*soft clash*), yaitu pelanggaran terhadap zona jarak aman atau *clearance* yang dibutuhkan suatu elemen untuk berfungsi atau dipelihara, misalnya ruang servis di sekitar panel listrik yang terlalu sempit. Ketiga, konflik alur kerja (*workflow clash* atau *4D clash*), yaitu konflik yang muncul akibat urutan penjadwalan konstruksi

yang tidak logis, misalnya rencana pemasangan elemen finishing sebelum elemen struktur pendukungnya selesai (Strand & Co., 2026; Silva, *et al.*, 2026).

Tabel 3.8 Klasifikasi Jenis-Jenis *Clash* dalam BIM

Jenis <i>Clash</i>	Definisi	Contoh Kasus
<i>Hard Clash</i>	Tumpang tindih fisik langsung antarelemen model	Pipa menembus balok struktur, duktus menembus kolom
<i>Soft Clash</i>	Pelanggaran zona jarak aman/ <i>clearance</i> fungsional	Ruang servis panel listrik terlalu sempit untuk akses pemeliharaan
<i>Workflow/4D Clash</i>	Konflik akibat urutan penjadwalan yang tidak logis	Instalasi plafon dijadwalkan sebelum jalur MEP di atasnya selesai

Sumber: Diolah dari Strand & Co. (2026)

2. Proses dan Alur Kerja *Clash Detection*

Proses *clash detection* pada praktiknya mengikuti alur kerja sistematis yang terdiri atas beberapa tahap. Tahap pertama adalah persiapan model, yaitu memastikan model dari setiap disiplin telah mencapai tingkat kelengkapan (LOD) yang memadai dan diunggah ke platform koordinasi. Tahap kedua adalah penetapan aturan deteksi (*clash rules*), yaitu menentukan kombinasi disiplin dan kategori elemen mana yang akan diperiksa konfliknya, misalnya struktur terhadap MEP, atau arsitektur terhadap struktur (Strand & Co., 2026).

Tahap ketiga adalah eksekusi pengujian otomatis, di mana perangkat lunak memindai model untuk mengidentifikasi seluruh titik perpotongan geometris sesuai aturan yang ditetapkan, menghasilkan daftar konflik lengkap dengan koordinat, elemen yang terlibat, dan representasi visualnya. Tahap keempat adalah peninjauan dan klasifikasi, di mana tim proyek meninjau setiap konflik yang terdeteksi dan mengategorikannya berdasarkan tingkat keparahan. Tahap kelima adalah resolusi dan verifikasi ulang, di mana disiplin terkait memperbaiki modelnya dan pengujian diulang untuk memastikan konflik selesai tanpa menimbulkan konflik baru (Strand & Co., 2026).

Tabel 3.9 Alur Kerja Proses *Clash Detection* Berbasis BIM

Tahap	Aktivitas Utama	Keluaran
1. Persiapan Model	Verifikasi kelengkapan LOD, unggah model ke platform koordinasi	Model siap diperiksa dari seluruh disiplin
2. Penetapan Aturan	Menentukan kombinasi disiplin dan kategori elemen yang diperiksa	Aturan/ <i>clash test rules</i> terdefinisi
3. Eksekusi Pengujian	Pemindaian otomatis titik perpotongan geometris model	Daftar konflik lengkap dengan koordinat dan visualisasi
4. Peninjauan & Klasifikasi	Tim meninjau dan mengategorikan tingkat keparahan konflik	Konflik terklasifikasi berdasarkan prioritas
5. Resolusi & Verifikasi Ulang	Perbaiki model oleh disiplin terkait, pengujian ulang	Model bebas konflik atau konflik tersisa terdokumentasi

Sumber: Diolah dari Strand & Co. (2026)

Skala kompleksitas proses *clash detection* juga sangat dipengaruhi oleh ukuran dan tipologi proyek. Pada proyek berskala kecil dengan disiplin terbatas, pengujian konflik dapat dilakukan secara relatif sederhana dengan frekuensi mingguan. Sebaliknya, pada proyek infrastruktur berskala besar dengan puluhan subkontraktor spesialis, pengujian konflik idealnya dilakukan secara lebih sering dan otomatis, memanfaatkan integrasi berkelanjutan (*continuous integration*) yang memindai model setiap kali terdapat pembaruan, alih-alih menunggu jadwal pengujian manual berkala.

3. Perangkat Lunak Pendukung *Clash Detection*

Sejumlah perangkat lunak khusus telah dikembangkan untuk mendukung proses *clash detection* secara otomatis dan efisien. Perangkat lunak ini umumnya bekerja dengan mengimpor model dari berbagai perangkat lunak pemodelan disiplin, baik melalui format

eksklusif vendor maupun format terbuka IFC, kemudian menjalankan algoritma deteksi perpotongan geometris terhadap gabungan model.

Tabel 3.10 Kategori Perangkat Lunak Pendukung *Clash Detection*

Kategori Fungsi	Contoh Kemampuan	Manfaat bagi Tim Proyek
Peninjauan Model Federasi	Penggabungan model multi-format dari berbagai disiplin	Visualisasi terpadu seluruh disiplin dalam satu lingkungan
Deteksi Otomatis Berbasis Aturan	Pemindaian perpotongan geometris sesuai kombinasi aturan	Identifikasi konflik secara sistematis dan berulang
Manajemen Isu Kolaboratif	Pelacakan status konflik dari terdeteksi hingga terselesaikan	Akuntabilitas dan transparansi proses resolusi konflik
Visualisasi Berbasis Cloud	Akses model dan hasil deteksi konflik dari berbagai lokasi	Kolaborasi tim yang tersebar secara geografis

4. Klasifikasi dan Prioritisasi Konflik

Pada proyek berskala menengah hingga besar, proses deteksi otomatis dapat menghasilkan ratusan hingga ribuan konflik pada satu kali pengujian, sehingga diperlukan sistem prioritisasi yang jelas agar tim dapat menangani konflik secara efisien dan tidak kewalahan (Strand & Co., 2026). Konflik kritis (*critical clash*) memerlukan penanganan segera karena berdampak langsung pada integritas struktural atau keselamatan, seperti pipa yang menembus elemen struktur utama. Konflik mayor (*major clash*) memengaruhi kinerja sistem atau kemudahan konstruksi meskipun tidak mengancam keselamatan, seperti ductus yang mengurangi tinggi bersih ruangan di bawah standar.

Konflik minor (*minor clash*) umumnya bersifat estetis atau tumpang tindih yang tidak signifikan secara fungsional, sementara positif palsu (*false positive*) adalah tumpang tindih yang terdeteksi sistem namun sebenarnya berada dalam toleransi yang dapat diterima, seperti sambungan elemen yang secara desain memang saling bersentuhan. Kemampuan tim BIM Coordinator membedakan konflik nyata dari positif palsu menjadi keterampilan penting yang menentukan efisiensi keseluruhan proses koordinasi (Strand & Co., 2026).

Tabel 3.11 Tingkat Prioritas Penanganan Konflik dalam *Clash Detection*

Tingkat Prioritas	Kriteria	Contoh dan Urgensi Penanganan
Kritis	Berdampak pada integritas struktural atau keselamatan	Pipa menembus balok utama; ditangani segera sebelum lanjut desain
Mayor	Memengaruhi kinerja sistem atau kemudahan konstruksi	Tinggi bersih ruang di bawah standar; ditangani sebelum konstruksi
Minor	Tumpang tindih estetis, dampak fungsional minimal	Elemen dekoratif bersinggungan; dapat ditangani belakangan
Positif Palsu	Tumpang tindih dalam toleransi desain yang wajar	Sambungan elemen yang memang dirancang bersentuhan; diabaikan

Sumber: Diolah dari Strand & Co. (2026)

D. Manajemen Proyek dan Pengendalian Biaya Menggunakan BIM

1. Integrasi BIM dengan Manajemen Jadwal (*4D Scheduling*)

Integrasi BIM dengan manajemen jadwal proyek, atau *4D scheduling*, melibatkan penghubungan setiap elemen model 3D dengan aktivitas jadwal konstruksi yang relevan, biasanya dikembangkan menggunakan perangkat lunak manajemen proyek seperti *Primavera* atau *Microsoft Project* yang kemudian diintegrasikan dengan platform simulasi BIM. Hasil integrasi ini memungkinkan tim proyek memvisualisasikan progres konstruksi secara kronologis sebelum pekerjaan fisik dimulai, mengidentifikasi potensi konflik ruang kerja antartahapan, serta mengomunikasikan rencana konstruksi secara lebih efektif kepada seluruh pemangku kepentingan (Doukari, Lee, & Park, 2022).

Studi perbandingan antara alur kerja penjadwalan otomatis berbasis 4D dengan perencanaan konvensional menunjukkan bahwa pendekatan berbasis BIM menghasilkan identifikasi konflik

penjadwalan yang lebih dini dan akurat, terutama pada proyek dengan kompleksitas tinggi yang melibatkan banyak kontraktor spesialis bekerja secara bersamaan pada area terbatas (Doukari *et al.*, 2022). Kemampuan simulasi 4D juga bermanfaat untuk perencanaan logistik lokasi proyek, termasuk penentuan area penyimpanan material dan jalur akses alat berat pada setiap tahap konstruksi.

Tabel 3.12 Manfaat Simulasi 4D bagi Perencanaan Logistik Lokasi Proyek

Aspek Logistik	Manfaat Simulasi 4D	Dampak terhadap Proyek
Area penyimpanan material	Visualisasi kebutuhan ruang penyimpanan per tahap	Mengurangi kepadatan lokasi dan risiko kerusakan material
Jalur akses alat berat	Simulasi pergerakan crane dan kendaraan proyek	Mencegah konflik jalur dengan pekerjaan yang sedang berlangsung
Urutan kedatangan subkontraktor	Sinkronisasi jadwal berbagai kontraktor spesialis	Mengurangi waktu tunggu dan tumpang tindih pekerjaan
Zona keselamatan kerja	Identifikasi area berisiko tinggi pada setiap tahap	Perencanaan mitigasi keselamatan kerja lebih proaktif

Sumber: Disintesis dari Doukari, Lee & Park (2022)

2. Estimasi Biaya dan *Quantity Take-Off* Otomatis (5D)

Dimensi 5D BIM memungkinkan ekstraksi kuantitas material secara otomatis langsung dari model (*automated quantity take-off*), yang kemudian dihubungkan dengan basis data harga satuan untuk menghasilkan estimasi biaya secara *real-time*. Pendekatan ini terbukti secara signifikan lebih akurat dibandingkan metode konvensional yang mengandalkan pengukuran manual dari gambar 2D (Al-Musawi & Naimi, 2023; Soon *et al.*, 2024).

Nilai pasar global perangkat lunak 5D BIM yang terus tumbuh pesat, diperkirakan meningkat dari sekitar 2,9 miliar dolar Amerika Serikat pada 2023 menjadi hampir 9 miliar dolar pada 2032 dengan

tingkat pertumbuhan tahunan majemuk sekitar 13,4 persen, mencerminkan semakin luasnya adopsi pendekatan ini di industri konstruksi global. Meskipun demikian, riset juga mengidentifikasi bahwa akurasi *quantity take-off* otomatis sangat bergantung pada kelengkapan dan akurasi pemodelan elemen sejak awal, khususnya untuk elemen kompleks seperti pekerjaan beton bertulang yang melibatkan perhitungan volume dan berat tulangan secara detail.

Tabel 3.13 Perbandingan Estimasi Biaya Konvensional dan Berbasis BIM 5D

Aspek	Estimasi Biaya Konvensional	Estimasi Biaya Berbasis BIM 5D
Sumber kuantitas	Pengukuran manual dari gambar 2D	Ekstraksi otomatis langsung dari model 3D
Kecepatan pembaruan	Lambat, memerlukan pengukuran ulang manual	Real-time mengikuti setiap perubahan desain
Tingkat akurasi	Rentan kesalahan interpretasi dan inkonsistensi	Lebih akurat, konsisten dengan geometri model
Kemampuan analisis skenario	Terbatas karena proses re-estimasi memakan waktu	Cepat membandingkan dampak biaya berbagai alternatif desain

Sumber: Diolah dari Al-Musawi & Naimi (2023); Soon et al. (2024); ViBIM (2026)

Tabel 3.14 Contoh Perbandingan Rekayasa Nilai Berbasis Data BIM 5D

Elemen Dievaluasi	Alternatif Dibandingkan	Pertimbangan Keputusan
Sistem fasad	Kaca <i>low-e</i> vs panel komposit aluminium	Biaya awal, efisiensi energi jangka panjang, estetika
Struktur atap	Baja konvensional vs struktur bentang ringan	Berat total, kecepatan pemasangan, biaya material
Sistem lantai	Pelat beton konvensional vs pelat pracetak	Kecepatan konstruksi, kualitas permukaan, biaya cetakan
Sistem HVAC	Sistem sentral vs sistem VRF terdesentralisasi	Fleksibilitas operasional, biaya pemeliharaan jangka panjang

Sumber: Abanda & Byers (2021)

3. Rekayasa Nilai (*Value Engineering*) Berbasis Data BIM

Kemampuan BIM menghasilkan estimasi biaya secara cepat dan akurat, membuka peluang penerapan rekayasa nilai (*value engineering*) yang jauh lebih sistematis. Rekayasa nilai adalah proses evaluasi sistematis terhadap fungsi suatu elemen bangunan relatif terhadap biayanya, dengan tujuan mengidentifikasi alternatif yang memberikan nilai lebih tinggi, baik melalui penurunan biaya tanpa mengorbankan fungsi maupun peningkatan fungsi dengan biaya yang setara (Abanda & Byers, 2021).

Pada pendekatan konvensional, evaluasi rekayasa nilai memerlukan proses estimasi ulang manual untuk setiap alternatif yang dipertimbangkan, sehingga jumlah alternatif yang dapat dievaluasi secara realistis sangat terbatas oleh keterbatasan waktu. Dengan BIM 5D, tim proyek dapat membandingkan dampak biaya dari berbagai alternatif material atau sistem secara hampir seketika, memungkinkan evaluasi rekayasa nilai yang jauh lebih menyeluruh dilakukan dalam rentang waktu yang sama. Sebagai contoh, perbandingan biaya siklus hidup antara sistem fasad kaca dengan sistem panel komposit dapat dievaluasi secara simultan dengan mempertimbangkan biaya awal,

efisiensi energi jangka panjang dan biaya pemeliharaan sepanjang masa layan bangunan.

4. *Earned Value Management* Berbasis BIM

Earned Value Management (EVM) adalah metodologi manajemen proyek yang mengintegrasikan pengukuran lingkup, jadwal, dan biaya untuk menilai kinerja proyek secara objektif pada suatu titik waktu tertentu. Integrasi EVM dengan BIM 5D menghasilkan pendekatan yang dikenal sebagai *5D BIM-based cost-schedule integration for earned-value management*, yang memungkinkan perhitungan indikator kinerja proyek, seperti *Cost Performance Index* (CPI) dan *Schedule Performance Index* (SPI) dihasilkan secara otomatis dan real-time langsung dari model, alih-alih melalui proses pelaporan manual yang memakan waktu (Elghaish, Abrishami, & Hosseini, 2021).

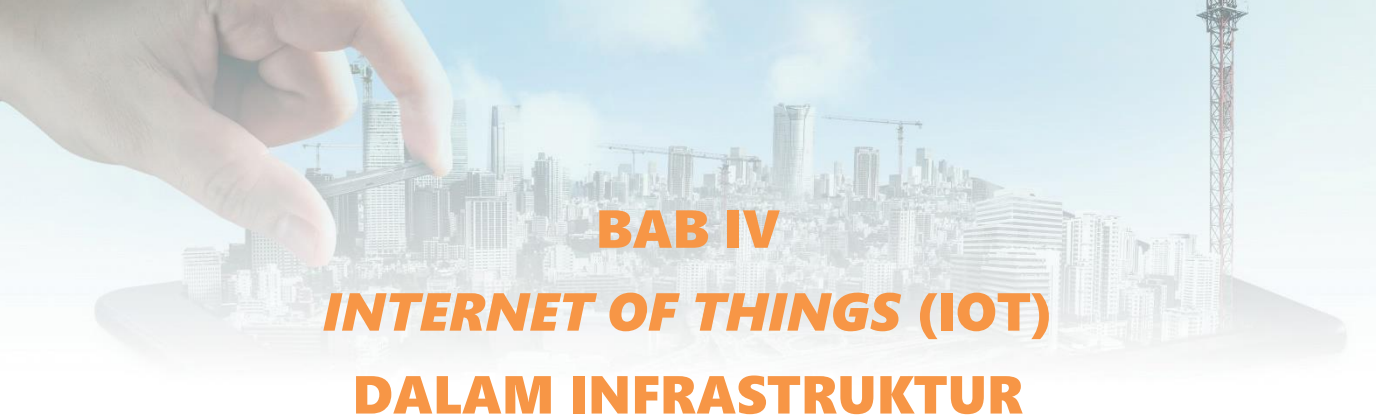
Pendekatan EVM berbasis BIM ini memberikan keunggulan signifikan dibandingkan EVM konvensional karena nilai pekerjaan yang telah diselesaikan (*earned value*) dapat dihitung berdasarkan elemen model yang telah terverifikasi selesai secara fisik di lapangan, misalnya melalui integrasi dengan teknologi pemindaian atau visi komputer untuk pemantauan progres konstruksi otomatis (Cheng & Lu, 2020) sehingga akurasi pengukuran kinerja proyek meningkat secara substansial dibandingkan estimasi progres berbasis laporan manual yang bersifat subjektif.

Tabel 3.15 Indikator Kunci *Earned Value Management* Berbasis BIM

Indikator	Rumus Dasar	Interpretasi
<i>Planned Value</i> (PV)	Nilai anggaran pekerjaan terjadwal hingga suatu titik waktu	Baseline rencana yang menjadi acuan pembanding
<i>Earned Value</i> (EV)	Nilai anggaran pekerjaan yang benar-benar telah diselesaikan	Diukur otomatis dari elemen model terverifikasi selesai
<i>Cost Performance Index</i> (CPI)	EV dibagi Biaya Aktual (<i>Actual Cost</i>)	$CPI < 1$ menandakan proyek melebihi anggaran
<i>Schedule Performance Index</i> (SPI)	EV dibagi PV	$SPI < 1$ menandakan proyek tertinggal dari jadwal

Sumber: Diolah dari Elghaish, Abrishami & Hosseini (2021)

Ketika CPI dan SPI dihitung secara manual melalui laporan progres konvensional, nilai EV umumnya diestimasi secara subjektif oleh pengawas lapangan berdasarkan persentase penyelesaian yang dilaporkan setiap pekerja atau mandor, sebuah proses yang rawan bias optimisme berlebihan (*optimism bias*). Sebaliknya, ketika EV dihitung berdasarkan elemen model BIM yang telah terverifikasi selesai secara objektif, misalnya melalui integrasi dengan teknologi pemindaian progres konstruksi yaitu akurasi pengukuran kinerja proyek meningkat secara substansial.



BAB IV

INTERNET OF THINGS (IOT)

DALAM INFRASTRUKTUR

Setelah Bab 2 dan Bab 3 membahas *Building Information Modeling* (BIM) secara mendalam, mulai dari konsep, dimensi, siklus hidup, hingga penerapannya dalam proyek konstruksi. Bab 4 ini beralih fokus pada pilar kedua transformasi digital teknik sipil sebagaimana diperkenalkan pada Bab 1, yaitu *Internet of Things* (IoT). Jika BIM menyediakan representasi digital yang kaya informasi mengenai desain dan konstruksi suatu aset, IoT menyediakan indera digital yang memungkinkan aset tersebut ‘berbicara’ mengenai kondisi aktualnya secara berkelanjutan sepanjang masa operasionalnya (Hu, Olgun, & Assaad, 2024).

A. Konsep dan Arsitektur IoT

1. Definisi dan Prinsip Dasar IoT

Internet of Things (IoT) didefinisikan sebagai jaringan objek fisik yaitu perangkat, kendaraan, bangunan, dan benda lain yang tertanam dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi konektivitas, sehingga memungkinkan objek tersebut mengumpulkan dan bertukar data melalui internet tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung. Pasar IoT global tumbuh secara eksponensial, dengan nilai diperkirakan mencapai 714,48 miliar dolar Amerika Serikat pada 2024 dan diproyeksikan tumbuh hingga lebih dari 4 triliun dolar pada 2032 dengan tingkat pertumbuhan tahunan majemuk sekitar 24,3 persen (Cavli Wireless, 2025).

Tiga prinsip dasar yang membedakan IoT dari sistem komputasi konvensional adalah keterhubungan (*connectivity*), yaitu kemampuan setiap perangkat untuk terhubung dan bertukar data melalui jaringan; kesadaran konteks (*context awareness*), yaitu kemampuan sistem memahami kondisi lingkungan sekitarnya melalui data sensor; dan

otonomi terbatas (*limited autonomy*), yaitu kemampuan sistem mengambil tindakan tertentu berdasarkan data yang diterima tanpa selalu memerlukan intervensi manusia langsung, seperti mengirimkan peringatan otomatis ketika suatu ambang batas parameter terlampaui.

Tabel 4.1 Elemen Penyusun Definisi IoT dan Relevansinya bagi Infrastruktur

Elemen Definisi	Penjelasan	Relevansi bagi Infrastruktur Sipil
Objek fisik terhubung	Perangkat/aset yang dilengkapi kemampuan konektivitas	Jembatan, bendungan, gedung sebagai 'objek' yang dipantau
Sensor tertanam	Kemampuan mendeteksi parameter fisik lingkungan	Deteksi regangan, getaran, kelembapan, tekanan air
Pertukaran data otomatis	Transmisi data tanpa intervensi manusia langsung	Pelaporan kondisi struktur secara kontinu 24/7
Konektivitas internet	Kemampuan menjangkau sistem pengolahan pusat	Integrasi dengan <i>dashboard</i> pemantauan jarak jauh

2. Arsitektur Tiga Lapis: *Perception, Network, dan Application*

Arsitektur IoT yang paling mendasar dan banyak dirujuk dalam literatur adalah model tiga lapis, yang terdiri atas lapisan persepsi (*perception layer*), lapisan jaringan (*network layer*), dan lapisan aplikasi (*application layer*) (Kumar, Tanwar, & Park, 2024). Lapisan persepsi berfungsi sebagai ‘mata dan telinga’ sistem IoT, terdiri atas sensor fisik dan aktuator yang berinteraksi langsung dengan lingkungan untuk mengumpulkan data mentah seperti suhu, getaran, atau posisi geografis (WizzDev, 2025).

Lapisan jaringan berfungsi sebagai ‘otak’ sistem yang bertanggung jawab memproses dan mentransmisikan informasi yang terdeteksi dari lapisan persepsi menuju lapisan aplikasi, memanfaatkan berbagai teknologi komunikasi seperti Wi-Fi, seluler, atau jaringan berdaya rendah jarak jauh (*Low Power Wide Area Network/LPWAN*). Lapisan aplikasi merupakan lapisan teratas yang menyampaikan layanan

akhir kepada pengguna, mengubah data mentah yang telah diproses menjadi informasi yang dapat ditindaklanjuti melalui aplikasi seperti *dashboard* pemantauan struktur atau sistem peringatan dini (Cavli Wireless, 2025).

Tabel 4.2 Arsitektur Tiga Lapis IoT dan Penerapannya dalam Teknik Sipil

Lapisan	Fungsi Utama	Contoh Penerapan dalam Teknik Sipil
Persepsi (<i>Perception</i>)	Mendeteksi dan mengumpulkan data fisik dari lingkungan	Sensor regangan pada jembatan, sensor kelembapan pada terowongan
Jaringan (<i>Network</i>)	Mentransmisikan data dari sensor menuju pusat pengolahan	Jaringan LoRaWAN pada lokasi proyek terpencil, jaringan seluler 5G
Aplikasi (<i>Application</i>)	Menyajikan informasi yang dapat ditindaklanjuti kepada pengguna	<i>Dashboard</i> pemantauan kesehatan struktur, sistem peringatan dini banjir

3. Arsitektur Lima Lapis dan Peran *Middleware*

Untuk mengakomodasi kompleksitas sistem IoT skala besar, seperti jaringan sensor pada koridor infrastruktur perkotaan yang melibatkan ribuan titik penginderaan, arsitektur tiga lapis sering diperluas menjadi arsitektur lima lapis dengan menambahkan lapisan pemrosesan (*processing layer*) dan lapisan *middleware*. Lapisan *middleware* berperan sebagai penghubung antara lapisan jaringan dan lapisan aplikasi, bertanggung jawab menyaring, mengagregasi, dan menyimpan data sementara sebelum diteruskan, sekaligus menyediakan kontrol akses terhadap data tersebut.

Penambahan lapisan pemrosesan memungkinkan analisis data awal dilakukan lebih dekat dengan sumber data, mengurangi beban komunikasi menuju pusat data dan mempercepat waktu respons sistem, sebuah kebutuhan penting bagi aplikasi pemantauan infrastruktur yang menuntut deteksi anomali secara mendekati waktu nyata (*near real-*

time), seperti deteksi dini keretakan struktur atau pergerakan tanah pada lereng.

Tabel 4.3 Perbandingan Arsitektur Tiga Lapis dan Lima Lapis IoT

Aspek	Arsitektur Tiga Lapis	Arsitektur Lima Lapis
Kompleksitas sistem	Cocok untuk sistem IoT sederhana berskala kecil	Cocok untuk sistem IoT kompleks berskala besar
Pemrosesan data	Minimal, sebagian besar diproses di lapisan aplikasi	Terdistribusi melalui lapisan pemrosesan khusus
Manajemen data	Tidak ada lapisan khusus	Dikelola melalui lapisan <i>middleware</i>
Contoh kebutuhan	Sensor tunggal pemantauan suhu ruang	Jaringan ribuan sensor pemantauan koridor jalan tol

4. Protokol Komunikasi Perangkat Lunak IoT

Selain protokol jaringan fisik, sistem IoT juga bergantung pada protokol komunikasi tingkat aplikasi yang mengatur bagaimana pesan dipertukarkan antarperangkat. Dua protokol yang paling banyak digunakan dalam konteks IoT infrastruktur adalah *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) dan *Constrained Application Protocol* (CoAP). MQTT bekerja berdasarkan model publikasi-langgan (*publish-subscribe*), di mana perangkat sensor mempublikasikan data ke suatu topik tertentu, dan aplikasi yang berlangganan topik tersebut menerima data secara otomatis tanpa perlu melakukan permintaan berulang.

CoAP, di sisi lain, dirancang khusus untuk perangkat dengan sumber daya sangat terbatas yaitu memori kecil dan daya rendah menggunakan model permintaan-respons yang lebih ringan dibandingkan protokol web konvensional seperti HTTP. Studi perbandingan kinerja antara MQTT, CoAP, dan *Advanced Message Queuing Protocol* (AMQP) menunjukkan bahwa CoAP menjadi pilihan menarik untuk aplikasi dengan keterbatasan sumber daya jaringan yang signifikan, sementara MQTT lebih unggul untuk skenario yang menuntut keandalan pengiriman pesan pada jaringan yang kurang stabil.

Tabel 4.4 Perbandingan Protokol Komunikasi Aplikasi IoT

Protokol	Model Komunikasi	Kesesuaian Penggunaan
MQTT	Publikasi-langgan (<i>publish-subscribe</i>)	Jaringan sensor luas dengan keandalan tinggi diperlukan
CoAP	Permintaan-respons ringan	Perangkat dengan memori dan daya sangat terbatas
AMQP	<i>Message queuing</i> tingkat lanjut	Sistem enterprise dengan kebutuhan integrasi kompleks

B. Sensor dan Perangkat IoT dalam Teknik Sipil

1. Klasifikasi Sensor Pemantauan Kesehatan Struktur

Sensor pemantauan kesehatan struktur (*Structural Health Monitoring/SHM*) dapat diklasifikasikan berdasarkan parameter fisik yang diukurnya. Sensor regangan (*strain gauge*) mengukur deformasi lokal pada elemen struktur akibat pembebanan, umumnya dipasang pada titik-titik kritis seperti sambungan balok-kolom atau tengah bentang girder jembatan. Akselerometer mengukur percepatan dan getaran struktur, digunakan secara luas untuk memantau respons dinamis bangunan terhadap beban gempa atau angin, serta untuk mendeteksi perubahan frekuensi alami struktur yang dapat mengindikasikan kerusakan tersembunyi (Hu, Olgun, & Assaad, 2024).

Sensor perpindahan (*displacement sensor*) dan inklinometer mengukur pergeseran dan kemiringan elemen struktur, sangat relevan untuk pemantauan stabilitas menara, dinding penahan tanah, dan lereng. Sensor serat optik (*fiber optic sensor*) menawarkan keunggulan berupa kemampuan pengukuran terdistribusi sepanjang jalur kabel, bukan hanya pada titik diskret sebagaimana sensor konvensional serta imunitas terhadap interferensi elektromagnetik, menjadikannya pilihan yang semakin populer untuk pemantauan struktur bentang panjang seperti jembatan gantung dan terowongan (Bado, Casas, & Kaklauskas, 2022).

Perkembangan jaringan sensor nirkabel (*Wireless Sensor Network/WSN*) turut mengubah lanskap penerapan SHM secara signifikan, menggantikan sensor kabel konvensional yang memerlukan

instalasi jalur kabel fisik yang mahal dan rentan kerusakan. Jaringan sensor nirkabel memungkinkan pemasangan yang jauh lebih fleksibel dan biaya instalasi yang lebih rendah, meskipun menghadirkan tantangan tersendiri terkait manajemen daya baterai dan keandalan komunikasi.

Tabel 4.5 Klasifikasi Sensor Pemantauan Kesehatan Struktur (SHM)

Jenis Sensor	Parameter Diukur	Aplikasi Utama pada Infrastruktur
<i>Strain gauge</i>	Regangan/deformasi lokal elemen	Sambungan struktur, tengah bentang girder jembatan
Akselerometer	Percepatan dan getaran struktur	Respons dinamis terhadap gempa, angin, beban lalu lintas
Sensor perpindahan (<i>LVDT</i>)	Pergeseran linear elemen struktur	Pemantauan sambungan ekspansi jembatan
Inklinometer	Kemiringan dan rotasi elemen	Stabilitas menara, dinding penahan tanah, lereng
Sensor serat optik (<i>FBG</i>)	Regangan dan suhu terdistribusi	Struktur bentang panjang, terowongan, jembatan gantung
Sensor akustik emisi	Gelombang suara dari retakan mikro	Deteksi dini keretakan pada elemen beton dan baja

Selain klasifikasi berdasarkan parameter yang diukur, sensor SHM juga dapat dibedakan berdasarkan cara pemasangannya pada struktur, sensor tertanam (*embedded*) yang dipasang di dalam elemen struktur sejak tahap konstruksi seperti sensor serat optik dalam beton, dan sensor terpasang permukaan (*surface-mounted*) yang dipasang setelah struktur selesai dibangun seperti kebanyakan *strain gauge* dan akselerometer. Sensor tertanam menawarkan perlindungan fisik lebih baik dan integrasi struktural yang lebih menyeluruh, namun tidak dapat diganti atau diperbaiki apabila mengalami kerusakan, berbeda dengan

sensor terpasang permukaan yang lebih mudah dipelihara namun lebih rentan terhadap kerusakan akibat faktor lingkungan eksternal.

2. Sensor Lingkungan dan Geoteknik

Selain sensor yang berfokus pada elemen struktur, pemantauan infrastruktur secara komprehensif juga memerlukan sensor lingkungan dan geoteknik yang memantau kondisi tanah dan lingkungan sekitar aset. Sensor kelembapan dan suhu tanah digunakan untuk memantau kondisi geoteknik yang memengaruhi stabilitas fondasi dan lereng, sementara piezometer mengukur tekanan air pori dalam tanah, parameter krusial untuk menilai risiko kelongsoran lereng dan stabilitas bendungan (Bado *et al.*, 2022).

Sensor *Global Navigation Satellite System* (GNSS) presisi tinggi memungkinkan pemantauan deformasi permukaan tanah dan struktur berskala besar seperti bendungan dan lereng tambang dengan akurasi hingga level milimeter, memanfaatkan perbandingan posisi dari waktu ke waktu untuk mendeteksi pergerakan yang mungkin mengindikasikan potensi kegagalan. Sensor kualitas udara turut menjadi bagian penting dari pemantauan lingkungan proyek konstruksi, khususnya untuk memantau tingkat partikulat dan gas berbahaya pada ruang kerja tertutup seperti terowongan.

3. Perangkat Penginderaan Jarak Jauh: LiDAR, Drone, dan Kamera

Berbeda dengan sensor titik diskret yang telah dibahas sebelumnya, perangkat penginderaan jarak jauh memungkinkan pemantauan kondisi permukaan infrastruktur secara menyeluruh dan berkala. *Light Detection and Ranging* (LiDAR) menggunakan pulsa laser untuk menghasilkan model permukaan tiga dimensi presisi tinggi, banyak dimanfaatkan untuk memantau deformasi permukaan lereng, progres konstruksi, dan verifikasi kesesuaian kondisi terbangun dengan model BIM.

Pesawat nirawak (*drone/Unmanned Aerial Vehicle*) yang dilengkapi kamera resolusi tinggi maupun sensor termal semakin banyak digunakan untuk inspeksi infrastruktur yang sulit atau berbahaya dijangkau manusia secara langsung, seperti bagian bawah jembatan bentang panjang, atap struktur bertingkat tinggi, atau lereng curam. Kamera pengawasan (CCTV) berbasis IoT yang dilengkapi kemampuan

analisis citra melalui kecerdasan buatan turut memungkinkan deteksi otomatis anomali visual, seperti retakan permukaan atau genangan air yang mengindikasikan masalah drainase, tanpa memerlukan pemeriksaan manual oleh petugas lapangan secara terus-menerus.

4. Kriteria Pemilihan dan Penempatan Sensor

Tabel 4.6 Rentang Spesifikasi Teknis Umum Sensor Pemantauan Struktur

Jenis Sensor	Rentang Pengukuran Umum	Resolusi/Akurasi Umum
<i>Strain gauge</i>	± 5.000 hingga ± 10.000 microstrain	Resolusi hingga 1 microstrain
Akselerometer	0,001g hingga beberapa g (tergantung aplikasi)	Resolusi hingga 0,0001g pada sensor presisi tinggi
Inklinometer	$\pm 15^\circ$ hingga $\pm 90^\circ$ tergantung tipe	Akurasi hingga $0,001^\circ$ pada sensor presisi tinggi
Piezometer	0–1.000 kPa tergantung kedalaman pemasangan	Akurasi $\pm 0,1\%$ dari rentang skala penuh
GNSS presisi tinggi	Global (tidak terbatas area)	Akurasi posisi hingga level milimeter (mode RTK)

Pemilihan jenis dan lokasi penempatan sensor merupakan keputusan rekayasa yang menentukan efektivitas keseluruhan sistem pemantauan. Kriteria pemilihan sensor umumnya mempertimbangkan lima faktor utama: pertama, kesesuaian parameter yang diukur dengan mode kegagalan yang paling relevan bagi aset tersebut; kedua, akurasi dan resolusi pengukuran yang dibutuhkan; ketiga, ketahanan sensor terhadap kondisi lingkungan operasional seperti kelembapan, suhu ekstrem, atau paparan bahan kimia; keempat, kebutuhan daya dan masa pakai baterai; dan kelima, biaya pengadaan dan pemeliharaan relatif terhadap manfaat informasi yang dihasilkan (Bado *et al.*, 2022).

Penempatan sensor idealnya ditentukan melalui analisis struktural awal yang mengidentifikasi titik-titik kritis dengan konsentrasi tegangan tertinggi atau area dengan riwayat permasalahan, bukan sekadar penempatan seragam pada interval tertentu. Pendekatan berbasis risiko ini memastikan jumlah sensor yang terbatas, mengingat pertimbangan biaya dapat memberikan informasi paling representatif mengenai kondisi kesehatan struktur secara keseluruhan.

Tabel 4.7 Kriteria Pemilihan Sensor Berdasarkan Karakteristik Aset Infrastruktur

Tipe Aset	Mode Kegagalan Utama	Sensor Prioritas
Jembatan bentang panjang	Kelelahan struktural, deformasi berlebih	<i>Strain gauge</i> , akselerometer, sensor serat optik
Bendungan	Rembesan, pergerakan tubuh bendungan	Piezometer, GNSS presisi tinggi, sensor rembesan
Lereng dan dinding penahan	Kelongsoran, pergeseran tanah	Inklinometer, piezometer, GNSS
Terowongan	Konvergensi dinding, kualitas udara	Sensor konvergensi, sensor gas dan partikulat
Gedung bertingkat tinggi	Respons dinamis gempa/angin berlebih	Akselerometer, sensor perpindahan antarlantai

C. Sistem Akuisisi dan Komunikasi Data

1. Arsitektur Sistem Akuisisi Data (*Data Acquisition System/DAQ*)

Sistem akuisisi data (*Data Acquisition System/DAQ*) merupakan rangkaian perangkat keras dan lunak yang bertanggung jawab mengonversi sinyal fisik dari sensor menjadi data digital yang dapat diproses lebih lanjut. Arsitektur DAQ tipikal terdiri atas sensor itu sendiri, pengondisi sinyal (*signal conditioner*) yang menguatkan dan menyaring sinyal mentah, konverter analog-ke-digital (*Analog-to-*

Digital Converter/ADC), serta unit pemrosesan lokal (*data logger* atau *microcontroller*) yang mengelola pengumpulan dan penyimpanan sementara data sebelum ditransmisikan (Röhrig & Cramer, 2025).

Pada sistem IoT infrastruktur modern, unit pemrosesan lokal ini sering berperan sebagai gerbang (*IoT gateway*) yang menghubungkan beberapa sensor sekaligus dalam satu titik pengumpulan, sebelum data diteruskan melalui jaringan komunikasi menuju sistem pusat. Desain arsitektur DAQ perlu mempertimbangkan frekuensi pengambilan sampel (*sampling rate*) yang sesuai dengan karakteristik fenomena yang dipantau, pemantauan getaran struktur akibat gempa memerlukan frekuensi sampel jauh lebih tinggi dibandingkan pemantauan suhu tanah yang berubah relatif lambat.

2. Teknologi Jaringan Berdaya Rendah Jarak Jauh (LPWAN)

Untuk aplikasi pemantauan infrastruktur yang tersebar pada area luas dengan kebutuhan daya rendah, seperti jaringan sensor sepanjang koridor jalan tol atau kawasan bendungan, teknologi *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) menjadi pilihan yang semakin dominan dibandingkan jaringan seluler konvensional. Dua teknologi LPWAN yang paling banyak diadopsi adalah LoRaWAN dan *Narrowband IoT* (NB-IoT), dengan karakteristik dan keunggulan yang berbeda.

LoRaWAN beroperasi pada spektrum tanpa lisensi, memungkinkan organisasi membangun jaringan privat dengan biaya operasional yang relatif rendah dan jangkauan mencapai 15 hingga 20 kilometer pada kondisi lingkungan terbuka. Pada 2024, LoRaWAN telah diterapkan oleh lebih dari 170 operator di 181 negara, mencerminkan adopsi global yang luas. NB-IoT, sebaliknya, memanfaatkan infrastruktur jaringan seluler yang telah ada, menawarkan keandalan dan cakupan yang lebih konsisten di kawasan perkotaan dengan infrastruktur seluler yang matang (Choovio, 2026).

Tabel 4.8 Perbandingan Teknologi LPWAN untuk Pemantauan Infrastruktur

Aspek	LoRaWAN	NB-IoT
Spektrum	Tanpa lisensi (ISM band)	Berlisensi, memanfaatkan jaringan seluler operator

Aspek	LoRaWAN	NB-IoT
Jangkauan	15–20 km pada area terbuka	Bergantung cakupan menara seluler operator
Biaya operasional	Rendah, dapat membangun jaringan privat	Berlangganan berkelanjutan kepada operator seluler
Konsumsi daya	Sangat rendah, masa pakai baterai bertahun-tahun	Rendah, namun umumnya lebih tinggi dari LoRaWAN
Kesesuaian lokasi	Area terpencil tanpa infrastruktur seluler memadai	Area perkotaan dengan cakupan seluler baik
Contoh penerapan infrastruktur	Pemantauan bendungan terpencil, jaringan sensor jalan tol	Pemantauan drainase perkotaan, jaringan sensor gedung kota

Penerapan NB-IoT untuk pemantauan sistem drainase perkotaan cerdas telah didokumentasikan secara khusus dalam penelitian yang mengevaluasi jaringan sensor seluler NB-IoT untuk mengendalikan sistem drainase kota, menunjukkan keandalan komunikasi yang baik meskipun sensor ditempatkan pada lingkungan bawah tanah yang menantang bagi propagasi sinyal radio (Roosipuu *et al.*, 2023). Sementara itu, penerapan LoRaWAN untuk sistem pemantauan dan peringatan dini banjir di kawasan tangkapan air menunjukkan keunggulan signifikan dalam hal jangkauan jaringan yang luas dan konsumsi daya minimal, menjadikannya solusi hemat biaya dan mudah diterapkan untuk pemantauan tingkat air secara *real-time* pada daerah aliran sungai yang luas.

3. Jaringan Seluler 5G untuk IoT Infrastruktur

Berbeda dengan LPWAN yang mengutamakan efisiensi daya dan jangkauan dengan mengorbankan kecepatan data, jaringan seluler generasi kelima (5G) menawarkan kombinasi latensi sangat rendah dan kapasitas data tinggi yang dibutuhkan aplikasi IoT infrastruktur tertentu, seperti transmisi video resolusi tinggi dari kamera inspeksi otonom atau

koordinasi *real-time* antara banyak perangkat sensor pada aplikasi kritikal. Standar teknis 5G mencakup kategori layanan *Ultra-Reliable Low-Latency Communication* (URLLC), yang secara khusus dirancang untuk aplikasi industri yang menuntut keandalan dan latensi minimal (Khan, Jangsher, Ahmed, & Al-Dweik, 2022).

Beberapa penyedia solusi IoT kini menawarkan pendekatan hibrida yang menggabungkan LoRaWAN dan 5G dalam satu ekosistem, perangkat sensor mengumpulkan data berdaya rendah melalui LoRaWAN, sementara data bervolume besar atau sensitif terhadap latensi ditransmisikan melalui jaringan 5G, memberikan fleksibilitas bagi penerapan berskala kompleks seperti kampus atau kawasan infrastruktur terpadu. Meskipun demikian, penerapan 5G pada proyek infrastruktur di wilayah pedesaan atau terpencil Indonesia masih menghadapi kendala keterbatasan cakupan jaringan, sehingga LPWAN tetap menjadi pilihan yang lebih realistis untuk sebagian besar proyek infrastruktur nasional dalam jangka menengah.

Tabel 4.9 Kesesuaian Teknologi Jaringan Berdasarkan Kebutuhan Aplikasi IoT Infrastruktur

Kebutuhan Aplikasi	Teknologi Paling Sesuai	Alasan Utama
Pemantauan struktur jangka panjang, area terpencil	LoRaWAN	Konsumsi daya rendah, jangkauan luas, biaya operasional rendah
Pemantauan drainase perkotaan padat	NB-IoT	Memanfaatkan infrastruktur seluler yang sudah tersedia
Inspeksi video real-time, kamera resolusi tinggi	5G	Kapasitas data besar dan latensi sangat rendah
Kawasan infrastruktur terpadu skala kampus	Hibrida LoRaWAN-5G	Fleksibilitas menggabungkan efisiensi daya dan kapasitas data

4. Manajemen dan Penyimpanan Data IoT

Volume data yang dihasilkan jaringan sensor IoT infrastruktur berskala besar dapat mencapai jutaan titik data per hari, menuntut

arsitektur penyimpanan yang dirancang khusus untuk data berurutan waktu (*time-series data*). Basis data deret waktu (*time-series database*) dioptimalkan untuk menyimpan dan menganalisis data yang memiliki stempel waktu (*timestamp*), memungkinkan kueri cepat terhadap tren historis maupun deteksi anomali dibandingkan pengelolaan basis data relasional konvensional.

Strategi penyimpanan data IoT infrastruktur umumnya menerapkan pendekatan berjenjang: data mentah frekuensi tinggi disimpan sementara pada penyimpanan lokal atau *edge* untuk keperluan analisis segera, kemudian data teragregasi dan terfilter dikirimkan ke penyimpanan *cloud* jangka panjang untuk keperluan analisis tren historis dan pelaporan kepatuhan regulasi. Pendekatan berjenjang ini menyeimbangkan kebutuhan responsivitas dengan keterbatasan biaya penyimpanan dan *bandwidth* jaringan.

Tabel 4.10 Strategi Penyimpanan Data Berjenjang pada Sistem IoT Infrastruktur

Tingkatan Penyimpanan	Lokasi	Durasi Retensi	Tujuan Utama
Tingkat 1: Data Mentah	Perangkat lokal/ <i>edge</i>	Jam hingga hari	Deteksi anomali segera, respons darurat
Tingkat 2: Data Teragregasi	Gerbang IoT/server lokal	Minggu hingga bulan	Analisis tren jangka pendek, pelaporan operasional
Tingkat 3: Arsip Historis	<i>Cloud</i> jangka panjang	Tahun (sesuai kebutuhan regulasi)	Analisis tren jangka panjang, kepatuhan audit

D. Integrasi IoT dengan Sistem Infrastruktur

1. Integrasi IoT dengan BIM: dari Model Statis menuju *Digital Twin*

Dimensi 7D BIM, integrasi IoT dengan BIM mengubah model informasi bangunan dari representasi statis pascakonstruksi menjadi representasi dinamis yang senantiasa termutakhirkan sesuai kondisi

aktual, sebuah transformasi yang dikenal sebagai *digital twin*. Kerangka konseptual integrasi melalui lima lapisan fisik, konektivitas, model informasi, analitik, dan keputusan yang kini dapat dipahami secara lebih teknis.

Secara teknis, integrasi ini diwujudkan melalui pemetaan setiap sensor IoT ke elemen spesifik dalam model BIM menggunakan pengenalan unik (*Global Unique Identifier/GUID*) elemen IFC, sehingga data sensor yang mengalir secara *real-time* dapat divisualisasikan langsung pada elemen model yang bersangkutan. Sebagai contoh, ketika sensor regangan pada suatu elemen balok jembatan mendeteksi nilai yang melampaui ambang batas aman, elemen balok tersebut pada model BIM dapat secara otomatis berubah warna menjadi indikator peringatan, memungkinkan insinyur segera mengidentifikasi lokasi persis yang memerlukan perhatian tanpa perlu menelusuri data mentah secara manual (Baghalzadeh, *et al.*, 2022).

Tantangan teknis yang perlu diperhatikan dalam integrasi ini adalah perbedaan mendasar antara frekuensi pembaruan data BIM, yang secara tradisional bersifat episodik mengikuti siklus proyek, dengan frekuensi data sensor IoT yang bersifat kontinu dapat mencapai puluhan kali per detik untuk sensor getaran. Platform integrasi BIM-IoT yang efektif perlu menerapkan strategi agregasi dan penyaringan data yang cerdas, menampilkan ringkasan status terkini pada model tanpa membanjiri antarmuka pengguna dengan volume data mentah yang tidak dapat diinterpretasikan secara bermakna oleh pengguna manusia.

Tabel 4.11 Alur Integrasi Data IoT menuju Model BIM Dinamis
(*Digital Twin*)

Tahap	Proses	Keluaran
1. Akuisisi Data	Sensor IoT mengumpulkan data fisik aset secara kontinu	Data mentah dengan stempel waktu
2. Transmisi	Data dikirim melalui LPWAN/5G menuju gerbang IoT	Data tersinkronisasi di pusat pengolahan
3. Pemetaan Elemen	Data dikaitkan dengan GUID	Data terhubung ke elemen model yang relevan

Tahap	Proses	Keluaran
	elemen model BIM tertentu	
4. Visualisasi Dinamis	Model BIM menampilkan status elemen secara real-time	<i>Digital twin</i> aset yang termutakhirkan
5. Analitik & Keputusan	Algoritma menganalisis tren dan memicu peringatan	Rekomendasi tindakan pemeliharaan/perbaikan

2. IoT untuk *Smart Building* dan Manajemen Fasilitas

Pada skala bangunan gedung, integrasi IoT mendukung konsep *smart building* yang mencakup optimasi konsumsi energi, keselamatan penghuni, dan efisiensi operasional. Sensor okupansi ruangan yang terintegrasi dengan sistem tata udara dan pencahayaan memungkinkan penyesuaian otomatis berdasarkan keberadaan aktual penghuni, secara signifikan mengurangi konsumsi energi dibandingkan sistem yang beroperasi pada jadwal tetap tanpa mempertimbangkan okupansi riil. Integrasi ini melengkapi analisis energi pada dimensi 6D BIM, mengubah prediksi konsumsi energi tahap desain menjadi pemantauan dan optimasi aktual tahap operasional.

Riset mengenai integrasi BIM, IoT, dan kecerdasan buatan pada manajemen fasilitas menunjukkan bahwa kombinasi ketiganya secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional, terutama pada fasilitas dengan tuntutan operasional tinggi seperti bangunan medis yang beroperasi secara berkelanjutan, melalui peningkatan aksesibilitas data secara real-time, pemeliharaan prediktif, dan manajemen cerdas yang menjanjikan efektivitas operasional yang lebih baik (Sampaio *et al*, 2025).



Gambar 4.1 IoT untuk *Smart Building*

Sistem keselamatan kebakaran berbasis IoT turut menjadi komponen penting *smart building*, mengintegrasikan detektor asap dan panas konvensional dengan konektivitas jaringan yang memungkinkan notifikasi otomatis kepada petugas keamanan dan pemadam kebakaran segera setelah anomali terdeteksi, alih-alih hanya mengandalkan alarm lokal yang bergantung pada kehadiran manusia di sekitar lokasi kejadian. Integrasi data ini dengan model BIM gedung turut memungkinkan tim tanggap darurat memvisualisasikan lokasi persis titik kebakaran serta jalur evakuasi optimal secara langsung sebelum tiba di lokasi, mempercepat waktu respons pada situasi kritis yang menuntut setiap detik keputusan.

Tabel 4.12 Ilustrasi Kasus: *Smart Building* pada Gedung Perkantoran Bertingkat

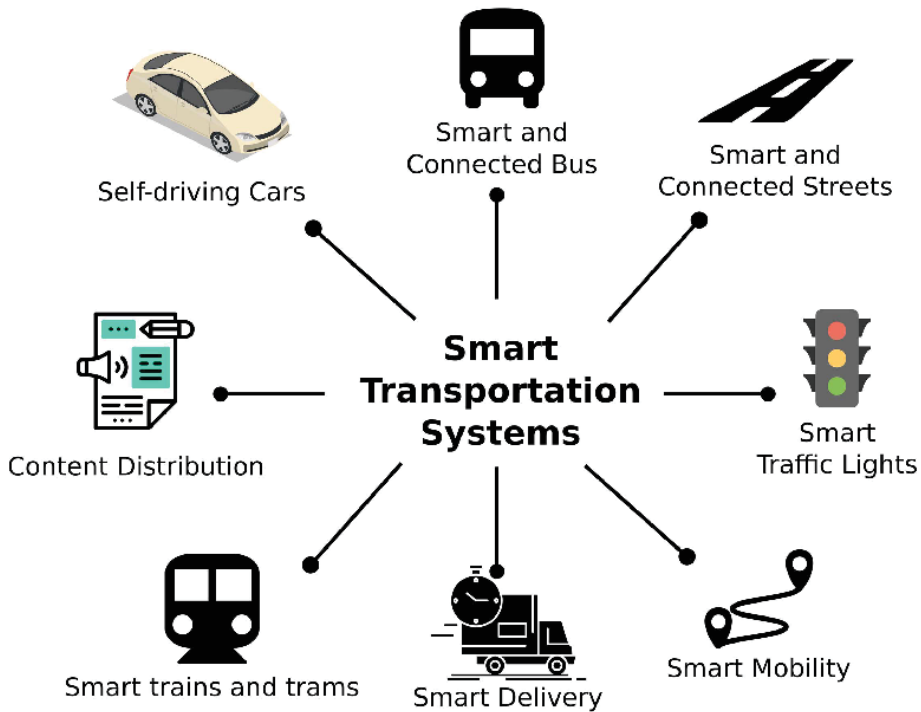
Elemen	Uraian
Konteks	Gedung perkantoran 20 lantai dengan target efisiensi energi dan sertifikasi bangunan hijau

Elemen	Uraian
Sensor diterapkan	Sensor okupansi ruangan, sensor kualitas udara, sensor konsumsi energi per lantai
Integrasi sistem	Data sensor terhubung ke model BIM 7D untuk manajemen fasilitas terintegrasi
Hasil operasional	Penurunan konsumsi energi signifikan melalui penyesuaian otomatis HVAC dan pencahayaan
Manfaat tambahan	Deteksi dini masalah kualitas udara dalam ruangan meningkatkan kenyamanan penghuni
Pembelajaran utama	Manfaat smart building paling optimal ketika data IoT terintegrasi langsung dengan model BIM operasional

3. IoT untuk *Smart Transportation* dan Infrastruktur Jalan

Pada skala infrastruktur transportasi, IoT mendukung berbagai aplikasi mulai dari pemantauan kondisi perkerasan jalan, manajemen lalu lintas adaptif, hingga sistem tol otomatis. Sensor tertanam pada perkerasan jalan dapat memantau beban lalu lintas aktual dan kondisi struktural perkerasan secara berkelanjutan, memungkinkan perencanaan pemeliharaan jalan yang lebih presisi dibandingkan pendekatan inspeksi visual berkala konvensional. Kamera lalu lintas berbasis IoT yang dilengkapi analisis citra memungkinkan deteksi kepadatan lalu lintas secara *real-time*, mendukung sistem manajemen lalu lintas adaptif yang menyesuaikan waktu sinyal lalu lintas berdasarkan kondisi aktual, bukan jadwal tetap.

Pada infrastruktur jembatan, integrasi data IoT dengan sistem manajemen aset transportasi memungkinkan otoritas jalan memprioritaskan alokasi anggaran pemeliharaan secara berbasis data, jembatan dengan indikator kesehatan struktur yang memburuk mendapat prioritas lebih tinggi dibandingkan pendekatan penjadwalan pemeliharaan seragam yang tidak mempertimbangkan kondisi aktual setiap aset.



Gambar 4.2 IoT untuk *Smart Transportation*

Tabel 4.13 Aplikasi IoT pada Infrastruktur Transportasi dan Manfaatnya

Aplikasi	Jenis Sensor/Perangkat	Manfaat Operasional
Pemantauan perkerasan jalan	Sensor beban dinamis, sensor suhu perkerasan	Perencanaan pemeliharaan berbasis kondisi aktual
Manajemen lalu lintas adaptif	Kamera analisis citra, sensor kepadatan kendaraan	Penyesuaian sinyal lalu lintas real-time, pengurangan kemacetan
Sistem tol otomatis	RFID/ <i>On-Board Unit</i> , kamera pengenalan plat nomor	Transaksi tanpa henti, pengurangan antrean gerbang tol
Pemantauan jembatan	<i>Strain gauge</i> , akselerometer terintegrasi manajemen aset	Prioritisasi anggaran pemeliharaan berbasis data kondisi

Aplikasi	Jenis Sensor/Perangkat	Manfaat Operasional
Pemantauan terowongan	Sensor kualitas udara, sensor kebakaran, CCTV	Keselamatan pengguna, deteksi dini insiden darurat

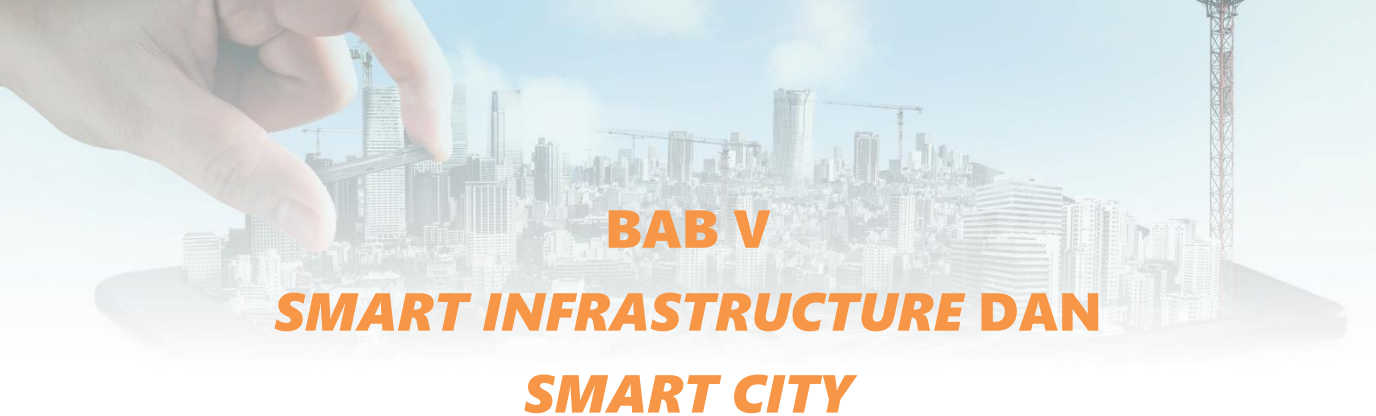
4. IoT untuk Manajemen Sumber Daya Air dan Mitigasi Bencana

Bendungan multifungsi, IoT memainkan peran penting dalam manajemen sumber daya air dan mitigasi risiko bencana hidrologis. Sistem pemantauan ketinggian air berbasis IoT yang dipasang di sepanjang sungai dan kawasan tangkapan air memungkinkan deteksi dini potensi banjir, memberikan waktu peringatan yang lebih panjang bagi masyarakat terdampak dibandingkan sistem pemantauan manual konvensional (Te *et al.*, 2024).

Penerapan sensor tekanan berperforma tinggi yang diintegrasikan dengan jaringan LoRaWAN untuk pemantauan banjir perkotaan menunjukkan bahwa sistem semacam ini dapat memberikan data ketinggian air secara real-time dengan biaya implementasi yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem pemantauan konvensional, menjadikannya solusi yang layak diterapkan secara luas bahkan pada anggaran pemerintah daerah yang terbatas (Te *et al.*, 2024). Bagi konteks Indonesia yang memiliki kerentanan tinggi terhadap bencana hidrometeorologi seperti banjir dan tanah longsor, penerapan sistem peringatan dini berbasis IoT semacam ini memiliki potensi dampak sosial yang signifikan, sejalan dengan prinsip *Society 5.0* mengenai teknologi yang berorientasi pada penyelesaian persoalan sosial, bukan sekadar efisiensi ekonomi semata.

Tabel 4.14 Ringkasan Penerapan IoT pada Berbagai Tipologi Infrastruktur

Tipologi Infrastruktur	Aplikasi IoT Utama	Manfaat Kunci
Gedung (<i>Smart Building</i>)	Sensor okupansi, kontrol HVAC otomatis, keamanan	Efisiensi energi, kenyamanan, keselamatan penghuni
Jalan dan Jembatan	Sensor beban perkerasan, SHM jembatan, kamera lalu lintas	Pemeliharaan berbasis kondisi, manajemen lalu lintas adaptif
Sumber Daya Air	Sensor ketinggian air, piezometer bendungan, kualitas air	Deteksi dini banjir, keamanan bendungan, konservasi air
Kawasan Perkotaan	Jaringan sensor terintegrasi lintas aset kota	Pengambilan keputusan perkotaan berbasis data terpadu



BAB V

SMART INFRASTRUCTURE DAN SMART CITY

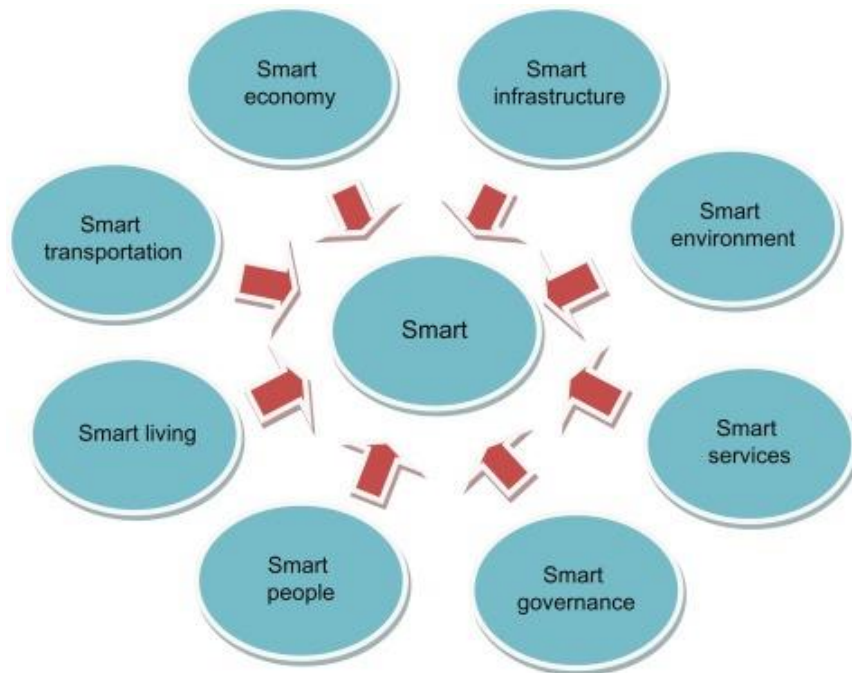
Smart Infrastructure dan *Smart City* merupakan dua konsep yang saling berkaitan dalam mewujudkan pembangunan perkotaan yang modern, berkelanjutan, dan berorientasi pada peningkatan kualitas hidup masyarakat. *Smart infrastructure* mengacu pada pemanfaatan teknologi digital, sensor, *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan, dan sistem informasi untuk mengelola infrastruktur seperti transportasi, energi, air, telekomunikasi, serta layanan publik secara lebih efisien dan responsif. Sementara itu, *smart city* adalah konsep pengelolaan kota yang mengintegrasikan teknologi, tata kelola, partisipasi masyarakat, dan inovasi untuk menciptakan lingkungan perkotaan yang aman, nyaman, produktif, serta ramah lingkungan. Keberadaan *smart infrastructure* menjadi fondasi utama dalam pengembangan *smart city* karena menyediakan sistem pendukung yang mampu mengoptimalkan pengelolaan sumber daya, meningkatkan kualitas pelayanan publik, memperkuat ketahanan kota terhadap berbagai tantangan, serta mendukung terciptanya pembangunan yang berkelanjutan.

A. Definisi dan Karakteristik *Smart Infrastructure*

1. Definisi *Smart Infrastructure* dari Berbagai Perspektif

Smart infrastructure dapat dipahami sebagai aset infrastruktur fisik yang dilengkapi kemampuan penginderaan, pemrosesan data, dan pengambilan keputusan otonom atau semi-otonom untuk mengoptimalkan kinerja, keselamatan, dan efisiensinya sepanjang siklus hidup. Definisi yang lebih spesifik dari perspektif sistem energi memandang *smart infrastructure* sebagai infrastruktur energi, informasi, dan komunikasi yang mendukung teknologi pembangkitan, distribusi, konsumsi, pengukuran informasi, pemantauan, manajemen, dan

komunikasi listrik tingkat lanjut, yang mencakup tiga subsistem utama: energi cerdas, informasi cerdas, dan komunikasi cerdas.



Gambar 5.1 *Smart Infrastructure*

Dari perspektif investasi infrastruktur, *smart infrastructure* dipandang sebagai peluang untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam, modal manusia, dan modal ekonomi melalui integrasi solusi digital pada aset yang sudah berkinerja baik maupun aset yang berkinerja di bawah standar. Data disebut secara eksplisit sebagai elemen paling mendasar yang membedakan infrastruktur konvensional dari *smart infrastructure*. Ketiga perspektif ini yaitu teknis-energi, investasi, dan konseptual umum, menegaskan bahwa *smart infrastructure* bukan sekadar penambahan teknologi pada aset fisik, melainkan transformasi fundamental terhadap cara aset tersebut menghasilkan, mengelola, dan memanfaatkan informasi.

Tabel 5.1 Definisi *Smart Infrastructure* dari Berbagai Perspektif

Perspektif	Fokus Definisi
Teknis-Energi	Infrastruktur energi-informasi-komunikasi dengan tiga subsistem cerdas
Investasi Infrastruktur	Optimasi sumber daya melalui integrasi solusi digital, data sebagai pembeda utama
Kebijakan Publik	Perpaduan infrastruktur fisik dan siber menuju era ' <i>connected everything</i> '
Pasar Global	Sistem yang mengumpulkan informasi via perangkat, kamera, dan sensor terhubung

2. Karakteristik Utama yang Membedakan *Smart Infrastructure*

Berdasarkan sintesis berbagai definisi maka dapat diidentifikasi lima karakteristik utama yang membedakan *smart infrastructure* dari infrastruktur konvensional. Pertama, kesadaran situasional (*situational awareness*), yaitu kemampuan aset memantau kondisinya sendiri secara berkelanjutan melalui jaringan sensor. Kedua, konektivitas menyeluruh (*pervasive connectivity*), yaitu integrasi komunikasi data yang menghubungkan setiap komponen aset dengan sistem pengolahan pusat maupun aset infrastruktur lain di sekitarnya.

Ketiga, kapasitas analitis (*analytical capacity*), yaitu kemampuan mengolah data mentah menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti melalui algoritma analitik dan kecerdasan buatan. Keempat, respons adaptif (*adaptive response*), yaitu kemampuan sistem menyesuaikan operasinya secara otomatis berdasarkan kondisi yang terdeteksi, mulai dari penyesuaian sederhana seperti pencahayaan otomatis hingga tindakan kompleks seperti penutupan otomatis pintu air bendungan. Kelima, keterhubungan dengan model informasi (*information model linkage*), yaitu integrasi data operasional dengan representasi digital aset.

Karakteristik keenam yang semakin diakui pentingnya adalah interoperabilitas lintas sistem (*cross-system interoperability*), yaitu kemampuan suatu aset *smart infrastructure* untuk bertukar data secara bermakna dengan aset infrastruktur lain di sekitarnya, bukan beroperasi sebagai sistem terisolasi. Sebuah gedung cerdas yang mampu berkoordinasi dengan jaringan listrik kota untuk menyesuaikan konsumsi energinya pada saat permintaan puncak, misalnya,

menunjukkan tingkat kecerdasan yang lebih tinggi dibandingkan gedung yang hanya mengoptimalkan konsumsi energinya secara internal tanpa mempertimbangkan konteks jaringan yang lebih luas. Karakteristik keenam inilah yang menjadi jembatan konseptual menuju *smart city*.

Tabel 5.2 Enam Karakteristik Utama *Smart Infrastructure*

No	Karakteristik	Manifestasi Teknis
1	Kesadaran Situasional	Jaringan sensor IoT yang memantau kondisi aset berkelanjutan
2	Konektivitas Menyeluruh	Jaringan komunikasi LPWAN/5G yang menghubungkan seluruh komponen
3	Kapasitas Analitis	Algoritma analitik data dan kecerdasan buatan untuk mengolah data sensor
4	Respons Adaptif	Tindakan otomatis berdasarkan kondisi terdeteksi (kendali pintu air, dsb.)
5	Keterhubungan Model Informasi	Integrasi data operasional dengan model BIM membentuk <i>digital twin</i>
6	Interoperabilitas Lintas Sistem	Pertukaran data bermakna antaraset infrastruktur di sekitarnya

3. Evolusi dari Infrastruktur Konvensional menuju *Smart Infrastructure*

Transisi menuju *smart infrastructure* pada dasarnya merupakan kelanjutan dari evolusi digital teknik sipil. Infrastruktur konvensional dicirikan oleh pengelolaan reaktif merupakan tindakan pemeliharaan dilakukan setelah kerusakan teramati atau berdasarkan jadwal tetap tanpa mempertimbangkan kondisi aktual. Transisi menuju infrastruktur cerdas berlangsung melalui beberapa tahap: pertama, digitalisasi dasar melalui penerapan BIM pada tahap desain; kedua, instrumentasi melalui pemasangan sensor IoT pasca-konstruksi; ketiga, konektivitas melalui integrasi data sensor dengan platform pusat; dan keempat, otomasi serta kecerdasan melalui penerapan analitik prediktif dan respons otomatis.

Pasar global *smart infrastructure* mencerminkan laju transisi ini secara kuantitatif: nilai pasar diperkirakan mencapai 372,95 miliar dolar

Amerika Serikat pada 2023 dan diproyeksikan tumbuh hingga 1.355,44 miliar dolar pada 2030, dengan tingkat pertumbuhan tahunan majemuk sebesar 20,5 persen. Sistem transportasi cerdas tercatat sebagai segmen dengan pangsa pendapatan terbesar pada 2023, sementara kawasan Amerika Utara mendominasi pasar dengan pangsa 30,84 persen.

4. Komponen Penyusun Ekosistem *Smart Infrastructure*

Ekosistem *smart infrastructure* dapat dipetakan ke dalam lima komponen utama yang saling terintegrasi. Komponen fisik mencakup aset infrastruktur itu sendiri yaitu jembatan, jalan, gedung, bendungan beserta material dan strukturnya. Komponen penginderaan mencakup seluruh sensor IoT, mulai dari *strain gauge* hingga GNSS presisi tinggi.

Komponen konektivitas mencakup jaringan komunikasi data yaitu LPWAN, 5G, maupun jaringan kabel tetap yang menghubungkan sensor dengan sistem pengolahan. Komponen model informasi mencakup representasi digital aset melalui BIM yang menjadi kanvas visualisasi bagi data sensor *real-time*. Komponen kecerdasan mencakup algoritma analitik, pembelajaran mesin, dan sistem pendukung keputusan yang mengubah data mentah menjadi wawasan dan tindakan yang dapat ditindaklanjuti oleh manusia maupun sistem otomatis.

Tabel 5.3 Lima Komponen Ekosistem *Smart Infrastructure*

Komponen	Elemen Penyusun
Fisik	Aset infrastruktur, material, struktur
Penginderaan	Sensor SHM, sensor geoteknik, LiDAR, drone
Konektivitas	LPWAN, 5G, jaringan kabel tetap, gerbang IoT
Model Informasi	BIM, <i>Common Data Environment</i> , <i>digital twin</i>
Kecerdasan	Analitik data, pembelajaran mesin, sistem pendukung keputusan

Kelima komponen ini bersifat saling bergantung dan tidak dapat berfungsi optimal secara terisolasi. Sebagai contoh, komponen kecerdasan yang sangat canggih tidak akan menghasilkan nilai apa pun tanpa komponen penginderaan yang memadai untuk menyediakan data

mentah, sementara komponen model informasi yang kaya tidak akan termanfaatkan optimal tanpa komponen konektivitas yang andal untuk menjaga kesinambungan pembaruan datanya. Prinsip saling ketergantungan inilah yang menjelaskan mengapa investasi *smart infrastructure* yang efektif memerlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan seluruh komponen secara seimbang, alih-alih berinvestasi besar pada satu komponen tertentu sambil mengabaikan komponen lainnya.

B. Infrastruktur Berbasis Data dan Konektivitas

Data merupakan elemen paling fundamental yang membedakan *smart infrastructure* dari infrastruktur konvensional. Subbab ini membahas secara lebih mendalam bagaimana data diperlakukan sebagai aset strategis, bagaimana konektivitas menjadi tulang punggung yang menghubungkan seluruh komponen, serta bagaimana analitik data dan kecerdasan buatan mengubah data mentah menjadi keputusan rekayasa yang bernilai.

1. Data sebagai Aset Strategis Infrastruktur

Pergeseran paradigma paling mendasar dalam *smart infrastructure* adalah perlakuan terhadap data bukan sekadar produk sampingan operasional, melainkan sebagai aset strategis yang bernilai ekonomi dan operasional setara dengan aset fisik itu sendiri. Data historis mengenai kinerja suatu aset, pola pembebanan, riwayat pemeliharaan, respons terhadap kondisi lingkungan ekstrem memiliki nilai yang terus bertambah dari waktu ke waktu, karena memungkinkan analisis tren jangka panjang yang tidak dapat diperoleh dari data sesaat (CAIA, 2024).

Perlakuan data sebagai aset strategis memiliki implikasi tata kelola yang signifikan. Organisasi pengelola infrastruktur perlu menetapkan kebijakan kepemilikan data, standar kualitas data, dan protokol keamanan yang setara dengan kebijakan pengelolaan aset fisik konvensional. Kualitas data dan kalibrasi sensor, data yang tidak dikelola dengan disiplin, baik dari segi akurasi maupun keamanan, dapat menghasilkan keputusan rekayasa yang keliru, mengurangi nilai strategis yang seharusnya diperoleh dari investasi *smart infrastructure*.

Nilai strategis data infrastruktur juga membuka potensi monetisasi baru yang belum banyak dieksplorasi oleh sektor konstruksi konvensional. Data agregat mengenai pola penggunaan infrastruktur transportasi, misalnya, dapat memberikan nilai bagi perencana kota, pengembang properti, maupun penyedia layanan logistik, tentunya dengan memperhatikan batasan privasi dan kepemilikan data yang berlaku. Organisasi pengelola infrastruktur yang memahami nilai strategis ini secara progresif mulai mengembangkan model bisnis baru berbasis data, melampaui model pendapatan tradisional yang hanya bertumpu pada tarif penggunaan aset fisik semata.

Tabel 5.4 Kerangka Tata Kelola Data Strategis Infrastruktur

Dimensi Tata Kelola	Fokus Utama	Contoh Penerapan
Kepemilikan Data	Kejelasan pihak yang berwenang atas data aset	Penetapan pemilik proyek sebagai pemegang hak data utama
Kualitas Data	Akurasi, konsistensi, dan validitas data sensor	Program kalibrasi berkala sebagaimana dibahas pada Bab 4
Keamanan Data	Perlindungan terhadap akses tidak sah dan kebocoran	Enkripsi, kontrol akses berbasis peran
Retensi dan Arsip	Kebijakan penyimpanan data jangka panjang	Strategi penyimpanan berjenjang
Etika dan Privasi	Perlindungan data pribadi warga pada aplikasi <i>smart city</i>	Kepatuhan regulasi privasi data pada sistem CCTV publik

2. Konektivitas sebagai Tulang Punggung *Smart Infrastructure*

Komponen konektivitas berperan sebagai tulang punggung yang menghubungkan sistem penginderaan dengan sistem kecerdasan dalam ekosistem *smart infrastructure*. Melalui jaringan komunikasi yang andal, data yang dikumpulkan oleh berbagai sensor dapat dikirim secara real-time ke pusat pengolahan untuk dianalisis dan diubah menjadi informasi

yang mendukung pengambilan keputusan. Tanpa konektivitas yang memadai, aliran data akan terhambat sehingga proses analisis tidak dapat berlangsung secara optimal, meskipun sistem analitik dan algoritma yang digunakan memiliki kemampuan yang sangat canggih.

Kinerja konektivitas tidak hanya ditentukan oleh kecepatan transmisi data, tetapi juga oleh tingkat keandalan (*reliability*) dan latensi (*latency*). Keandalan menunjukkan kemampuan jaringan untuk tetap tersedia dan berfungsi secara konsisten dalam berbagai kondisi, sedangkan latensi menggambarkan waktu yang dibutuhkan sejak data dihasilkan hingga diterima oleh sistem untuk diproses. Pada aplikasi yang bersifat kritis, seperti sistem peringatan dini bencana, kedua aspek tersebut menjadi faktor yang sangat penting karena informasi harus diterima dan diproses dalam waktu sesingkat mungkin. Latensi yang rendah memungkinkan respons cepat terhadap kondisi darurat, sementara jaringan yang andal memastikan informasi tetap dapat dikirim tanpa gangguan, sehingga peluang keberhasilan mitigasi dan evakuasi dapat ditingkatkan.

3. Analitik *Big Data* dan Prediktif dalam Pengelolaan Infrastruktur

Karakteristik *big data* dalam konteks *smart infrastructure* umumnya dijelaskan melalui tiga dimensi utama yang dikenal sebagai '3V': volume (jumlah data yang sangat besar, dapat mencapai terabita per hari pada jaringan sensor perkotaan berskala luas), velositas (kecepatan data dihasilkan dan perlu diproses, seringkali menuntut pemrosesan mendekati waktu nyata sebagaimana dibahas dalam konteks *edge computing*), dan variasi (keragaman format data, mulai dari data numerik sensor, citra visual kamera, hingga data geospasial). Ketiga dimensi ini secara kolektif menuntut infrastruktur teknologi informasi yang jauh lebih canggih dibandingkan sistem pengelolaan data konvensional yang dirancang untuk volume data yang jauh lebih kecil dan format yang lebih seragam.

Volume data yang dihasilkan jaringan sensor *smart infrastructure* berskala besar menuntut pendekatan analitik yang mampu mengolah *big data* tersebut secara efektif. Riset mengenai keselarasan strategis BIM dan *big data* menegaskan bahwa integrasi kedua ranah teknologi ini membuka potensi analitik yang jauh melampaui kapasitas analisis manual konvensional, termasuk kemampuan mengidentifikasi

pola tersembunyi dalam data historis yang tidak dapat terdeteksi melalui inspeksi visual maupun analisis statistik sederhana (Sompolgrunk, Banihashemi, Golzad, & Le Nguyen, 2024).

Analitik prediktif memanfaatkan data historis dan data real-time untuk memproyeksikan kondisi aset di masa depan, memungkinkan pemeliharaan prediktif. Berbeda dengan analitik deskriptif yang hanya menjelaskan apa yang telah terjadi, analitik prediktif menjawab pertanyaan apa yang mungkin akan terjadi, memberikan waktu bagi pengelola infrastruktur untuk mengambil tindakan pencegahan sebelum kegagalan benar-benar terjadi.

Tabel 5.5 Perbedaan Analitik Deskriptif dan Analitik Prediktif dalam Pengelolaan Infrastruktur

Aspek	Analitik Deskriptif	Analitik Prediktif
Pertanyaan yang dijawab	Apa yang telah terjadi pada aset?	Apa yang mungkin terjadi pada aset?
Basis data	Data historis dan data real-time saat ini	Data historis, data real-time, dan model statistik/ML
Contoh keluaran	Laporan tren konsumsi energi bulanan	Proyeksi kegagalan komponen dalam enam bulan mendatang
Manfaat utama	Pemahaman kondisi masa lalu dan kini	Kesempatan mengambil tindakan pencegahan dini

4. Kecerdasan Buatan dan Pembelajaran Mesin dalam Infrastruktur

Kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dan pembelajaran mesin (*machine learning*) merupakan mesin penggerak di balik kapasitas analitis sebagai salah satu karakteristik utama *smart infrastructure*. Algoritma pembelajaran mesin dilatih menggunakan data historis untuk mengenali pola normal dan anomali pada perilaku aset infrastruktur, memungkinkan deteksi dini penyimpangan yang mengindikasikan potensi masalah, dalam konteks otomasi *clash detection* dan validasi kualitas data sensor.

Penerapan AI pada infrastruktur mencakup berbagai kategori, mulai dari klasifikasi (mengategorikan kondisi aset ke dalam kategori risiko tertentu), regresi (memprediksi nilai numerik seperti estimasi umur layan sisa suatu komponen), hingga pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*) yang memungkinkan sistem belajar strategi pengendalian optimal melalui simulasi berulang, seperti optimasi jadwal operasi pompa pada sistem manajemen air. Penting ditegaskan, sejalan dengan prinsip bahwa AI berfungsi sebagai alat bantu pengambilan keputusan, bukan pengganti penilaian profesional insinyur, terutama untuk keputusan yang berimplikasi langsung pada keselamatan publik.

Perkembangan mutakhir kecerdasan buatan generatif (*generative AI*), mulai merambah ke ranah pengelolaan infrastruktur operasional melalui kemampuan menghasilkan laporan naratif otomatis dari data sensor mentah, menerjemahkan pertanyaan bahasa alami operator menjadi kueri data teknis, serta menyusun rekomendasi tindakan pemeliharaan dalam bahasa yang mudah dipahami oleh pemangku kepentingan non-teknis. Kemampuan ini berpotensi menjembatani kesenjangan antara kompleksitas data teknis dan kebutuhan komunikasi yang jelas kepada pengambil keputusan pada tataran manajerial maupun kebijakan publik.

5. Interoperabilitas dan Platform Data Terbuka

Interoperabilitas data menjadi tantangan yang berulang muncul di setiap lapisan teknologi *smart infrastructure*. Ekosistem *smart infrastructure* yang matang idealnya mengadopsi platform data terbuka yang memungkinkan berbagai sistem seperti BIM, IoT, sistem manajemen aset, sistem informasi geografis saling bertukar data tanpa terkungkung pada format eksklusif vendor tertentu.

Prinsip *openBIM* melalui standar IFC, dikombinasikan dengan standar data terbuka IoT seperti *Sensor Web Enablement* membentuk fondasi bagi interoperabilitas menyeluruh dalam ekosistem *smart infrastructure*. Tanpa interoperabilitas semacam ini, organisasi berisiko terjebak dalam silo data (*data silos*) yang terisolasi satu sama lain, mengurangi nilai strategis data, karena wawasan yang bermakna sering kali baru muncul ketika data dari berbagai sumber yang berbeda digabungkan dan dianalisis secara bersamaan.

Tabel 5.6 Indikator Kinerja Utama Pemanfaatan Data pada *Smart Infrastructure*

Indikator	Definisi	Interpretasi
Tingkat Ketersediaan Data (<i>Data Availability</i>)	Persentase waktu data sensor tersedia tanpa gangguan	Rendah menandakan masalah konektivitas atau sensor
Latensi Data (<i>Data Latency</i>)	Waktu tunda antara data dihasilkan dan tersedia untuk analisis	Tinggi menghambat respons terhadap kondisi kritis
Tingkat Pemanfaatan Data (<i>Data Utilization Rate</i>)	Proporsi data terkumpul yang benar-benar dianalisis dan ditindaklanjuti	Rendah menandakan potensi investasi sensor yang tidak optimal
Akurasi Prediksi Model	Tingkat kesesuaian prediksi analitik dengan kejadian aktual	Rendah menandakan kebutuhan penyempurnaan model analitik

Pemantauan indikator ini secara berkala penting untuk memastikan investasi pada infrastruktur data dan konektivitas benar-benar menghasilkan nilai yang sepadan. Organisasi yang hanya berfokus pada jumlah sensor yang terpasang tanpa memantau tingkat pemanfaatan data yang dihasilkan berisiko mengalami apa yang disebut sebagai 'kekayaan data, kemiskinan wawasan' (*data rich, insight poor*) yaitu situasi ketika data melimpah namun tidak menghasilkan keputusan yang lebih baik karena tidak dianalisis atau ditindaklanjuti secara memadai.

C. *Smart City* dan Infrastruktur Perkotaan

Ketika konsep *smart infrastructure* diterapkan pada skala kawasan perkotaan secara menyeluruh, muncul konsep yang lebih luas yaitu *smart city* atau kota cerdas. Subbab ini membahas keterkaitan kedua konsep tersebut, domain-domain utama yang membentuk *smart city*, serta penerapannya dalam konteks Indonesia.

1. Konsep *Smart City* dan Kaitannya dengan *Smart Infrastructure*

Smart city didefinisikan sebagai kota yang mengintegrasikan berbagai domain transportasi, energi, kesehatan, pendidikan, dan tata kelola pemerintahan untuk menciptakan lingkungan perkotaan yang saling terhubung dan cerdas, dengan tujuan meningkatkan kualitas hidup warga, efisiensi infrastruktur, dan pertumbuhan ekonomi berkelanjutan (Lacson *et al.*, 2023). Sementara *smart infrastructure* berfokus pada kecerdasan aset individual, satu jembatan, satu gedung, satu jaringan air, *smart city* mengintegrasikan kecerdasan lintas-aset tersebut ke dalam satu ekosistem kota yang koheren.

Hubungan antara kedua konsep dapat dipahami sebagai hubungan bagian-keseluruhan: setiap aset *smart infrastructure* individual seperti jalan, jembatan, gedung, jaringan air merupakan blok pembangun (*building block*) yang, ketika diintegrasikan dan dikoordinasikan pada skala kota, membentuk *smart city*. Tanpa fondasi *smart infrastructure* yang kokoh pada tingkat aset individual, visi *smart city* pada skala yang lebih luas tidak akan memiliki basis data dan konektivitas yang memadai untuk terwujud secara bermakna.

Tabel 5.7 Dimensi Evaluasi Kinerja *Smart City* menurut Standar ISO 37120/37122

Dimensi Evaluasi	Contoh Indikator	Kaitan dengan <i>Smart Infrastructure</i>
Tata Kelola (<i>Governance</i>)	Transparansi anggaran, partisipasi warga digital	<i>Smart governance</i>
Ekonomi	Tingkat pengangguran, produktivitas ekonomi digital	<i>Smart economy</i>
Lingkungan	Kualitas udara, pengelolaan limbah	<i>Smart environment</i> , sensor kualitas udara
Mobilitas	Waktu tempuh rata-rata, cakupan transportasi publik	<i>Smart mobility</i>

2. Domain dan Pilar Utama *Smart City*

Kerangka evaluasi *smart city* internasional, termasuk standar ISO 37120 dan ISO 37122 yang menjadi rujukan paling banyak digunakan dalam model evaluasi *smart city* global, mengukur kinerja kota pada berbagai dimensi termasuk tata kelola, ekonomi, lingkungan, dan mobilitas (ISO 37120, 2018; ISO 37122, 2019). Dalam konteks Indonesia, Kementerian Komunikasi dan Informatika melalui program Gerakan Menuju 100 Smart City menetapkan enam pilar utama yang menjadi acuan pengembangan kota cerdas nasional: *smart governance*, *smart branding*, *smart economy*, *smart living*, *smart society*, dan *smart environment*.

Riset terkini menegaskan bahwa meskipun model evaluasi kinerja *smart city* telah berkembang pesat, model penilaian kelayakan (*feasibility assessment*) sebelum suatu kota memulai transformasi *smart city* justru masih jarang tersedia secara komprehensif, meninggalkan kesenjangan penting dalam proses perencanaan. Penilaian kelayakan yang memadai idealnya mempertimbangkan tidak hanya kesiapan teknis dan finansial, tetapi juga risiko sosial dan lingkungan yang dapat mengancam keberlanjutan proses transformasi perkotaan jangka panjang, sebuah pertimbangan yang sejalan dengan pembahasan analisis kelayakan investasi *smart infrastructure*.

Tabel 5.8 Enam Pilar *Smart City* menurut Gerakan Menuju 100 *Smart City* Indonesia

Pilar	Fokus Utama	Contoh Penerapan
<i>Smart Governance</i>	Tata kelola pemerintahan digital yang transparan dan partisipatif	Layanan publik daring, sistem pengaduan digital
<i>Smart Branding</i>	Penguatan citra dan daya saing daerah	Promosi wisata digital, identitas kota berbasis data
<i>Smart Economy</i>	Ekonomi digital dan transaksi nontunai	<i>E-commerce</i> lokal, sistem pembayaran digital UMKM

Pilar	Fokus Utama	Contoh Penerapan
<i>Smart Living</i>	Kualitas hidup warga melalui infrastruktur dasar cerdas	Transportasi publik terintegrasi, perumahan hemat energi
<i>Smart Society</i>	Masyarakat yang literat digital dan partisipatif	Platform partisipasi warga, literasi digital
<i>Smart Environment</i>	Pengelolaan lingkungan dan sumber daya berkelanjutan	Pemantauan kualitas udara, manajemen sampah cerdas

Sumber: Diolah dari Ditjen Aptika Kominfo (2024)

3. *Smart Mobility* dan Transportasi Perkotaan Cerdas

Smart mobility merupakan salah satu domain *smart city* yang paling matang secara teknologi dan paling langsung dirasakan manfaatnya oleh warga perkotaan. Konsep ini mencakup sistem transportasi cerdas (*Intelligent Transportation System/ITS*), kendaraan otonom, dan platform berbagi kendaraan (*ride-sharing*) yang secara kolektif bertujuan meningkatkan mobilitas, keselamatan, dan efisiensi transportasi perkotaan. Integrasi indikator *smart mobility* dengan prinsip pengembangan berorientasi transit (*Transit-Oriented Development/TOD*) menjadi kerangka konseptual yang semakin banyak diadopsi, menekankan pentingnya keterjangkauan titik transit, kemudahan berjalan kaki (*walkability*), dan pelestarian lingkungan sebagai indikator utama mobilitas perkotaan yang ramah lingkungan (Sharif & Rahman, 2022).

Jaringan sensor IoT menjadi fondasi teknis bagi *smart mobility*, mendukung pemantauan lalu lintas secara real-time, sistem informasi penumpang dinamis pada transportasi publik, serta integrasi pembayaran elektronik antarmoda transportasi. Kombinasi kendaraan listrik dan kendaraan otonom yang terhubung (*Connected and Autonomous Electric Vehicles/CAEVs*) juga membuka potensi baru dalam mendukung fleksibilitas jaringan listrik perkotaan melalui pengisian daya cerdas yang responsif terhadap kondisi permintaan-pasokan listrik secara real-time, menjembatani domain *smart mobility* dengan domain *smart grid*.

Dimensi partisipasi warga (*citizen participation*) semakin diakui sebagai elemen penting dalam perencanaan *smart mobility* yang efektif, bergeser dari pendekatan *top-down* yang murni teknokratis menuju

pendekatan yang melibatkan warga dalam proses desain dan evaluasi layanan mobilitas. Pendekatan koproduksi (*co-production*) semacam ini, yang menekankan hubungan seimbang dan transparan antara pemerintah kota dan warganya, memungkinkan sistem transportasi cerdas dirancang berdasarkan kebutuhan riil pengguna, bukan sekadar asumsi teknokratis perencanaan kota (Founoun *et al.*, 2022; Di Bernardo *et al.*, 2023).

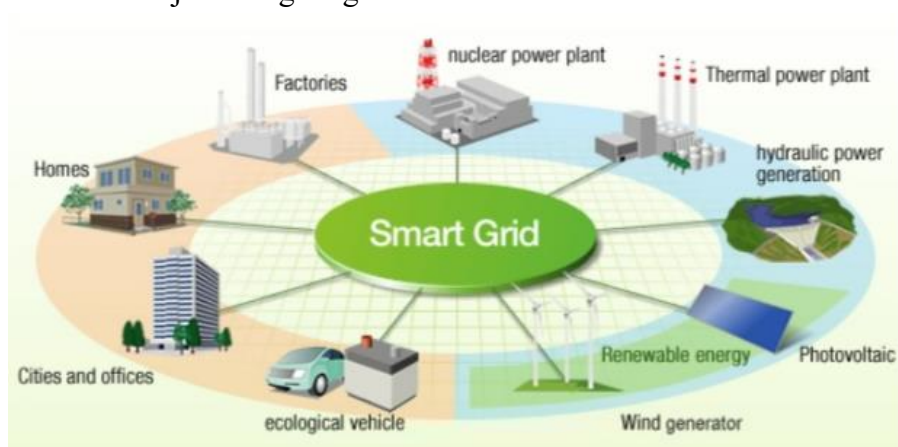
4. *Smart Grid* dan Manajemen Energi Perkotaan

Smart grid merupakan sistem jaringan listrik modern yang mengintegrasikan teknologi informasi, komunikasi, sensor, dan otomatisasi untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, serta fleksibilitas pengelolaan energi. Berbeda dengan jaringan listrik konvensional yang hanya menyalurkan listrik dari pembangkit menuju konsumen, *smart grid* memungkinkan pertukaran data dan informasi secara dua arah antara penyedia energi dan pengguna. Sistem ini memanfaatkan berbagai perangkat seperti *smart meter*, sensor jaringan, perangkat *Internet of Things* (IoT), serta pusat kendali berbasis komputer untuk memantau kondisi jaringan secara real-time. Dengan kemampuan tersebut, operator dapat mengetahui pola konsumsi energi, mendeteksi gangguan, mengatur distribusi daya, dan mengambil tindakan korektif secara cepat sehingga kualitas layanan kelistrikan menjadi lebih baik.

Dalam konteks manajemen energi perkotaan, *smart grid* berperan penting dalam mengoptimalkan penggunaan energi di berbagai sektor, seperti permukiman, kawasan industri, gedung perkantoran, fasilitas kesehatan, hingga sistem transportasi. Data konsumsi listrik yang diperoleh dari *smart meter* dianalisis untuk mengidentifikasi pola penggunaan energi pada waktu-waktu tertentu, sehingga beban listrik dapat didistribusikan secara lebih merata. Pendekatan ini dikenal sebagai *demand-side management*, yaitu strategi mengelola kebutuhan energi konsumen agar tidak terjadi lonjakan beban pada jam-jam puncak. Selain itu, sistem dapat memberikan informasi kepada pengguna mengenai konsumsi energi secara langsung, sehingga masyarakat terdorong untuk menggunakan listrik secara lebih hemat dan efisien. Pemerintah daerah maupun perusahaan penyedia listrik juga dapat memanfaatkan data tersebut untuk merencanakan pembangunan infrastruktur energi berdasarkan kebutuhan nyata di lapangan.

Keunggulan lain dari *smart grid* adalah kemampuannya mengintegrasikan berbagai sumber energi terbarukan ke dalam sistem

kelistrikan perkotaan. Energi yang berasal dari panel surya, turbin angin, pembangkit listrik tenaga air skala kecil, maupun biomassa dapat dimasukkan ke jaringan listrik tanpa mengganggu stabilitas sistem. Bahkan, masyarakat yang memiliki pembangkit listrik mandiri, seperti panel surya atap, dapat berperan sebagai *prosumer*, yaitu sekaligus sebagai produsen dan konsumen energi. Melalui mekanisme ini, kelebihan listrik yang dihasilkan dapat disalurkan kembali ke jaringan untuk dimanfaatkan oleh pengguna lain. Integrasi energi terbarukan membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, menurunkan emisi gas rumah kaca, meningkatkan ketahanan energi kota, serta mendukung pencapaian target pembangunan rendah karbon dan keberlanjutan lingkungan.



Gambar 5.2 *Smart Grid*

Penerapan *smart grid* juga meningkatkan keandalan dan ketahanan sistem kelistrikan terhadap berbagai gangguan. Sensor yang tersebar di sepanjang jaringan mampu mendeteksi kerusakan kabel, gangguan tegangan, maupun potensi kegagalan peralatan secara otomatis sebelum menyebabkan pemadaman yang lebih luas. Sistem kemudian dapat mengisolasi bagian jaringan yang mengalami gangguan dan mengalihkan aliran listrik melalui jalur alternatif sehingga pasokan listrik tetap tersedia bagi sebagian besar pengguna. Selain itu, pemanfaatan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), analisis data besar (*Big Data Analytics*), dan pembelajaran mesin (*Machine Learning*) memungkinkan prediksi kebutuhan energi berdasarkan pola konsumsi, kondisi cuaca, aktivitas ekonomi, maupun pertumbuhan penduduk. Dengan demikian, *smart grid* tidak hanya meningkatkan efisiensi

operasional jaringan listrik, tetapi juga menjadi fondasi utama dalam pengembangan manajemen energi perkotaan yang adaptif, tangguh, hemat energi, dan berkelanjutan sebagai bagian dari implementasi *smart city*.

Tabel 5.9 Lima Dimensi Utama Riset *Smart City* dan Perencanaan Energi Perkotaan

Dimensi	Fokus Kajian
Penggunaan Energi Skala Bangunan	Efisiensi energi gedung individual, sistem HVAC cerdas
Integrasi Desain dan Perencanaan Kota	Tata ruang kota yang mendukung efisiensi energi kawasan
Transportasi dan Mobilitas	Elektrifikasi transportasi, sistem transit cerdas
Modernisasi Jaringan Listrik (<i>Smart Grid</i>)	Integrasi energi terbarukan, fleksibilitas jaringan
Kebijakan dan Regulasi	Kerangka hukum pendukung transisi energi perkotaan cerdas

Sumber: Diolah dari Esfandi et al. (2024)

Tabel 5.10 Komponen Utama *Smart Grid* dan Fungsinya dalam Manajemen Energi Perkotaan

Komponen	Fungsi Utama	Manfaat bagi Kota
<i>Smart meter</i>	Pengukuran konsumsi listrik real-time dua arah	Tagihan akurat, deteksi dini pencurian listrik
Sensor jaringan distribusi	Pemantauan kualitas dan stabilitas aliran listrik	Deteksi dini gangguan sebelum pemadaman meluas
Sistem manajemen energi terdistribusi	Koordinasi sumber energi terbarukan tersebar (surya atap, dsb.)	Integrasi energi terbarukan skala kecil ke jaringan utama

Komponen	Fungsi Utama	Manfaat bagi Kota
Sistem penyimpanan energi (baterai)	Penyeimbang pasokan-permintaan energi jangka pendek	Stabilitas jaringan saat permintaan puncak

D. Peran Teknologi dalam Infrastruktur Berkelanjutan

Perkembangan teknologi telah mengubah cara infrastruktur dirancang, dibangun, dioperasikan, dan dipelihara untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan. Infrastruktur berkelanjutan tidak hanya berorientasi pada penyediaan fasilitas fisik yang mampu memenuhi kebutuhan masyarakat saat ini, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi penggunaan sumber daya, perlindungan lingkungan, ketahanan terhadap perubahan iklim, serta keberlanjutan ekonomi dan sosial dalam jangka panjang. Teknologi menjadi faktor utama yang memungkinkan berbagai sistem infrastruktur bekerja secara lebih cerdas melalui integrasi sensor, jaringan komunikasi, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), komputasi awan (*Cloud Computing*), *Internet of Things* (IoT), analisis data besar (*Big Data Analytics*), dan sistem informasi geografis (*Geographic Information System/GIS*). Integrasi berbagai teknologi tersebut menghasilkan pengambilan keputusan yang lebih cepat, akurat, dan berbasis data sehingga pengelolaan infrastruktur menjadi lebih efisien.

Salah satu peran utama teknologi adalah meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya alam dan energi. Melalui sistem pemantauan secara real-time, pengelola infrastruktur dapat mengetahui tingkat konsumsi listrik, air, bahan bakar, maupun sumber daya lainnya sehingga pemborosan dapat diminimalkan. Sebagai contoh, penerapan *smart grid* memungkinkan distribusi listrik disesuaikan dengan kebutuhan aktual masyarakat, sedangkan sistem irigasi pintar menggunakan sensor kelembapan tanah dan data cuaca untuk mengatur penggunaan air secara otomatis. Pada sektor bangunan, teknologi *Building Management System* (BMS) mengendalikan pencahayaan, pendingin ruangan, ventilasi, dan penggunaan energi berdasarkan tingkat okupansi serta kondisi lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi biaya operasional,

tetapi juga menurunkan emisi karbon dan mendukung penggunaan energi yang lebih ramah lingkungan.

Teknologi juga berperan penting dalam meningkatkan ketahanan (*resilience*) infrastruktur terhadap berbagai ancaman, seperti bencana alam, perubahan iklim, dan gangguan operasional. Sensor yang dipasang pada jembatan, bendungan, gedung, maupun jaringan transportasi mampu mendeteksi perubahan struktur, getaran, deformasi, atau kerusakan sejak tahap awal sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan yang lebih besar. Selain itu, pemanfaatan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin (*Machine Learning*) memungkinkan analisis data historis untuk memprediksi risiko kerusakan, memperkirakan umur layanan suatu aset, serta menyusun jadwal pemeliharaan yang lebih efektif. Dalam kondisi darurat, teknologi komunikasi dan sistem informasi dapat mempercepat penyebaran informasi, koordinasi antarinstansi, serta pengambilan keputusan sehingga dampak bencana terhadap masyarakat dapat diminimalkan.

Selain mendukung efisiensi dan ketahanan, teknologi memperkuat tata kelola infrastruktur melalui pemanfaatan data yang lebih terbuka, transparan, dan terintegrasi. Platform digital memungkinkan berbagai instansi pemerintah, sektor swasta, akademisi, dan masyarakat berbagi informasi mengenai kondisi infrastruktur, penggunaan anggaran, maupun kualitas layanan secara lebih mudah. Data yang terkumpul dari berbagai sumber dapat dianalisis untuk mendukung perencanaan pembangunan, menentukan prioritas investasi, serta mengevaluasi kinerja infrastruktur secara berkelanjutan. Partisipasi masyarakat juga semakin meningkat melalui aplikasi digital yang memungkinkan pelaporan kerusakan fasilitas umum, penyampaian aspirasi, maupun pemantauan pelaksanaan proyek pembangunan. Dengan demikian, teknologi tidak hanya berfungsi sebagai alat untuk meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga menjadi fondasi dalam mewujudkan infrastruktur yang berkelanjutan, adaptif, inklusif, dan mampu mendukung pembangunan kota yang cerdas serta berwawasan lingkungan.

1. Keterkaitan *Smart Infrastructure* dengan Keberlanjutan

Keterkaitan antara *smart infrastructure* dan keberlanjutan bersifat dua arah. Pada satu sisi, teknologi cerdas mendukung keberlanjutan melalui optimasi penggunaan sumber daya seperti energi, air, material. Pada sisi lain, agenda keberlanjutan itu sendiri menjadi salah satu pendorong utama investasi *smart infrastructure*, mengingat tekanan global untuk mengurangi jejak karbon dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim mendorong kebutuhan akan infrastruktur yang lebih presisi dan responsif.

Laporan OECD mengenai infrastruktur untuk masa depan yang tangguh terhadap perubahan iklim menegaskan bahwa kerusakan infrastruktur akibat bencana terkait iklim menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan secara global, dengan negara berkembang menghadapi tantangan terbesar dalam membangun infrastruktur yang tangguh terhadap iklim, sehingga diperlukan investasi yang lebih besar dan berkualitas untuk infrastruktur berkelanjutan (OECD, 2024). Data suhu global yang mencapai sekitar 1,4 derajat Celsius di atas rata-rata pra-industri pada 2023 turut memicu gelombang panas, banjir, musim kebakaran hutan yang lebih panjang, dan kekeringan meluas yang memberikan tekanan besar terhadap infrastruktur di seluruh sektor, mulai dari jaringan listrik, komunikasi, dan transportasi hingga pengolahan air dan limbah (OECD, 2024).

Tabel 5.11 Tiga Pilar Keberlanjutan dan Kontribusi *Smart Infrastructure*

Pilar Keberlanjutan	Fokus Utama	Kontribusi <i>Smart Infrastructure</i>
Lingkungan	Pengurangan jejak karbon, konservasi sumber daya alam	Efisiensi energi real-time, deteksi kebocoran air
Sosial	Kualitas hidup, aksesibilitas, keselamatan publik	Sistem peringatan dini bencana, transportasi inklusif
Ekonomi	Efisiensi biaya jangka panjang, produktivitas	Pemeliharaan prediktif, optimasi operasional

2. Teknologi Hijau dan Efisiensi Energi Infrastruktur

Teknologi hijau (*green technology*) dalam konteks infrastruktur mencakup berbagai inovasi yang mengurangi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup aset, mulai dari material konstruksi rendah karbon, sistem energi terbarukan terintegrasi, hingga desain pasif yang memaksimalkan pencahayaan dan ventilasi alami. Integrasi *smart infrastructure* memperkuat penerapan teknologi hijau melalui kemampuan pemantauan dan optimasi *real-time* yang memastikan sistem energi terbarukan dan efisiensi bangunan benar-benar berfungsi sesuai rancangan, bukan sekadar terpasang tanpa verifikasi kinerja aktual.

Sebagai contoh, sistem panel surya yang terintegrasi dengan sensor IoT dapat memantau kinerja setiap unit panel secara individual, mendeteksi penurunan efisiensi akibat kotoran atau kerusakan lebih dini dibandingkan inspeksi visual berkala, sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan sebelum penurunan kinerja menjadi signifikan. Demikian pula, sistem pencahayaan gedung yang terintegrasi dengan sensor okupansi dan sensor cahaya alami, secara otomatis menyesuaikan tingkat pencahayaan buatan untuk memaksimalkan pemanfaatan cahaya alami sambil tetap memenuhi standar kenyamanan visual penghuni.

3. Ekonomi Sirkular dalam Pengelolaan Infrastruktur

Ekonomi sirkular menawarkan paradigma alternatif terhadap model ekonomi linier konvensional yang mengikuti pola 'ambil-buat-buang' (*take-make-waste*), dengan menekankan penggunaan sumber daya secara berkelanjutan melalui penggunaan kembali, perbaikan, dan daur ulang material sepanjang siklus hidupnya. Data global menunjukkan bahwa hanya 7,2 persen material yang digunakan kembali ke dalam perekonomian global, sebuah kesenjangan besar yang menimbulkan beban signifikan terhadap lingkungan dan berkontribusi pada krisis iklim, kehilangan keanekaragaman hayati, dan polusi.

Dalam konteks infrastruktur sipil, penerapan prinsip ekonomi sirkular sejalan dengan pembahasan dimensi 9D BIM mengenai *lean construction*, serta pembahasan pemanfaatan model BIM untuk perencanaan penggunaan kembali material pada tahap pembongkaran. *Smart infrastructure* memperkuat penerapan ekonomi sirkular melalui pelacakan material berbasis RFID sepanjang rantai pasok yang memungkinkan identifikasi dan verifikasi asal-usul material daur ulang

secara lebih andal dibandingkan sistem pelacakan manual konvensional. Pada tataran nasional, pendekatan ekonomi sirkular berbasis lokal industri penggunaan kembali dan perbaikan, pertanian regeneratif, serta produksi material domestik turut memperkuat ketahanan terhadap gangguan rantai pasok global akibat gejolak iklim.

Tabel 5.12 Ilustrasi Kasus: Gedung Perkantoran dengan Sertifikasi Bangunan Hijau Berbasis *Smart Infrastructure*

Elemen	Uraian
Konteks	Gedung perkantoran yang menargetkan sertifikasi bangunan hijau tingkat tertinggi
Teknologi diterapkan	Sensor IoT pemantauan energi real-time terintegrasi model BIM 6D
Material	Material daur ulang bersertifikat dilacak menggunakan RFID sepanjang rantai pasok
Hasil pemantauan	Konsumsi energi aktual terverifikasi konsisten dengan simulasi tahap desain
Manfaat tambahan	Data pemantauan mendukung pelaporan keberlanjutan tahunan kepada pemangku kepentingan
Pembelajaran utama	Sertifikasi bangunan hijau paling kredibel ketika diverifikasi data operasional aktual, bukan hanya simulasi desain

Tabel 5.13 Indikator Penerapan Ekonomi Sirkular pada Proyek Infrastruktur

Indikator	Cara Pengukuran	Target Ideal
Tingkat Penggunaan Material Daur Ulang	Persentase material daur ulang dari total material konstruksi	Meningkat secara progresif dari proyek ke proyek
Tingkat Material Dapat Digunakan Kembali	Persentase komponen yang dirancang untuk dibongkar dan dipakai ulang	Maksimal sesuai kelayakan teknis dan ekonomi

Indikator	Cara Pengukuran	Target Ideal
Rasio Limbah Konstruksi	Volume limbah dibagi total volume material yang digunakan	Menurun mendekati nol melalui perencanaan presisi BIM
Keterlacakan Material (<i>Material Traceability</i>)	Persentase material dengan data asal-usul terlacak via RFID	Mendekati 100% untuk material struktural utama

4. Ketahanan (*Resilience*) Infrastruktur terhadap Perubahan Iklim

Ketahanan (*resilience*) infrastruktur terhadap perubahan iklim merujuk pada kemampuan aset infrastruktur untuk tetap berfungsi, atau pulih dengan cepat, ketika menghadapi tekanan iklim ekstrem seperti banjir, gelombang panas, badai, dan kenaikan permukaan air laut. Laporan OECD menegaskan bahwa pemerintah pada seluruh tingkatan perlu secara sistematis memperhitungkan ketahanan iklim dalam perencanaan dan pengambilan keputusan infrastruktur, termasuk dengan memprioritaskan proyek berkelanjutan, untuk mengurangi kerentanan sosial dan ekonomi serta menghindari biaya jangka panjang yang lebih besar (OECD, 2024).

Smart infrastructure berkontribusi signifikan terhadap ketahanan iklim melalui kemampuan deteksi dini, sistem peringatan banjir berbasis IoT, analitik prediktif, dan integrasi data cuaca *real-time* dengan model BIM infrastruktur. Laporan OECD turut menyoroti solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) sebagai pendekatan hemat biaya untuk membangun ketahanan iklim, yang dapat dikombinasikan dengan solusi teknologi digital, misalnya sistem pemantauan IoT pada infrastruktur hijau seperti taman resapan air atau hutan kota yang berfungsi ganda sebagai pengendali banjir alami sekaligus objek pemantauan kualitas lingkungan (OECD, 2024).

Tabel 5.14 Peran *Smart Infrastructure* dalam Membangun Ketahanan Iklim

Ancaman Iklim	Peran <i>Smart Infrastructure</i>	Teknologi Pendukung
Banjir	Deteksi dini ketinggian air, peringatan otomatis	Sensor IoT, LoRaWAN
Gelombang panas	Optimasi sistem pendinginan gedung dan jaringan energi	Sensor okupansi, <i>smart grid</i>
Kekeringan	Pemantauan dan optimasi distribusi air, deteksi kebocoran	Analitik prediktif, sensor tekanan
Kenaikan permukaan laut	Pemantauan deformasi tanggul dan infrastruktur pesisir	GNSS presisi tinggi, piezometer



BAB VI

STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM)

Perkembangan industri konstruksi modern menuntut paradigma baru dalam menjaga keandalan, keselamatan, dan umur layan infrastruktur. Jika pada masa lalu evaluasi kondisi struktur mengandalkan inspeksi visual periodik yang bersifat manual dan reaktif, maka pendekatan kontemporer mengarah pada pemantauan kondisi struktur secara *real-time*, kontinu, dan berbasis data. Paradigma ini dikenal sebagai *Structural Health Monitoring* (SHM), yaitu proses implementasi strategi identifikasi kerusakan pada struktur teknik sipil melalui pengamatan sistematis terhadap respons struktural dari waktu ke waktu (Farrar & Worden, 2013; Jia *et al.*, 2023). Bab ini membahas empat pilar utama SHM, yaitu konsep dasar pemantauan kesehatan struktur, teknologi sensor yang digunakan, metode analisis data kerusakan dan degradasi, serta sistem peringatan dini dan mitigasi risiko menjadi muara keseluruhan proses SHM dalam *smart infrastructure*.

A. Konsep Pemantauan Kesehatan Struktur

1. Definisi dan Filosofi *Structural Health Monitoring*

Secara definitif, *Structural Health Monitoring* dapat dimaknai sebagai proses berkelanjutan dalam memperoleh, memvalidasi, dan menganalisis data dari struktur untuk menentukan status kondisi terkini serta memprediksi kinerja struktur di masa mendatang (Farrar & Worden, 2013). Berbeda dengan inspeksi konvensional yang bersifat *snapshot* pada satu titik waktu, SHM menempatkan sensor secara permanen atau semi-permanen pada struktur sehingga mampu menangkap perubahan perilaku struktural secara kontinu, termasuk perubahan yang bersifat gradual maupun mendadak. Filosofi dasar SHM berangkat dari premis bahwa kerusakan struktural, baik berupa retak, korosi, penurunan kekakuan, maupun degradasi material akan

memunculkan perubahan pada karakteristik dinamis maupun statis struktur, seperti frekuensi alami, redaman, regangan, maupun pola lendutan (Toh *et al.*, 2020).

Filosofi SHM modern tidak lagi berhenti pada aspek deteksi semata, melainkan berkembang menjadi kerangka manajemen aset infrastruktur yang terintegrasi dengan *Building Information Modeling* (BIM) dan *Internet of Things* (IoT). Dalam konteks *smart infrastructure*, data SHM menjadi masukan bagi *digital twin* yang merepresentasikan kondisi struktur secara virtual dan diperbarui secara berkala berdasarkan data sensor aktual (Crognale *et al.*, 2024). Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih presisi, efisien, dan berbasis bukti (*evidence-based maintenance*), sekaligus menggeser paradigma pemeliharaan dari yang bersifat terjadwal (*time-based maintenance*) menjadi pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) yang lebih hemat biaya dalam jangka panjang.

2. Sejarah dan Perkembangan SHM

Perkembangan SHM tidak dapat dilepaskan dari kemajuan teknologi sensor, komputasi, dan telekomunikasi. Pada dekade 1980–1990-an, penerapan SHM masih terbatas pada instrumentasi sederhana menggunakan *strain gauge* kabel dan sistem akuisisi data terpusat yang mahal serta sulit diskalakan. Memasuki awal 2000-an, kemunculan sensor nirkabel (*wireless sensor network/WSN*) membuka peluang pemantauan berskala besar dengan biaya instalasi yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem kabel konvensional. Tinjauan bibliometrik terbaru menunjukkan lonjakan signifikan publikasi ilmiah terkait integrasi sensor pintar dalam SHM, dari 15 artikel pada tahun 2019 menjadi 359 artikel pada tahun 2023, mengindikasikan percepatan riset yang sangat pesat pada dekade terakhir.

Pada dekade 2020-an, perkembangan SHM semakin didorong oleh konvergensi tiga teknologi utama, yaitu sensor berbiaya rendah berbasis *microelectromechanical systems* (MEMS), konektivitas IoT menggunakan modul seperti *ESP8266* dan *Arduino*, serta kemampuan komputasi awan (*cloud computing*) untuk pemrosesan data berskala besar (Setiawan & Nugroho, 2024). Studi pemetaan riset menunjukkan bahwa negara-negara seperti Amerika Serikat, Italia, India, dan Tiongkok menjadi kontributor utama dalam penelitian SHM berbasis IoT selama satu dekade terakhir, dengan Amerika Serikat menyumbang

sekitar 25,3 persen dari total publikasi (Wijaya *et al.*, 2024). Tren ini menegaskan bahwa SHM telah bertransformasi dari teknologi laboratorium menjadi solusi praktis yang diadopsi secara luas dalam manajemen infrastruktur sipil di berbagai belahan dunia.

3. Hierarki Diagnostik dalam SHM

Salah satu kerangka konseptual yang paling banyak dirujuk dalam literatur SHM adalah hierarki diagnostik lima tingkat yang dikembangkan oleh Rytter (1993) dan terus digunakan sebagai rujukan dasar hingga penelitian-penelitian terkini (Alkayem *et al.*, 2024; Ma *et al.*, 2023). Hierarki ini menjelaskan bahwa proses identifikasi kerusakan struktural dapat dibagi menjadi beberapa tingkatan kompleksitas, mulai dari sekadar mendeteksi keberadaan kerusakan hingga memprediksi sisa umur layan struktur. Semakin tinggi tingkatannya, semakin kompleks pula kebutuhan data, algoritma analisis, dan model prediktif yang harus digunakan.

Tabel 6.1 Hierarki Diagnostik *Structural Health Monitoring*

Level	Pertanyaan Diagnostik	Deskripsi	Contoh Metode/Pendekatan
1. Deteksi	Apakah ada kerusakan?	Menentukan keberadaan kerusakan pada struktur secara kualitatif	Analisis frekuensi alami, deteksi anomali statistik
2. Lokalisasi	Di mana letak kerusakan?	Mengidentifikasi posisi geometris kerusakan pada elemen struktur	Mode <i>shape curvature</i> , tomografi gelombang
3. Klasifikasi	Jenis kerusakan apa?	Mengategorikan tipe kerusakan, misalnya retak, korosi, atau delaminasi	Klasifikasi berbasis <i>machine learning</i>
4. Kuantifikasi	Seberapa parah kerusakan?	Mengukur tingkat keparahan kerusakan secara kuantitatif	Model regresi, pembaruan model elemen hingga (FE model updating)

Level	Pertanyaan Diagnostik	Deskripsi	Contoh Metode/Pendekatan
5. Prognosis	Berapa sisa umur layan struktur?	Memprediksi perkembangan kerusakan dan estimasi umur layan sisa	Model degradasi probabilistik, <i>digital twin</i> , <i>deep learning</i> prediktif

4. Manfaat dan Tantangan Implementasi SHM

Penerapan SHM memberikan sejumlah manfaat strategis bagi pengelolaan infrastruktur. Pertama, SHM memungkinkan deteksi dini kerusakan sebelum berkembang menjadi kegagalan struktural yang membahayakan keselamatan publik, sebagaimana ditekankan dalam laporan investigasi keruntuhan *Champlain Towers South* yang menyoroti pentingnya pemantauan kondisi struktural secara berkelanjutan pada bangunan bertingkat. Kedua, SHM mengurangi ketergantungan pada inspeksi manual yang memakan waktu, berisiko tinggi bagi inspektur, dan rentan terhadap subjektivitas penilaian (Deng *et al.*, 2023). Ketiga, dari perspektif ekonomi, pemeliharaan prediktif berbasis data SHM terbukti mampu menekan biaya pemeliharaan jangka panjang dibandingkan strategi pemeliharaan reaktif maupun terjadwal secara kaku (Miller *et al.*, 2023).

Meskipun demikian, implementasi SHM di lapangan masih ada sejumlah tantangan signifikan. Tantangan teknis meliputi keterbatasan daya tahan baterai sensor nirkabel, gangguan sinyal komunikasi pada lingkungan konstruksi yang kompleks, serta kebutuhan kalibrasi berkala untuk menjaga akurasi pengukuran dalam jangka panjang. Tantangan non-teknis mencakup tingginya biaya investasi awal, keterbatasan standar interoperabilitas antarplatform sensor, serta kesenjangan kompetensi sumber daya manusia dalam menginterpretasikan data SHM secara tepat (Wijaya *et al.*, 2024). Selain itu, volume data yang dihasilkan sistem SHM berskala besar yang dapat mencapai jutaan titik data per hari, menuntut infrastruktur penyimpanan dan komputasi yang memadai, termasuk strategi kompresi data dan pemrosesan tepi (*edge computing*) untuk mengurangi beban transmisi ke server pusat.

5. Integrasi SHM dengan BIM dan *Smart Infrastructure*

Integrasi SHM dengan BIM merupakan salah satu perkembangan paling signifikan dalam ekosistem *smart infrastructure* kontemporer. Model BIM yang semula berfungsi sebagai representasi geometris dan informasi konstruksi kini diperluas fungsinya menjadi wadah visualisasi data sensor secara *real-time*, sehingga setiap elemen struktural pada model BIM dapat dikaitkan langsung dengan data kondisi aktualnya di lapangan (Crognale *et al.*, 2024). Pendekatan ini melahirkan konsep *digital twin*, yaitu representasi virtual dari aset fisik yang diperbarui secara sinkron berdasarkan data sensor, sehingga memungkinkan simulasi skenario, prediksi kinerja, dan pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis data yang lebih akurat (Crognale, De Iuliis, & Gattulli, 2024).

Dalam kerangka *smart infrastructure* yang lebih luas, SHM berperan sebagai lapisan sensorik (*sensing layer*) yang menyediakan data mentah bagi lapisan analitik dan lapisan pengambilan keputusan. Ketiga lapisan ini yaitu *sensing*, *analytics*, dan *decision-making*, saling terhubung melalui arsitektur IoT yang memungkinkan aliran data dari sensor fisik hingga dasbor manajemen aset berbasis cloud. Diagram dibawah mengilustrasikan arsitektur umum sistem SHM modern yang terintegrasi dengan BIM dan platform IoT, mulai dari akuisisi data di lapangan hingga diseminasi informasi kepada pemangku kepentingan.

Gambar 6.1 Arsitektur Umum Sistem SHM Terintegrasi BIM-IoT



B. Sensor untuk Monitoring Struktur

1. Klasifikasi Umum Sensor SHM

Sensor merupakan komponen fundamental dalam sistem SHM karena berfungsi sebagai antarmuka pertama yang menangkap fenomena fisik pada struktur dan mengonversinya menjadi sinyal yang dapat diproses secara digital. Tinjauan sistematis terbaru mengklasifikasikan teknologi *sensing* dalam SHM ke dalam beberapa kelompok utama, meliputi sensor berbasis regangan (*strain-based*), sensor berbasis getaran (*vibration-based*), sensor optik, sensor akustik, serta sensor berbasis pencitraan (*vision-based*) yang memanfaatkan kamera dan teknik pengolahan citra digital. Pengelompokan ini penting karena setiap kategori sensor memiliki karakteristik pengukuran, resolusi, dan area aplikasi yang berbeda, sehingga pemilihan jenis sensor harus disesuaikan dengan tujuan pemantauan dan jenis kerusakan yang ingin dideteksi.

Kerangka evaluasi kinerja sensor SHM kontemporer umumnya mempertimbangkan lima kriteria utama, yaitu kesesuaian penempatan (*deployment suitability*), kebutuhan perangkat keras, karakteristik sinyal yang dihasilkan, sensitivitas pengukuran, serta kemampuan integrasi dengan lingkungan *digital twin*. Kriteria-kriteria ini menjadi dasar pertimbangan bagi perencana sistem SHM dalam menentukan kombinasi sensor yang optimal, mengingat tidak ada satu jenis sensor pun yang mampu memenuhi seluruh kebutuhan pemantauan secara menyeluruh. Oleh karena itu, sistem SHM yang matang umumnya menerapkan strategi *sensor fusion*, yaitu penggabungan data dari berbagai jenis sensor untuk meningkatkan akurasi dan keandalan diagnosis kerusakan.

2. Sensor Regangan dan Deformasi

Sensor regangan atau *strain gauge* merupakan salah satu instrumen paling klasik namun tetap relevan dalam SHM modern. Prinsip kerjanya memanfaatkan perubahan resistansi listrik akibat deformasi material tempat sensor terpasang, sehingga mampu mengukur regangan lokal pada elemen struktural seperti balok, kolom, atau sambungan baja. Selain *strain gauge* konvensional, *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) juga banyak digunakan untuk mengukur perpindahan (*displacement*) relatif antareleman struktur dengan akurasi tinggi. Kombinasi kedua sensor ini memungkinkan estimasi kurva lendutan struktur secara lebih komprehensif, yang

selanjutnya dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan kekakuan akibat kerusakan.

Pada aplikasi jembatan, sensor regangan sering dipasang pada titik-titik kritis seperti tumpuan, tengah bentang, dan sambungan las untuk memantau distribusi tegangan akibat beban lalu lintas dan beban lingkungan. Studi oleh Peng, Li, dan Hao (2023) mengembangkan sistem penginderaan IoT untuk pemantauan kesehatan jembatan berbasis pendekatan *drive-by*, di mana sensor yang dipasang pada kendaraan yang melintas digunakan untuk mengestimasi kondisi struktural jembatan tanpa memerlukan instrumentasi permanen pada seluruh bentang, sehingga secara signifikan menekan biaya instalasi dan pemeliharaan sistem monitoring dibandingkan pendekatan konvensional yang memasang sensor permanen di sepanjang struktur jembatan.

3. Sensor Getaran dan Akselerometer

Sensor getaran, khususnya akselerometer, digunakan secara luas dalam SHM berbasis dinamika struktur (*vibration-based SHM*) karena kemampuannya menangkap respons dinamis struktur terhadap eksitasi, baik yang berasal dari beban operasional, angin, maupun gempa bumi. Prinsip dasarnya adalah bahwa perubahan karakteristik dinamis, seperti frekuensi alami, rasio redaman, dan bentuk ragam getar (*mode shape*) dapat mengindikasikan adanya penurunan kekakuan akibat kerusakan struktural (Ubertini, Comanducci, & Cavalagli, 2016; Toh *et al.*, 2020). Studi validasi laboratorium menunjukkan bahwa perangkat akselerometer berbasis IoT mampu menghasilkan estimasi frekuensi getar dengan selisih rata-rata kurang dari enam persen dibandingkan akselerometer standar industri, mengonfirmasi kelayakan penggunaan sensor IoT berbiaya rendah untuk aplikasi SHM praktis.

Penerapan sensor getaran juga meluas ke struktur warisan budaya (*cultural heritage*), seperti menara bersejarah dan bangunan cagar budaya, yang memerlukan pendekatan non-invasif mengingat sensitivitas nilai historisnya. Penelitian pada menara lonceng bersejarah menunjukkan bahwa jaringan sensor nirkabel berbiaya rendah mampu mendeteksi perubahan frekuensi alami akibat variasi suhu musiman maupun potensi degradasi struktural jangka panjang, sehingga metode ini dinilai layak untuk diterapkan secara luas pada aset-aset cagar budaya yang tersebar di berbagai wilayah.

4. Sensor Serat Optik (*Fiber Optic Sensor*)

Sensor serat optik atau *fiber optic sensor* (FOS) menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan sensor elektronik konvensional, terutama dalam hal imunitas terhadap gangguan elektromagnetik, kemampuan pengukuran terdistribusi sepanjang kabel serat, serta daya tahan tinggi terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Teknologi *Fiber Bragg Grating* (FBG) menjadi salah satu varian FOS yang paling banyak diaplikasikan dalam SHM karena memungkinkan pengukuran regangan multitik menggunakan satu untai serat optik tunggal, sehingga mengurangi kompleksitas pengkabelan dibandingkan sensor diskret konvensional.

Pemanfaatan FOS juga terbukti efektif untuk pemantauan lendutan jembatan secara kontinu melalui kombinasi dengan giroskop serat optik, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian yang menggabungkan data lendutan dari sensor FOS dengan algoritma *deep learning* untuk mendeteksi kerusakan secara otomatis pada elemen jembatan (Li *et al.*, 2020). Meskipun demikian, biaya investasi awal untuk interrogator FBG, perangkat yang membaca pergeseran panjang gelombang pada serat optik masih relatif tinggi dibandingkan sensor konvensional, sehingga penerapannya umumnya diprioritaskan pada struktur kritis berskala besar seperti jembatan bentang panjang, terowongan, dan bendungan.

5. Sensor Piezoelektrik dan *Acoustic Emission*

Sensor piezoelektrik memanfaatkan material yang menghasilkan muatan listrik ketika mengalami tegangan mekanis, dan sebaliknya dapat berdeformasi ketika diberi medan listrik. Karakteristik dwiarah (*bidirectional*) ini menjadikan sensor piezoelektrik sangat berguna dalam metode *electromechanical impedance* (EMI), yaitu teknik pemantauan kerusakan lokal pada elemen beton maupun baja dengan menganalisis perubahan impedansi elektromekanik akibat retak atau delaminasi (Ai, Mo, Yang, & Zhu, 2022). Selain itu, teknik *acoustic emission* (AE) memanfaatkan sensor piezoelektrik untuk menangkap gelombang elastis berfrekuensi tinggi yang dilepaskan material saat terjadi pertumbuhan retak secara mendadak, sehingga mampu mendeteksi inisiasi kerusakan pada tahap yang sangat dini, bahkan sebelum kerusakan tersebut kasat mata (Hesser *et al.*, 2021).

Pengembangan terbaru dalam teknik *acoustic emission* mengintegrasikan algoritma pembelajaran mendalam berbasis *convolutional neural network* untuk mengidentifikasi sumber emisi akustik secara otomatis, sehingga mengurangi kebutuhan interpretasi manual oleh ahli yang cenderung memakan waktu dan rawan bias subjektif (Hesser *et al.*, 2021). Pendekatan berbasis klasterisasi sinyal AE juga dikembangkan untuk membedakan pola kerusakan yang berasal dari sumber derau lingkungan dengan pola kerusakan struktural yang sesungguhnya, sebuah tantangan klasik dalam penerapan AE di lapangan yang kerap dipengaruhi oleh kebisingan lalu lintas maupun aktivitas konstruksi di sekitar lokasi pemantauan.

C. Analisis Data Kerusakan dan Degradasi

1. Alur Pemrosesan Data dalam SHM

Data mentah yang diperoleh dari sensor SHM tidak dapat langsung diinterpretasikan sebagai informasi kerusakan struktural, melainkan harus melalui serangkaian tahapan pemrosesan sistematis. Secara umum, alur pemrosesan data SHM terdiri atas empat tahap utama, yaitu *praproses data (data pre-processing)*, *ekstraksi fitur (feature extraction)*, *reduksi dimensi dan seleksi fitur (feature selection)*, serta *klasifikasi atau deteksi anomali (statistical classification)* (Farrar & Worden, 2013; Toh *et al.*, 2020). Tahap *praproses* mencakup pembersihan derau sinyal, penanganan data hilang, serta normalisasi data untuk mengompensasi pengaruh faktor lingkungan seperti fluktuasi suhu yang dapat menyamarkan sinyal kerusakan sesungguhnya.

Salah satu tantangan terbesar dalam analisis data SHM adalah memisahkan variasi sinyal yang disebabkan oleh faktor operasional dan lingkungan (*operational and environmental variability/OEV*) dari variasi yang benar-benar mengindikasikan kerusakan struktural. Sebagai ilustrasi, frekuensi alami jembatan dapat berubah signifikan akibat variasi suhu harian maupun musiman, sehingga tanpa kompensasi yang tepat, perubahan ini dapat salah diinterpretasikan sebagai indikasi kerusakan (*false positive*), atau sebaliknya, kerusakan aktual dapat tertutupi oleh variasi lingkungan (*false negative*). Oleh karena itu, metode statistik seperti *cointegration* dan *principal component analysis* (PCA) banyak digunakan untuk menghilangkan pengaruh faktor lingkungan sebelum dianalisis] lanjut untuk tujuan deteksi kerusakan.

2. Ekstraksi Fitur dan Identifikasi Kerusakan

Ekstraksi fitur merupakan proses transformasi data sinyal mentah menjadi indikator terukur yang sensitif terhadap perubahan kondisi struktural. Pada analisis berbasis getaran, fitur yang umum diekstraksi meliputi frekuensi alami, rasio redaman, kurvatur bentuk ragam getar (*mode shape curvature*), serta *modal strain energy*. Pendekatan berbasis domain frekuensi-waktu, seperti transformasi *wavelet* dan *empirical mode decomposition* (EMD), juga banyak digunakan untuk menganalisis sinyal non-stasioner yang khas pada respons struktur akibat beban dinamis seperti gempa atau angin kencang (Torres *et al.*, 2011).

Pada domain visual, teknik *computer vision* berbasis pembelajaran mendalam telah mengubah cara deteksi retak permukaan beton dilakukan. Kerangka kerja seperti *Co-CrackSegment* mengombinasikan beberapa model deep learning secara kolaboratif untuk melakukan segmentasi retak pada tingkat piksel, sehingga memungkinkan kuantifikasi lebar dan panjang retak secara otomatis dari citra digital tanpa memerlukan kontak fisik dengan struktur (Alkayem *et al.*, 2024). Pendekatan berbasis citra ini sangat relevan untuk elemen struktur yang sulit dijangkau instrumentasi konvensional, seperti bagian bawah jembatan atau dinding terowongan, dan dapat dikombinasikan dengan wahana tanpa awak (*unmanned aerial vehicle/UAV*) untuk inspeksi berskala luas secara efisien.

3. Pendekatan *Machine Learning* dan *Deep Learning*

Perkembangan kecerdasan buatan telah mendorong transformasi signifikan dalam analisis data SHM, menggeser pendekatan berbasis aturan (*rule-based*) menuju pendekatan berbasis data yang mampu mempelajari pola kerusakan secara otomatis dari data historis. Tinjauan sistematis terhadap penerapan machine learning dalam penilaian kerusakan infrastruktur mengidentifikasi bahwa algoritma seperti *support vector machine* (SVM), *random forest*, dan *artificial neural network* (ANN) banyak diterapkan untuk klasifikasi dan regresi kerusakan pada berbagai jenis infrastruktur, termasuk perkerasan jalan, jembatan, bendungan, dan terowongan kereta api.

Sementara itu, arsitektur *deep learning*, khususnya *convolutional neural network* (CNN) satu dimensi, telah terbukti efektif dalam deteksi kerusakan berbasis sinyal getaran tanpa memerlukan tahap ekstraksi fitur

manual yang rumit, karena model mampu mempelajari representasi fitur secara otomatis langsung dari data mentah. Tinjauan komprehensif mengenai penerapan deep learning dalam SHM menegaskan bahwa performa model semacam ini sangat bergantung pada ketersediaan data pelatihan berlabel dalam jumlah besar, yang pada praktiknya sulit diperoleh karena kejadian kerusakan struktural nyata relatif jarang terjadi dibandingkan kondisi struktur yang sehat (Jia, He, Xu, & Chen, 2023).

Untuk mengatasi keterbatasan data berlabel tersebut, pendekatan pembelajaran semi-supervised dan tanpa pengawasan (*unsupervised*) semakin banyak dikembangkan, misalnya menggunakan kombinasi *variational autoencoder* (VAE) dengan *one-class support vector machine* untuk mendeteksi anomali struktural hanya berdasarkan data kondisi sehat, tanpa memerlukan contoh data kerusakan aktual sebagai bahan pelatihan model. Pendekatan semacam ini sangat relevan secara praktis karena kondisi struktur sehat jauh lebih mudah diperoleh datanya dibandingkan data kondisi rusak, sehingga model dapat dilatih untuk mengenali pola normal dan menandai setiap penyimpangan signifikan sebagai potensi anomali yang memerlukan investigasi lebih lanjut oleh insinyur struktur.

Perkembangan mutakhir juga mengarah pada model prediksi respons struktural berbasis *physics-informed deep learning*, yang mengintegrasikan prinsip-prinsip mekanika struktur ke dalam arsitektur jaringan saraf tiruan sehingga prediksi yang dihasilkan tetap konsisten secara fisis, bukan sekadar korelasi statistik semata (Zhou *et al.*, 2024). Pendekatan hibrida semacam ini dinilai mampu meningkatkan generalisasi model terhadap kondisi pembebanan yang belum pernah dijumpai dalam data pelatihan, sekaligus mengurangi risiko prediksi yang secara fisis tidak masuk akal, yang menjadi kelemahan umum model deep learning murni berbasis data.

Tabel 6.2 Perbandingan Pendekatan Analisis Data Berbasis Kecerdasan Buatan dalam SHM

Pendekatan	Prinsip Kerja	Kelebihan	Kebutuhan Data
<i>Machine learning</i> klasik (SVM, <i>Random Forest</i>)	Klasifikasi/regresi berdasarkan fitur hasil ekstraksi manual	Interpretasi relatif mudah, kebutuhan data lebih kecil	Sedang
<i>Deep learning</i> (CNN, RNN)	Pembelajaran representasi fitur otomatis dari data mentah	Akurasi tinggi pada pola kompleks dan non-linear	Besar, berlabel
<i>Unsupervised /semi-supervised</i> (VAE, autoencoder)	Deteksi anomali dari deviasi pola data kondisi sehat	Tidak memerlukan data kerusakan berlabel	Sedang (data sehat saja)
<i>Physics-informed deep learning</i>	Menggabungkan hukum fisika dengan pembelajaran data	Prediksi konsisten secara fisis, generalisasi lebih baik	Sedang hingga besar

Sumber: Disintesis dari Jia et al. (2023) dan Zhou et al. (2024)

4. *Digital Twin* dan Integrasi BIM dalam Analisis Data

Konsep *digital twin* semakin menjadi elemen sentral dalam analisis data SHM kontemporer, karena memungkinkan sinkronisasi berkelanjutan antara kondisi fisik struktur dan representasi virtualnya dalam model BIM. Kerangka kerja *digital twin* untuk warisan bangunan (*built heritage digital twins*) mengilustrasikan bagaimana data sensor dapat diproyeksikan langsung ke elemen-elemen model BIM, sehingga insinyur dapat memvisualisasikan lokasi dan tingkat keparahan kerusakan secara spasial pada model tiga dimensi, bukan hanya sebagai angka pada grafik dua dimensi yang kurang intuitif (Crognale, De Iuliis, & Gattulli, 2024).

Integrasi ini memberikan manfaat signifikan dalam mempercepat interpretasi data oleh pemangku kepentingan non-teknis, seperti manajer aset dan pengambil kebijakan, karena informasi kerusakan disajikan dalam konteks spasial yang mudah dipahami. Selain itu, model *digital twin* yang diperkaya data historis memungkinkan simulasi skenario prediktif, misalnya memproyeksikan perkembangan korosi tulangan beton dalam lima hingga sepuluh tahun mendatang berdasarkan laju degradasi yang teramati, sehingga perencanaan anggaran pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih proaktif dan berbasis data kuantitatif, bukan sekadar estimasi kualitatif berdasarkan pengalaman inspektor semata.

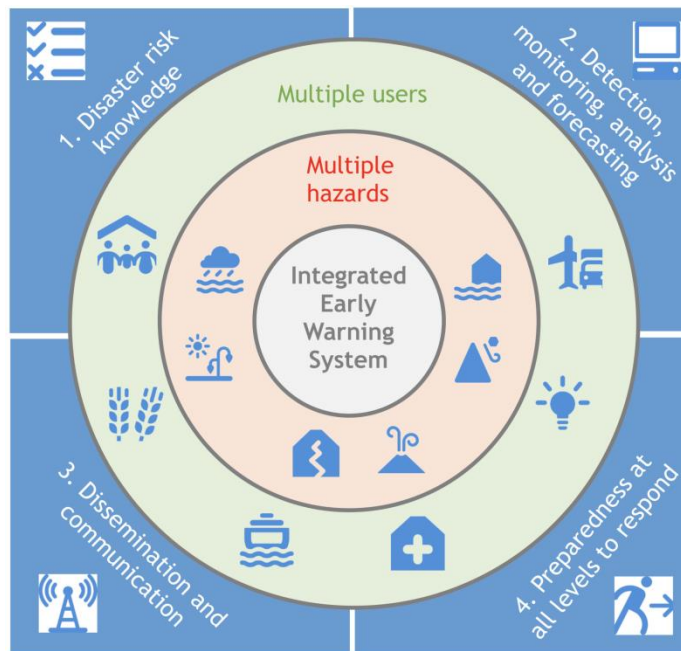
D. Sistem Peringatan Dini dan Mitigasi Risiko

1. Arsitektur Sistem Peringatan Dini

Sistem peringatan dini (*early warning system*/EWS) merupakan muara akhir dari keseluruhan rantai proses SHM, yang mentransformasikan data mentah sensor menjadi informasi yang dapat ditindaklanjuti (*actionable information*) oleh pengelola infrastruktur. Secara konseptual, proses peringatan dini kerusakan struktural terbagi menjadi tiga tingkatan pengambilan keputusan yang saling berurutan, yaitu deteksi keberadaan kerusakan, lokalisasi komponen yang terdampak, dan kuantifikasi tingkat keparahannya, di mana keberhasilan pada tingkatan lokalisasi dan kuantifikasi sangat bergantung pada akurasi deteksi awal.

Arsitektur EWS modern umumnya dirancang dengan pendekatan berlapis (*multi-tier architecture*) yang memisahkan fungsi pemrosesan data tepi (*edge processing*) di lokasi sensor dengan fungsi analitik

lanjutan di pusat *data cloud*. Pemrosesan tepi memungkinkan deteksi anomali sederhana dilakukan secara lokal dengan latensi rendah, sehingga peringatan kritis dapat dikirimkan secara instan tanpa bergantung pada konektivitas jaringan yang terkadang tidak stabil, sementara analitik lanjutan yang memerlukan daya komputasi lebih besar, seperti klasifikasi jenis kerusakan menggunakan model *deep learning* dilakukan pada *server cloud* secara asinkron. Pendekatan hibrida ini menyeimbangkan kebutuhan responsivitas waktu nyata dengan kedalaman analisis yang komprehensif.



Gambar 6.2 *Early Warning System*

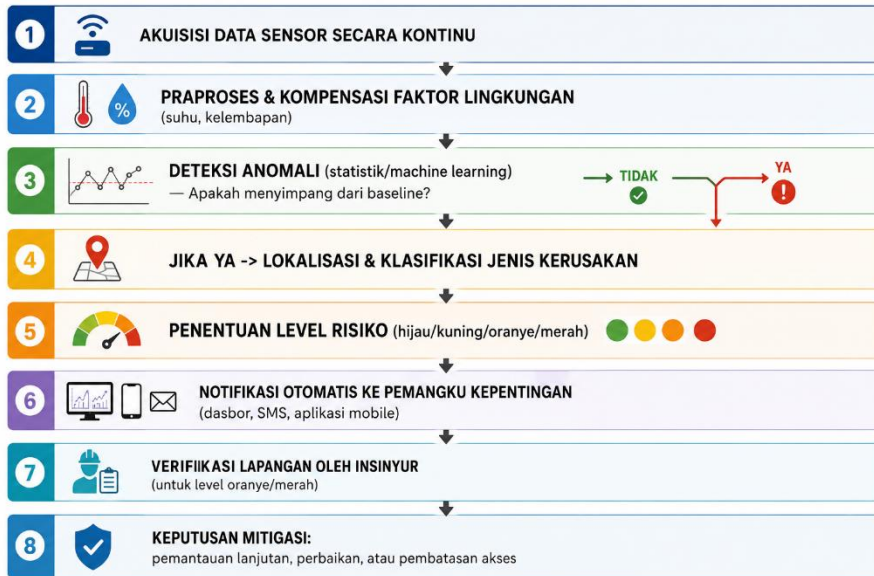
2. Ambang Batas dan Level Peringatan

Penentuan ambang batas (*threshold*) merupakan komponen krusial dalam desain sistem peringatan dini, karena ambang batas yang terlalu sensitif akan menghasilkan banyak peringatan palsu (*false alarm*) yang berpotensi menurunkan kepercayaan operator terhadap sistem, sementara ambang batas yang terlalu longgar berisiko melewati kejadian kerusakan aktual (*missed detection*). Pendekatan probabilistik berbasis deteksi anomali non-parametrik semakin banyak diadopsi untuk mengatasi dilema ini, karena mampu mengakomodasi ketidakpastian data secara lebih realistis dibandingkan ambang batas tetap (*fixed threshold*) yang bersifat deterministik.

Dalam praktik manajemen risiko infrastruktur, sistem peringatan dini umumnya menerapkan skema klasifikasi tingkat risiko bertingkat yang diadaptasi dari sistem *traffic light*, membagi kondisi struktur ke dalam beberapa kategori risiko yang masing-masing berkorespondensi dengan tindakan operasional yang berbeda. Skema semacam ini memudahkan komunikasi risiko kepada pemangku kepentingan non-teknis, karena kategori warna lebih intuitif dipahami dibandingkan angka indeks kerusakan yang abstrak.

Tabel 6.3 Skema Klasifikasi Level Peringatan Dini SHM

Level	Status Kondisi	Indikator Umum	Tindakan yang Direkomendasikan
Hijau	Normal	Parameter dalam rentang baseline, tidak ada anomali signifikan	Pemantauan rutin berkelanjutan
Kuning	Waspada	Deviasi ringan terdeteksi, tren perubahan mulai tampak	Peningkatan frekuensi pemantauan, inspeksi visual tambahan
Oranye	Siaga	Anomali signifikan pada satu atau lebih parameter kunci	Inspeksi lapangan mendalam, evaluasi struktural oleh ahli
Merah	Kritis/ Darurat	Indikasi kuat risiko kegagalan struktural mendesak	Pembatasan akses/beban segera, evakuasi jika diperlukan, perkuatan darurat



Gambar 6.3 Alur Logika Sistem Peringatan Dini Berbasis SHM

3. Pembelajaran dari Kasus Kegagalan Struktur

Sejumlah kegagalan struktural besar dalam dua dekade terakhir memberikan pelajaran berharga mengenai pentingnya sistem pemantauan dan peringatan dini yang efektif. Keruntuhan *Champlain Towers South* di Surfside, Florida pada tahun 2021 menjadi salah satu kasus yang paling banyak dikaji, di mana laporan investigasi resmi menyoroti bahwa tanda-tanda degradasi struktural, termasuk korosi tulangan dan kerusakan pada pelat parkir bawah tanah telah teridentifikasi dalam laporan inspeksi sebelum keruntuhan terjadi, namun tindak lanjut perbaikan tidak dilaksanakan secara tepat waktu.

Kasus lain yang relevan adalah keruntuhan Jembatan Morandi di Genoa, Italia pada tahun 2018, yang investigasinya mengindikasikan kegagalan pada kabel penggantung akibat korosi yang tidak terpantau secara memadai selama bertahun-tahun. Demikian pula keruntuhan jembatan pejalan kaki di Miami pada tahun 2018 yang diinvestigasi oleh *National Transportation Safety Board*, mengungkap kegagalan pada sambungan struktural yang seharusnya dapat terdeteksi melalui pemantauan regangan yang lebih ketat pada tahap konstruksi. Kasus-kasus ini secara konsisten menegaskan bahwa keberadaan sistem SHM semata tidak cukup tanpa disertai protokol tindak lanjut yang tegas dan responsif terhadap sinyal peringatan yang telah terdeteksi.

Tabel 6.4 Ringkasan Pembelajaran dari Kasus Kegagalan Struktur Global

Kasus	Penyebab Utama	Pembelajaran bagi Praktik SHM
<i>Champlain Towers South</i> (2021)	Korosi tulangan progresif pada pelat struktur	Pentingnya integrasi data inspeksi historis ke dalam sistem pemantauan berkelanjutan, bukan laporan periodik yang terisolasi
Jembatan Morandi, Genoa (2018)	Korosi kabel penggantung tidak terpantau	Perlunya sensor korosi terdedikasi pada elemen kritis seperti kabel dan tendon prategang
Jembatan Pejalan Kaki Miami (2018)	Kegagalan sambungan struktural saat konstruksi	Pentingnya pemantauan regangan real-time pada tahap konstruksi, bukan hanya pascakonstruksi

Sumber: NIST (2022), Italian Ministry of Infrastructure and Transport (2019), NTSB (2019)

4. Strategi Mitigasi Risiko dan Pemeliharaan Prediktif

Mitigasi risiko berbasis data SHM mencakup spektrum tindakan yang luas, mulai dari intervensi ringan seperti peningkatan frekuensi inspeksi, hingga tindakan darurat seperti pembatasan beban atau evakuasi struktur. Prinsip dasar pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) adalah mengalokasikan sumber daya pemeliharaan secara proporsional terhadap tingkat risiko aktual struktur, alih-alih menerapkan jadwal pemeliharaan seragam yang tidak mempertimbangkan kondisi riil di lapangan. Pendekatan ini terbukti menghasilkan efisiensi biaya yang signifikan, karena sumber daya pemeliharaan dapat difokuskan pada elemen struktural dengan risiko tertinggi, bukan tersebar merata pada seluruh elemen tanpa memandang kondisi aktualnya (Miller *et al.*, 2023; Setiawan & Nugroho, 2024).

Strategi mitigasi yang efektif juga memerlukan protokol eskalasi yang jelas dan terdokumentasi, mendefinisikan secara eksplisit pihak yang bertanggung jawab mengambil keputusan pada setiap level

peringatan, batas waktu respons yang diizinkan, serta prosedur komunikasi kepada publik apabila diperlukan tindakan darurat seperti penutupan akses. Selain itu, integrasi SHM dengan sistem manajemen aset infrastruktur (*infrastructure asset management system*) memungkinkan riwayat kerusakan dan tindakan perbaikan didokumentasikan secara sistematis dalam basis data terpusat, sehingga menjadi rujukan berharga untuk perencanaan pemeliharaan jangka panjang serta evaluasi efektivitas intervensi yang telah dilakukan sebelumnya pada struktur serupa.

Pada level kebijakan, penerapan SHM berskala luas juga mendorong perlunya standar dan regulasi yang mengatur kewajiban pemantauan struktural pada bangunan dan infrastruktur kritis, khususnya pasca berbagai kejadian kegagalan struktural yang menyita perhatian publik secara global. Sejumlah yurisdiksi mulai mengadopsi persyaratan inspeksi terstruktur berbasis risiko untuk bangunan bertingkat tinggi dan infrastruktur vital, meskipun standarisasi mengenai kewajiban penerapan sensor SHM otomatis masih bervariasi antarnegara dan umumnya masih bersifat rekomendasi ketimbang mandat hukum yang mengikat secara penuh (Wijaya *et al.*, 2024).

5. Tantangan dan Arah Pengembangan ke Depan

Meskipun teknologi SHM telah berkembang pesat, sejumlah tantangan signifikan masih perlu diatasi untuk mencapai adopsi yang lebih luas dan andal. Pertama, kebutuhan standarisasi interoperabilitas data antarplatform sensor dan perangkat lunak analitik masih menjadi hambatan, mengingat banyaknya vendor dengan format *data proprietary* yang menyulitkan integrasi sistem secara menyeluruh. Kedua, validasi keandalan model kecerdasan buatan dalam kondisi lapangan yang beragam masih memerlukan riset lebih lanjut, mengingat model yang dilatih pada satu jenis struktur atau kondisi lingkungan tertentu tidak selalu dapat digeneralisasi secara langsung ke struktur lain dengan karakteristik berbeda (Spencer, 2025).

Arah pengembangan masa depan SHM diproyeksikan mengarah pada beberapa tren utama, yaitu integrasi lebih dalam dengan teknologi *digital twin* dan *artificial intelligence* generatif untuk simulasi skenario prediktif yang lebih canggih, pengembangan sensor mandiri energi (*self-powered sensor*) berbasis *energy harvesting* untuk mengurangi ketergantungan pada penggantian baterai, serta penerapan *federated*

learning yang memungkinkan model kecerdasan buatan dilatih secara kolaboratif lintas berbagai struktur tanpa perlu berbagi data mentah secara langsung, sehingga menjaga aspek privasi dan keamanan data sekaligus tetap mendapatkan manfaat dari data agregat berskala besar.

Pada akhirnya, keberhasilan implementasi SHM secara berkelanjutan tidak semata-mata ditentukan oleh kecanggihan teknologi sensor dan algoritma analitik, melainkan juga oleh kesiapan kelembagaan, regulasi yang mendukung, serta kapasitas sumber daya manusia dalam menerjemahkan data teknis menjadi keputusan manajerial yang tepat. Integrasi SHM sebagai bagian tak terpisahkan dari ekosistem BIM dan *smart infrastructure* yang lebih luas menjadi kunci untuk mewujudkan pengelolaan aset infrastruktur yang lebih tangguh, efisien, dan responsif terhadap risiko di masa mendatang, sejalan dengan visi pembangunan infrastruktur berkelanjutan.



BAB VII

BIM DAN IOT UNTUK MANAJEMEN ASET INFRASTRUKTUR

Infrastruktur seperti jalan, jembatan, bendungan, gedung, dan jaringan utilitas merupakan aset jangka panjang yang menyerap investasi besar, namun nilai investasi tersebut hanya dapat dipertahankan apabila aset dikelola secara sistematis sepanjang siklus hidupnya. Selama beberapa dekade, manajemen aset infrastruktur banyak bertumpu pada dokumen kertas, basis data yang terfragmentasi, dan inspeksi visual berkala yang bersifat manual. Pendekatan ini semakin sulit mempertahankan relevansinya ketika kompleksitas aset, tuntutan keselamatan publik, dan keterbatasan anggaran pemeliharaan terus meningkat (Hakimi, Liu, & Abudayyeh, 2024).

Perkembangan *Building Information Modeling* (BIM) dan *Internet of Things* (IoT) membuka jalan bagi transformasi manajemen aset dari yang bersifat reaktif menjadi proaktif dan berbasis data. BIM menyediakan struktur informasi aset yang kaya dan terstandardisasi, sedangkan IoT menghadirkan aliran data kondisi aset secara *real-time* dari lapangan. Ketika keduanya diintegrasikan, lahirlah konsep *digital twin*, representasi digital yang senantiasa mencerminkan kondisi fisik aset secara dinamis (Tuhaise, Tah, & Abanda, 2023; Akhavian, Amani, Mootz, Ashe, & Beheshti, 2025). Sejumlah tinjauan sistematis terbaru menegaskan bahwa integrasi BIM-IoT bukan sekadar tren teknologi, melainkan kebutuhan struktural bagi tata kelola aset infrastruktur modern, khususnya pada aset yang menua (*aging infrastructure*) di berbagai negara (Gao, Chen, & Hu, 2025; Werbińska-Wojciechowska, Giel, & Winiarska, 2024).

A. *Asset Management* Berbasis Digital

Manajemen aset (*asset management*) infrastruktur secara formal didefinisikan sebagai aktivitas terkoordinasi suatu organisasi untuk mewujudkan nilai dari asetnya, sebagaimana diatur dalam standar internasional ISO 55000 tentang sistem manajemen aset. Ketika prinsip ini dipadukan dengan platform digital seperti BIM, lahirlah pendekatan yang disebut *digital asset management*, manajemen aset yang menempatkan model informasi digital sebagai inti dari seluruh proses pengambilan keputusan sepanjang siklus hidup aset.

1. Evolusi Manajemen Aset: dari Reaktif ke Digital

Secara historis, manajemen aset infrastruktur berkembang melalui tiga generasi. Generasi pertama bersifat reaktif, yaitu tindakan perbaikan dilakukan hanya setelah kegagalan atau kerusakan terjadi. Generasi kedua bersifat preventif terjadwal, dengan inspeksi dan pemeliharaan dilakukan berdasarkan interval waktu tetap tanpa memperhatikan kondisi aktual aset. Generasi ketiga, yang menjadi fokus adalah manajemen aset berbasis digital (*digital asset management*), yang mengandalkan data kondisi real-time, model informasi terstruktur, dan analitik prediktif untuk menentukan tindakan yang tepat pada waktu yang tepat.

Pergeseran ini didorong oleh meningkatnya tekanan terhadap pengelola infrastruktur untuk mengoptimalkan biaya siklus hidup (*life-cycle cost*) di tengah anggaran publik yang terbatas, sekaligus menjamin keselamatan dan keandalan layanan. Kajian PRISMA terhadap proyek-proyek infrastruktur menunjukkan bahwa digitalisasi memberikan manfaat signifikan dalam efisiensi biaya dan pengurangan kesalahan koordinasi, meskipun implementasinya masih menghadapi kendala organisasi dan keterbatasan kapasitas sumber daya manusia (Zhao *et al.*, 2024).

2. BIM sebagai Basis Data Aset (BIM-FM)

Pada fase pascakonstruksi, model BIM yang semula digunakan untuk keperluan desain dan koordinasi konstruksi dikonversi menjadi model operasi dan pemeliharaan yang disebut *BIM for Facility Management* (BIM-FM). Transformasi ini bukan sekadar penyederhanaan model geometris, melainkan pengayaan model dengan

atribut data non-geometris yang relevan bagi operator aset, seperti nomor identitas aset, tanggal pemasangan, riwayat inspeksi, status garansi, dan estimasi umur layan.

Studi oleh Godager, Mohn, Merschbrock, Klakegg, dan Huang (2022) terhadap penerapan *enterprise BIM* pada sebuah rumah sakit di Norwegia menunjukkan bahwa keberhasilan transisi dari BIM konstruksi ke BIM operasional sangat bergantung pada kejelasan persyaratan informasi (*information requirements*) yang disepakati sejak fase awal proyek, bukan disusun belakangan setelah bangunan selesai dibangun. Tanpa perencanaan data sejak dini, model BIM yang diserahkan kepada operator seringkali tidak memuat atribut yang benar-benar dibutuhkan untuk operasi harian.

Pada infrastruktur transportasi, penerapan BIM turut meluas ke jalan raya dan jaringan utilitas bawah tanah. Vignali dkk. (2021) mendemonstrasikan penerapan BIM pada infrastruktur jalan eksisting untuk mendukung inventarisasi aset dan perencanaan pemeliharaan, sementara Sharafat, Latif, dan Seo (2021) mengusulkan kerangka kerja gabungan BIM-GIS untuk manajemen utilitas bawah tanah pada pekerjaan tanah (*earthwork*), yang memungkinkan visualisasi posisi pipa dan kabel secara akurat sehingga mengurangi risiko kerusakan saat penggalian.

3. Evolusi Siklus Hidup Informasi dan *Level of Development* (LOD)

Kualitas data dalam model BIM ditentukan oleh tingkat kedetailan atau *Level of Development* (LOD), yang menggambarkan sejauh mana geometri dan informasi non-geometris suatu elemen telah dikembangkan pada fase tertentu. Semakin tinggi angka LOD, semakin rinci data elemen tersebut, mulai dari representasi konseptual (LOD 100) hingga representasi *as-built* yang telah diverifikasi di lapangan dan dilengkapi data operasional (LOD 500).

Poin penting yang perlu ditambahkan pada pembahasan LOD ini adalah bahwa peningkatan LOD tidak selalu berarti model menjadi lebih baik untuk keperluan manajemen aset; yang lebih menentukan adalah kesesuaian antara tingkat detail dengan kebutuhan operasional. Sejumlah elemen kritis seperti pompa, katup, dan panel kelistrikan memerlukan LOD tinggi disertai atribut data operasional yang lengkap, sedangkan

elemen struktural pasif seperti dinding partisi umumnya cukup direpresentasikan pada LOD yang lebih rendah.

Tabel 7.1 Perbandingan Manajemen Aset Tradisional dan Manajemen Aset Berbasis Digital

Aspek	Manajemen Aset Tradisional	Manajemen Aset Berbasis Digital (BIM-IoT)
Sumber data	Dokumen kertas, spreadsheet terpisah	Model BIM terpusat terhubung sensor IoT
Sifat pemeliharaan	Reaktif atau preventif terjadwal	Prediktif berbasis kondisi aktual
Visibilitas kondisi aset	Terbatas, tergantung laporan manual	Real-time melalui dashboard digital
Pengambilan keputusan	Berdasarkan pengalaman dan intuisi	Berbasis data dan analitik risiko
Interoperabilitas	Rendah, format tidak standar	Tinggi, mengacu standar IFC/COBie/ISO 19650
Biaya siklus hidup	Cenderung lebih tinggi akibat kegagalan mendadak	Lebih terkendali melalui intervensi tepat waktu

Sumber: Diadaptasi dari Hakimi, Liu, & Abudayyeh (2024); Zhao et al. (2024); Godager et al. (2022)

4. Standar dan Interoperabilitas Data

Agar data aset dapat dipertukarkan secara konsisten lintas platform perangkat lunak dan lintas pemangku kepentingan (pemilik, konsultan, kontraktor, operator), diperlukan standar data terbuka.

Tabel 7.2 Standar dan Kerangka Kerja Data untuk Manajemen Aset Digital

Standar/Kerangka	Fokus Utama	Relevansi bagi Manajemen Aset
<i>IFC (Industry Foundation Classes)</i>	Format pertukaran model BIM lintas perangkat lunak (<i>openBIM</i>)	Mencegah ketergantungan pada satu vendor perangkat lunak (<i>vendor lock-in</i>)
<i>COBie (Construction Operations Building Information Exchange)</i>	Format standar penyerahan data aset dari kontraktor ke pemilik/operator	Menjamin data peralatan dan komponen tersalurkan lengkap saat serah terima
ISO 19650	Manajemen informasi sepanjang siklus hidup aset berbasis BIM	Mendefinisikan <i>Common Data Environment</i> (CDE) dan tata kelola informasi
ISO 55000	Sistem manajemen aset organisasi	Menjadi kerangka strategis penetapan tujuan dan indikator kinerja aset

Sumber: Diadaptasi dari Godager, Mohn, Merschbrock, Klakegg, & Huang (2022); dokumentasi ISO 19650 dan ISO 55000

Godager dkk. (2022) menekankan bahwa penerapan ISO 19650 pada level *enterprise* (lintas banyak proyek dan aset dalam satu organisasi) menuntut penyelarasan antara persyaratan informasi organisasi (*Organizational Information Requirements/OIR*) dengan persyaratan informasi aset (*Asset Information Requirements/AIR*), yang jika tidak diselaraskan sejak awal akan menimbulkan duplikasi data dan model yang tidak dapat dimanfaatkan optimal oleh tim operasi dan pemeliharaan.

B. *Digital Twin* dalam Infrastruktur

Jika BIM-FM dipahami sebagai basis data aset yang relatif statis, maka *digital twin* ialah langkah lanjutan yang menghadirkan representasi digital yang senantiasa "hidup" diperbarui secara berkelanjutan melalui aliran data sensor dari aset fisik.

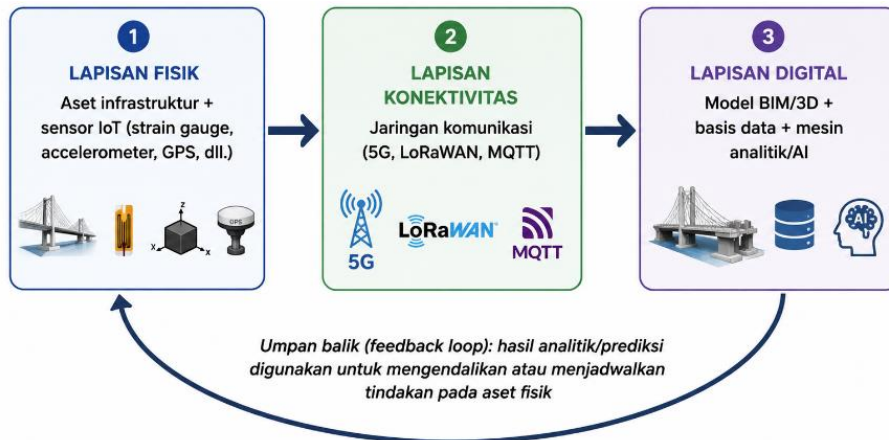
1. Definisi dan Konsep Dasar

Digital twin didefinisikan sebagai replika digital dinamis dari suatu entitas fisik yang terhubung melalui aliran data dua arah, sehingga perubahan pada aset fisik tercermin pada model digital, dan sebaliknya, hasil analisis pada model digital dapat memengaruhi tindakan pada aset fisik (Akhavian, Amani, Mootz, Ashe, & Beheshti, 2025). Karakteristik inilah merupakan hubungan data dua arah yang bersifat *real-time* atau mendekati *real-time* yang membedakan *digital twin* sejati dari model BIM statis yang hanya diperbarui secara manual dan berkala. Wimmer dan Braml (2024) menegaskan bahwa dari perspektif *Industry 4.0*, *digital twin* pada struktur teknik sipil tidak dapat dilepaskan dari tiga elemen yang saling terhubung: objek fisik itu sendiri, model virtualnya, dan konektivitas data yang menjembatani keduanya secara berkelanjutan sepanjang umur layan struktur.

2. Perbedaan BIM dan *Digital Twin*

Perbedaan mendasar antara BIM dan *digital twin* sering disalahpahami sebagai sekadar perbedaan tingkat detail model. Sesungguhnya, perbedaan utama terletak pada dimensi waktu dan arah aliran data. Model BIM konvensional bersifat *snapshot*, menggambarkan kondisi aset pada satu titik waktu tertentu dan diperbarui secara manual bila terjadi perubahan. *Digital twin*, sebaliknya, memuat mekanisme pembaruan otomatis dan berkelanjutan yang bersumber dari sensor IoT yang tertanam pada aset fisik.

Gambar 7.1 Arsitektur Tiga Lapisan *Digital Twin* Infrastruktur



Sumber: Disusun oleh Penulis, diadaptasi dari Akhavian, Amani, Mootz, Ashe, & Beheshti (2025); Wimmer & Braml (2024); Tuhaise, Tah, & Abanda (2023)

3. Tingkat Kematangan *Digital Twin*

Deng, Menassa, dan Kamat mengusulkan kerangka lima tingkat kematangan (*five-level ladder*) penerapan *digital twin* pada bangunan dan infrastruktur. Kerangka ini bermanfaat bagi pengelola aset untuk menilai posisi kesiapan digital organisasinya saat ini serta merancang peta jalan (*roadmap*) peningkatan menuju tingkat yang lebih matang.

Tabel 7.3 Lima Tingkat Kematangan *Digital Twin* pada Infrastruktur

Tingkat	Nama	Karakteristik Utama
Level 1	BIM Dasar untuk Visualisasi	Model 3D statis, digunakan terutama untuk keperluan visual dan dokumentasi
Level 2	BIM dengan Simulasi	Model digunakan untuk simulasi performa (struktural, energi, dsb.) secara <i>offline</i>
Level 3	BIM terintegrasi IoT untuk Pemantauan	Sensor IoT memberi data kondisi real-time, namun analisis masih dilakukan manual
Level 4	BIM dengan AI untuk Prediksi	Model dilengkapi algoritma AI/ML untuk memproyeksikan kondisi di masa depan

Tingkat	Nama	Karakteristik Utama
Level 5	Digital Twin Ideal dengan Kendali Otomatis	Sistem dapat memicu tindakan pengendalian/pemeliharaan secara otomatis

Sumber: Diadaptasi dari Kerangka Lima Tingkat Kematangan Digital Twin Sebagaimana Dirujuk Dalam Akhavian, Amani, Mootz, Ashe, & Beheshti (2025)

4. Penerapan pada Berbagai Jenis Infrastruktur

- Jembatan*: sensor regangan (*strain gauge*) dan akselerometer dipetakan ke elemen struktur pada model digital untuk memantau kelelahan material dan mendeteksi anomali getaran secara dini (He, Li, & Zhang, 2022; Peng, Li, & Hao, 2023).
- Jaringan jalan raya*: sensor beban gandar dan kamera berbasis AI dipetakan pada model jaringan jalan untuk memantau kerusakan permukaan dan pola lalu lintas.
- Transportasi rel*: penerapan digital twin pada sistem perkeretaapian mendukung pemantauan geometri jalur secara berkelanjutan menggunakan model prediktif berbasis *recurrent neural network* yang disimulasikan bersama model BIM (Thompson et al., 2025).
- Gedung dan fasilitas*: sensor konsumsi energi, kualitas udara, dan okupansi ruang terhubung ke model BIM gedung untuk optimasi operasional fasilitas (Hakimi, Liu, & Abudayyeh, 2024).

5. *Digital Twin, Extended Reality, dan Menuju Metaverse Industri*

Perkembangan terbaru memperluas pemanfaatan digital twin dengan teknologi realitas terkembang (*Extended Reality/XR*), yang memungkinkan teknisi lapangan melakukan inspeksi dengan panduan visual dari model digital secara langsung melalui perangkat seperti kacamata pintar, sebagaimana ditinjau dalam kajian literatur *maintenance 4.0* terbaru. Mourtzis (2023), membahas peran digital twin sebagai fondasi *industrial metaverse* dalam kerangka *Industry 4.0* dan *Industry 5.0*, di mana operator dan sistem siber-fisik berinteraksi dalam lingkungan virtual yang imersif. Perkembangan ini relevan bagi infrastruktur skala besar, karena memungkinkan kolaborasi jarak jauh antara insinyur pusat dan teknisi lapangan tanpa memerlukan kehadiran

fisik yang sama pada satu lokasi. Pemanfaatan XR dan metaverse pada manajemen aset infrastruktur publik masih tergolong pada tahap awal penerapan (*early adoption*) dan sebagian besar studi yang tersedia masih berupa studi kasus terbatas atau prototipe, sehingga generalisasi manfaatnya bagi skala jaringan infrastruktur nasional masih memerlukan bukti empiris lebih lanjut.

C. Pemeliharaan Prediktif dan Preventif

Strategi pemeliharaan merupakan inti dari manajemen aset infrastruktur, karena menentukan kapan dan bagaimana intervensi dilakukan terhadap suatu elemen aset. Kemajuan sensor IoT dan pembelajaran mesin (*machine learning*) dalam satu dekade terakhir telah menggeser praktik terbaik dari pemeliharaan preventif terjadwal menuju pemeliharaan prediktif berbasis kondisi aktual (*condition-based predictive maintenance*), yang terbukti lebih efisien dari sisi biaya maupun keselamatan (Rosati *et al.*, 2023).

1. Klasifikasi Strategi Pemeliharaan

Strategi pemeliharaan aset dapat diklasifikasikan ke dalam empat kategori utama, preventif terjadwal, prediktif berbasis kondisi, dan yang paling mutakhir, pemeliharaan preskriptif (*prescriptive maintenance*) yang tidak hanya memprediksi kapan kegagalan mungkin terjadi, tetapi juga merekomendasikan tindakan optimal yang harus diambil (Suawa *et al.*, 2022; Hosseinzadeh *et al.*, 2023).

Tabel 7.4 Perbandingan Strategi Pemeliharaan Aset Infrastruktur

Strategi	Dasar Tindakan	Keunggulan	Kelemahan
Reaktif/ Korektif	Setelah kegagalan terjadi	Biaya awal rendah, sederhana	Risiko gangguan layanan dan biaya darurat tinggi
Preventif Terjadwal	Interval waktu/penggunaan tetap	Mudah direncanakan dan dianggarkan	Bisa boros bila komponen masih layak pakai

Strategi	Dasar Tindakan	Keunggulan	Kelemahan
Prediktif Berbasis Kondisi	Data sensor dan model analitik	Efisiensi biaya tinggi, intervensi tepat waktu	Investasi sensor dan analitik data yang signifikan
Preskriptif	Prediksi + rekomendasi tindakan optimal	Mendukung keputusan yang lebih komprehensif	Kompleksitas model dan kebutuhan data historis besar

Sumber: Diadaptasi dari Rosati et al. (2023); Suawa et al. (2022); Hosseinzadeh, Chen, Shahin, & Bouzary (2023)

2. Peran Sensor IoT dalam *Condition-Based Monitoring*

Pemantauan kondisi aset secara kontinu memerlukan jaringan sensor yang dipilih sesuai jenis kegagalan yang ingin dideteksi lebih awal. Mishra, Lourenço, dan Ramana (2022) dalam tinjauan komprehensif mereka mengenai pemanfaatan IoT pada pemantauan struktur teknik sipil mengelompokkan sensor berdasarkan parameter fisik yang diukur, antara lain getaran, regangan, suhu, kelembapan, dan perpindahan (*displacement*).

- Vibrasi dan akustik: digunakan untuk mendeteksi keausan bantalan (*bearing*) pada peralatan mekanis serta retak pada elemen struktur beton dan baja (Zhang, Cheng, Du, & Du, 2023).
- Regangan (*strain*) dan defleksi: dipasang pada elemen jembatan untuk memantau distribusi beban dan mendeteksi tanda-tanda kelelahan material secara dini (He, Li, & Zhang, 2022).
- Suhu dan arus listrik: dipasang pada panel dan peralatan kelistrikan untuk mendeteksi risiko *overheating* sebelum terjadi kegagalan total.
- Tekanan dan aliran: dipasang pada jaringan pipa air/gas untuk mendeteksi indikasi kebocoran atau penyumbatan sejak dini.

3. *Structural Health Monitoring* (SHM) sebagai Studi Kasus Utama

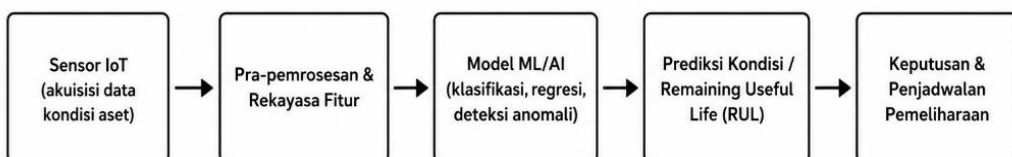
Structural Health Monitoring (SHM) merupakan salah satu penerapan paling matang dari pemeliharaan prediktif berbasis IoT pada infrastruktur teknik sipil. Sistem SHM modern menggabungkan jaringan sensor nirkabel berbiaya rendah dengan algoritma deteksi anomali tanpa

label (*unsupervised anomaly detection*) untuk mengidentifikasi perubahan pola perilaku struktur yang tidak wajar tanpa memerlukan riwayat kegagalan sebagai data pelatihan.

Sebagai ilustrasi penerapan praktis, sebuah sistem pemantauan dan peringatan dini pada jembatan jalan berbasis IoT dan logika fuzy (*fuzzy logic*) dikembangkan untuk mengklasifikasikan status kesehatan jembatan berdasarkan kombinasi beban, getaran, dan kondisi lingkungan, dan diuji melalui simulasi yang menunjukkan kemampuan sistem mengategorikan tingkat risiko struktur secara otomatis. Studi lain oleh Gragnaniello, Mariniello, Pastore, dan Asprone (2024) mengintegrasikan perancangan sistem SHM langsung ke dalam alur kerja BIM, sehingga penentuan titik pemasangan sensor dapat direncanakan sejak fase desain struktur, bukan ditambahkan belakangan setelah konstruksi selesai.

Ditambahkan sebagai poin penting: keberhasilan SHM sangat bergantung pada kalibrasi sensor yang tepat. Riset mengenai kalibrasi sistem penginderaan pada pemantauan kesehatan jembatan menegaskan bahwa sensor yang tidak terkalibrasi dengan baik dapat menurunkan keandalan sistem deteksi dini dan meningkatkan risiko kesalahan klasifikasi kondisi struktur, baik berupa alarm palsu (*false alarm*) maupun kegagalan mendeteksi kerusakan nyata (*false negative*).

Gambar 7.2 Alur Kerja (*Workflow*) Pemeliharaan Prediktif Berbasis IoT dan *Machine Learning*



Sumber: Diadaptasi dari Rosati et al. (2023); Mishra, Lourenço, & Ramana (2022)

4. Algoritma *Machine Learning* untuk Prediksi Kegagalan dan *Remaining Useful Life* (RUL)

Data historis sensor digunakan untuk melatih model prediktif yang memperkirakan sisa umur pakai komponen atau *Remaining Useful Life* (RUL). Taşcı, Omar, dan Ayvaz (2023) mengembangkan model prediksi RUL untuk keperluan pemeliharaan prediktif pada konteks

manufaktur, dengan pendekatan yang secara konseptual dapat diadaptasi pada komponen mekanis dan elektrik infrastruktur seperti pompa dan motor listrik pada sistem drainase perkotaan.

- a. Model berbasis pohon (*tree-based ensemble*) seperti *random forest* dan *gradient boosting*, digunakan untuk klasifikasi tingkat keparahan kerusakan berdasarkan data fitur yang diekstraksi dari sinyal sensor, sebagaimana didemonstrasikan pada prediksi suhu dan getaran motor listrik dalam lingkungan manufaktur Industri 4.0 (Rakholia, Suárez-Cetrulo, Singh, & Carbajo, 2025).
- b. Jaringan saraf tiruan (*neural network*) dan varian *deep learning*, termasuk *Long Short-Term Memory* (LSTM), digunakan untuk memodelkan data sekuensial dari sensor yang bersifat berderet waktu (*time-series*).
- c. Deteksi anomali tanpa label (*unsupervised anomaly detection*), digunakan ketika data kegagalan historis sangat terbatas, sebagaimana lazim terjadi pada infrastruktur sipil yang berumur panjang dan keagalannya relatif jarang terjadi.

D. Integrasi Data untuk Pengambilan Keputusan

Integrasi data merupakan salah satu elemen utama dalam pengembangan *smart infrastructure* dan *smart city* karena memungkinkan berbagai informasi dari beragam sumber dikumpulkan, dipadukan, dan dianalisis secara terpadu untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat, akurat, dan berbasis bukti (*evidence-based decision making*). Data yang diintegrasikan dapat berasal dari sensor *Internet of Things* (IoT), sistem informasi geografis (*Geographic Information System/GIS*), kamera pengawas, satelit, *smart meter*, aplikasi layanan publik, media sosial, hingga basis data pemerintah. Melalui integrasi tersebut, informasi yang sebelumnya terpisah-pisah menjadi satu kesatuan yang mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi infrastruktur, lingkungan, dan aktivitas masyarakat. Hasil analisis data kemudian digunakan sebagai dasar dalam perencanaan, pengendalian, evaluasi, serta penyusunan kebijakan yang lebih efektif dan responsif terhadap dinamika perkotaan.

Proses integrasi data memerlukan infrastruktur digital yang mampu menghubungkan berbagai sistem informasi yang sebelumnya bekerja secara terpisah. Hal ini dilakukan melalui penggunaan platform

berbagi data (*data integration platform*), komputasi awan (*Cloud Computing*), *Application Programming Interface* (API), serta standar interoperabilitas yang memungkinkan pertukaran data antarinstansi maupun antaraplikasi. Dengan adanya interoperabilitas, data dari sektor transportasi, energi, kesehatan, lingkungan, keamanan, dan administrasi pemerintahan dapat diproses secara bersamaan tanpa mengalami hambatan format maupun perbedaan sistem. Integrasi tersebut menghasilkan pusat data (*data center*) atau pusat kendali (*command center*) yang menyediakan informasi secara real-time sehingga para pengambil keputusan dapat memantau kondisi kota secara menyeluruh dan mengambil tindakan berdasarkan informasi terkini.

Pemanfaatan data yang telah terintegrasi memberikan berbagai manfaat dalam pengelolaan infrastruktur dan layanan publik. Analisis data besar (*Big Data Analytics*) memungkinkan identifikasi pola penggunaan fasilitas publik, prediksi kebutuhan layanan, deteksi dini terhadap potensi gangguan, hingga evaluasi efektivitas kebijakan yang telah diterapkan. Sebagai contoh, data lalu lintas dari kamera, sensor jalan, dan aplikasi navigasi dapat dianalisis untuk mengoptimalkan pengaturan lampu lalu lintas dan mengurangi kemacetan. Pada sektor energi, data konsumsi listrik digunakan untuk memperkirakan beban puncak sehingga distribusi daya dapat dilakukan secara lebih efisien. Di bidang kesehatan, integrasi data rumah sakit, fasilitas kesehatan, dan sistem surveilans membantu pemerintah mendeteksi penyebaran penyakit lebih cepat serta merencanakan distribusi sumber daya kesehatan secara lebih tepat. Dengan demikian, keputusan yang dihasilkan tidak hanya didasarkan pada asumsi, tetapi juga pada informasi yang akurat dan terkini.

Meskipun menawarkan banyak manfaat, integrasi data juga menghadapi berbagai tantangan yang perlu dikelola dengan baik. Perbedaan format data, kualitas data yang tidak seragam, keterbatasan interoperabilitas antarplatform, serta keamanan dan privasi informasi menjadi isu penting dalam implementasinya. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan tata kelola data (*data governance*) yang mencakup standar kualitas data, mekanisme pertukaran informasi, perlindungan data pribadi, pengendalian akses, serta penerapan teknologi keamanan siber untuk mencegah kebocoran maupun penyalahgunaan data. Selain itu, keberhasilan integrasi data memerlukan kolaborasi yang erat antara pemerintah, sektor swasta, akademisi, dan masyarakat agar data yang

dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal. Dengan pengelolaan yang baik, integrasi data menjadi fondasi utama bagi terciptanya sistem pengambilan keputusan yang cerdas, transparan, adaptif, dan berkelanjutan dalam mendukung pembangunan infrastruktur modern.

1. Tantangan Silo Data pada Proyek Infrastruktur

Salah satu kendala paling mendasar dalam manajemen aset infrastruktur adalah data yang tersebar di berbagai sistem yang tidak saling terhubung: model BIM, sistem GIS, CMMS, sistem SCADA, hingga laporan inspeksi manual yang masih berbentuk dokumen cetak. Kondisi ini dikenal sebagai *data silo*, yang menyebabkan duplikasi data, inkonsistensi antar-sumber, dan lambatnya proses pengambilan keputusan karena informasi yang relevan tidak tersedia pada waktu yang dibutuhkan.

Perlu ditambahkan sebagai poin penting bahwa silo data tidak selalu bersifat teknis; seringkali silo data justru bersumber dari struktur organisasi itu sendiri, di mana setiap divisi (perencanaan, konstruksi, operasi, keuangan) mengembangkan sistem informasinya masing-masing tanpa koordinasi lintas divisi sejak awal. Oleh karena itu, penyelesaian masalah silo data memerlukan intervensi pada tingkat tata kelola organisasi, bukan semata-mata solusi teknologi.

2. Common Data Environment (CDE) dan ISO 19650

Common Data Environment (CDE) didefinisikan dalam ISO 19650 sebagai sumber informasi yang disepakati bagi suatu proyek atau aset, digunakan untuk mengumpulkan, mengelola, dan menyebarkan setiap kontainer informasi melalui suatu proses yang terkelola. CDE berfungsi sebagai *single source of truth* yang menggantikan praktik berbagi berkas melalui surel atau folder lokal yang rawan menimbulkan versi dokumen yang saling bertentangan.

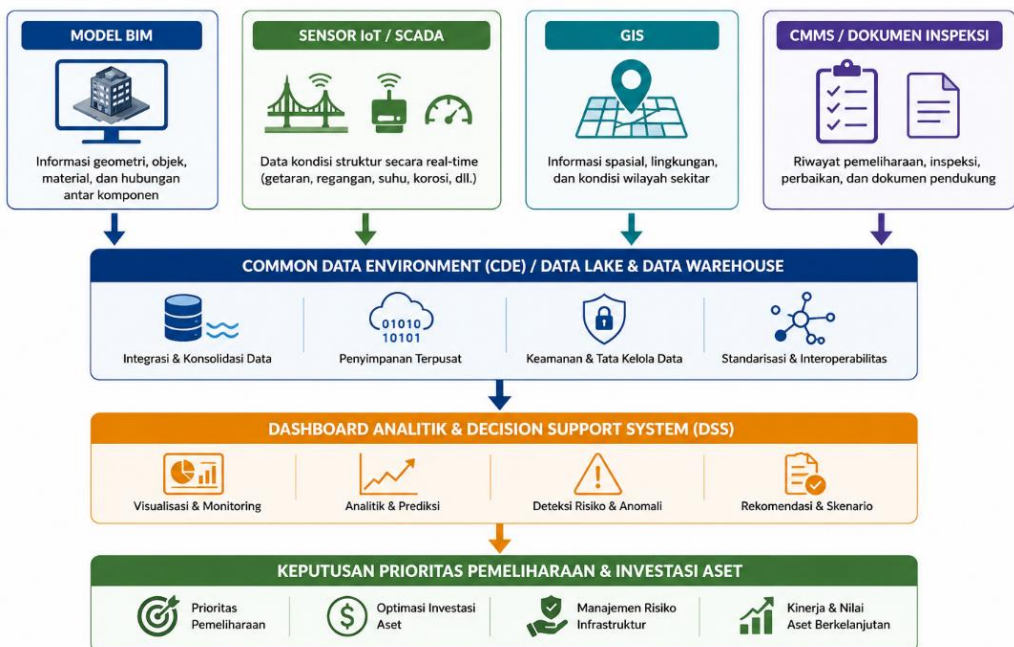
Struktur kerja CDE menurut ISO 19650 umumnya terbagi ke dalam beberapa status (*state*) informasi, yaitu *Work in Progress* (dokumen yang masih dikerjakan), *Shared* (dokumen yang telah dibagikan untuk koordinasi lintas disiplin), *Published* (dokumen yang telah disetujui secara resmi), dan *Archived* (dokumen historis untuk keperluan audit dan rujukan). Alur status ini menjamin bahwa setiap pemangku kepentingan proyek bekerja dengan versi informasi yang benar dan telah melalui proses persetujuan yang jelas.

Pada level organisasi yang mengelola banyak aset sekaligus (*enterprise BIM*), Godager dkk. (2022, 2024) menunjukkan bahwa penerapan ISO 19650 memerlukan penyelarasan yang konsisten antara kebutuhan informasi tingkat organisasi dan kebutuhan informasi tingkat aset individual, agar CDE tidak sekadar menjadi tempat penyimpanan dokumen, tetapi benar-benar menjadi basis pengambilan keputusan operasional sehari-hari.

3. Arsitektur Integrasi: *Data Lake, Middleware, dan API*

Di luar CDE yang berfokus pada dokumen dan model proyek, integrasi data skala besar dari berbagai sensor IoT memerlukan arsitektur teknis tambahan berupa *data lake* untuk menyimpan data mentah dalam berbagai format, *middleware* dan *Application Programming Interface* (API) yang menjembatani platform BIM dengan platform IoT dan GIS, serta mesin analitik yang mengolah data menjadi informasi siap pakai.

Gambar 7.3 Arsitektur Integrasi Data Multi-Sumber untuk Pengambilan Keputusan Aset Infrastruktur



Sebagaimana diilustrasikan pada diagram di atas, empat sumber data utama yaitu model BIM, sensor IoT/SCADA, GIS, dan CMMS/dokumen inspeksi, mengalir ke dalam satu CDE/data lake

terpusat sebelum diolah menjadi dashboard analitik dan sistem pendukung keputusan. Struktur berjenjang ini penting karena memisahkan secara jelas antara lapisan penyimpanan data mentah, lapisan pengolahan analitik, dan lapisan penyajian informasi kepada pengguna akhir, sehingga perubahan pada satu lapisan tidak memerlukan perombakan total pada lapisan lainnya.

4. Dashboard Analitik dan Decision Support System (DSS)

Hasil integrasi data pada akhirnya perlu disajikan melalui *dashboard* yang menampilkan indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators/KPI*) aset, seperti tingkat kerusakan, prioritas risiko, dan estimasi biaya pemeliharaan. *Dashboard* yang baik memungkinkan pemangku kepentingan dengan latar belakang berbeda, dari insinyur lapangan hingga pembuat kebijakan, mengakses informasi pada tingkat kedalaman yang sesuai dengan kebutuhan masing-masing, tanpa harus memahami detail teknis di baliknya.

- a. Bagi insinyur lapangan: *dashboard* menyajikan status kondisi terkini setiap elemen aset beserta riwayat inspeksinya secara rinci.
- b. Bagi manajer aset: *dashboard* menyajikan agregasi risiko pada tingkat jaringan aset, memungkinkan penyusunan prioritas anggaran pemeliharaan.
- c. Bagi pembuat kebijakan: *dashboard* menyajikan indikator kinerja tingkat tinggi yang menunjukkan tren kondisi infrastruktur secara keseluruhan dari waktu ke waktu.



BAB VIII

BIG DATA DAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM TEKNIK SIPIL

Perkembangan teknologi digital telah mengubah cara industri teknik sipil merencanakan, membangun, mengoperasikan, dan memelihara infrastruktur. Jika pada bab-bab sebelumnya telah dibahas bagaimana *Building Information Modeling* (BIM) menyediakan representasi digital yang kaya informasi geometris dan non-geometris, serta bagaimana *Internet of Things* (IoT) menghasilkan aliran data secara *real-time* dari sensor yang tertanam pada struktur dan lingkungan binaan, maka bab ini membahas lapisan berikutnya dalam ekosistem infrastruktur cerdas, yaitu bagaimana data dalam jumlah besar tersebut dikelola, dianalisis, dan diubah menjadi pengetahuan yang dapat ditindaklanjuti melalui *big data analytics* dan *artificial intelligence* (AI).

Transformasi digital pada industri konstruksi dan infrastruktur telah menghasilkan volume data yang tumbuh secara eksponensial, mulai dari data sensor struktural, data survei terestrial dan udara (LiDAR, fotogrametri), data transaksi proyek, hingga data operasional aset selama masa layan puluhan tahun. *Big data* dan kecerdasan buatan memungkinkan praktisi teknik sipil melakukan pemodelan prediktif terhadap kinerja struktural, arus lalu lintas, dan pemanfaatan sumber daya, sehingga proses pemeliharaan, alokasi sumber daya, dan pengambilan keputusan menjadi lebih efektif dan berbasis bukti (Zabala-Vargas *et al.*, 2023; Atuahene *et al.*, 2022). Pergeseran paradigma ini menandai transisi dari pendekatan manajemen aset yang bersifat reaktif dan berbasis jadwal tetap (*time-based maintenance*) menuju pendekatan yang bersifat prediktif dan adaptif, di mana keputusan rekayasa didasarkan pada pola yang digali dari data historis dan data waktu nyata.

A. *Big Data* untuk Infrastruktur Modern

Industri teknik sipil secara historis dikenal sebagai salah satu sektor dengan tingkat adopsi digital yang relatif lambat dibandingkan sektor manufaktur atau keuangan. Namun demikian, dalam satu dekade terakhir, penetrasi sensor murah, konektivitas nirkabel, serta kebutuhan pemantauan aset infrastruktur yang menua telah mendorong ledakan volume data pada seluruh tahapan siklus hidup proyek, mulai dari perencanaan, desain, konstruksi, hingga operasi dan pemeliharaan (*Operation and Maintenance/O&M*). Fenomena ini kemudian dikenal sebagai era *big data* dalam teknik sipil (Chang & Mao, 2021).

1. Definisi dan Karakteristik *Big Data*

Big data didefinisikan bukan semata-mata berdasarkan ukurannya yang besar, melainkan berdasarkan karakteristik intrinsik yang membedakannya dari data konvensional. Karakteristik ini umumnya dirangkum dalam kerangka "5V", yaitu *Volume* (jumlah data yang sangat besar), *Velocity* (kecepatan data dihasilkan dan harus diproses, sering kali secara *real-time*), *Variety* (keberagaman jenis dan format data, terstruktur, semi-terstruktur, dan tidak terstruktur), *Veracity* (tingkat keandalan dan kualitas data yang bervariasi), serta *Value* (nilai atau manfaat yang dapat diekstraksi dari data melalui analisis) (Chang & Mao, 2021; Atuahene, Kanjanabootra, & Gajendran, 2022). Kelima dimensi ini saling terkait dan menjadi dasar bagi perancangan arsitektur pengelolaan data infrastruktur yang efektif.

Tabel 8.1 Lima Karakteristik *Big Data* (5V) dan Contoh Penerapannya pada Proyek Infrastruktur

Dimensi	Deskripsi	Contoh dalam Proyek Infrastruktur
<i>Volume</i>	Skala data yang dihasilkan, mulai dari gigabyte hingga petabyte	Data pemindaian <i>LiDAR</i> jembatan sepanjang 2 km dapat menghasilkan puluhan gigabyte titik awan (<i>point cloud</i>) dalam satu sesi survei
<i>Velocity</i>	Kecepatan pembangkitan dan	Sensor akselerometer pada jembatan dapat mengirim data

Dimensi	Deskripsi	Contoh dalam Proyek Infrastruktur
	kebutuhan pemrosesan data	getaran struktural hingga 1000 sampel per detik
<i>Variety</i>	Ragam format data: numerik, citra, video, teks, model 3D	Kombinasi data BIM (IFC), citra drone, log sensor IoT, dan laporan inspeksi manual dalam satu proyek
<i>Veracity</i>	Tingkat akurasi, konsistensi, dan kepercayaan terhadap data	Data cuaca dari beberapa stasiun BMKG yang memerlukan validasi silang sebelum digunakan untuk analisis risiko banjir
<i>Value</i>	Manfaat nyata yang dihasilkan dari analisis data	Penjadwalan pemeliharaan preventif yang menghemat biaya perbaikan darurat hingga puluhan persen

Selain kerangka 5V, sejumlah peneliti menambahkan dimensi keenam yaitu *Variability*, yang merujuk pada inkonsistensi aliran data akibat perubahan kondisi lapangan, misalnya gangguan sinyal sensor nirkabel saat cuaca ekstrem atau perubahan pola lalu lintas pada jam sibuk. Pemahaman terhadap variabilitas ini penting agar model analitik yang dibangun tidak bias terhadap kondisi tertentu saja.

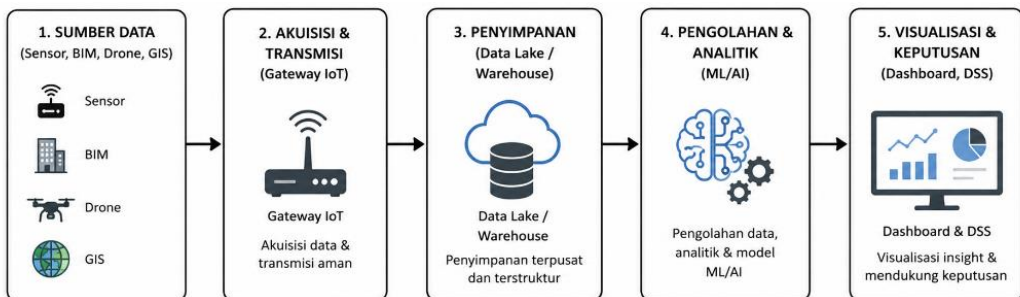
2. Sumber Data dalam Siklus Hidup Infrastruktur Sipil

Data infrastruktur bersumber dari beragam titik sepanjang siklus hidup aset. Pada tahap perencanaan dan desain, sumber utama meliputi model BIM, data topografi, data geoteknik, dan data iklim historis. Pada tahap konstruksi, data dihasilkan dari sensor peralatan berat, catatan progres harian, data *Global Positioning System* (GPS) alat berat, serta rekaman drone untuk pemantauan kemajuan pekerjaan. Pada tahap operasi dan pemeliharaan, tahap dengan durasi terpanjang dalam siklus hidup aset, data dihasilkan secara kontinu dari sensor *Structural Health Monitoring* (SHM), sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) pada infrastruktur air dan energi, sistem manajemen lalu lintas

cerdas, serta laporan inspeksi visual berkala (Hakimi, Abudayyeh, Almatared, Alhawiti, & Houshyar, 2023).

- a. Sensor IoT terpasang permanen: akselerometer, *strain gauge*, sensor suhu-kelembaban, dan sensor korosi yang terpasang pada jembatan, bendungan, dan gedung tinggi.
- b. Penginderaan jauh (*remote sensing*): citra satelit, drone (*Unmanned Aerial Vehicle/UAV*), dan pemindaian *LiDAR* terestrial maupun udara untuk pemetaan kondisi permukaan dan deformasi struktur.
- c. Data BIM dan model 3D: informasi geometris dan atribut non-geometris (material, jadwal pemeliharaan, riwayat perbaikan) yang tersimpan dalam format *Industry Foundation Classes* (IFC).
- d. Data transaksional dan administratif: catatan proyek, anggaran, jadwal, serta data pengadaan yang dihasilkan sistem manajemen proyek.
- e. Data lingkungan dan sosial: data cuaca, data curah hujan, data kepadatan penduduk, serta data media sosial yang dapat memberi sinyal dini terhadap gangguan layanan infrastruktur, misalnya keluhan warga terkait genangan air atau kemacetan.

Gambar 8.1 Alur Pipa Data (*Data Pipeline*) Infrastruktur Cerdas



Gambar di atas menggambarkan alur umum pengelolaan data infrastruktur cerdas. Data yang dihasilkan oleh berbagai sumber dikumpulkan melalui gateway IoT, kemudian disimpan dalam repositori data berskala besar, diolah menggunakan teknik analitik lanjutan, dan akhirnya divisualisasikan untuk mendukung pengambilan keputusan oleh insinyur, manajer aset, maupun pembuat kebijakan. Setiap tahap dalam alur ini memiliki tantangan teknis tersendiri, termasuk masalah

interoperabilitas format data, latensi jaringan, serta kebutuhan penyimpanan yang terus meningkat.

3. Arsitektur dan Platform Pengelolaan *Big Data*

Arsitektur pengelolaan *big data* pada infrastruktur umumnya mengadopsi salah satu dari dua pendekatan penyimpanan utama, yaitu *data warehouse* dan *data lake*. *Data warehouse* menyimpan data terstruktur yang telah melalui proses pembersihan dan transformasi (*Extract, Transform, Load/ETL*), cocok untuk pelaporan dan analitik historis yang terjadwal. Sebaliknya, *data lake* menyimpan data mentah dalam berbagai format, terstruktur, semi-terstruktur, dan tidak terstruktur, sehingga lebih fleksibel untuk mendukung analitik lanjutan seperti *machine learning* yang membutuhkan akses ke data mentah beresolusi tinggi.

Untuk menangani volume dan kecepatan data yang tinggi, banyak organisasi infrastruktur mengadopsi kerangka komputasi terdistribusi seperti *Apache Hadoop* dan *Apache Spark*, yang memungkinkan pemrosesan paralel pada kluster komputer. Selain itu, komputasi awan (*cloud computing*) menjadi tulang punggung penyimpanan dan pemrosesan data infrastruktur berskala nasional karena menawarkan elastisitas sumber daya sesuai kebutuhan, sementara *edge computing* semakin banyak diterapkan untuk memproses data sensor secara lokal di dekat sumbernya guna mengurangi latensi dan beban jaringan, terutama pada aplikasi pemantauan struktur secara *real-time* (Hakimi *et al.*, 2023).

Integrasi antara *big data* dan *digital twin* semakin menjadi fokus penelitian mutakhir. *Digital twin* infrastruktur, representasi virtual dinamis dari aset fisik yang diperbarui secara berkelanjutan oleh aliran data sensor, membutuhkan arsitektur fusi data (*data fusion*) yang mampu menggabungkan berbagai sumber data heterogen menjadi satu model pengambilan keputusan yang koheren. Kajian sistematis terhadap 105 publikasi oleh Hakimi *et al.* (2023) mengidentifikasi bahwa tantangan utama dalam integrasi ini terletak pada heterogenitas data, interoperabilitas semantik, serta kompleksitas pemilihan algoritma fusi data yang tepat, dan mengusulkan kerangka kerja yang menekankan fusi

data berlapis serta integrasi *openBIM* dengan *Geographic Information System* (GIS).

Pemilihan arsitektur penyimpanan dan pemrosesan data juga perlu mempertimbangkan model penyebaran (*deployment model*) yang paling sesuai dengan kebutuhan dan sumber daya organisasi pengelola infrastruktur. Tiga model umum yang banyak diadopsi adalah komputasi lokal (*on-premise*), komputasi awan sepenuhnya (*full cloud*), dan model hibrida yang menggabungkan keduanya. Pemilihan model ini memengaruhi tidak hanya biaya investasi, tetapi juga tingkat kendali organisasi terhadap keamanan data, kemudahan skalabilitas, serta kecepatan waktu pemrosesan data sensor yang bersifat kritis waktu (*time-critical*).

Tabel 8.2 Perbandingan Model Penyebaran Infrastruktur Data (*On-Premise, Cloud, dan Hibrida*)

Model	Kendali Keamanan Data	Skalabilitas	Estimasi Biaya Investasi Awal	Kesesuaian Penggunaan
<i>On-Premise</i>	Tinggi (sepenuhnya dikuasai organisasi)	Terbatas, memerlukan penambahan perangkat keras fisik	Tinggi di awal, rendah pada biaya operasional bulanan	Data sangat sensitif, misalnya sistem SCADA bendungan strategis nasional
<i>Full Cloud</i>	Bergantung pada penyedia layanan awan	Sangat tinggi, elastis sesuai kebutuhan	Rendah di awal, bersifat berlangganan (<i>subscription</i>)	Proyek dengan volume data fluktuatif dan kebutuhan kolaborasi lintas lokasi
Hibrida	Sedang–tinggi, data sensitif tetap lokal	Tinggi, fleksibel sesuai kebutuhan	Sedang, kombinasi investasi awal dan biaya berlangganan	Instansi pemerintah dengan sebagian data terklasifikasi dan sebagian data terbuka

4. Tantangan Implementasi *Big Data* pada Sektor Infrastruktur

Meskipun potensi manfaatnya besar, implementasi *big data* dalam proyek infrastruktur menghadapi sejumlah tantangan signifikan. Pertama, kualitas data (*data quality*) sering kali tidak konsisten akibat sensor yang tidak terkalibrasi dengan baik, data yang hilang (*missing data*), atau format yang tidak seragam antarvendor. Kedua, interoperabilitas antar sistem lawas (*legacy system*) dan platform digital baru masih menjadi hambatan struktural, terutama pada institusi pengelola infrastruktur publik yang belum sepenuhnya bertransformasi digital. Ketiga, kesenjangan kompetensi sumber daya manusia, insinyur sipil pada umumnya belum terlatih dalam ilmu data (*data science*) menghambat pemanfaatan data secara optimal (Atuahene *et al.*, 2022).

Keempat, aspek keamanan siber dan privasi data menjadi perhatian serius, mengingat data infrastruktur kritis (bendungan, jaringan listrik, sistem transportasi) berpotensi menjadi target serangan siber yang dapat membahayakan keselamatan publik. Kelima, biaya investasi awal untuk membangun infrastruktur data, mencakup sensor, jaringan, penyimpanan awan, dan lisensi perangkat lunak analitik, masih menjadi kendala bagi banyak instansi pemerintah daerah dengan keterbatasan anggaran. Kajian tinjauan pustaka pada industri konstruksi menegaskan bahwa keberhasilan transformasi *big data* sangat bergantung pada kesiapan organisasi (*organizational readiness*), bukan semata-mata kesiapan teknologi (Atuahene *et al.*, 2022; Zabala-Vargas *et al.*, 2023).

B. *Machine Learning* dalam Analisis Infrastruktur

Jika *big data* menyediakan bahan mentah, maka *machine learning* (ML) adalah salah satu mesin utama yang mengubah data tersebut menjadi wawasan (*insight*) yang bermakna bagi rekayasa infrastruktur. *Machine learning* merupakan cabang kecerdasan buatan yang memungkinkan sistem komputer mempelajari pola dari data tanpa harus diprogram secara eksplisit untuk setiap aturan, sehingga sangat sesuai untuk memodelkan fenomena rekayasa yang kompleks dan non-linear, seperti degradasi struktur atau perilaku lalu lintas (Flah, Nunez, Ben Chaabene, & Nehdi, 2021).

1. Konsep Dasar dan Taksonomi *Machine Learning*

Secara umum, algoritma *machine learning* dikelompokkan menjadi tiga kategori utama. *Supervised learning* menggunakan data berlabel (data historis dengan hasil yang telah diketahui) untuk melatih model memprediksi hasil pada data baru, misalnya memprediksi indeks kondisi jembatan berdasarkan data historis. *Unsupervised learning* digunakan untuk menemukan pola tersembunyi pada data tanpa label, seperti pengelompokan (*clustering*) segmen jalan berdasarkan karakteristik kerusakan yang mirip. *Reinforcement learning* memungkinkan agen belajar melalui interaksi dengan lingkungan dan umpan balik berupa penghargaan (*reward*), yang mulai diterapkan dalam optimasi jadwal pemeliharaan jaringan infrastruktur secara dinamis.

Tabel 8.3 Perbandingan Kategori Algoritma *Machine Learning* dan Aplikasinya dalam Teknik Sipil

Kategori	Contoh Algoritma	Aplikasi dalam Infrastruktur
<i>Supervised Learning</i>	<i>Random Forest</i> , <i>Support Vector Machine</i> (SVM), <i>XGBoost</i> , Regresi	Prediksi kekuatan beton, klasifikasi tingkat kerusakan jembatan, prediksi <i>Pavement Condition Index</i>
<i>Unsupervised Learning</i>	<i>K-Means Clustering</i> , <i>Principal Component Analysis</i> (PCA)	Pengelompokan pola kerusakan jalan, deteksi anomali data sensor tanpa label
<i>Deep Learning</i>	<i>Convolutional Neural Network</i> (CNN), <i>Long Short-Term Memory</i> (LSTM)	Deteksi retak dari citra visual, prediksi deret waktu deformasi bendungan
<i>Reinforcement Learning</i>	<i>Q-Learning</i> , <i>Deep Q-Network</i>	Optimasi jadwal pemeliharaan jaringan jalan secara adaptif

Dalam praktiknya, penerapan *machine learning* pada teknik sipil banyak memanfaatkan pustaka perangkat lunak sumber terbuka (*open-source*) yang telah teruji secara luas pada berbagai domain. Bahasa

pemrograman Python menjadi pilihan dominan karena ekosistem pustakanya yang kaya, mencakup *scikit-learn* untuk algoritma ML klasik, serta *TensorFlow* dan *PyTorch* untuk pengembangan model *deep learning* yang lebih kompleks. Pemilihan kerangka kerja (*framework*) yang tepat perlu mempertimbangkan kompleksitas masalah, ketersediaan data, dan kapasitas komputasi yang dimiliki tim rekayasa data infrastruktur.

Tabel 8.4 Pustaka dan Kerangka Kerja Umum untuk Analisis Data Infrastruktur

Pustaka/Kerangka Kerja	Kegunaan Utama	Tingkat Kompleksitas Penggunaan
<i>scikit-learn</i>	Algoritma ML klasik: regresi, klasifikasi, <i>clustering</i>	Rendah–sedang, cocok untuk pemula analitik data
<i>TensorFlow</i>	Pengembangan dan pelatihan model <i>deep learning</i> skala besar	Sedang–tinggi, mendukung produksi skala industri
<i>PyTorch</i>	Penelitian dan pengembangan model <i>deep learning</i> fleksibel	Sedang–tinggi, populer di kalangan akademisi
<i>Pandas / NumPy</i>	Manipulasi dan pra-pemrosesan data tabular	Rendah, fondasi dasar analitik data

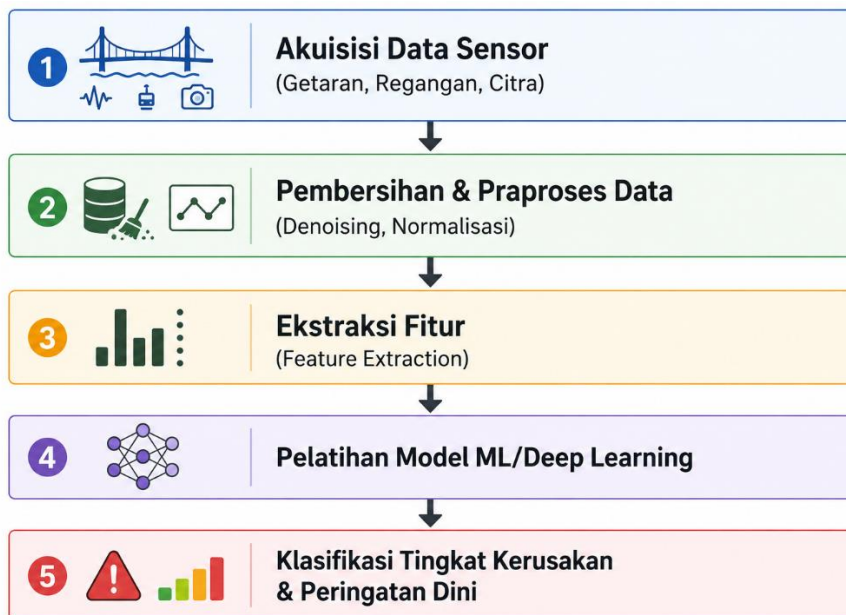
2. Machine Learning untuk Structural Health Monitoring (SHM)

Salah satu penerapan *machine learning* yang paling matang dalam teknik sipil adalah *Structural Health Monitoring* (SHM), yaitu proses pemantauan kondisi struktur secara berkelanjutan untuk mendeteksi kerusakan sedini mungkin. Tinjauan sistematis oleh Malekloo, Ozer, AlHamaydeh, dan Girolami (2022) menunjukkan bahwa algoritma ML, mulai dari model klasik seperti *Support Vector Machine* hingga arsitektur *deep learning* seperti *Convolutional Neural Network* (CNN) telah digunakan secara luas untuk mengekstraksi fitur,

menormalkan data, dan mengklasifikasikan tingkat kerusakan berdasarkan data getaran struktural (*vibration-based monitoring*).

Pendekatan berbasis visi komputer (*computer vision*) juga berkembang pesat, memanfaatkan CNN untuk menganalisis citra yang diambil oleh drone maupun kamera statis guna mendeteksi retak, korosi, dan pengelupasan permukaan beton secara otomatis tanpa memerlukan inspeksi manual yang berisiko dan memakan waktu. Sebagai contoh, Yessoufou dan Zhu (2023) mengembangkan konfigurasi gabungan CNN dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) untuk mengidentifikasi kerusakan jembatan berdasarkan data pemantauan getaran jangka panjang, dengan hasil klasifikasi yang lebih akurat dibandingkan model tunggal. Pada struktur bendungan, Chen *et al.* (2023) mengusulkan kerangka *deep transfer learning* berbasis dekomposisi fitur untuk memprediksi deformasi bendungan beton, khususnya pada kondisi data pengamatan yang terbatas, situasi yang umum terjadi pada bendungan tua dengan riwayat instrumentasi yang tidak lengkap.

Gambar 8.2 Alur Kerja *Machine Learning* untuk *Structural Health Monitoring*



Alur kerja pada diagram diatas mencerminkan pola umum yang ditemukan pada berbagai penelitian SHM berbasis ML: dimulai dari akuisisi data sensor mentah, dilanjutkan dengan pembersihan data untuk

menghilangkan derau (*noise*) dan mengatasi data yang hilang, ekstraksi fitur yang relevan secara rekayasa (misalnya frekuensi natural, bentuk modal), pelatihan model prediktif, hingga keluaran berupa klasifikasi tingkat kerusakan yang dapat memicu peringatan dini bagi pengelola aset.

3. *Machine Learning* untuk Prediksi Kinerja Perkerasan Jalan

Selain pada struktur jembatan dan bangunan, *machine learning* juga banyak diterapkan pada manajemen perkerasan jalan (*pavement management*). Tinjauan pustaka oleh Justo-Silva, Ferreira, dan Flintsch (2021) mengidentifikasi bahwa model berbasis ML, termasuk *Artificial Neural Network*, *Random Forest*, dan model deret waktu berbasis LSTM, secara konsisten menunjukkan akurasi prediksi kondisi perkerasan yang lebih baik dibandingkan model statistik tradisional seperti model Markov, terutama ketika tersedia data historis yang cukup panjang dan beragam variabel penjelas seperti volume lalu lintas, jenis material, dan kondisi iklim.

Zhao dan Wang (2023) mengembangkan model *machine learning* untuk memprediksi kinerja perkerasan aspal guna mendukung pengambilan keputusan berbasis data terkait waktu optimal pelapisan ulang (*overlay*), yang menunjukkan bahwa integrasi model prediktif ke dalam sistem manajemen perkerasan dapat menghasilkan strategi pemeliharaan yang lebih hemat biaya sepanjang siklus hidup jalan. Pendekatan pembelajaran transfer (*transfer learning*) juga mulai diterapkan untuk mengatasi keterbatasan data pada ruas jalan baru yang belum memiliki riwayat pemantauan panjang; Li, Guo, Li, dan Meng (2024) mengusulkan metode *instance-based transfer learning* yang memungkinkan model yang telah dilatih pada satu jaringan jalan digunakan kembali secara adaptif untuk memprediksi kinerja perkerasan pada jaringan jalan lain dengan karakteristik yang berbeda. Sementara itu, pendekatan probabilistik berbasis rantai Markov hibrida yang dikembangkan Wasiq dan Golroo (2024) menunjukkan bahwa penggabungan model statistik klasik dengan teknik pembelajaran data-driven dapat meningkatkan keandalan prediksi pada konteks negara berkembang dengan data historis yang terbatas.

Tabel 8.5 Perbandingan Pendekatan Prediksi Kinerja Perkerasan Jalan

Pendekatan	Karakteristik	Keunggulan	Keterbatasan
Model Statistik Klasik (Markov)	Berbasis probabilitas transisi kondisi	Sederhana, mudah diinterpretasi	Kurang akurat untuk pola non-linear
<i>Random Forest / XGBoost</i>	Ansambel pohon keputusan	Akurasi tinggi, tahan terhadap <i>outlier</i>	Kurang optimal untuk data deret waktu panjang
<i>LSTM / Deep Learning</i>	Jaringan saraf tiruan berlapis	Mampu menangkap pola deret waktu kompleks	Membutuhkan data pelatihan besar dan daya komputasi tinggi
<i>Transfer Learning</i>	Memanfaatkan model terlatih dari domain lain	Efektif pada data terbatas/ruas jalan baru	Kinerja bergantung pada kemiripan domain sumber dan target

4. Tantangan Kualitas Data dan Interpretabilitas Model

Meskipun *machine learning* menawarkan kemampuan yang sangat baik dalam menganalisis kondisi infrastruktur dan memprediksi potensi kerusakan, keberhasilan penerapannya sangat bergantung pada kualitas data yang digunakan. Model pembelajaran mesin memerlukan data yang akurat, lengkap, konsisten, dan representatif agar mampu menghasilkan prediksi yang dapat dipercaya. Pada praktiknya, data infrastruktur sering kali berasal dari berbagai sumber, seperti sensor IoT, citra satelit, drone, kamera, maupun hasil inspeksi lapangan, yang memiliki format, tingkat akurasi, dan frekuensi pembaruan yang berbeda. Selain itu, data dapat mengandung kesalahan pengukuran, nilai yang hilang (*missing values*), duplikasi, atau gangguan (*noise*) akibat kerusakan sensor dan kondisi lingkungan. Apabila data tersebut tidak melalui proses pembersihan (*data cleaning*), validasi, dan standarisasi, performa model akan menurun sehingga prediksi yang dihasilkan berpotensi menyesatkan dan mengurangi efektivitas pengambilan keputusan.

Salah satu tantangan terbesar adalah keterbatasan data berlabel (*labeled data*) yang berkualitas tinggi, terutama untuk kejadian-kejadian yang bersifat langka tetapi memiliki dampak besar. Dalam pemantauan infrastruktur, kasus seperti keruntuhan jembatan, kegagalan bendungan, atau kerusakan struktural berat relatif jarang terjadi sehingga jumlah contoh yang tersedia jauh lebih sedikit dibandingkan data kondisi normal. Kondisi ini dikenal sebagai *imbalanced data*, yaitu ketidakseimbangan jumlah data antar kelas. Model *machine learning* cenderung belajar lebih baik dari kelas yang memiliki jumlah data lebih banyak, sehingga sering kali gagal mengenali kejadian yang sebenarnya paling penting untuk dideteksi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai pendekatan dapat diterapkan, seperti teknik *oversampling*, *undersampling*, pembangkitan data sintetis menggunakan *Synthetic Minority Over-sampling Technique* (SMOTE), pembelajaran berbasis anomali (*anomaly detection*), maupun pemanfaatan data simulasi dan *transfer learning* agar model tetap mampu mengenali pola kerusakan meskipun jumlah datanya terbatas.

Tantangan berikutnya berkaitan dengan interpretabilitas model, terutama pada penggunaan algoritma *deep learning* yang memiliki struktur sangat kompleks. Banyak model bekerja sebagai *black box*, yaitu mampu menghasilkan prediksi dengan tingkat akurasi tinggi, tetapi tidak dapat menjelaskan proses atau alasan di balik keputusan yang diambil. Kondisi ini menjadi persoalan penting dalam bidang rekayasa infrastruktur karena setiap keputusan, seperti penutupan jembatan, penggantian komponen, atau evakuasi suatu bangunan, harus dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, teknis, dan hukum. Insinyur, pengelola infrastruktur, maupun pembuat kebijakan memerlukan penjelasan mengenai faktor-faktor yang menyebabkan model menyimpulkan bahwa suatu aset berada dalam kondisi berisiko. Tanpa penjelasan yang memadai, tingkat kepercayaan terhadap sistem akan menurun dan hasil analisis akan sulit dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan yang berkaitan dengan keselamatan masyarakat.

Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian mengenai *Explainable Artificial Intelligence* (XAI) berkembang pesat sebagai upaya meningkatkan transparansi dan akuntabilitas model kecerdasan buatan. XAI menyediakan berbagai metode yang mampu menjelaskan kontribusi setiap variabel terhadap hasil prediksi, mengidentifikasi fitur yang paling berpengaruh, serta memperlihatkan proses pengambilan

keputusan model dalam bentuk yang lebih mudah dipahami oleh manusia. Pendekatan seperti *Local Interpretable Model-Agnostic Explanations* (LIME), *SHapley Additive exPlanations* (SHAP), *Grad-CAM*, maupun *attention mechanism* banyak digunakan untuk memberikan interpretasi terhadap model yang kompleks. Selain itu, penerapan tata kelola data (*data governance*), validasi model secara berkala, audit algoritma, serta kolaborasi antara ilmuwan data, insinyur, dan pembuat kebijakan menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa sistem *machine learning* tidak hanya memiliki tingkat akurasi yang tinggi, tetapi juga transparan, dapat diaudit, serta memenuhi aspek keselamatan, etika, dan regulasi dalam pengelolaan infrastruktur modern.

5. Studi Kasus: Deteksi Retak Beton Berbasis *Convolutional Neural Network*

Deteksi retak beton merupakan salah satu aplikasi *machine learning* yang paling banyak dikaji dalam literatur teknik sipil karena ketersediaan data citra yang relatif melimpah dan kebutuhan praktis yang tinggi di lapangan. Secara umum, alur kerja deteksi retak berbasis *Convolutional Neural Network* dimulai dari akuisisi citra permukaan struktur menggunakan kamera resolusi tinggi atau drone, dilanjutkan dengan anotasi manual pada sebagian data untuk membentuk data latih berlabel, pelatihan model klasifikasi atau segmentasi citra, dan validasi model pada data uji yang terpisah dari data latih. Berbagai varian arsitektur *Convolutional Neural Network*, mulai dari model klasifikasi sederhana hingga arsitektur segmentasi semantik yang lebih kompleks telah diujicobakan dengan tingkat keberhasilan yang bervariasi tergantung kualitas data citra dan kompleksitas pola kerusakan yang ingin dideteksi (Malekloo *et al.*, 2022).

Tabel 8.6 Perbandingan Kualitatif Pendekatan Deteksi Kerusakan Visual pada Struktur Sipil

Pendekatan	Kebutuhan Data Latih	Kompleksitas Komputasi	Kesesuaian Kondisi Lapangan
Inspeksi visual manual	Tidak memerlukan data latih	Rendah	Bergantung pengalaman inspektur, berisiko pada area sulit dijangkau
Pemrosesan citra klasik (<i>image processing</i>)	Rendah–sedang	Rendah–sedang	Sensitif terhadap variasi pencahayaan dan tekstur permukaan
CNN klasifikasi	Sedang–tinggi (citra berlabel)	Sedang	Baik untuk klasifikasi ada/tidaknya retak pada segmen citra
CNN segmentasi semantik	Tinggi (anotasi piksel per piksel)	Tinggi	Mampu memetakan pola dan luasan retak secara presisi

C. *Artificial Intelligence* untuk Prediksi Kinerja Infrastruktur

Jika sub-bab sebelumnya berfokus pada *machine learning* sebagai teknik analisis data, sub-bab ini membahas penerapan *artificial intelligence* (AI) secara lebih luas dalam konteks prediksi kinerja infrastruktur, mencakup pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*), deteksi kerusakan berbasis visi komputer, serta integrasinya dengan *digital twin* untuk menciptakan sistem infrastruktur yang memprediksi kebutuhan pemeliharaannya sendiri secara proaktif.

1. Dari Pemeliharaan Reaktif menuju *Predictive Maintenance*

Secara historis, strategi pemeliharaan infrastruktur berkembang melalui tiga generasi. Generasi pertama adalah pemeliharaan reaktif (*reactive maintenance*), yaitu perbaikan dilakukan hanya setelah kegagalan terjadi. Generasi kedua adalah pemeliharaan preventif berbasis jadwal tetap (*time-based maintenance*), yang dilakukan pada interval waktu tertentu tanpa mempertimbangkan kondisi aktual komponen. Generasi ketiga, yang menjadi fokus bab ini, adalah pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) berbasis AI, yang memanfaatkan data kondisi aktual dan model prediktif untuk menentukan waktu intervensi yang paling optimal, cukup awal untuk mencegah kegagalan, namun cukup lambat untuk menghindari pemborosan sumber daya akibat penggantian komponen yang sebenarnya masih layak pakai (Ucar, Karakose, & Kırımça, 2024).

Transisi menuju *predictive maintenance* berbasis AI menghasilkan manfaat signifikan yang telah didokumentasikan pada berbagai sektor infrastruktur kritis, termasuk peningkatan efisiensi inspeksi, penurunan risiko kegagalan tak terduga, serta perpanjangan usia layan aset. Sebagai ilustrasi, laporan industri menunjukkan bahwa transisi dari pemeliharaan preventif berbasis jadwal menuju pemeliharaan prediktif berbasis AI pada sektor transportasi dapat meningkatkan produktivitas teknisi hingga puluhan persen serta meningkatkan akurasi inspeksi aset secara substansial.

Tabel 8.7 Evolusi Strategi Pemeliharaan Infrastruktur

Generasi	Strategi	Dasar Keputusan	Kelemahan Utama
Generasi 1	<i>Reactive Maintenance</i>	Perbaikan setelah kerusakan/kegagalan terjadi	Biaya darurat tinggi, risiko keselamatan
Generasi 2	<i>Preventive / Time-Based Maintenance</i>	Jadwal tetap berdasarkan waktu atau umur pakai	Boros sumber daya, tidak mempertimbangkan kondisi aktual
Generasi 3	<i>Predictive Maintenance</i> berbasis AI	Kondisi aktual dan prediksi	Membutuhkan investasi data &

Generasi	Strategi	Dasar Keputusan	Kelemahan Utama
		model data-driven	infrastruktur analitik
Generasi 4 (berkembang)	<i>Prescriptive Maintenance</i>	Rekomendasi tindakan optimal otomatis dari model AI	Kematangan teknologi dan tata kelola masih berkembang

2. Deep Learning dan Computer Vision untuk Deteksi Kerusakan

Penggunaan *deep learning*, khususnya *Convolutional Neural Network* (CNN), telah memungkinkan otomatisasi analisis data visual yang diambil dari drone, kamera tetap, maupun perangkat pemindaian jarak jauh lainnya. Kerusakan permukaan seperti retak, korosi, dan pengelupasan dapat dideteksi dengan tingkat presisi tinggi tanpa memerlukan inspeksi manual yang memakan waktu dan berisiko bagi inspektur, terutama pada elemen struktur yang sulit dijangkau seperti bagian bawah jembatan atau menara transmisi (Spencer, Hoskere, & Narazaki, 2019). Perkembangan lanjutan menggabungkan AI dengan teknologi fotogrametri dan *LiDAR* sehingga model kerusakan tidak hanya bersifat dua dimensi, tetapi juga terintegrasi dalam representasi tiga dimensi yang presisi.

Selain deteksi kerusakan permukaan, AI berbasis deret waktu (*time-series*) turut digunakan untuk memantau parameter modal struktur (frekuensi natural, redaman) secara berkelanjutan, memungkinkan deteksi anomali dini sebelum kerusakan menjadi tampak secara visual. Kombinasi antara pemantauan berbasis getaran (*vibration-based*) dan pemantauan berbasis visi (*vision-based*) menghasilkan sistem pemantauan yang lebih komprehensif, karena masing-masing pendekatan memiliki kepekaan yang berbeda terhadap jenis dan lokasi kerusakan tertentu.

3. Integrasi AI dengan Digital Twin

Digital twin infrastruktur merupakan representasi virtual dinamis dari aset fisik yang diperbarui secara terus-menerus melalui aliran data sensor, dan menjadi wadah alami bagi integrasi model AI prediktif. Jiang, Ding, Song, Geng, dan Wang (2023) mengusulkan kerangka kerja

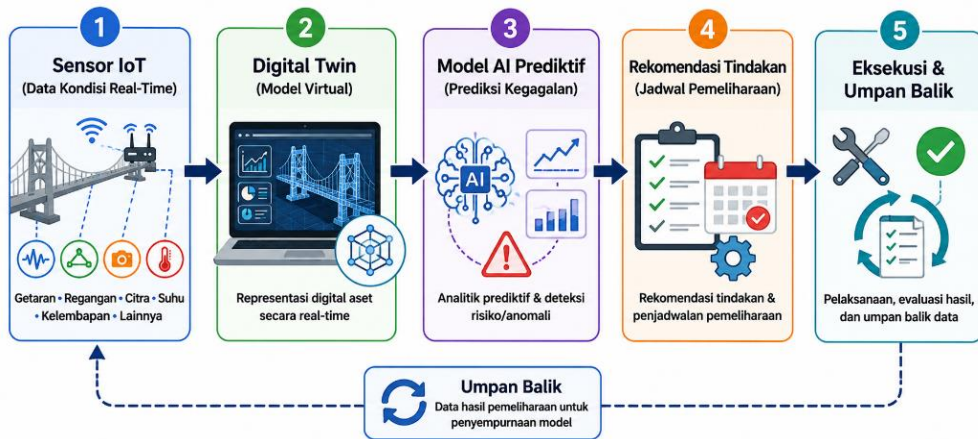
digital twin untuk manajemen siklus hidup kelelahan (*fatigue*) jembatan baja, yang memungkinkan simulasi prediktif terhadap akumulasi kerusakan kelelahan berdasarkan data pemantauan aktual, sehingga jadwal inspeksi dan pemeliharaan dapat disesuaikan secara dinamis alih-alih mengikuti interval tetap yang telah ditentukan sejak tahap desain.

Integrasi ini menciptakan sebuah lingkaran umpan balik tertutup (*closed-loop feedback*): sensor IoT mengirim data kondisi terkini ke *digital twin*, model AI di dalam *digital twin* memproses data tersebut untuk memprediksi perilaku struktur pada masa mendatang, hasil prediksi digunakan untuk merekomendasikan tindakan pemeliharaan, dan hasil tindakan tersebut pada gilirannya memperbarui kembali model *digital twin*. Siklus inilah yang menjadi inti dari konsep infrastruktur cerdas yang mampu "belajar" dari pengalaman operasionalnya sendiri.

Ilustrasi Penerapan Digital Twin pada Manajemen Kelelahan Jembatan Baja

Jiang, Ding, Song, Geng, dan Wang (2023) menggambarkan bagaimana kerangka *digital twin* untuk jembatan baja bekerja dalam praktik: data regangan dari sensor yang terpasang pada elemen kritis jembatan dikumpulkan secara kontinu, kemudian digunakan untuk memperbarui model akumulasi kerusakan kelelahan (*fatigue damage accumulation*) di dalam *digital twin* secara berkala. Alih-alih menjadwalkan inspeksi mendetail pada interval waktu tetap sebagaimana praktik konvensional, jadwal inspeksi disesuaikan secara dinamis berdasarkan estimasi sisa umur kelelahan (*remaining fatigue life*) yang dihasilkan model. Pendekatan ini berpotensi mengalihkan sumber daya inspeksi ke elemen struktur yang benar-benar membutuhkan perhatian lebih awal, sekaligus menghindari inspeksi berlebihan pada elemen yang kondisinya masih jauh dari ambang batas kritis.

Gambar 8.3 Lingkaran Umpan Balik *Predictive Maintenance* Berbasis AI dan *Digital Twin*



4. Studi Kasus Penerapan AI pada Berbagai Tipe Infrastruktur

Penerapan AI untuk prediksi kinerja infrastruktur telah meluas ke berbagai tipologi aset. Pada infrastruktur bendungan, model *deep transfer learning* digunakan untuk memprediksi deformasi struktur beton pada kondisi data historis yang terbatas, sebuah tantangan umum pada bendungan-bendungan tua yang instrumentasinya belum lengkap (Chen *et al.*, 2023). Pada jaringan jalan raya, model AI digunakan tidak hanya untuk memprediksi kondisi perkerasan tetapi juga untuk mengoptimalkan strategi intervensi dalam kerangka manajemen aset jaringan secara keseluruhan (Zhao & Wang, 2023). Sementara itu, pada sektor energi dan utilitas, integrasi *Industrial Internet of Things* (IIoT) dengan model prediktif memungkinkan deteksi dini potensi gangguan pada gardu listrik dan jaringan distribusi sebelum menyebabkan pemadaman skala luas.

Kajian sistematis mengenai penerapan pembelajaran transfer pada pemeliharaan prediktif di era Industri 4.0 oleh Azari, Flammini, Santini, dan Caporusio (2023) mengonfirmasi bahwa pendekatan *transfer learning* menjadi semakin relevan bagi sektor infrastruktur karena memungkinkan model prediktif yang telah terbukti efektif pada satu aset diadaptasi ke aset serupa dengan biaya pelatihan data yang jauh lebih rendah, sebuah keunggulan penting mengingat keterbatasan data historis berkualitas tinggi pada banyak aset infrastruktur di negara berkembang.

***Explainable AI* dalam Konteks Keselamatan Infrastruktur**

Karena keputusan pemeliharaan infrastruktur menyangkut keselamatan publik, model AI yang digunakan idealnya tidak hanya akurat tetapi juga dapat dijelaskan (*explainable*). Dereci dan Tuzkaya (2024) mengusulkan model AI yang dapat dijelaskan (*explainable AI*) untuk pemeliharaan prediktif dan optimasi suku cadang, yang memungkinkan insinyur memahami faktor-faktor apa yang mendorong suatu prediksi kegagalan, bukan sekadar menerima keluaran model sebagai kotak hitam. Pendekatan ini penting untuk membangun kepercayaan (*trust*) antara insinyur, manajemen, dan regulator terhadap rekomendasi yang dihasilkan sistem AI.

5. AI untuk Manajemen Energi dan Jaringan Utilitas Cerdas

Selain pada infrastruktur transportasi dan bangunan, penerapan AI juga berkembang pesat pada pengelolaan infrastruktur energi dan utilitas, khususnya melalui konsep *smart grid*. *Industrial Internet of Things* (IIoT) menjadi tulang punggung infrastruktur pemantauan yang mendukung deteksi dini kegagalan peralatan pada gardu induk dan jaringan distribusi listrik melalui pengumpulan data kondisi secara kontinu dari sensor yang terpasang pada aset kritis. Model prediktif berbasis AI memungkinkan operator jaringan memperkirakan potensi gangguan pasokan akibat degradasi peralatan sebelum terjadi pemadaman skala luas, sehingga jadwal pemeliharaan dapat disesuaikan secara proaktif berdasarkan kondisi aktual masing-masing komponen jaringan alih-alih interval waktu tetap.

Pada infrastruktur air minum dan air limbah, pendekatan serupa diterapkan untuk memantau tekanan pipa, kualitas air, dan performa pompa secara *real-time*, dengan model AI digunakan untuk memprediksi potensi kebocoran pipa berdasarkan pola anomali tekanan yang terdeteksi sensor. Penerapan lintas sektor ini menegaskan bahwa kerangka *predictive maintenance* berbasis AI bersifat generik dan dapat diadaptasi pada berbagai tipologi infrastruktur jaringan, selama tersedia instrumentasi sensor yang memadai dan data historis yang cukup untuk melatih model prediktif.

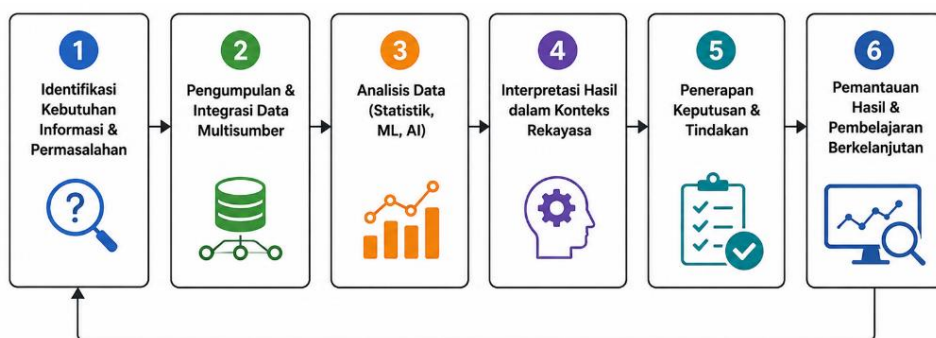
D. Pengambilan Keputusan Berbasis Data

Keberhasilan penerapan *big data* dan *artificial intelligence* pada akhirnya diukur dari sejauh mana keduanya mampu meningkatkan kualitas pengambilan keputusan rekayasa dan manajerial. Sub-bab ini membahas kerangka *data-driven decision making* (DDDM), peran sistem pendukung keputusan (*Decision Support System/DSS*), integrasi menyeluruh antara BIM, IoT, *big data*, dan AI dalam siklus hidup infrastruktur, serta isu tata kelola dan etika data yang menyertainya.

1. Kerangka *Data-Driven Decision Making* (DDDM)

Data-driven decision making adalah pendekatan pengambilan keputusan yang mendasarkan pilihan tindakan pada analisis data empiris, bukan semata-mata pada intuisi atau pengalaman subjektif pengambil keputusan. Dalam konteks infrastruktur, kerangka DDDM umumnya melibatkan beberapa tahap berurutan: identifikasi kebutuhan informasi, pengumpulan dan integrasi data dari berbagai sumber, analisis data menggunakan teknik statistik maupun *machine learning*, interpretasi hasil analisis dalam konteks rekayasa, dan akhirnya penerapan keputusan yang disertai pemantauan hasil untuk pembelajaran berkelanjutan (Zabala-Vargas *et al.*, 2023).

Gambar 8.4 Siklus *Data-Driven Decision Making* pada Manajemen Infrastruktur



Penting untuk dicatat bahwa DDDM bukan berarti menghilangkan sepenuhnya peran penilaian rekayasa (*engineering judgment*). Model data-driven menyediakan bukti kuantitatif yang memperkaya proses pengambilan keputusan, namun interpretasi akhir

tetap memerlukan pertimbangan konteks lokal, regulasi, dan pengalaman praktisi yang tidak selalu dapat direpresentasikan secara penuh dalam data historis. Pendekatan yang paling efektif menggabungkan kekuatan analitik data dengan keahlian domain insinyur sipil secara komplementer.

2. Sistem Pendukung Keputusan (*Decision Support System*) Infrastruktur

Decision Support System (DSS) infrastruktur adalah platform perangkat lunak yang mengintegrasikan data, model analitik, dan antarmuka visualisasi untuk membantu pengambil keputusan mengevaluasi berbagai skenario dan alternatif tindakan. DSS modern pada sektor infrastruktur umumnya menggabungkan dasbor (*dashboard*) interaktif yang menampilkan indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators/KPI*) aset, modul simulasi skenario "bagaimana-jika" (*what-if analysis*), serta modul optimasi yang merekomendasikan alokasi anggaran pemeliharaan optimal di antara ratusan atau ribuan segmen aset yang bersaing untuk mendapatkan sumber daya terbatas.

Tabel 8.8 Komponen Utama Sistem Pendukung Keputusan (DSS) Infrastruktur

Komponen	Fungsi	Contoh Teknologi
Basis Data Terintegrasi	Menyimpan dan mengelola data multisumber secara terpusat	<i>Data warehouse, data lake</i> , basis data relasional dan spasial
Mesin Analitik	Menjalankan model statistik, ML, dan optimasi	Python/R, <i>Apache Spark</i> , kerangka <i>deep learning</i>
Modul Simulasi Skenario	Mengevaluasi dampak berbagai alternatif kebijakan pemeliharaan	Model simulasi Monte Carlo, model optimasi program dinamis
Antarmuka Visualisasi	Menyajikan hasil analisis secara intuitif bagi pengambil keputusan	Dasbor <i>Business Intelligence</i> (BI), GIS interaktif

3. Integrasi BIM, IoT, *Big Data*, dan AI dalam Siklus Hidup Infrastruktur

Perkembangan teknologi digital telah mendorong lahirnya pendekatan yang lebih terintegrasi dalam pengelolaan infrastruktur melalui pemanfaatan *Building Information Modeling* (BIM), *Internet of Things* (IoT), *Big Data*, dan *Artificial Intelligence* (AI). Keempat teknologi tersebut saling melengkapi dan membentuk suatu ekosistem digital yang mendukung seluruh siklus hidup infrastruktur, mulai dari tahap perencanaan, perancangan, konstruksi, operasi, pemeliharaan, hingga rehabilitasi atau pembongkaran. BIM berfungsi sebagai representasi digital dari aset fisik yang menyimpan seluruh informasi mengenai desain, material, spesifikasi teknis, biaya, dan jadwal pekerjaan. IoT menyediakan data kondisi lapangan secara real-time melalui berbagai sensor yang dipasang pada infrastruktur. *Big Data* memungkinkan penyimpanan dan pengelolaan data dalam jumlah sangat besar dari berbagai sumber, sedangkan AI menganalisis data tersebut untuk menghasilkan prediksi, rekomendasi, maupun keputusan otomatis. Integrasi keempat teknologi ini memungkinkan pengelolaan infrastruktur menjadi lebih efisien, akurat, kolaboratif, dan berbasis data.

Pada tahap perencanaan dan perancangan, BIM menjadi platform utama yang mengintegrasikan seluruh informasi proyek dalam satu model digital tiga dimensi yang dapat diakses oleh berbagai pemangku kepentingan, seperti arsitek, insinyur, kontraktor, dan pemilik proyek. Model BIM tidak hanya menampilkan bentuk fisik bangunan atau infrastruktur, tetapi juga memuat informasi mengenai dimensi, kapasitas, material, estimasi biaya, jadwal pembangunan, hingga analisis kinerja struktur. Integrasi dengan AI memungkinkan dilakukan simulasi berbagai skenario desain untuk memperoleh alternatif yang paling efisien dari sisi biaya, konsumsi energi, maupun dampak lingkungan. Sementara itu, analisis *Big Data* yang memanfaatkan data historis proyek, kondisi geografis, lalu lintas, iklim, serta karakteristik tanah dapat membantu meningkatkan akurasi perencanaan dan mengurangi potensi kesalahan desain sebelum konstruksi dimulai.

Pada tahap konstruksi dan operasional, IoT berperan sebagai sumber utama data lapangan melalui sensor yang dipasang pada alat berat, struktur bangunan, jaringan utilitas, maupun lingkungan sekitar proyek. Sensor tersebut mengukur berbagai parameter, seperti suhu, kelembapan, getaran, deformasi struktur, konsumsi energi, tekanan,

kualitas udara, dan tingkat kebisingan secara berkelanjutan. Data yang dihasilkan kemudian dikirim melalui jaringan komunikasi menuju platform *Big Data* untuk disimpan dan diproses dalam waktu nyata. Selanjutnya, AI menganalisis data tersebut guna mendeteksi penyimpangan, memprediksi potensi kegagalan sistem, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, serta memberikan rekomendasi tindakan secara otomatis. Integrasi ini memungkinkan konsep *digital twin*, yaitu representasi virtual yang selalu diperbarui berdasarkan kondisi aktual aset fisik sehingga pengelola dapat memantau kinerja infrastruktur secara real-time dan melakukan simulasi berbagai skenario tanpa mengganggu operasi di lapangan.

Pada tahap operasi, pemeliharaan, hingga akhir siklus hidup infrastruktur, integrasi BIM, IoT, *Big Data*, dan AI memberikan manfaat yang semakin besar dalam mendukung pengambilan keputusan yang proaktif. Data historis dan data real-time dianalisis untuk menerapkan *predictive maintenance*, yaitu pemeliharaan berdasarkan prediksi kondisi peralatan sebelum terjadi kerusakan. Pendekatan ini membantu mengurangi biaya perawatan, memperpanjang umur layanan aset, meminimalkan waktu henti (*downtime*), serta meningkatkan keselamatan operasional. Selain itu, informasi yang tersimpan dalam model BIM dapat diperbarui secara berkala sesuai kondisi aktual sehingga seluruh riwayat inspeksi, perbaikan, penggantian komponen, dan evaluasi kinerja terdokumentasi dengan baik. Ketika infrastruktur memasuki tahap rehabilitasi atau pembongkaran, data tersebut tetap dapat dimanfaatkan untuk mendukung perencanaan renovasi, pengelolaan limbah konstruksi, maupun penggunaan kembali material yang masih layak. Dengan demikian, integrasi BIM, IoT, *Big Data*, dan AI membentuk sistem pengelolaan infrastruktur yang cerdas, adaptif, efisien, serta mendukung pembangunan yang berkelanjutan sepanjang siklus hidup asset (Zabala-Vargas *et al.*, 2023; Hakimi *et al.*, 2023).

Tabel 8.9 Peran Komplementer BIM, IoT, *Big Data*, dan AI dalam Siklus Hidup Infrastruktur

Teknologi	Peran Utama	Kontribusi terhadap Pengambilan Keputusan
BIM	Representasi digital geometris dan semantik aset	Menyediakan konteks dan struktur data acuan (<i>single source of truth</i>)
IoT	Akuisisi data kondisi secara real-time	Menyediakan bukti kondisi aktual untuk validasi asumsi desain
<i>Big Data Platform</i>	Penyimpanan dan pemrosesan data berskala besar	Memungkinkan analisis historis dan lintas-aset secara efisien
<i>Artificial Intelligence</i>	Pemodelan prediktif dan rekomendasi tindakan	Menghasilkan wawasan prediktif yang mendukung keputusan proaktif

4. Tata Kelola, Etika, dan Keamanan Data Infrastruktur

Pengambilan keputusan berbasis data pada infrastruktur kritis tidak dapat dilepaskan dari tanggung jawab tata kelola data (*data governance*) yang kuat. Setidaknya terdapat empat isu utama yang perlu diperhatikan. Pertama, kepemilikan dan akses data (*data ownership*) terutama pada proyek kemitraan pemerintah-swasta, perlu ada kejelasan mengenai pihak yang berhak mengakses, memodifikasi, dan memanfaatkan data operasional aset. Kedua, keamanan siber (*cybersecurity*), karena sistem SCADA dan IoT pada infrastruktur kritis merupakan target potensial serangan siber yang dapat berdampak pada keselamatan publik secara langsung.

Ketiga, bias algoritmik (*algorithmic bias*) model prediktif yang dilatih pada data historis dari wilayah atau tipe aset tertentu berisiko menghasilkan prediksi yang kurang akurat ketika diterapkan pada konteks yang berbeda, misalnya model prediksi kerusakan jalan yang dilatih pada iklim tropis lembap mungkin tidak sepenuhnya sesuai untuk diterapkan di wilayah kering tanpa penyesuaian. Keempat, akuntabilitas

keputusan (*accountability*) ketika rekomendasi AI menjadi dasar keputusan pemeliharaan yang berdampak besar, perlu ada kejelasan tanggung jawab profesional insinyur yang pada akhirnya menyetujui atau menolak rekomendasi tersebut, sejalan dengan semangat *explainable AI* (Dereci & Tuzkaya, 2024).

Prinsip Tata Kelola Data yang Bertanggung Jawab pada Infrastruktur Cerdas

1. **Transparansi:** Metodologi dan sumber data yang mendasari rekomendasi AI harus dapat ditelusuri dan didokumentasikan.
2. **Akuntabilitas:** Keputusan akhir tetap berada pada insinyur profesional bersertifikat, bukan sepenuhnya diserahkan pada sistem otomatis.
3. **Keamanan berlapis:** Penerapan enkripsi data, segmentasi jaringan, dan audit keamanan siber berkala pada sistem SCADA/IoT infrastruktur kritis.
4. **Keadilan algoritmik:** Validasi model pada berbagai konteks geografis dan tipe aset untuk mencegah bias sistemik.
5. **Keberlanjutan data:** Perencanaan jangka panjang untuk pemeliharaan kualitas, format, dan aksesibilitas data melampaui masa proyek maupun masa jabatan pengelola tertentu.

5. Kompetensi Baru Insinyur Sipil di Era *Big Data* dan AI

Transformasi menuju infrastruktur berbasis data menuntut pergeseran kompetensi profesi insinyur sipil. Selain penguasaan prinsip rekayasa struktural, geoteknik, dan hidrolika secara mendalam, insinyur sipil masa depan dituntut memiliki literasi data (*data literacy*) yang memadai, kemampuan membaca, menginterpretasi, dan mengomunikasikan hasil analisis data secara kritis, meskipun tidak harus menjadi ahli pemrograman atau ilmuwan data secara penuh. Kajian tinjauan pustaka pada industri konstruksi menegaskan bahwa kesenjangan kompetensi ini menjadi salah satu penghambat utama keberhasilan transformasi digital, sehingga investasi pada pengembangan kapasitas sumber daya manusia perlu berjalan seiring dengan investasi pada infrastruktur teknologi itu sendiri (Atuahene *et al.*, 2022; Zabala-Vargas *et al.*, 2023).

- a. Kemampuan berpikir kritis terhadap keluaran model prediktif, termasuk mengenali potensi bias dan keterbatasan data yang mendasarinya.
- b. Pemahaman dasar mengenai prinsip kerja *machine learning* dan *artificial intelligence*, tanpa harus menguasai detail implementasi algoritma secara teknis.
- c. Kemampuan berkolaborasi lintas disiplin dengan ilmuwan data (*data scientist*) dan insinyur perangkat lunak dalam merancang solusi analitik yang relevan secara rekayasa.
- d. Kesadaran etika dan tata kelola data, khususnya terkait tanggung jawab profesional ketika keputusan rekayasa didukung oleh rekomendasi sistem otomatis.



BAB IX

SMART TRANSPORTATION DAN INFRASTRUKTUR MOBILITAS

Sektor transportasi merupakan salah satu domain yang paling nyata merasakan dampak transformasi digital dalam dua dekade terakhir. Jika bab-bab sebelumnya membahas bagaimana *Building Information Modeling* (BIM), *Internet of Things* (IoT), *big data*, dan *artificial intelligence* (AI) diterapkan secara umum pada infrastruktur sipil, bab ini memfokuskan pembahasan pada penerapan teknologi-teknologi tersebut secara spesifik pada infrastruktur transportasi dan mobilitas perkotaan. Kemacetan lalu lintas, tingginya angka kecelakaan, emisi gas rumah kaca dari sektor transportasi, serta tuntutan mobilitas yang lebih inklusif dan berkelanjutan menjadi pendorong utama transformasi menuju apa yang secara luas dikenal sebagai *smart transportation*.

Intelligent Transportation System (ITS) menjadi kerangka payung yang mengintegrasikan teknologi informasi, elektronika, dan telekomunikasi ke dalam pengelolaan sistem transportasi jalan, sehingga layanan transportasi dapat diselenggarakan secara lebih efektif, aman, dan efisien. Di tingkat global, penelitian menunjukkan konvergensi antara AI, IoT, dan analitik prediktif telah mengubah secara mendasar cara sistem kendali lalu lintas beradaptasi dilaksanakan, memungkinkan pengambilan keputusan waktu nyata yang meningkatkan efisiensi dan keselamatan jaringan jalan (Gheorghe & Soica, 2025). Di Indonesia, urgensi ini turut ditegaskan pemerintah melalui penerbitan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 76 Tahun 2021 tentang Sistem Manajemen Transportasi Cerdas di Bidang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan, yang menjadi payung hukum bagi pengembangan sistem transportasi cerdas secara nasional.

A. Sistem Transportasi Cerdas (*Intelligent Transportation System*)

Intelligent Transportation System (ITS) merujuk pada penerapan teknologi informasi, komunikasi, dan elektronika pada sistem transportasi untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan kenyamanan pengguna jalan. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang bersifat statis, misalnya rambu lalu lintas tetap atau lampu sinyal dengan durasi tetap, ITS memungkinkan sistem transportasi merespons kondisi lalu lintas secara dinamis berdasarkan data yang dikumpulkan secara berkelanjutan dari berbagai sumber di lapangan.

1. Definisi dan Komponen Utama ITS

ITS terdiri atas beberapa subsistem yang saling terintegrasi. *Advanced Traffic Management System* (ATMS) berfungsi mengelola arus lalu lintas melalui kendali sinyal adaptif dan sistem pemantauan kondisi jalan secara *real-time*. *Advanced Traveler Information System* (ATIS) menyediakan informasi kondisi lalu lintas, rute alternatif, dan estimasi waktu tempuh bagi pengguna jalan melalui aplikasi seluler maupun papan informasi elektronik. *Advanced Public Transportation System* (APTS) mendukung pengelolaan angkutan umum, termasuk pelacakan posisi kendaraan secara *real-time* dan informasi jadwal kedatangan bagi penumpang. Sementara itu, *Advanced Vehicle Control System* (AVCS) mencakup teknologi bantuan pengemudi hingga sistem kendali otonom penuh (Olugbade, Ojo, Imoize, Isabona, & Alaba, 2022).

Tabel 9.1 Subsistem Utama *Intelligent Transportation System* (ITS)

Subsistem	Kepanjangan	Fungsi Utama	Contoh Penerapan
ATMS	<i>Advanced Traffic Management System</i>	Pengelolaan arus lalu lintas dan kendali sinyal	Kendali lampu lalu lintas adaptif, kamera CCTV pemantau jalan
ATIS	<i>Advanced Traveler Information System</i>	Penyediaan informasi lalu lintas bagi pengguna jalan	Aplikasi navigasi, papan informasi elektronik (<i>Variable Message Sign</i>)

Subsistem	Kepanjangan	Fungsi Utama	Contoh Penerapan
APTS	<i>Advanced Public Transportation System</i>	Pengelolaan operasional angkutan umum	Pelacakan GPS bus, aplikasi "Teman Bus", sistem tiket elektronik
AVCS	<i>Advanced Vehicle Control System</i>	Bantuan dan otomatisasi kendali kendaraan	<i>Adaptive Cruise Control</i> , sistem pengereman darurat otomatis
ATSC	<i>Advanced Traffic Signal Control</i>	Optimasi waktu sinyal berbasis kondisi lalu lintas aktual	Sinyal lalu lintas berbasis <i>reinforcement learning</i>

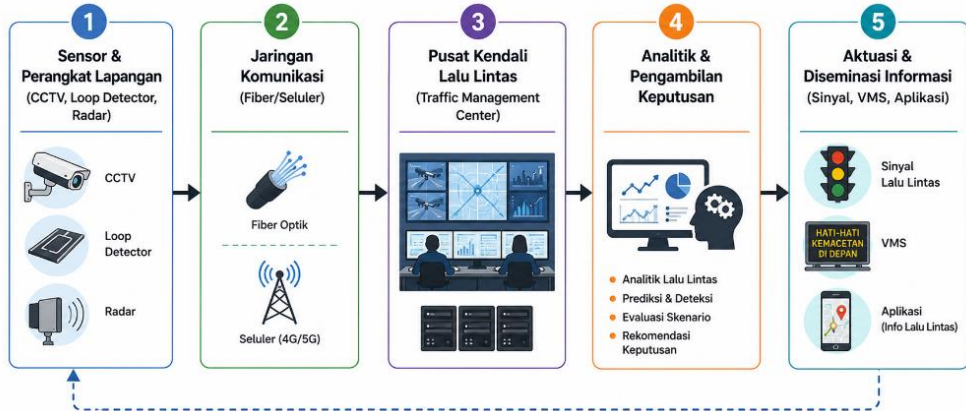
2. Arsitektur dan Alur Data ITS

Secara arsitektural, ITS bekerja melalui alur data yang berulang: pengumpulan data dari sensor dan perangkat lapangan, transmisi data ke pusat kendali, pengolahan data untuk menghasilkan keputusan operasional, dan penyampaian instruksi atau informasi kembali ke lapangan maupun pengguna jalan. Pusat kendali ITS (*Traffic Management Center/TMC*) berperan sebagai simpul utama yang mengintegrasikan data dari berbagai sumber seperti kamera CCTV, sensor induktif pada perkerasan, radar gelombang mikro, serta data posisi kendaraan angkutan umum, untuk menghasilkan gambaran kondisi lalu lintas secara menyeluruh dan waktu nyata.

Keandalan operasional TMC bergantung pada tiga lapisan pendukung yang harus berfungsi secara bersamaan: lapisan perangkat lapangan yang harus terpelihara dan terkalibrasi dengan baik, lapisan jaringan komunikasi yang harus memiliki redundansi memadai agar tidak terjadi kehilangan data ketika salah satu jalur komunikasi mengalami gangguan, serta lapisan perangkat lunak analitik yang harus mampu memproses volume data yang terus bertambah seiring bertambahnya jumlah sensor yang terpasang dari waktu ke waktu. Kegagalan pada salah satu lapisan ini dapat menurunkan keandalan

keseluruhan sistem ITS, sehingga perencanaan pemeliharaan yang menyeluruh terhadap ketiga lapisan tersebut menjadi kunci keberlangsungan operasional jangka panjang.

Gambar 9.1 Arsitektur Alur Data *Intelligent Transportation System*



3. Perkembangan ITS di Indonesia: Kebijakan dan Implementasi

Pemerintah Indonesia menegaskan komitmennya terhadap pengembangan transportasi cerdas melalui penerbitan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 76 Tahun 2021 tentang Sistem Manajemen Transportasi Cerdas di Bidang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (Permenhub No. PM 76 Tahun 2021). Regulasi ini menetapkan bahwa Sistem Manajemen Transportasi Cerdas (SMTC) berfungsi sebagai alat pengawasan, deteksi, komunikasi, serta pengumpulan dan pengolahan data untuk perencanaan dan pengaturan sistem transportasi, sekaligus sebagai sarana penyampaian informasi bagi pengguna jalan secara *real-time*. Penerapan SMTC di Indonesia telah dimulai lebih awal di DKI Jakarta melalui *Masterplan* ITS DKI Jakarta sejak tahun 2012, yang kemudian diperluas cakupannya melalui Rencana Induk ITS Jabodetabek pada tahun 2019 untuk mengoordinasikan sistem transportasi cerdas lintas wilayah metropolitan.

Salah satu wujud nyata penerapan ITS pada infrastruktur jalan tol nasional adalah sistem transaksi tol nirsentuh *Multi Lane Free Flow* (MLFF), yang landasan hukumnya diperkuat melalui Peraturan Pemerintah Nomor 23 Tahun 2024 tentang Jalan Tol (PP No. 23 Tahun 2024). Sistem MLFF memungkinkan kendaraan melintasi gerbang tol tanpa harus berhenti untuk melakukan transaksi, karena proses pembayaran dilakukan secara otomatis melalui teknologi penentuan

posisi kendaraan dan pemrosesan data secara *real-time*, sehingga antrean di gerbang tol yang selama ini menjadi salah satu sumber utama kemacetan dapat dihilangkan secara signifikan.

Dibandingkan dengan praktik internasional, penerapan ITS di Indonesia berada pada tahapan yang terus berkembang mengikuti pengalaman kota-kota besar dunia yang telah lebih dahulu mengadopsi kebijakan serupa. Sebagai ilustrasi, konsep pengendalian kemacetan melalui skema tarif jalan elektronik (*congestion pricing*) telah diterapkan di sejumlah kota metropolitan dunia sejak akhir abad ke-20 sebagai instrumen manajemen permintaan lalu lintas, sementara pengembangan sistem kendali sinyal adaptif berskala kota telah menjadi praktik umum pada banyak ibu kota negara maju. Pembelajaran dari pengalaman internasional semacam ini dapat diadaptasi secara selektif oleh kota-kota di Indonesia dengan mempertimbangkan karakteristik lalu lintas, pola permukiman, dan kapasitas kelembagaan yang berbeda-beda antarwilayah, alih-alih diterapkan secara langsung tanpa penyesuaian konteks lokal.

4. Manfaat dan Tantangan Implementasi ITS

Penerapan ITS memberikan manfaat multidimensi yang saling terkait: peningkatan efisiensi arus lalu lintas melalui pengurangan waktu tempuh dan antrean, peningkatan keselamatan melalui deteksi dini potensi bahaya dan respons insiden yang lebih cepat, pengurangan emisi gas rumah kaca akibat berkurangnya waktu kendaraan dalam kondisi idle di kemacetan, serta peningkatan kualitas layanan angkutan umum melalui informasi yang lebih transparan bagi penumpang (Osterwisch, Rinchi, Alsharoa, Ghazzai, & Massoud, 2024).

Namun demikian, implementasi ITS juga menghadapi tantangan signifikan. Pertama, kebutuhan investasi infrastruktur komunikasi yang andal seperti konektivitas serat optik atau jaringan seluler generasi terbaru yang tidak merata ketersediaannya antarwilayah, terutama antara kawasan perkotaan besar dan daerah dengan keterbatasan infrastruktur telekomunikasi. Kedua, kebutuhan koordinasi lintas instansi yang kompleks, mengingat pengelolaan jalan, angkutan umum, dan penegakan hukum lalu lintas sering kali berada di bawah kewenangan instansi yang berbeda-beda. Ketiga, resistensi kelembagaan terhadap perubahan pola kerja konvensional menuju pengelolaan berbasis data

memerlukan waktu adaptasi dan pengembangan kapasitas sumber daya manusia yang tidak sebentar.

Ilustrasi: *Multi Lane Free Flow (MLFF)* pada Jalan Tol Indonesia

Sistem MLFF menggantikan mekanisme transaksi tol konvensional yang mengharuskan kendaraan berhenti di gerbang tol untuk melakukan pembayaran tunai maupun nontunai berbasis kartu. Dengan MLFF, posisi kendaraan dideteksi menggunakan teknologi penentuan lokasi yang terintegrasi dengan aplikasi pada perangkat *on-board unit*, sementara proses pemotongan saldo dilakukan secara otomatis di latar belakang tanpa mengharuskan kendaraan mengurangi kecepatan secara signifikan. Landasan hukum penerapan MLFF diperkuat melalui Peraturan Pemerintah Nomor 23 Tahun 2024 tentang Jalan Tol, yang menjadikannya salah satu skema transaksi resmi jalan tol di Indonesia sebagai bagian dari transformasi menuju Teknologi Jalan Tol 4.0.

5. Indikator Kinerja Utama (KPI) dalam Evaluasi ITS

Keberhasilan penerapan ITS perlu diukur secara objektif melalui indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators/KPI*) yang terdefinisi dengan jelas, agar investasi teknologi dapat dievaluasi dampaknya secara berkelanjutan dan dipertanggungjawabkan kepada pemangku kepentingan. KPI yang umum digunakan mencakup dimensi efisiensi operasional, keselamatan, keberlanjutan lingkungan, dan kepuasan pengguna, yang masing-masing memerlukan sumber data dan metode pengukuran yang berbeda.

Tabel 9.2 Contoh Indikator Kinerja Utama (KPI) Evaluasi ITS

Dimensi	Contoh Indikator	Sumber Data
Efisiensi Operasional	Rata-rata waktu tempuh, panjang antrean pada persimpangan	Sensor lalu lintas, data floating car

Dimensi	Contoh Indikator	Sumber Data
Keselamatan	Jumlah kecelakaan per kilometer jalan, waktu respons insiden	Basis data kepolisian, sistem deteksi insiden otomatis
Keberlanjutan Lingkungan	Estimasi emisi karbon akibat waktu idle kendaraan di kemacetan	Model estimasi emisi berbasis data volume dan kecepatan lalu lintas
Kepuasan Pengguna	Tingkat kepuasan penumpang angkutan umum terhadap ketepatan waktu	Survei pengguna, ulasan aplikasi transportasi

B. IoT dalam Manajemen Lalu Lintas

Internet of Things (IoT) sebagai lapisan akuisisi data yang menjadi fondasi bagi seluruh pengambilan keputusan dalam manajemen lalu lintas modern. Tanpa jaringan sensor IoT yang andal, ITS tidak akan memiliki data waktu nyata yang dibutuhkan untuk beroperasi secara adaptif.

1. Sensor dan Perangkat IoT untuk Pemantauan Lalu Lintas

Berbagai jenis sensor digunakan untuk memantau kondisi lalu lintas secara kontinu. Sensor induktif (*inductive loop detector*) yang tertanam pada perkerasan jalan mendeteksi keberadaan dan kecepatan kendaraan melalui perubahan medan elektromagnetik. Sensor radar gelombang mikro dan sensor inframerah digunakan pada lokasi yang tidak memungkinkan penanaman sensor pada perkerasan, misalnya pada jembatan atau persimpangan kompleks. Kamera *Closed-Circuit Television* (CCTV) yang dilengkapi algoritma visi komputer memungkinkan penghitungan kendaraan, klasifikasi jenis kendaraan, serta deteksi pelanggaran lalu lintas secara otomatis. Selain itu, data posisi kendaraan yang dikumpulkan secara masif dari aplikasi navigasi berbasis GPS pada telepon pintar pengguna jalan turut menjadi sumber data lalu lintas beresolusi tinggi yang mencakup hampir seluruh jaringan jalan tanpa memerlukan pemasangan sensor fisik tambahan.

Tabel 9.3 Perbandingan Jenis Sensor untuk Pemantauan Lalu Lintas

Jenis Sensor	Prinsip Kerja	Keunggulan	Keterbatasan
<i>Inductive Loop Detector</i>	Deteksi perubahan medan elektromagnetik akibat massa logam kendaraan	Akurasi tinggi untuk penghitungan kendaraan	Instalasi memerlukan pembongkaran perkerasan jalan
Radar Gelombang Mikro	Pengukuran kecepatan dan jarak berbasis pantulan gelombang radio	Tidak memerlukan kontak dengan perkerasan, tahan cuaca	Biaya perangkat relatif lebih tinggi
Kamera CCTV + Computer Vision	Analisis citra video untuk deteksi dan klasifikasi kendaraan	Mampu mendeteksi jenis kendaraan dan pelanggaran secara visual	Sensitif terhadap kondisi pencahayaan dan cuaca ekstrem
Data GPS Ponsel Pintar (<i>Floating Car Data</i>)	Agregasi data posisi dan kecepatan dari aplikasi navigasi pengguna	Cakupan luas tanpa infrastruktur fisik tambahan	Bergantung pada tingkat penetrasi aplikasi di kalangan pengguna jalan

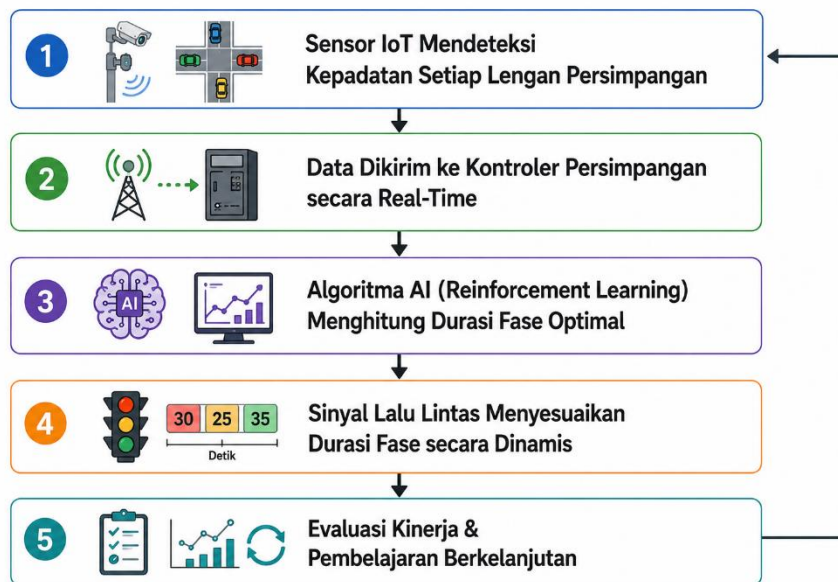
2. Kendali Sinyal Lalu Lintas Adaptif Berbasis IoT dan AI

Kendali sinyal lalu lintas tradisional bekerja berdasarkan waktu tetap (*fixed-time control*) yang ditentukan berdasarkan data historis volume lalu lintas, sehingga tidak dapat merespons fluktuasi kondisi lalu lintas aktual secara memadai. Kendali sinyal adaptif (*Adaptive Traffic Signal Control/ATSC*) berbasis IoT memungkinkan durasi setiap fase sinyal disesuaikan secara dinamis berdasarkan data kepadatan lalu lintas yang diterima secara *real-time* dari sensor pada setiap lengan persimpangan. Tinjauan sistematis oleh Gheorghe dan Soica (2025) menegaskan bahwa integrasi IoT dengan algoritma kecerdasan buatan, termasuk pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*) telah menjadi pendekatan dominan dalam penelitian ATSC kontemporer,

memungkinkan sistem sinyal "belajar" strategi pengaturan optimal melalui interaksi berulang dengan kondisi lalu lintas yang disimulasikan maupun aktual.

Pada persimpangan dengan kompleksitas tinggi, misalnya persimpangan dengan banyak lengan atau volume pejalan kaki yang signifikan, pendekatan pembelajaran penguatan multiagen (*multiagent reinforcement learning*) memungkinkan koordinasi antarsinyal pada beberapa persimpangan yang berdekatan secara simultan, sehingga kemacetan tidak sekadar dipindahkan dari satu persimpangan ke persimpangan berikutnya, melainkan dioptimalkan pada skala koridor jalan secara menyeluruh.

Gambar 9.2 Alur Kendali Sinyal Lalu Lintas Adaptif Berbasis IoT dan AI



3. Manajemen Insiden dan Deteksi Kecelakaan Otomatis

Selain optimasi arus lalu lintas rutin, IoT juga berperan penting dalam deteksi insiden lalu lintas secara otomatis, termasuk kecelakaan, kendaraan mogok, maupun objek asing di badan jalan. Sistem deteksi insiden otomatis (*Automatic Incident Detection/AID*) memanfaatkan kombinasi data sensor dan algoritma *machine learning* untuk mengenali pola anomali lalu lintas, misalnya perlambatan mendadak yang menyebar ke arah hulu ruas jalan yang mengindikasikan kemungkinan

terjadinya insiden, sehingga petugas dapat memperoleh peringatan dini sebelum laporan manual dari pengguna jalan diterima (Olugbade *et al.*, 2022).

Kecepatan deteksi dan respons insiden memiliki dampak signifikan terhadap keselamatan dan efisiensi jaringan jalan, mengingat durasi penanganan insiden yang berkepanjangan dapat menimbulkan efek domino berupa kemacetan sekunder yang meluas jauh melampaui lokasi kejadian awal. Integrasi sistem AID dengan pusat kendali lalu lintas memungkinkan koordinasi respons yang lebih cepat antara petugas lalu lintas, layanan derek, dan layanan medis darurat.

Pada konteks jalan tol di Indonesia, integrasi kamera CCTV pemantau ruas jalan dengan pusat kendali operasional milik badan usaha jalan tol telah menjadi praktik umum untuk mempercepat identifikasi insiden seperti kendaraan mogok atau kecelakaan ringan, sehingga petugas layanan jalan tol dapat diarahkan ke lokasi kejadian dengan lebih cepat dibandingkan mengandalkan laporan manual dari pengguna jalan semata. Ke depan, penerapan algoritma deteksi insiden otomatis berbasis visi komputer pada rekaman CCTV yang sudah tersedia berpotensi mempercepat waktu deteksi secara lebih signifikan tanpa memerlukan investasi sensor tambahan yang besar, mengingat infrastruktur kamera pemantau pada banyak ruas jalan tol nasional sesungguhnya telah tersedia.

4. Integrasi *Big Data* Lalu Lintas untuk Prediksi Kemacetan

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah menghasilkan data lalu lintas dalam jumlah sangat besar yang berasal dari berbagai sumber, seperti sensor kendaraan, kamera pengawas (*Closed-Circuit Television* atau CCTV), *loop detector*, perangkat *Global Positioning System* (GPS), aplikasi navigasi, transportasi umum berbasis digital, hingga telepon seluler pengguna jalan. Data tersebut mencakup informasi mengenai volume kendaraan, kecepatan rata-rata, kepadatan lalu lintas, waktu tempuh, lokasi kemacetan, kondisi cuaca, serta kejadian khusus seperti kecelakaan atau pekerjaan konstruksi. Seluruh data yang dikumpulkan secara terus-menerus membentuk kumpulan *Big Data* yang memiliki karakteristik volume besar, kecepatan pembaruan tinggi, dan variasi sumber yang beragam. Melalui proses integrasi dan pengelolaan yang baik, data tersebut menjadi sumber informasi yang

sangat berharga dalam memahami dinamika lalu lintas perkotaan secara lebih komprehensif dibandingkan metode pemantauan konvensional.

Integrasi *Big Data* memungkinkan pengelola transportasi tidak hanya memantau kondisi lalu lintas secara real-time, tetapi juga membangun basis data historis yang merekam pola pergerakan kendaraan dalam jangka panjang. Analisis terhadap data historis dapat mengungkap pola kemacetan berdasarkan waktu, lokasi, musim, kondisi cuaca, hari kerja, hari libur, maupun penyelenggaraan kegiatan berskala besar. Dengan memanfaatkan teknik *machine learning* dan analisis prediktif (*predictive analytics*), sistem dapat mempelajari hubungan antara berbagai faktor yang memengaruhi arus lalu lintas, kemudian menghasilkan prediksi mengenai kemungkinan terjadinya kemacetan pada waktu dan lokasi tertentu. Berbagai algoritma, seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), *Long Short-Term Memory* (LSTM), dan *Graph Neural Network* (GNN), telah banyak digunakan untuk memodelkan pola lalu lintas karena mampu mengenali hubungan spasial dan temporal yang kompleks dari data yang terus berubah.

Hasil prediksi yang dihasilkan sistem memberikan manfaat besar bagi otoritas transportasi dalam menerapkan manajemen lalu lintas secara proaktif. Informasi mengenai potensi kemacetan memungkinkan pengelola jalan melakukan penyesuaian waktu sinyal lalu lintas (*adaptive traffic signal control*), mengatur pengalihan arus kendaraan, membuka jalur alternatif, mengoptimalkan operasional transportasi umum, serta memberikan informasi perjalanan kepada masyarakat sebelum kepadatan terjadi. Selain itu, data prediksi dapat dimanfaatkan dalam perencanaan kegiatan berskala besar, seperti konser, pertandingan olahraga, atau acara kenegaraan, sehingga strategi pengaturan lalu lintas dapat dipersiapkan lebih awal. Integrasi dengan aplikasi navigasi digital juga memungkinkan pengguna jalan memperoleh rekomendasi rute tercepat berdasarkan prediksi kondisi lalu lintas, bukan hanya berdasarkan situasi saat itu, sehingga waktu perjalanan menjadi lebih efisien.

Penerapan integrasi *Big Data* untuk prediksi kemacetan merupakan salah satu implementasi nyata konsep *smart transportation* dalam ekosistem *smart city*. Melalui kombinasi IoT sebagai penghasil data, *Big Data* sebagai media penyimpanan dan pengelolaan informasi, serta *Artificial Intelligence* dan *machine learning* sebagai alat analisis prediktif, sistem transportasi dapat bertransformasi dari pendekatan yang

bersifat reaktif menjadi prediktif dan adaptif. Meskipun demikian, keberhasilan implementasi teknologi ini sangat bergantung pada kualitas data, interoperabilitas antarplatform, keamanan informasi, serta kolaborasi antara pemerintah, operator transportasi, penyedia teknologi, dan masyarakat. Dengan dukungan tata kelola data yang baik, integrasi *Big Data* lalu lintas tidak hanya mampu mengurangi kemacetan, tetapi juga meningkatkan keselamatan, efisiensi mobilitas, mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi karbon, serta mendukung pembangunan transportasi perkotaan yang berkelanjutan.

5. Tantangan Interoperabilitas dan Standardisasi Data Lalu Lintas

Ekosistem IoT lalu lintas modern umumnya terdiri atas perangkat dari berbagai vendor yang dipasang secara bertahap selama bertahun-tahun, sehingga tantangan interoperabilitas menjadi isu yang tidak dapat dihindari. Perbedaan protokol komunikasi, format data, dan standar antarmuka antarvendor dapat menghambat integrasi data secara menyeluruh pada satu pusat kendali lalu lintas. Kajian mengenai integrasi teknologi *blockchain*, IoT, dan AI pada sektor logistik dan transportasi menegaskan bahwa standardisasi format pertukaran data dan protokol komunikasi menjadi prasyarat mendasar bagi terwujudnya interoperabilitas lintas sistem, termasuk pada konteks manajemen lalu lintas perkotaan (Idrissi, Lachgar, & Hrimech, 2024).

Upaya standardisasi ini sejalan dengan prinsip interoperabilitas data dalam konteks kerangka Satu Data Indonesia, yang idealnya turut diterapkan pada domain data transportasi agar data lalu lintas dari berbagai instansi seperti Kementerian Perhubungan, dinas perhubungan daerah, kepolisian lalu lintas, dan operator jalan tol, dapat dipertukarkan dan dianalisis secara terintegrasi tanpa hambatan teknis maupun kelembagaan.

C. Infrastruktur Kendaraan Otonom

Perkembangan kendaraan otonom (*autonomous vehicle/AV*) tidak dapat dilepaskan dari kesiapan infrastruktur jalan dan komunikasi yang mendukungnya. Sub-bab ini membahas tingkatan otonomi kendaraan, teknologi komunikasi *Vehicle-to-Everything* (V2X) sebagai penghubung antara kendaraan dan infrastruktur, kebutuhan kesiapan

infrastruktur jalan secara fisik dan digital, serta tantangan regulasi dan etika yang menyertai penerapannya.

1. Tingkatan Otonomi Kendaraan

Klasifikasi tingkat otonomi kendaraan yang paling banyak dirujuk adalah standar SAE (*Society of Automotive Engineers*), yang membagi otonomi kendaraan menjadi enam tingkat, mulai dari Level 0 (tanpa otomatisasi, pengemudi mengendalikan penuh) hingga Level 5 (otomatisasi penuh tanpa memerlukan pengemudi manusia sama sekali dalam kondisi apa pun). Sebagian besar kendaraan komersial yang beredar saat ini berada pada Level 1 hingga Level 2, yang menyediakan fitur bantuan pengemudi seperti *adaptive cruise control* dan *lane-keeping assist*, namun tetap mensyaratkan pengemudi untuk mengawasi dan siap mengambil alih kendali kapan saja.

Tabel 9.4 Tingkatan Otonomi Kendaraan Berdasarkan Standar SAE

Level	Nama	Peran Pengemudi	Contoh Fitur
0	Tanpa Otomatisasi	Mengendalikan penuh seluruh aspek berkendara	Kendaraan konvensional tanpa fitur bantuan
1	Bantuan Pengemudi	Mengendalikan penuh, dibantu satu fitur otomatis	<i>Cruise control</i> adaptif ATAU <i>lane-keeping assist</i>
2	Otomatisasi Parsial	Mengawasi penuh, dibantu lebih dari satu fitur otomatis secara simultan	Kombinasi <i>adaptive cruise control</i> dan <i>lane-keeping assist</i>
3	Otomatisasi Bersyarat	Dapat melepaskan perhatian pada kondisi tertentu, namun harus siap mengambil alih	Sistem pilot otomatis pada kondisi lalu lintas tertentu (mis. jalan tol)

Level	Nama	Peran Pengemudi	Contoh Fitur
4	Otomatisasi Tinggi	Tidak perlu mengambil alih pada kondisi operasional yang telah ditentukan (<i>Operational Design Domain</i>)	Taksi robotik pada area geografis terbatas
5	Otomatisasi Penuh	Tidak diperlukan pengemudi sama sekali pada seluruh kondisi	Kendaraan otonom penuh tanpa kemudi maupun pedal

2. Komunikasi *Vehicle-to-Everything* (V2X)

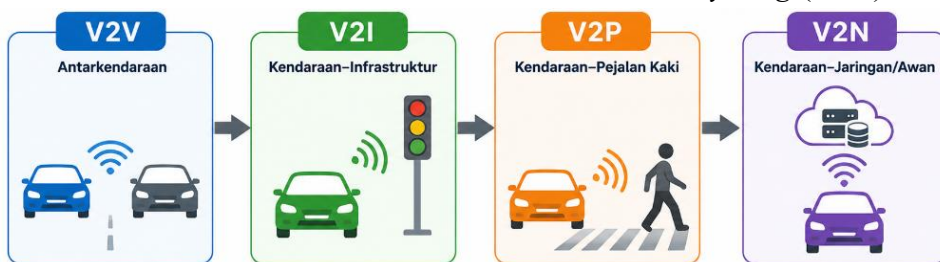
Komunikasi *Vehicle-to-Everything* (V2X) merupakan teknologi yang memungkinkan kendaraan bertukar informasi dengan berbagai entitas di sekitarnya secara nirkabel dan bermuatan latensi rendah. V2X mencakup beberapa jenis komunikasi: *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) untuk pertukaran data posisi dan kecepatan antarkendaraan guna mendukung koordinasi manuver seperti *platooning*; *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) untuk komunikasi dengan elemen infrastruktur seperti lampu lalu lintas dan rambu jalan; *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P) untuk melindungi pengguna jalan rentan seperti pejalan kaki dan pesepeda; serta *Vehicle-to-Network* (V2N) untuk komunikasi dengan sistem awan dan pusat kendali lalu lintas (Olugbade *et al.*, 2022; Gheorghe & Soica, 2025).

Dua teknologi utama yang bersaing dalam implementasi V2X adalah *Dedicated Short-Range Communications* (DSRC), yang menggunakan standar komunikasi nirkabel khusus untuk kendaraan, dan *Cellular V2X* (C-V2X), yang memanfaatkan jaringan seluler generasi keempat dan kelima (4G/5G) untuk mendukung komunikasi langsung antarkendaraan maupun melalui jaringan operator seluler. C-V2X menawarkan keunggulan integrasi yang lebih baik dengan infrastruktur telekomunikasi seluler yang telah ada secara luas, sehingga menjadi pilihan yang semakin dominan pada implementasi V2X di berbagai negara dibandingkan DSRC.

Tabel 9.5 Perbandingan Teknologi Komunikasi DSRC dan C-V2X

Aspek	DSRC	C-V2X
Basis Teknologi	Standar WLAN khusus kendaraan (IEEE 802.11p)	Jaringan seluler LTE/5G (3GPP)
Infrastruktur Pendukung	Memerlukan perangkat pemancar khusus di sepanjang jalan	Dapat memanfaatkan infrastruktur jaringan seluler yang sudah ada
Skalabilitas	Terbatas pada area dengan perangkat DSRC terpasang	Lebih mudah diskalakan mengikuti cakupan jaringan seluler
Tren Adopsi Global	Mulai ditinggalkan sejumlah negara	Semakin dominan seiring perluasan jaringan 5G

Gambar 9.3 Ekosistem Komunikasi *Vehicle-to-Everything* (V2X)



3. Kesiapan Infrastruktur Jalan untuk Kendaraan Otonom

Kendaraan otonom, terutama pada tingkat otonomi tinggi (Level 3 ke atas), bergantung secara signifikan pada kualitas dan kelengkapan infrastruktur jalan fisik maupun digital. Marka jalan yang jelas dan konsisten menjadi kebutuhan mendasar bagi sistem persepsi berbasis kamera untuk mengenali batas lajur secara andal. Peta beresolusi tinggi (*High Definition Map/HD Map*) yang memuat informasi geometris jalan hingga tingkat sentimeter menjadi rujukan navigasi presisi tinggi yang melampaui kemampuan sistem GPS konvensional. Selain itu, unit tepi jalan (*Roadside Unit/RSU*) yang dilengkapi kemampuan komunikasi V2I perlu dipasang pada titik-titik strategis seperti persimpangan kompleks untuk mendukung koordinasi lalu lintas dengan kendaraan terhubung (Pirdavani, Muzyka, Vandervoort, & Van Hoya, 2023).

- a. Marka dan rambu jalan standar: konsistensi kualitas visual marka jalan sangat memengaruhi keandalan sistem persepsi kendaraan otonom berbasis kamera.
- b. Peta digital resolusi tinggi (HD Map): representasi presisi tinggi geometri jalan, termasuk kemiringan, radius tikungan, dan posisi elemen jalan lainnya.
- c. Roadside Unit (RSU): perangkat komunikasi V2I yang dipasang pada infrastruktur jalan untuk mendukung pertukaran data dengan kendaraan terhubung.
- d. Konektivitas jaringan andal: ketersediaan jaringan seluler 5G atau setara pada koridor jalan yang menjadi jalur operasional kendaraan otonom.
- e. Integrasi dengan *Digital Twin* jaringan jalan: representasi virtual jaringan jalan yang diperbarui secara berkelanjutan untuk mendukung simulasi dan validasi operasional kendaraan otonom sebelum penerapan di lapangan (Ulrich, Schildorfer, Aigner, Thonhofer, & Neubauer, 2023).

4. Tantangan Regulasi, Keamanan Siber, dan Etika

Penerapan kendaraan otonom menghadirkan tantangan yang melampaui aspek teknis semata. Dari sisi regulasi, banyak negara, termasuk Indonesia masih dalam tahap menyusun kerangka hukum yang jelas mengenai tanggung jawab hukum ketika kendaraan otonom terlibat kecelakaan, mengingat pengemudi manusia tidak lagi memegang kendali penuh atas kendaraan. Dari sisi keamanan siber, ketergantungan kendaraan otonom pada komunikasi nirkabel dan sistem perangkat lunak yang kompleks membuka potensi celah serangan siber yang dapat membahayakan keselamatan penumpang maupun pengguna jalan lain apabila tidak diamankan secara memadai.

Dari sisi etika, kendaraan otonom pada situasi darurat yang tidak dapat dihindari terkadang dihadapkan pada dilema pengambilan keputusan yang melibatkan *trade-off* keselamatan antara penumpang dan pengguna jalan lain, yang menuntut kerangka etika yang jelas dan dapat diaudit dalam perancangan algoritma pengambilan keputusan kendaraan. Isu-isu ini menegaskan kembali pentingnya prinsip *explainable AI* dan akuntabilitas yang menjadi semakin krusial ketika diterapkan pada konteks kendaraan otonom yang beroperasi di ruang publik bersama pengguna jalan lain.

Prinsip Kesiapan Infrastruktur bagi Kendaraan Otonom

1. Kesiapan fisik: kualitas perkerasan, marka, dan rambu jalan yang konsisten dan terpelihara dengan baik.
2. Kesiapan digital: ketersediaan peta digital beresolusi tinggi dan pembaruan data jaringan jalan secara berkala.
3. Kesiapan konektivitas: jaringan komunikasi V2X yang andal dengan latensi rendah pada koridor operasional.
4. Kesiapan regulasi: kerangka hukum yang jelas mengenai tanggung jawab, standar keselamatan, dan sertifikasi kendaraan otonom.
5. Kesiapan keamanan siber: standar keamanan komunikasi V2X dan sistem deteksi ancaman siber pada infrastruktur pendukung.

5. Simulasi dan *Digital Twin* untuk Pengujian Kendaraan Otonom

Perkembangan kendaraan otonom (*autonomous vehicles*) mendorong penggunaan teknologi simulasi dan *digital twin* sebagai sarana utama untuk menguji keamanan, keandalan, dan kinerja sistem sebelum diterapkan di lingkungan nyata. Kendaraan otonom mengandalkan berbagai teknologi cerdas, seperti sensor *Light Detection and Ranging* (LiDAR), kamera, radar, *Global Positioning System* (GPS), *Internet of Things* (IoT), serta algoritma *Artificial Intelligence* (AI) untuk mengenali lingkungan, memahami situasi lalu lintas, dan mengambil keputusan secara otomatis. Mengingat kompleksitas sistem tersebut, pengujian secara langsung di jalan umum memiliki risiko yang tinggi, memerlukan biaya besar, dan sulit mencakup seluruh kemungkinan kondisi yang dapat terjadi. Oleh karena itu, simulasi berbasis komputer dan teknologi *digital twin* menjadi solusi yang memungkinkan berbagai skenario diuji secara aman, efisien, dan berulang tanpa membahayakan pengguna jalan maupun merusak kendaraan.

Teknologi simulasi memungkinkan pengembang menciptakan lingkungan virtual yang menyerupai kondisi dunia nyata dengan tingkat detail yang sangat tinggi. Dalam simulasi tersebut, kendaraan otonom dapat diuji pada berbagai situasi, seperti kepadatan lalu lintas yang berbeda, perubahan cuaca, kondisi jalan yang rusak, keberadaan pejalan kaki, pesepeda, kendaraan darurat, hingga kejadian yang jarang terjadi

seperti kecelakaan mendadak atau kegagalan lampu lalu lintas. Sistem AI yang mengendalikan kendaraan kemudian dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam mengenali objek, memprediksi pergerakan pengguna jalan lain, memilih jalur yang aman, menghindari tabrakan, serta mematuhi aturan lalu lintas. Karena seluruh proses berlangsung di lingkungan virtual, ribuan hingga jutaan skenario dapat dijalankan dalam waktu yang relatif singkat sehingga proses pengembangan menjadi lebih cepat dan biaya pengujian dapat ditekan secara signifikan.

Sementara itu, *digital twin* merupakan representasi digital yang dinamis dari kendaraan maupun lingkungan operasionalnya, yang terus diperbarui menggunakan data nyata yang diperoleh dari sensor dan sistem komunikasi. Berbeda dengan simulasi konvensional yang umumnya menggunakan kondisi yang telah ditentukan sebelumnya, *digital twin* mampu mencerminkan kondisi aktual kendaraan secara real-time, termasuk performa mesin, kondisi baterai, konsumsi energi, respons sistem pengereman, hingga kondisi komponen elektronik. Data tersebut dipadukan dengan informasi mengenai kondisi jalan, lalu lintas, cuaca, dan infrastruktur sehingga pengembang dapat memantau perilaku kendaraan secara menyeluruh. Selain digunakan untuk mengevaluasi performa kendaraan, *digital twin* juga mendukung *predictive maintenance*, yaitu memprediksi potensi kerusakan komponen sebelum terjadi kegagalan, sehingga keselamatan dan keandalan sistem dapat terus ditingkatkan selama masa operasional kendaraan.

Integrasi simulasi, *digital twin*, *Big Data*, dan AI menjadi fondasi penting dalam pengembangan ekosistem transportasi cerdas (*smart transportation*) sebagai bagian dari implementasi *smart city*. Data hasil simulasi dan pengoperasian kendaraan di dunia nyata terus dikumpulkan, dianalisis, dan digunakan untuk menyempurnakan model AI sehingga kemampuan kendaraan dalam mengambil keputusan semakin akurat. Selain mempercepat proses pengembangan kendaraan otonom, pendekatan ini juga membantu pemerintah dan pengelola transportasi mengevaluasi dampak penerapan kendaraan otonom terhadap kapasitas jalan, keselamatan lalu lintas, konsumsi energi, dan emisi karbon sebelum teknologi tersebut diterapkan secara luas. Dengan demikian, penggunaan simulasi dan *digital twin* tidak hanya meningkatkan efisiensi proses pengujian, tetapi juga memastikan bahwa kendaraan otonom memenuhi standar keselamatan, keandalan, dan keberlanjutan yang diperlukan untuk mendukung sistem transportasi masa depan.

Integrasi *digital twin* jaringan jalan dengan data historis kecelakaan dan kondisi lalu lintas aktual memungkinkan simulasi yang semakin merepresentasikan kondisi nyata secara akurat, sehingga kesenjangan antara kinerja kendaraan otonom pada lingkungan simulasi dan lingkungan operasional sesungguhnya (*sim-to-real gap*) dapat diminimalkan secara bertahap (Ulrich *et al.*, 2023).

D. Mobilitas Berkelanjutan dan *Smart Mobility*

Konsep *smart mobility* menjadi salah satu pilar utama dalam kerangka kota cerdas (*smart city*) yang lebih luas, dengan fokus pada pemanfaatan sistem transportasi untuk mendukung mobilitas perkotaan yang efisien dan berkelanjutan (Rey-Moreno, Perri   ez-Cristóbal, & Calvo-Mora, 2023).

1. Konsep *Smart Mobility* dan *Mobility as a Service* (MaaS)

Mobility as a Service (MaaS) merupakan salah satu wujud konkret dari *smart mobility*, yaitu model layanan yang mengintegrasikan berbagai moda transportasi, angkutan umum, taksi, layanan berbagi sepeda dan skuter, hingga kendaraan sewa ke dalam satu platform digital tunggal yang memungkinkan pengguna merencanakan perjalanan, memesan, dan membayar seluruh moda transportasi tersebut secara terintegrasi (Maas, 2022). Konsep ini sering dirangkum dalam "tiga B" *bundle* (paket layanan), *budget* (anggaran/langganan), dan *broker* (perantara layanan) yang menekankan pergeseran dari kepemilikan kendaraan pribadi menuju akses terhadap layanan mobilitas sesuai kebutuhan.

Manfaat MaaS terhadap keberlanjutan lingkungan bergantung pada sejauh mana penerapannya berhasil mengalihkan pengguna dari kendaraan pribadi menuju moda transportasi bersama dan angkutan umum. Kajian oleh Labee, Rasouli, dan Liao (2022) menunjukkan bahwa dampak MaaS terhadap emisi perkotaan sangat bergantung pada desain paket layanan dan insentif yang diberikan; apabila paket MaaS justru mempermudah penggunaan moda perjalanan pribadi seperti taksi daring tanpa insentif memadai untuk beralih ke transportasi umum, dampak pengurangan emisi yang diharapkan dapat tidak tercapai secara optimal. Studi lain juga mengonfirmasi bahwa lebih dari sebagian besar calon pengguna MaaS pada kenyataannya tidak serta-merta bersedia

melepaskan kepemilikan kendaraan pribadi mereka, sehingga keberhasilan MaaS dalam mendorong keberlanjutan memerlukan strategi kebijakan pendukung yang lebih komprehensif, bukan sekadar penyediaan platform digital semata.

Tabel 9.6 Komponen Utama Ekosistem *Mobility as a Service* (MaaS)

Komponen	Fungsi	Contoh
Platform Integrasi Digital	Perencanaan, pemesanan, dan pembayaran multimoda dalam satu aplikasi	Aplikasi mobilitas terpadu perkotaan
Operator Transportasi Mitra	Penyedia layanan moda transportasi yang terintegrasi dalam platform	Angkutan umum, layanan berbagi sepeda/skuter, taksi daring
Skema Pembayaran Terpadu	Mekanisme pembayaran tunggal lintas moda transportasi	Langganan bulanan, sistem tiket elektronik terintegrasi
Kebijakan Insentif Keberlanjutan	Dorongan kebijakan untuk mengalihkan preferensi dari kendaraan pribadi	Tarif preferensial untuk kombinasi angkutan umum dan mikromobilitas

2. Elektrifikasi Transportasi dan Infrastruktur Pengisian Daya

Elektrifikasi kendaraan merupakan pilar penting lainnya dalam mewujudkan mobilitas berkelanjutan, mengingat sektor transportasi menyumbang porsi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca perkotaan. Transisi menuju kendaraan listrik menuntut pembangunan infrastruktur pengisian daya (*charging infrastructure*) yang memadai, baik pada skala perumahan (pengisian lambat semalaman) maupun pada koridor jalan utama dan area publik (stasiun pengisian cepat/*fast charging*). Perencanaan lokasi infrastruktur pengisian daya perlu mempertimbangkan pola perjalanan pengguna, kapasitas jaringan listrik setempat, serta integrasi dengan sistem manajemen energi cerdas (*smart grid*), agar penambahan beban dari pengisian kendaraan listrik tidak

membebani jaringan distribusi listrik secara berlebihan pada jam-jam puncak.

Selain kendaraan pribadi, elektrifikasi angkutan umum seperti bus listrik pada skema *Buy The Service* yang telah diterapkan pada sejumlah kota besar di Indonesia, turut menjadi strategi penting dalam mengurangi emisi sektor transportasi secara agregat, mengingat satu unit bus listrik dapat menggantikan puluhan kendaraan pribadi berbahan bakar fosil dalam melayani jumlah penumpang yang setara.

Tabel 9.7 Contoh Instrumen Kebijakan Pendukung Elektrifikasi dan Mobilitas Berkelanjutan

Instrumen Kebijakan	Mekanisme	Target Dampak
Insentif Fiskal Kendaraan Listrik	Pengurangan pajak atau subsidi harga pembelian	Mempercepat penetrasi pasar kendaraan listrik pribadi
Skema <i>Buy The Service</i>	Pengadaan bus berbasis kinerja layanan, bukan kepemilikan aset	Mempercepat elektrifikasi armada angkutan umum tanpa beban investasi penuh pada operator
Zona Rendah Emisi (<i>Low Emission Zone</i>)	Pembatasan akses kendaraan berbahan bakar fosil di kawasan tertentu	Mendorong peralihan ke kendaraan listrik atau transportasi umum pada kawasan padat
Insentif Tarif Terintegrasi MaaS	Tarif preferensial untuk kombinasi transportasi umum dan mikromobilitas	Meningkatkan daya tarik moda berkelanjutan dibandingkan kendaraan pribadi

3. Integrasi Multimoda dan *Transit-Oriented Development* (TOD)

Mobilitas berkelanjutan tidak dapat diwujudkan semata-mata melalui intervensi teknologi transportasi, melainkan juga memerlukan keselarasan dengan perencanaan tata ruang perkotaan. *Transit-Oriented Development* (TOD) merupakan pendekatan perencanaan kawasan yang memusatkan pembangunan permukiman dan aktivitas komersial berkepadatan tinggi di sekitar simpul transportasi umum utama, seperti

stasiun kereta atau terminal bus rapid transit, sehingga penduduk memiliki akses mudah terhadap angkutan umum tanpa bergantung pada kendaraan pribadi. Integrasi TOD dengan sistem transportasi cerdas menciptakan sinergi yang saling memperkuat: kawasan TOD menyediakan basis penumpang yang memadai untuk menjustifikasi investasi angkutan umum berkualitas tinggi, sementara sistem transportasi cerdas meningkatkan keandalan dan kenyamanan layanan yang pada gilirannya memperkuat daya tarik kawasan TOD itu sendiri (Lopez-Carreiro, Monzon, & Lopez-Lambas, 2023).

4. Mikromobilitas dan Infrastruktur Pendukungnya

Selain moda transportasi konvensional, mikromobilitas mencakup sepeda, sepeda listrik, dan skuter listrik berbagi (*shared e-scooter*) semakin berperan penting sebagai solusi perjalanan jarak pendek dan penghubung tahap pertama/terakhir (*first-mile/last-mile*) menuju simpul transportasi umum utama. Keberhasilan mikromobilitas sangat bergantung pada ketersediaan infrastruktur pendukung yang memadai, seperti jalur sepeda yang terpisah secara fisik dari lalu lintas kendaraan bermotor, area parkir khusus kendaraan mikromobilitas di sekitar stasiun transit, serta regulasi kecepatan dan zona operasi yang jelas bagi layanan berbagi skuter listrik di kawasan padat pejalan kaki.

Integrasi data mikromobilitas ke dalam platform MaaS memungkinkan pengguna merencanakan perjalanan multimoda yang menggabungkan angkutan umum dengan mikromobilitas secara mulus, misalnya menggunakan sepeda berbagi untuk mencapai stasiun kereta terdekat sebelum melanjutkan perjalanan dengan angkutan massal. Tanpa integrasi semacam ini, potensi mikromobilitas untuk mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi cenderung tidak tercapai secara optimal, karena pengguna tetap harus beralih antaraplikasi dan sistem pembayaran yang terpisah-pisah.



BAB X

SMART WATER DAN INFRASTRUKTUR LINGKUNGAN

Air merupakan salah satu infrastruktur paling fundamental bagi kehidupan manusia, namun juga salah satu yang paling menantang untuk dikelola secara efisien. Sistem penyediaan air minum, pengelolaan air limbah, dan manajemen sumber daya air secara luas menghadapi tantangan struktural yang kompleks, kebocoran jaringan distribusi yang sulit terdeteksi, kualitas air yang fluktuatif, hingga risiko bencana hidrologis seperti banjir dan kekeringan yang semakin intensif akibat perubahan iklim sebagaimana dibahas pada Bab 5.

A. *Smart Water Management*

1. Konsep dan Definisi *Smart Water Management*

Smart water management didefinisikan sebagai penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) untuk merevolusi pemanfaatan sumber daya air secara berkelanjutan, mencakup peningkatan efisiensi operasional, pemeliharaan prediktif, dan konservasi sumber daya, sekaligus menghadirkan pertimbangan mengenai keamanan data dan kebutuhan investasi infrastruktur (Dada, Majemite, Obaigbena, Daraojimba, Oliha, & Nwokediegwu, 2024). Berbeda dengan manajemen air konvensional yang secara historis mengandalkan metode tanpa kemampuan pemantauan dan kendali secara *real-time*, *smart water management* menghadirkan paradigma yang sepenuhnya baru dalam bagaimana air dipantau, dianalisis, dan dikelola sepanjang seluruh siklusnya dari sumber air baku hingga air limbah yang telah diolah (Dada *et al.*, 2024).

Nilai pasar global *smart water management* diproyeksikan mencapai 50,7 miliar dolar Amerika Serikat pada 2033 dengan tingkat pertumbuhan tahunan majemuk sebesar 12,7 persen, sementara pasar IoT khusus sektor air diproyeksikan mencapai 35,2 miliar dolar pada 2032. Pertumbuhan pesat ini mencerminkan urgensi global dalam

mengatasi kelangkaan air, dengan proyeksi bahwa hampir dua miliar orang akan menghadapi kondisi kelangkaan air pada 2025, menjadikan penerapan sistem manajemen air yang cerdas bukan lagi pilihan opsional, melainkan kebutuhan mendesak.

Kerangka regulasi memainkan peran penting dalam membentuk penerapan AI dan IoT yang bertanggung jawab pada domain air, khususnya terkait jaminan privasi data dan penggunaan yang etis (Dada *et al.*, 2024). Regulasi yang mendukung, dikombinasikan dengan kematangan teknologi sensor dan analitik, menjadi dua faktor utama yang menentukan seberapa cepat suatu negara atau wilayah dapat mewujudkan potensi penuh *smart water management*. Indonesia telah memiliki kerangka regulasi dasar mengenai penyelenggaraan SPAM, meskipun belum secara eksplisit mengatur kewajiban penerapan teknologi digital tertentu.

Tabel 10.1 Perbandingan Manajemen Air Konvensional dan *Smart Water Management*

Aspek	Manajemen Air Konvensional	Smart Water Management
Pemantauan kondisi jaringan	Inspeksi manual berkala, rawan terlambat	Sensor IoT kontinu, deteksi hampir <i>real-time</i>
Deteksi kebocoran	Berdasarkan laporan warga atau pemeriksaan visual	Sensor akustik dan analitik otomatis
Kualitas air	Pengujian sampel berkala di laboratorium	Sensor kualitas air <i>real-time</i> multi-parameter
Pengambilan keputusan	Berdasarkan data historis dan intuisi operator	Analitik prediktif berbasis AI dan data historis
Respons terhadap anomali	Reaktif, setelah dampak signifikan terjadi	Proaktif, peringatan dini sebelum dampak membesar

Sumber: Diolah dari Dada *et al.* (2024); HashStudioz (2024)

Tabel 10.2 Ilustrasi Kasus: Instalasi Pengolahan Air Minum dengan Kendali Otomatis Berbasis Sensor

Elemen	Uraian
Konteks	Instalasi Pengolahan Air (IPA) berkapasitas menengah yang melayani kawasan perkotaan
Sensor diterapkan	Sensor kekeruhan pada intake, sensor pH dan klorin residual pada outlet
Kendali otomatis	Dosis koagulan dan disinfektan disesuaikan otomatis berdasarkan pembacaan sensor real-time
Manfaat operasional	Konsistensi kualitas air olahan meningkat, pemborosan bahan kimia menurun
Tantangan dihadapi	Kebutuhan kalibrasi berkala sensor kualitas air akibat fouling pada elektroda
Pembelajaran utama	Otomasi kendali kimia menuntut disiplin pemeliharaan sensor agar tidak menyesatkan dosis

2. Evolusi dari Manajemen Air Konvensional

Historisnya, manajemen sistem air sangat bergantung pada metode konvensional yang seringkali tidak memiliki kemampuan pemantauan dan kendali secara *real-time* (Eggimann *et al.*, 2017; Sun & Scanlon, 2019, sebagaimana dikutip dalam Dada *et al.*, 2024). Keterbatasan ini menghasilkan inefisiensi struktural, peningkatan pemborosan air, dan kualitas air yang terkompromikan, persoalan yang secara langsung berdampak pada keberlanjutan pasokan air bagi populasi yang terus bertambah. Dengan kemunculan IoT, terjadi perubahan paradigma fundamental dalam cara sistem air dipantau dan dikendalikan (Dada *et al.*, 2024).

Evolusi ini paralel dengan evolusi digital teknik sipil secara umum dari era konvensional tanpa instrumentasi, menuju era digitalisasi dasar, dan akhirnya menuju era *smart infrastructure*. Pada domain air, evolusi ini memiliki karakteristik khusus mengingat jaringan infrastruktur air umumnya tersembunyi di bawah tanah, menjadikan

pemantauan visual konvensional jauh lebih terbatas dibandingkan infrastruktur di atas tanah seperti jalan atau gedung, sehingga manfaat transformasi digital menjadi jauh lebih signifikan secara relatif.

3. Kerangka Regulasi Sistem Penyediaan Air Minum di Indonesia

Penerapan *smart water management* di Indonesia beroperasi dalam kerangka regulasi yang telah mapan mengenai Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM). Peraturan Pemerintah Nomor 122 Tahun 2015 tentang Sistem Penyediaan Air Minum menegaskan bahwa penyelenggara SPAM wajib memastikan kualitas air yang dihasilkan memenuhi standar yang ditetapkan, sementara Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2016 mengatur secara lebih teknis mengenai penyelenggaraan SPAM, mencakup perencanaan, pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan, pemantauan, dan evaluasi.

Kerangka regulasi ini secara tidak langsung mendukung adopsi teknologi *smart water management*, mengingat kewajiban pemantauan dan evaluasi berkelanjutan yang diamanatkan regulasi jauh lebih mudah dipenuhi melalui sistem pemantauan otomatis berbasis sensor dibandingkan metode manual konvensional. Meskipun demikian, regulasi yang ada belum secara eksplisit mewajibkan penerapan teknologi IoT tertentu, sehingga adopsi teknologi pada praktiknya masih bergantung pada inisiatif dan kapasitas masing-masing penyelenggara SPAM, sejalan dengan pola kesenjangan implementasi dalam konteks regulasi BIM dan regulasi *smart city*.

4. Komponen dan Arsitektur Sistem *Smart Water Management*

Tinjauan sistematis mengenai sistem manajemen air cerdas berbasis IoT mengidentifikasi bahwa arsitektur sistem tersebut umumnya terdiri atas berbagai komponen yang bekerja secara terintegrasi, sejalan dengan arsitektur berlapis IoT. Parameter pengukuran utama yang dipantau mencakup ketinggian air (*water level*), tingkat keasaman (*pH*), kekeruhan (*turbidity*), dan salinitas, yang secara kolektif memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi kuantitas dan kualitas air pada suatu sistem.

Komponen *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) memainkan peran sentral dalam arsitektur *smart water management*, berfungsi mengatur dan mengendalikan sistem distribusi air secara terpusat (TeamTweaks, 2024). Integrasi SCADA dengan sensor IoT

memperluas kapasitas sistem dari sekadar otomasi operasional dasar menjadi platform yang mampu memberikan wawasan analitik mendalam mengenai pola konsumsi, deteksi anomali, dan proyeksi kebutuhan kapasitas di masa depan, kapabilitas yang sebelumnya tidak dimiliki sistem SCADA generasi awal yang beroperasi secara terisolasi tanpa konektivitas data yang luas.

Tabel 10.3 Arsitektur Sistem *Smart Water Management* Berbasis IoT

Lapisan	Komponen	Fungsi Utama
Penginderaan	Sensor ketinggian air, pH, kekeruhan, salinitas, tekanan	Pengumpulan data kondisi air secara kontinu
Konektivitas	LoRaWAN, NB-IoT, jaringan seluler (lihat Bab 4)	Transmisi data sensor menuju sistem pusat
Kendali & Otomasi	Sistem SCADA, aktuator pompa dan katup	Kendali otomatis operasi jaringan distribusi
Analitik & Kecerdasan	Algoritma AI deteksi anomali dan prediksi permintaan	Mengubah data menjadi wawasan dan rekomendasi tindakan
Aplikasi & Pelaporan	<i>Dashboard</i> operator, aplikasi pelaporan warga	Antarmuka pengambilan keputusan bagi pengelola dan publik

Sumber: Disintesis dari TeamTweaks (2024); Dada et al. (2024)

Evolusi sistem SCADA dari generasi konvensional yang terisolasi menuju generasi modern yang terintegrasi dengan IoT dan analitik *cloud* mencerminkan pola evolusi teknologi yang serupa dengan evolusi BIM dari CAD, setiap generasi baru tidak sekadar meningkatkan fitur, melainkan mengubah secara fundamental bagaimana sistem tersebut menghasilkan nilai bagi penggunanya. SCADA generasi awal berfokus pada otomasi kendali lokal tanpa konektivitas luas, sementara SCADA modern berfungsi sebagai simpul integrasi yang menghubungkan data operasional dengan platform analitik yang lebih luas, termasuk kemampuan diagnostik jarak jauh yang memungkinkan

vendor peralatan memantau kondisi kesehatan pompa dan peralatan lain tanpa perlu kunjungan lapangan.

Tabel 10.4 Evolusi Generasi Sistem SCADA pada Manajemen Air

Generasi	Karakteristik Utama	Keterbatasan/Keunggulan
Generasi Pertama	Kendali lokal, tanpa konektivitas jarak jauh	Terisolasi, sulit dipantau dari luar lokasi
Generasi Kedua	Konektivitas jaringan lokal (LAN) antarstasion	Cakupan pemantauan terbatas pada satu fasilitas
Generasi Ketiga (Modern)	Integrasi IoT, konektivitas cloud, analitik terpusat	Pemantauan dan kendali jarak jauh menyeluruh

5. Peran Kecerdasan Buatan dalam *Smart Water Management*

Potensi sesungguhnya *smart water management* terwujud ketika teknologi IoT dan AI diintegrasikan secara mulus, menciptakan sistem yang holistik dan adaptif. Aliran data berkelanjutan dari perangkat IoT berfungsi sebagai input bagi algoritma AI, yang kemudian menghasilkan wawasan actionable mengenai pola konsumsi, prediksi kebutuhan, dan deteksi anomali (Dada *et al.*, 2024). Kajian mengenai manajemen air cerdas berbasis *edge computing*, AI, dan *big data* menegaskan bahwa metode AI untuk deteksi anomali dan pemeliharaan prediktif menjadi fokus penelitian yang berkembang pesat pada periode 2023–2025, mencerminkan pematangan teknologi ini dari tahap eksperimental menuju penerapan praktis (MDPI, 2025).

Penerapan AI pada pengelolaan air mencakup deteksi dini kontaminasi melalui pengenalan pola anomali pada data sensor kualitas air, prediksi kebutuhan air berdasarkan pola historis dan faktor musiman, serta optimasi jadwal operasi pompa dan reservoir untuk memaksimalkan efisiensi energi sekaligus keandalan pasokan. Arah pengembangan masa depan mencakup sensor canggih generasi berikutnya, sistem terdesentralisasi yang lebih tangguh terhadap gangguan, komputasi kuantum untuk optimasi jaringan berskala sangat

besar, dan teknologi *blockchain* untuk keamanan data air yang lebih terjamin (Dada *et al.*, 2024).



Gambar 10.1 *Smart Water Management*

B. Monitoring Jaringan Air Bersih dan Limbah

Monitoring jaringan air bersih dan limbah merupakan bagian penting dari pengelolaan infrastruktur perkotaan untuk memastikan distribusi air dan pengelolaan limbah berjalan secara aman, efisien, dan berkelanjutan. Sistem ini memanfaatkan sensor, *Internet of Things* (IoT), serta jaringan komunikasi untuk memantau kondisi jaringan secara real-time. Berbagai parameter, seperti tekanan, debit aliran, kualitas air, dan kapasitas saluran limbah, dapat dipantau secara terus-menerus sehingga kondisi jaringan selalu diketahui.

Pemantauan secara real-time memungkinkan gangguan terdeteksi lebih cepat dibandingkan inspeksi manual. Penurunan tekanan dapat mengindikasikan kebocoran pipa, sedangkan perubahan kualitas air dapat menjadi tanda kontaminasi. Pada jaringan limbah, peningkatan debit atau penyumbatan saluran dapat segera diketahui sehingga penanganan dapat dilakukan sebelum menimbulkan dampak yang lebih luas, seperti banjir atau pencemaran lingkungan.

Data hasil monitoring selanjutnya dianalisis menggunakan *Big Data Analytics* dan *Artificial Intelligence* (AI) untuk mendukung pengelolaan jaringan yang lebih efektif. Analisis data historis membantu mengidentifikasi pola konsumsi air, mendeteksi lokasi yang sering mengalami kebocoran, serta memprediksi kebutuhan pemeliharaan. Dengan pendekatan ini, pengelolaan infrastruktur tidak lagi bersifat reaktif, tetapi menjadi prediktif sehingga biaya operasional dan risiko kerusakan dapat ditekan.

Dalam konsep *smart city*, monitoring jaringan air bersih dan limbah mendukung peningkatan kualitas layanan publik melalui pengelolaan yang berbasis data. Integrasi sistem ini membantu pemerintah meningkatkan efisiensi distribusi air, mengurangi kehilangan air (*non-revenue water*), menjaga kualitas lingkungan, serta memastikan ketersediaan layanan air bersih dan sanitasi yang berkelanjutan bagi masyarakat.

1. *Non-Revenue Water* (NRW): Konsep dan Tantangan di Indonesia

Non-Revenue Water (NRW), yang di Indonesia dikenal pula sebagai Air Tak Berekening (ATR), didefinisikan sebagai selisih antara volume air yang didistribusikan ke dalam sistem dengan volume air yang tercatat dan dapat direkeningkan kepada pelanggan. NRW terdiri atas dua komponen utama: kehilangan air fisik, yang disebabkan oleh kebocoran pada jaringan distribusi, luapan reservoir, dan kerusakan sarana; serta kehilangan air non-fisik, yang disebabkan oleh konsumsi tidak resmi, kesalahan administrasi, pencurian air, atau kesalahan pencatatan meter pelanggan (PDAM Pintar, 2022).

Tingkat NRW di Indonesia mencapai rata-rata sekitar 33 persen, jauh melampaui target maksimal nasional sebesar 20 persen (PDAM Pintar, 2022). Variasi antar-penyelenggara Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) sangat signifikan sebagian PDAM berhasil menekan kehilangan air hingga di bawah 20 persen, sementara PDAM lain mengalami kehilangan air melebihi 60 persen. Studi kasus pada salah satu SPAM di Kalimantan mencatat tingkat NRW hingga 51,84 persen pada 2023, dengan indeks kebocoran infrastruktur (*Infrastructure Leakage Index/ILI*) sebesar 23, tergolong kategori D yang menandakan pemborosan sumber daya luar biasa dan menuntut program penurunan kebocoran sebagai prioritas utama.

Dampak ekonomi NRW yang tinggi bersifat berlapis: kerugian pendapatan langsung bagi penyelenggara SPAM akibat air yang telah diproduksi namun tidak terekening, biaya energi dan bahan kimia pengolahan yang terbuang sia-sia untuk memproduksi air yang pada akhirnya hilang sebelum mencapai konsumen, serta biaya sosial berupa keterbatasan akses air bersih bagi masyarakat akibat kapasitas produksi yang seharusnya dapat melayani lebih banyak pelanggan namun terserap oleh kehilangan air. Farley (2008) menegaskan bahwa penanganan NRW yang efektif menuntut peningkatan investasi pada perbaikan operasional seperti perawatan sarana dan prasarana, yang pada gilirannya akan meningkatkan pendapatan dan secara bertahap mengurangi biaya operasional penyelenggara SPAM (PDAM Pintar, 2022).

Tabel 10.5 Klasifikasi Komponen *Non-Revenue Water* (NRW)

Kategori	Jenis Kehilangan	Contoh Penyebab
Kehilangan Fisik	Kebocoran jaringan distribusi	Pipa tua/rusak, sambungan bocor, tekanan berlebih
Kehilangan Fisik	Luapan reservoir dan sarana	Kelebihan kapasitas tanpa kendali otomatis
Kehilangan Non-Fisik	Konsumsi tidak resmi/pencurian air	Sambungan ilegal, manipulasi meter
Kehilangan Non-Fisik	Kesalahan administrasi dan pencatatan	Meter rusak/buram, kesalahan pembacaan petugas

Sumber: Diolah dari Kementerian PUPR (2014); PDAM Pintar (2022)

2. *District Metered Area* (DMA) sebagai Strategi Pengendalian NRW

District Metered Area (DMA) merupakan strategi pengendalian NRW yang banyak diterapkan penyelenggara SPAM di Indonesia, yaitu membagi jaringan distribusi menjadi zona-zona kecil yang dapat dipantau secara independen melalui meter air, manometer, dan *data logger* pada titik masuk setiap zona (Savić & Ferrari, 2014). Pembagian ini memungkinkan pengelola SPAM mengidentifikasi zona dengan tingkat kehilangan air tertinggi secara lebih presisi dibandingkan

pemantauan pada skala jaringan kota secara keseluruhan, memfokuskan upaya perbaikan pada area yang paling membutuhkan.

Tabel 10.6 Tahapan Implementasi *District Metered Area* (DMA)

Tahap	Aktivitas Utama	Keluaran
1. Studi Perencanaan	Analisis peta jaringan, identifikasi batas zona potensial	Rencana pembagian zona DMA
2. Isolasi Hidraulis	Pemasangan katup penutup untuk memisahkan zona dari jaringan lain	Zona DMA terisolasi secara hidraulis
3. Instalasi Meter Induk	Pemasangan meter, manometer, dan data logger pada titik masuk	Kemampuan pengukuran input air per zona
4. Pengumpulan Data Baseline	Pemantauan awal untuk menetapkan pola konsumsi normal	Data dasar (<i>baseline</i>) sebelum optimasi
5. Step Test & Perbaikan	Pengujian bertahap, identifikasi dan perbaikan kebocoran	Penurunan NRW pada zona bersangkutan
6. Pemantauan Berkelanjutan	Pemantauan rutin untuk deteksi kebocoran baru	NRW zona tetap terkendali dalam jangka panjang

Sumber: Disintesis dari Savić & Ferrari (2014)

Studi kasus penerapan DMA pada salah satu kawasan perumahan di Kota Jambi menunjukkan penurunan tingkat kehilangan air dari 31 persen menjadi 29 persen dalam satu bulan setelah pengoperasian DMA dimulai, sementara studi kasus lain menunjukkan penurunan yang lebih signifikan hingga 8,5 poin persentase pada periode pemantauan yang sama. Metode pengujian tahap (*step test*) yang dilakukan dalam kerangka DMA memungkinkan tim teknis mengidentifikasi lokasi kebocoran spesifik dengan menutup katup secara bertahap pada sub-zona tertentu sambil memantau perubahan tekanan dan aliran, sebuah metode yang lebih sistematis dibandingkan pencarian kebocoran secara acak.

Tabel 10.7 Kriteria Ideal Pembentukan *District Metered Area* (DMA)

Kriteria	Rekomendasi Umum	Alasan
Jumlah sambungan pelanggan	1.000–3.000 sambungan per DMA	Cukup besar untuk efisiensi, cukup kecil untuk presisi deteksi
Status hidraulis	Zona tertutup/terisolasi dengan batas jelas	Mencegah aliran silang yang mengacaukan pengukuran
Titik masuk terukur	Idealnya satu titik masuk per DMA	Menyederhanakan perhitungan neraca air zona
Topografi	Elevasi relatif homogen	Mengurangi variasi tekanan yang mempersulit analisis

Sumber: Disintesis dari Savić & Ferrari (2014)

3. Teknologi Deteksi Kebocoran Berbasis Akustik dan IoT

Teknologi deteksi kebocoran berbasis akustik telah menjadi metode paling efektif untuk mendeteksi kebocoran pipa air, dengan pangsa pasar sebesar 49,34 persen pada 2023 dibandingkan metode lain, berkat keunggulan sensitivitas deteksi dan fleksibilitas penerapannya. Sensor akustik bekerja dengan mendeteksi anomali suara yang dihasilkan oleh kebocoran, suara mendesis atau bergemerikik yang khas ketika air keluar dari titik kebocoran bertekanan kemudian menganalisis pola sinyal tersebut untuk membedakan kebocoran sesungguhnya dari kantong udara maupun kebisingan eksternal (Xylem, 2018).

Contoh penerapan nyata teknologi ini ditunjukkan oleh kasus Singapura, yang memasang lebih dari 300 sensor akustik pada jaringan pipa air minumnya, dilengkapi analitik lanjutan yang memungkinkan pengelola air mendeteksi kebocoran dan pecahnya pipa secara *real-time*, memprediksi permintaan, dan menyimulasikan operasi jaringan. Melalui sistem ini, Singapura berhasil menekan tingkat NRW hingga hanya lima persen dari total air yang diproduksi, salah satu tingkat terendah di dunia (Xylem, 2018). Studi kasus lain di Malaysia mencatat keberhasilan mengidentifikasi 252 titik kebocoran dalam 17 bulan pertama penerapan

sistem akustik pada lebih dari 3.000 kilometer jaringan pipa, menghemat lebih dari 25 juta liter air per hari (Mueller, 2019).

Tabel 10.8 Perbandingan Teknologi Deteksi Kebocoran Jaringan Air

Teknologi	Prinsip Kerja	Keunggulan Utama
Sensor Akustik	Mendeteksi anomali suara akibat aliran air dari titik bocor	Akurasi tinggi (>90%), tidak mengganggu operasi jaringan
Sensor Tekanan pada DMA	Analisis perubahan tekanan pada zona termonitor	Identifikasi zona bermasalah tanpa perlu sensor per titik
Korelasi Waktu Tunda (<i>Time Delay</i>)	Estimasi lokasi bocor dari selisih waktu sinyal antarsensor	Lokalisasi presisi tanpa penggalian eksploratif
Inspeksi Robot Dalam Pipa (<i>SmartBall</i>)	Perangkat mengapung di dalam pipa mendeteksi anomali akustik	Inspeksi menyeluruh pipa besar tanpa henti operasi

Sumber: Diolah dari *Astute Analytica* (2024); *Xylem* (2018); *Mueller Systems* (2019)

4. Monitoring Kualitas Air *Real-Time*

Selain pemantauan kuantitas air untuk keperluan pengendalian NRW, pemantauan kualitas air secara *real-time* menjadi dimensi penting lain dari *smart water management*. Parameter kualitas air yang umum dipantau melalui sensor IoT mencakup tingkat keasaman (pH), kekeruhan (*turbidity*), salinitas, oksigen terlarut (*dissolved oxygen*), dan konsentrasi klorin residual pada air minum yang telah diolah. Pemantauan berkelanjutan ini memungkinkan deteksi dini kontaminasi yang jauh lebih cepat dibandingkan pengujian sampel laboratorium berkala, yang secara inheren memiliki keterlambatan antara waktu pengambilan sampel dan hasil analisis.

Integrasi sensor kualitas air dengan sistem peringatan otomatis memungkinkan tindakan korektif segera, seperti penghentian sementara distribusi dari sumber yang terkontaminasi atau peningkatan dosis disinfektan, sebelum air yang tidak memenuhi standar mencapai

konsumen. Kemampuan ini menjadi sangat relevan mengingat regulasi Indonesia melalui SNI 6774:2023 mengenai Unit Instalasi Pengolahan Air Minum menegaskan bahwa pengoperasian instalasi pengolahan air harus dilakukan dengan pengendalian parameter proses secara berkala agar unit pengolahan bekerja optimal, sebuah kebutuhan yang jauh lebih mudah dipenuhi melalui pemantauan otomatis berkelanjutan dibandingkan pengujian manual periodik.

Tabel 10.9 Parameter Kualitas Air yang Umum Dipantau melalui Sensor IoT

Parameter	Satuan Umum	Signifikansi bagi Kualitas Air
pH (Keasaman)	Skala 0–14	Indikator korosivitas dan kesesuaian proses disinfeksi
Kekeruhan (<i>Turbidity</i>)	NTU (<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>)	Indikator partikel tersuspensi dan efektivitas filtrasi
Klorin Residual	mg/L	Indikator kecukupan disinfeksi untuk mencegah kontaminasi mikroba
Oksigen Terlarut (<i>DO</i>)	mg/L	Indikator kesehatan ekosistem air dan proses biologis IPAL
Salinitas	ppt (<i>parts per thousand</i>)	Indikator intrusi air laut atau pencemaran pada sumber air baku
Konduktivitas Listrik	μS/cm	Indikator total zat terlarut dalam air

C. IoT untuk Pengelolaan Sumber Daya Air

Internet of Things (IoT) berperan penting dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya air melalui pemantauan kondisi air secara real-time. Berbagai sensor dipasang pada sungai, waduk,

bendungan, jaringan distribusi, maupun instalasi pengolahan air untuk mengukur parameter seperti tinggi muka air, debit aliran, tekanan, pH, suhu, kekeruhan, dan kualitas air. Data yang dikumpulkan dikirim secara otomatis ke pusat kendali sehingga kondisi sumber daya air dapat dipantau secara berkelanjutan. Data yang diperoleh dari perangkat IoT memungkinkan pengelola mendeteksi lebih dini berbagai permasalahan, seperti kebocoran pipa, penurunan kualitas air, kekurangan pasokan, maupun potensi banjir akibat peningkatan debit sungai. Sistem juga dapat mengirimkan peringatan otomatis kepada petugas sehingga tindakan penanganan dapat dilakukan lebih cepat untuk meminimalkan gangguan layanan dan dampak terhadap masyarakat.

Integrasi IoT dengan *Big Data Analytics* dan *Artificial Intelligence* (AI) memungkinkan analisis pola penggunaan air, prediksi kebutuhan air, serta perencanaan distribusi yang lebih efisien. Selain itu, teknologi ini mendukung pemeliharaan prediktif terhadap jaringan distribusi dan infrastruktur air sehingga kerusakan dapat diantisipasi sebelum berkembang menjadi masalah yang lebih serius. Dalam implementasi *smart city*, IoT menjadi fondasi pengelolaan sumber daya air yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan. Pemanfaatan teknologi ini membantu meningkatkan keandalan layanan air bersih, mengurangi pemborosan sumber daya, menjaga kualitas lingkungan, serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan berbasis data.

1. Dampak Perubahan Iklim terhadap Ketersediaan Sumber Daya Air

Perubahan iklim memberikan tekanan signifikan terhadap ketersediaan dan variabilitas sumber daya air. Pola curah hujan yang semakin tidak menentu menghasilkan periode kekeringan yang lebih panjang diselingi curah hujan ekstrem yang memicu banjir, menciptakan tantangan ganda bagi pengelola sumber daya air yang harus menyeimbangkan antara konservasi air pada musim kering dan pengendalian risiko banjir pada musim basah. Proyeksi bahwa hampir dua miliar orang akan menghadapi kelangkaan air pada 2025, sebagian besar didorong oleh ketidakpastian pola hidrologi akibat perubahan iklim ini.

Dalam konteks ini, jaringan sensor IoT berperan ganda: sebagai instrumen efisiensi operasional pada kondisi normal, dan sebagai instrumen ketahanan iklim pada kondisi ekstrem. Kemampuan

memantau kondisi hidrologi secara granular dan mendekati waktu nyata menjadi semakin penting ketika pola historis tidak lagi dapat diandalkan sepenuhnya sebagai basis perencanaan, menuntut pendekatan adaptif yang terus memperbarui pemahaman mengenai kondisi sumber daya air berdasarkan data terkini, bukan sekadar asumsi statis berdasarkan data historis jangka panjang.

2. Arsitektur IoT untuk Manajemen Sumber Daya Air

Tinjauan sistematis mengenai sistem manajemen air berbasis IoT menegaskan bahwa arsitektur sistem tersebut umumnya mencakup berbagai parameter pengukuran seperti tingkat air, pH, kekeruhan, dan salinitas, yang dikumpulkan melalui jaringan sensor terdistribusi dan dianalisis untuk mendukung pengambilan keputusan pengelolaan sumber daya air secara menyeluruh. Berbeda dengan arsitektur IoT untuk jaringan distribusi perkotaan, arsitektur untuk manajemen sumber daya air berskala kawasan atau daerah aliran sungai menuntut cakupan geografis yang jauh lebih luas, sehingga pemilihan teknologi komunikasi LPWAN semakin krusial.

Kajian komprehensif mengenai teknologi *smart water* untuk membangun kota air cerdas (*smart water city*) mengidentifikasi bahwa publikasi penelitian pada domain ini terus meningkat, mencerminkan urgensi topik ini di tengah peningkatan permintaan air global akibat pertumbuhan ekonomi, perubahan iklim, dan peningkatan populasi (MDPI, 2024). IoT dan Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) dipandang sebagai kunci konservasi sumber daya air yang tersedia, dengan kota-kota cerdas menerapkan IoT untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi fasilitas perkotaan termasuk aplikasi air cerdas (MDPI, 2024).

Pada skala pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) yang melintasi batas administratif, arsitektur IoT idealnya dirancang secara berjenjang, jaringan sensor hulu yang memantau curah hujan dan debit awal, jaringan sensor tengah yang memantau kualitas air dan pemanfaatan oleh berbagai pengguna di sepanjang aliran, serta jaringan sensor hilir yang memantau dampak akumulatif terhadap kawasan permukiman dan pertanian. Arsitektur berjenjang semacam ini memungkinkan pemodelan hidrologi yang lebih akurat dibandingkan pemantauan pada satu titik saja, mendukung pengelolaan sumber daya

air terpadu yang mempertimbangkan keterkaitan hulu-hilir secara menyeluruh.

3. Sistem Peringatan Dini Banjir dan Kekeringan

Sistem peringatan dini berbasis IoT memiliki potensi dampak sosial yang signifikan bagi konteks Indonesia yang rentan terhadap bencana hidrometeorologi. Penerapan sensor tekanan berperforma tinggi yang diintegrasikan dengan jaringan LoRaWAN untuk pemantauan banjir perkotaan menunjukkan sistem semacam ini dapat memberikan data ketinggian air secara *real-time* dengan biaya implementasi yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem konvensional (Te *et al.*, 2024).

Selain sistem peringatan dini banjir, pemantauan berkelanjutan terhadap ketinggian air tanah dan debit sungai memungkinkan deteksi dini kondisi kekeringan, memberikan waktu bagi otoritas pengelola sumber daya air untuk mengambil langkah mitigasi seperti pembatasan penggunaan air non-esensial atau optimasi distribusi air baku ke wilayah yang paling membutuhkan. Kombinasi kedua kemampuan ini yaitu deteksi dini banjir dan kekeringan, menjadikan jaringan sensor IoT pada sumber daya air sebagai instrumen ketahanan iklim ganda, sejalan dengan pembahasan ketahanan infrastruktur terhadap perubahan iklim.

Tabel 10.10 Sistem Peringatan Dini Berbasis IoT untuk Bencana Hidrologis

Jenis Bencana	Sensor Utama	Manfaat Sistem Peringatan Dini
Banjir Perkotaan	Sensor tekanan/ultrasonik ketinggian air, sensor curah hujan	Waktu evakuasi lebih panjang, pengurangan kerugian ekonomi
Banjir Bandang	Sensor debit sungai hulu, sensor curah hujan kawasan tangkapan	Peringatan dini bagi wilayah hilir sebelum air tiba
Kekeringan	Sensor ketinggian air tanah, sensor debit sungai baseline	Perencanaan mitigasi pembatasan penggunaan air lebih dini

Jenis Bencana	Sensor Utama	Manfaat Sistem Peringatan Dini
Longsor (terkait air)	Piezometer, sensor kelembapan tanah (lihat Bab 4)	Deteksi dini saturasi tanah pemicu longsor

Sumber: Disintesis dari Te et al. (2024)

4. *Smart Irrigation* untuk Pertanian

Sektor pertanian merupakan konsumen air terbesar secara global, menjadikan irigasi cerdas (*smart irrigation*) sebagai domain penting dalam pengelolaan sumber daya air secara menyeluruh. Irigasi presisi memanfaatkan sensor kelembapan tanah untuk memantau tingkat air secara *real-time* dan mengoptimalkan keputusan irigasi, dengan sensor yang ditempatkan pada berbagai kedalaman untuk menangkap variasi kelembapan di seluruh zona perakaran tanaman (Bwambale, Abagale, & Anornu, 2022).

Selain sensor lapangan langsung, penginderaan jarak jauh berbasis satelit, seperti pencitraan Sentinel-2 yang semakin banyak dimanfaatkan untuk memetakan heterogenitas spasial kelembapan tanah pada skala kawasan yang luas, melengkapi data sensor titik yang terbatas jangkauannya. Model seperti OPTRAM yang memanfaatkan citra satelit terbukti menghasilkan estimasi kelembapan tanah yang akurat, mendukung pengelolaan irigasi dan pemahaman pertumbuhan tanaman pada skala yang jauh lebih luas dibandingkan jaringan sensor darat semata, sekaligus meningkatkan pengelolaan sumber daya air pada sektor pertanian secara keseluruhan (Hassanpour *et al.*, 2020; Stańczyk *et al.*, 2023; Crioni *et al.*, 2025).

Sistem IoT mengombinasikan data sensor kelembapan tanah dengan data prakiraan cuaca dan model kebutuhan air tanaman untuk menentukan jadwal irigasi yang presisi, secara otomatis menyesuaikan volume air yang diberikan berdasarkan kebutuhan aktual tanaman, bukan jadwal tetap yang seringkali menghasilkan pemberian air berlebih atau kurang (PMC, 2025). Studi penerapan sistem pemantauan tanaman cerdas berbasis mikrokontroler dengan sensor kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan udara yang terintegrasi platform *cloud* menunjukkan pengurangan konsumsi air hingga sekitar 40 persen dibandingkan

metode irigasi konvensional, dengan akurasi pemeliharaan kelembapan tanah optimal mencapai 92 persen (arXiv, 2026).

Tabel 10.11 Manfaat *Smart Irrigation* Dibandingkan Irigasi Konvensional

Aspek	Irigasi Konvensional	Smart Irrigation Berbasis IoT
Basis keputusan penyiraman	Jadwal tetap atau perkiraan visual	Data sensor kelembapan tanah real-time
Konsumsi air	Cenderung berlebih akibat margin keamanan visual	Berkurang signifikan (dapat mencapai ~40%)
Adaptasi terhadap cuaca	Manual, sering terlambat	Otomatis terintegrasi data prakiraan cuaca
Kebutuhan tenaga kerja	Tinggi untuk pemantauan manual rutin	Rendah, pemantauan jarak jauh via aplikasi

D. Infrastruktur Hijau dan Ketahanan Lingkungan

1. Konsep dan Prinsip Infrastruktur Hijau

Infrastruktur hijau (*green infrastructure*) merupakan pendekatan pembangunan yang memanfaatkan proses alami dan ekosistem untuk menyediakan berbagai layanan lingkungan sekaligus mendukung kebutuhan masyarakat. Berbeda dengan infrastruktur konvensional yang didominasi oleh bangunan fisik seperti beton, aspal, dan saluran drainase tertutup, infrastruktur hijau mengintegrasikan unsur-unsur alam seperti ruang terbuka hijau, taman kota, hutan kota, lahan basah, koridor hijau, atap hijau (*green roof*), dinding hijau (*green wall*), taman hujan (*rain garden*), dan permukaan berpori (*permeable pavement*) ke dalam perencanaan kawasan. Tujuannya adalah menciptakan sistem yang mampu menjalankan fungsi ekologis secara optimal sekaligus memberikan manfaat sosial dan ekonomi. Infrastruktur hijau dirancang berdasarkan prinsip keberlanjutan, efisiensi sumber daya, konservasi keanekaragaman hayati, adaptasi terhadap perubahan iklim, serta peningkatan kualitas hidup masyarakat. Dengan pendekatan ini,

pembangunan tidak hanya berfokus pada pertumbuhan ekonomi, tetapi juga menjaga keseimbangan antara aktivitas manusia dan kelestarian lingkungan sehingga manfaatnya dapat dirasakan oleh generasi sekarang maupun mendatang.

2. Peran Infrastruktur Hijau dalam Ketahanan Lingkungan

Infrastruktur hijau memiliki peran strategis dalam meningkatkan ketahanan lingkungan terhadap berbagai tekanan, seperti urbanisasi, perubahan iklim, pencemaran, dan degradasi ekosistem. Vegetasi yang terdapat pada taman kota, hutan kota, dan ruang terbuka hijau mampu menyerap karbon dioksida, menghasilkan oksigen, menyaring polutan udara, serta menurunkan suhu lingkungan melalui proses evapotranspirasi. Selain itu, keberadaan area resapan air membantu meningkatkan infiltrasi air hujan ke dalam tanah sehingga mengurangi limpasan permukaan (*surface runoff*) yang menjadi penyebab banjir di kawasan perkotaan. Infrastruktur hijau juga berfungsi menjaga kualitas air dengan menyaring sedimen dan berbagai zat pencemar sebelum memasuki sungai maupun air tanah. Dari sisi ekologi, kawasan hijau menyediakan habitat bagi berbagai jenis flora dan fauna sehingga membantu menjaga keanekaragaman hayati di tengah perkembangan wilayah perkotaan. Dengan demikian, infrastruktur hijau tidak hanya memperbaiki kualitas lingkungan, tetapi juga meningkatkan kemampuan ekosistem dalam menghadapi berbagai gangguan dan perubahan kondisi alam.

3. Implementasi Infrastruktur Hijau dalam Pembangunan Berkelanjutan

Penerapan infrastruktur hijau dilakukan melalui integrasi unsur-unsur alami ke dalam perencanaan tata ruang dan pembangunan infrastruktur perkotaan. Contohnya meliputi pembangunan taman kota sebagai ruang publik sekaligus daerah resapan air, penerapan atap hijau pada bangunan untuk mengurangi panas dan meningkatkan efisiensi energi, penggunaan perkerasan berpori agar air hujan dapat meresap ke dalam tanah, pembangunan kolam retensi dan taman hujan untuk mengendalikan limpasan air, serta pelestarian sempadan sungai dan kawasan hutan kota sebagai penyangga ekosistem. Perkembangan teknologi digital juga mendukung pengelolaan infrastruktur hijau melalui pemanfaatan sensor *Internet of Things* (IoT), citra satelit,

Geographic Information System (GIS), drone, dan analisis data untuk memantau kondisi vegetasi, kelembapan tanah, kualitas udara, hingga efektivitas sistem drainase alami. Integrasi teknologi tersebut memungkinkan pengelolaan infrastruktur hijau dilakukan secara lebih akurat, efisien, dan berbasis data sehingga mendukung implementasi konsep *smart city* yang berkelanjutan.

4. Tantangan dan Strategi Pengembangan Infrastruktur Hijau

Meskipun memiliki banyak manfaat, pengembangan infrastruktur hijau masih menghadapi berbagai tantangan. Keterbatasan lahan akibat pesatnya urbanisasi sering menyebabkan ruang terbuka hijau berkurang dan tergantikan oleh pembangunan fisik. Selain itu, kebutuhan investasi awal yang relatif tinggi, kurangnya koordinasi antarinstansi, rendahnya kesadaran masyarakat terhadap pentingnya ruang hijau, serta belum optimalnya integrasi kebijakan lingkungan dalam perencanaan pembangunan menjadi hambatan dalam implementasinya. Untuk mengatasi tantangan tersebut diperlukan strategi yang komprehensif, antara lain melalui penyusunan kebijakan tata ruang yang berorientasi pada keberlanjutan, peningkatan investasi pada infrastruktur berbasis alam, penerapan teknologi digital untuk pemantauan lingkungan, serta penguatan kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, akademisi, dan masyarakat. Edukasi publik mengenai pentingnya pelestarian lingkungan juga perlu terus ditingkatkan agar masyarakat berpartisipasi aktif dalam menjaga dan memanfaatkan infrastruktur hijau. Dengan dukungan kebijakan, teknologi, dan partisipasi seluruh pemangku kepentingan, infrastruktur hijau dapat menjadi fondasi utama dalam membangun lingkungan yang tangguh, sehat, produktif, dan berkelanjutan.



BAB XI

KEAMANAN SIBER DAN TATA KELOLA INFRASTRUKTUR DIGITAL

Buku ini telah menguraikan bagaimana BIM, IoT, dan *smart infrastructure* mengubah cara infrastruktur sipil dirancang, dibangun, dan dioperasikan. Namun, setiap lapisan konektivitas dan digitalisasi yang menghadirkan manfaat tersebut juga membuka permukaan serangan (*attack surface*) baru yang tidak dikenal pada infrastruktur konvensional. Keamanan siber bukan lagi persoalan eksklusif departemen teknologi informasi, melainkan tanggung jawab yang harus dipahami setiap insinyur sipil yang bekerja dengan sistem digital terhubung.

A. Risiko Keamanan Siber dalam Infrastruktur

Penerapan teknologi digital pada infrastruktur modern meningkatkan efisiensi pengelolaan, tetapi juga membuka berbagai risiko keamanan siber. Infrastruktur yang terhubung melalui jaringan komunikasi, *Internet of Things* (IoT), komputasi awan (*Cloud Computing*), dan sistem kendali digital menjadi lebih rentan terhadap serangan siber yang dapat mengganggu operasional layanan penting, seperti listrik, air bersih, transportasi, dan telekomunikasi. Oleh karena itu, keamanan siber menjadi aspek yang tidak terpisahkan dari pengelolaan *smart infrastructure*. Ancaman keamanan siber dapat berupa akses tanpa izin, pencurian data, penyebaran *malware*, *ransomware*, serangan *Distributed Denial of Service* (DDoS), maupun manipulasi sistem kendali. Serangan tersebut dapat menyebabkan kebocoran informasi, kerusakan perangkat, gangguan layanan publik, hingga kegagalan operasional yang berdampak pada keselamatan masyarakat dan kerugian ekonomi.

Untuk mengurangi risiko tersebut, diperlukan penerapan berbagai langkah pengamanan, seperti enkripsi data, autentikasi berlapis,

pengendalian hak akses, pembaruan perangkat lunak secara berkala, pemantauan jaringan secara terus-menerus, serta sistem deteksi dan respons terhadap ancaman siber. Selain itu, edukasi dan pelatihan bagi operator juga penting untuk meningkatkan kesadaran terhadap potensi serangan dan cara penanganannya. Dalam konsep *smart city*, keamanan siber merupakan fondasi utama bagi keberlanjutan layanan digital. Perlindungan terhadap data, jaringan, dan sistem infrastruktur tidak hanya menjaga keandalan operasional, tetapi juga meningkatkan kepercayaan masyarakat terhadap pemanfaatan teknologi. Dengan strategi keamanan yang komprehensif, infrastruktur digital dapat beroperasi secara aman, tangguh, dan mampu mendukung pelayanan publik yang berkelanjutan.

1. Lanskap Ancaman Keamanan Siber Global pada Infrastruktur Kritis

Transformasi digital pada infrastruktur kritis telah meningkatkan efisiensi pengelolaan layanan publik, tetapi juga memperluas potensi ancaman keamanan siber. Infrastruktur kritis mencakup berbagai sektor yang menjadi penopang kehidupan masyarakat, seperti energi, air bersih, transportasi, telekomunikasi, kesehatan, serta layanan pemerintahan. Ketergantungan pada teknologi digital, *Industrial Control System* (ICS), *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), *Internet of Things* (IoT), dan komputasi awan menjadikan sektor-sektor tersebut sebagai sasaran utama serangan siber karena gangguan pada sistem dapat berdampak langsung terhadap keselamatan publik, stabilitas ekonomi, dan keamanan nasional.

Ancaman keamanan siber terhadap infrastruktur kritis semakin beragam dan kompleks. Bentuk serangan yang sering terjadi meliputi *malware*, *ransomware*, *Distributed Denial of Service* (DDoS), pencurian data, eksploitasi kerentanan perangkat lunak, serta akses ilegal ke sistem kendali. Selain dilakukan oleh pelaku kejahatan siber untuk memperoleh keuntungan finansial, serangan juga dapat berasal dari kelompok terorganisasi maupun aktor yang didukung negara (*state-sponsored actors*) dengan tujuan mengganggu layanan publik, melakukan spionase, atau melemahkan stabilitas suatu negara. Meningkatnya konektivitas antarperangkat turut memperbesar peluang penyebaran serangan ke berbagai sistem yang saling terhubung.

Dampak serangan terhadap infrastruktur kritikal dapat sangat luas, mulai dari terhentinya layanan listrik dan distribusi air bersih, terganggunya transportasi, hingga lumpuhnya sistem layanan kesehatan dan komunikasi. Selain kerugian finansial akibat gangguan operasional, insiden keamanan siber juga dapat mengancam keselamatan masyarakat apabila sistem pengendalian tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Oleh karena itu, organisasi pengelola infrastruktur dituntut untuk mampu mendeteksi ancaman sejak dini, memperkuat ketahanan sistem, serta memiliki prosedur respons dan pemulihan yang efektif ketika terjadi insiden.

Menghadapi lanskap ancaman yang terus berkembang, pengelolaan keamanan siber perlu dilakukan secara menyeluruh melalui penerapan manajemen risiko, pembaruan sistem secara berkala, pengamanan jaringan, enkripsi data, autentikasi berlapis, serta pemantauan keamanan secara berkesinambungan. Di samping itu, kolaborasi antara pemerintah, operator infrastruktur, sektor swasta, dan lembaga keamanan siber menjadi faktor penting dalam berbagi informasi ancaman, meningkatkan kesiapsiagaan, dan membangun sistem pertahanan yang lebih tangguh. Pendekatan yang terintegrasi tersebut akan memperkuat ketahanan infrastruktur kritikal terhadap berbagai ancaman siber yang terus berkembang seiring pesatnya transformasi digital.

2. Klasifikasi Ancaman: *Malware*, *Ransomware*, dan Serangan Rantai Pasok

Ancaman keamanan siber terhadap infrastruktur dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori utama. *Malware* atau perangkat lunak berbahaya mencakup berbagai program yang dirancang untuk merusak, mengganggu, atau memperoleh akses tidak sah ke sistem komputer. *Ransomware*, sebagai subkategori *malware* yang paling merugikan secara finansial, mengenkripsi data korban dan menuntut tebusan untuk memulihkan akses, dengan target yang semakin bergeser dari sekadar pencurian data menuju penempatan kemampuan tersembunyi (*pre-positioning*) di dalam sistem esensial untuk digunakan pada waktu yang dikehendaki penyerang.

Serangan rantai pasok (*supply chain attack*) mengeksploitasi kepercayaan antarorganisasi dalam ekosistem bisnis, mengompromikan satu vendor teknologi untuk mengakses ribuan organisasi klien yang

menggunakan produk atau layanan vendor tersebut. Pada 2023, sejumlah kompromi tingkat tinggi terhadap penyedia teknologi berdampak pada ribuan korban yang terhubung secara global. Dalam konteks *smart infrastructure*, kerentanan rantai pasok menjadi perhatian khusus mengingat ekosistem sensor IoT, platform BIM, dan sistem SCADA seringkali melibatkan puluhan vendor perangkat keras dan perangkat lunak yang berbeda dalam satu proyek infrastruktur.

Tabel 11.1 Klasifikasi Ancaman Keamanan Siber pada Infrastruktur

Kategori Ancaman	Mekanisme	Contoh Dampak pada Infrastruktur
<i>Malware/ Ransomware</i>	Enkripsi atau perusakan data, permintaan tebusan	Kelumpuhan sistem SCADA, kehilangan data operasional
Serangan Rantai Pasok	Kompromi vendor untuk mengakses banyak korban	Akses tersembunyi ke banyak sistem infrastruktur sekaligus
<i>Denial of Service (DoS/DDoS)</i>	Membanjiri sistem dengan trafik untuk melumpuhkan layanan	Gangguan akses <i>dashboard</i> pemantauan infrastruktur
Akses Tidak Sah (<i>Unauthorized Access</i>)	Eksplorasi kredensial lemah atau kerentanan sistem	Manipulasi data sensor, pengambilan kendali aktuator
Ancaman Persisten Tingkat Lanjut (APT)	Infiltrasi jangka panjang, tersembunyi, terarah	Pengintaian dan sabotase infrastruktur strategis nasional

3. Kerentanan Spesifik pada Sistem BIM dan IoT

Keamanan siber IIoT-*edge computing*, lapisan persepsi arsitektur IoT merupakan titik paling rentan terhadap serangan siber, meliputi manipulasi *node* palsu, injeksi kode berbahaya, dan gangguan *denial-of-service* yang dapat melumpuhkan seluruh jaringan sensor. Karakteristik unik perangkat IoT infrastruktur, beroperasi pada kondisi lingkungan ekstrem, di lokasi terpencil tanpa pengawasan langsung, dan dengan siklus pembaruan perangkat lunak yang jarang menciptakan tantangan

keamanan yang berbeda secara fundamental dari sistem teknologi informasi konvensional.

Pada domain BIM, kerentanan keamanan siber cenderung berbeda karakteristiknya dibandingkan IoT. *Common Data Environment* (CDE) menyimpan informasi desain sensitif, termasuk detail struktural, sistem keamanan bangunan, dan tata letak infrastruktur kritikal yang apabila diakses pihak tidak berwenang dapat dimanfaatkan untuk merencanakan serangan fisik maupun siber yang lebih terarah. Model BIM yang mengandung informasi rinci mengenai sistem kelistrikan, jalur evakuasi, dan titik kerentanan struktural suatu gedung pemerintahan atau fasilitas strategis, misalnya, menjadi aset informasi yang bernilai tinggi bagi aktor jahat apabila jatuh ke tangan yang salah.

Tabel 11.2 Perbandingan Karakteristik Kerentanan Keamanan Siber BIM vs IoT

Aspek	Kerentanan pada Sistem BIM	Kerentanan pada Sistem IoT
Aset yang terancam	Informasi desain, model struktural, tata letak keamanan	Integritas data sensor, kendali aktuator fisik
Titik akses utama	Common Data Environment, platform kolaborasi	Lapisan persepsi (sensor, gerbang IoT)
Dampak utama kompromi	Kebocoran informasi strategis untuk perencanaan serangan lanjutan	Manipulasi data real-time, kendali fisik tidak sah
Tantangan mitigasi	Kontrol akses granular pada model multi-disiplin	Keterbatasan daya komputasi perangkat untuk enkripsi kompleks

4. Dampak Serangan Siber terhadap Infrastruktur Fisik

Berbeda dengan serangan siber pada sistem teknologi informasi murni yang umumnya berdampak pada kerahasiaan dan integritas data, serangan siber pada infrastruktur yang terhubung dengan sistem fisik (*cyber-physical systems*) menghasilkan konsekuensi fisik langsung, pemadaman listrik, gangguan pasokan air, hingga potensi kegagalan

struktural apabila sistem kendali otomatis dimanipulasi. Karakteristik inilah yang menjadikan keamanan siber infrastruktur kritikal sebagai isu keselamatan publik, bukan sekadar isu kerugian finansial atau reputasi semata.

Insiden pada wilayah Laut Baltik menjadi ilustrasi nyata risiko infrastruktur bawah laut: sejak 2023, setidaknya sebelas kabel bawah laut mengalami kerusakan, dengan tujuh insiden terkonsentrasi antara November 2024 dan Januari 2025. Salah satu insiden pemutusan kabel oleh kapal tanker yang terkait jaringan penghindar sanksi memutus lima kabel bawah laut sekaligus, menyebabkan kabel listrik Estlink 2 antara Finlandia dan Estonia tidak berfungsi selama lebih dari tujuh bulan dengan biaya perbaikan mencapai 70 juta dolar Amerika Serikat, sekaligus meningkatkan latensi internet 20 hingga 30 persen di negara-negara terdampak. Insiden ini menegaskan bahwa ancaman terhadap infrastruktur digital tidak selalu bersifat siber murni, melainkan dapat pula berupa sabotase fisik yang menyasar infrastruktur pendukung konektivitas digital itu sendiri.

B. Perlindungan Data dan Sistem IoT

Lanskap ancaman terhadap infrastruktur digital bersifat luas dan terus berkembang. Subbab ini membahas secara lebih teknis bagaimana data dan sistem IoT dapat dilindungi secara efektif, mencakup prinsip dasar keamanan data, enkripsi dan autentikasi, keamanan berlapis, manajemen identitas, hingga strategi pemulihan bencana.

1. Prinsip Dasar Keamanan Data Infrastruktur: Segitiga CIA

Prinsip dasar keamanan informasi yang paling banyak dirujuk secara global adalah segitiga CIA yaitu Kerahasiaan (*Confidentiality*), Integritas (*Integrity*), dan Ketersediaan (*Availability*). Kerahasiaan memastikan informasi hanya dapat diakses oleh pihak yang berwenang, relevan misalnya bagi data desain BIM sensitif. Integritas memastikan data tidak diubah secara tidak sah, krusial bagi data sensor IoT yang menjadi basis keputusan rekayasa, data sensor yang term manipulasi dapat menyesatkan keputusan pemeliharaan infrastruktur kritikal.

Ketersediaan memastikan informasi dan sistem dapat diakses oleh pihak berwenang ketika dibutuhkan, menjadi pertimbangan utama bagi sistem pemantauan infrastruktur yang harus tetap berfungsi bahkan

dalam kondisi darurat seperti bencana alam. Ketiga prinsip ini seringkali saling berkompromi satu sama lain, penguatan kerahasiaan melalui enkripsi yang kompleks dapat mengurangi ketersediaan akibat waktu proses yang lebih lama, menuntut organisasi menyeimbangkan ketiganya sesuai konteks risiko spesifik setiap sistem.

Sejumlah pakar keamanan siber infrastruktur kritikal menambahkan dimensi keempat pada kerangka CIA konvensional, yaitu keselamatan (*safety*), mengingat implikasi unik sistem *cyber-physical*. Berbeda dengan sistem teknologi informasi murni yang cukup mempertimbangkan tiga dimensi CIA, sistem yang terhubung dengan aktuator fisik, seperti pintu air bendungan atau sistem kendali lalu lintas perlu mempertimbangkan bagaimana kegagalan keamanan siber dapat secara langsung membahayakan keselamatan manusia, menuntut lapisan pertimbangan tambahan di luar kerangka CIA konvensional yang berakar dari dunia keamanan teknologi informasi murni.

Tabel 11.3 Prinsip CIA dalam Konteks Infrastruktur Cerdas

Prinsip	Definisi	Contoh Penerapan pada Smart Infrastructure
Kerahasiaan (<i>Confidentiality</i>)	Informasi hanya diakses pihak berwenang	Enkripsi model BIM fasilitas strategis, kontrol akses CDE
Integritas (<i>Integrity</i>)	Data tidak diubah secara tidak sah	Validasi data sensor SHM sebelum digunakan analitik
Ketersediaan (<i>Availability</i>)	Sistem dapat diakses ketika dibutuhkan	Redundansi sistem peringatan dini banjir

2. Enkripsi dan Autentikasi pada Sistem IoT

Enkripsi berfungsi mengubah data menjadi bentuk yang tidak dapat dibaca tanpa kunci dekripsi yang sesuai, melindungi kerahasiaan data baik saat tersimpan (*at rest*) maupun saat ditransmisikan (*in transit*) melalui jaringan komunikasi. Bagi perangkat IoT infrastruktur dengan sumber daya komputasi terbatas, pemilihan algoritma enkripsi perlu menyeimbangkan tingkat keamanan dengan konsumsi daya dan daya

komputasi yang tersedia, mengingat algoritma enkripsi yang terlalu kompleks dapat menguras baterai sensor yang dirancang untuk beroperasi bertahun-tahun tanpa penggantian.

Autentikasi memastikan bahwa setiap perangkat atau pengguna yang mengakses sistem benar-benar merupakan entitas yang sah, umumnya melalui kombinasi kredensial seperti kata sandi, sertifikat digital, atau autentikasi multifaktor (*Multi-Factor Authentication/MFA*). Panduan keamanan siber perangkat IoT dari *National Institute of Standards and Technology* (NIST) melalui dokumen NIST SP 800-213 dan NISTIR 8259 menegaskan bahwa setiap perangkat IoT idealnya memiliki identitas unik yang dapat diverifikasi, mencegah perangkat palsu (*fake node*) menyusup ke dalam jaringan sensor infrastruktur.

Tabel 11.4 Pertimbangan Enkripsi Perangkat IoT Berdaya Rendah

Pertimbangan	Tantangan	Pendekatan Umum
Konsumsi daya	Enkripsi kompleks menguras baterai sensor jangka panjang	Algoritma enkripsi ringan (<i>lightweight cryptography</i>)
Kapasitas memori	Perangkat sensor memiliki memori sangat terbatas	Kunci enkripsi berukuran lebih kecil namun tetap aman
Latensi komunikasi	Enkripsi menambah waktu pemrosesan sebelum transmisi	Enkripsi di lapisan gerbang IoT, bukan di setiap sensor individual
Manajemen kunci	Distribusi dan pembaruan kunci pada ribuan perangkat tersebar	Sistem manajemen kunci terpusat otomatis

3. Keamanan Berlapis (*Defense in Depth*) untuk *Smart Infrastructure*

Prinsip pertahanan berlapis (*defense in depth*) menegaskan bahwa keamanan sistem tidak boleh bergantung pada satu mekanisme kontrol tunggal, melainkan pada kombinasi berbagai kontrol keamanan yang saling melengkapi di setiap lapisan arsitektur. Pendekatan ini beranjak dari asumsi realistis bahwa tidak ada satu kontrol keamanan yang sempurna, apabila satu lapisan pertahanan berhasil ditembus,

lapisan-lapisan berikutnya tetap memberikan perlindungan, memperlambat atau menggagalkan keseluruhan upaya serangan.

Pada arsitektur *smart infrastructure*, penerapan *defense in depth* mencakup segmentasi jaringan yang mengisolasi sistem kendali fisik (*Operational Technology/OT*) dari jaringan teknologi informasi umum (*Information Technology/IT*), pembatasan akses berdasarkan prinsip kebutuhan minimum (*least privilege*), pemantauan anomali secara berkelanjutan, serta rencana respons insiden yang telah diuji melalui simulasi berkala. Standar internasional ISA/IEC 62443 secara khusus dikembangkan untuk keamanan sistem otomasi dan kendali industri, memberikan kerangka acuan yang lebih relevan bagi konteks *cyber-physical systems* infrastruktur dibandingkan standar keamanan teknologi informasi umum dirancang untuk lingkungan kantor konvensional.

Tabel 11.5 Lapisan Pertahanan Berlapis pada *Smart Infrastructure*

Lapisan Pertahanan	Kontrol Keamanan	Tujuan
Perimeter	Firewall, segmentasi jaringan IT-OT	Mencegah akses awal dari jaringan eksternal
Jaringan Internal	Deteksi intrusi, pemantauan trafik anomali	Deteksi pergerakan lateral penyerang dalam jaringan
Perangkat/ <i>Endpoint</i>	Autentikasi perangkat, pembaruan keamanan berkala	Mencegah kompromi perangkat individual (sensor, gerbang IoT)
Data	Enkripsi <i>at-rest</i> dan <i>in-transit</i> , kontrol akses	Melindungi kerahasiaan dan integritas data meski lapisan lain ditembus
Manusia & Proses	Pelatihan kesadaran keamanan, rencana respons insiden	Mengurangi risiko <i>human error</i> dan mempercepat respons

4. Manajemen Identitas dan Akses (*Identity and Access Management*)

Manajemen Identitas dan Akses (*Identity and Access Management/IAM*) mengatur siapa yang dapat mengakses sumber daya sistem tertentu dan tindakan apa yang dapat mereka lakukan. Dalam konteks kolaborasi BIM, IAM diwujudkan melalui kontrol akses berbasis peran (*Role-Based Access Control/RBAC*) pada *Common Data Environment*, memastikan bahwa tim struktur hanya dapat mengubah model struktur, sementara tim MEP hanya memiliki akses ubah pada model disiplinnya sendiri, sejalan dengan matriks tanggung jawab RACI.

Prinsip kebutuhan minimum (*least privilege*) menegaskan bahwa setiap pengguna atau sistem sebaiknya hanya diberikan tingkat akses minimum yang diperlukan untuk menjalankan fungsinya, mengurangi potensi kerugian apabila kredensial pengguna tersebut disalahgunakan atau dicuri. Penerapan IAM yang matang pada ekosistem *smart infrastructure* turut mencakup audit berkala terhadap hak akses yang diberikan, memastikan bahwa akses yang tidak lagi diperlukan, misalnya akses milik karyawan yang telah berpindah divisi atau berhenti bekerja segera dicabut, mencegah akumulasi hak akses berlebih (*privilege creep*) yang memperluas permukaan serangan dari waktu ke waktu.

C. Tata Kelola Infrastruktur Digital

1. Konsep Tata Kelola Infrastruktur Digital

Tata kelola infrastruktur digital merujuk pada kerangka kebijakan, proses, dan struktur organisasi yang mengarahkan bagaimana aset digital infrastruktur seperti data, sistem, dan teknologi, dikelola untuk mencapai tujuan organisasi sekaligus mematuhi kewajiban regulasi. Berbeda dengan manajemen operasional sehari-hari yang berfokus pada pelaksanaan tugas teknis, tata kelola berfokus pada pengambilan keputusan strategis mengenai arah, prioritas, dan akuntabilitas pengelolaan infrastruktur digital, sejalan dengan pembahasan tata kelola kelembagaan SPAM dan tata kelola data strategis.

Kerangka Kerja Keamanan Siber NIST versi 2.0 yang dirilis pada Februari 2024 menegaskan pentingnya fungsi Tata Kelola (*Govern*) sebagai fungsi inti yang menempatkan keamanan siber sebagai risiko yang harus dipertimbangkan pada tataran dewan direksi bersama risiko finansial dan reputasi, bukan sekadar isu teknis yang didelegasikan

sepenuhnya kepada divisi teknologi informasi (Cyberhaven, 2025). Pergeseran ini menandai kematangan pemahaman global bahwa keamanan siber infrastruktur digital adalah persoalan tata kelola korporat, sejalan dengan pembahasan pentingnya kepemimpinan dalam transformasi digital yang telah ditekankan berulang kali sepanjang buku ini.

Tabel 11.6 Tingkat Kematangan Tata Kelola Infrastruktur Digital

Tingkat	Karakteristik	Ciri Utama
1. Ad Hoc	Tidak ada kebijakan formal, respons reaktif	Keputusan keamanan diambil kasus per kasus tanpa standar
2. Berkembang	Kebijakan dasar mulai disusun namun belum konsisten	Sebagian sistem memiliki kontrol keamanan dasar
3. Terdefinisi	Kebijakan terdokumentasi dan diterapkan secara organisasi	Proses tata kelola konsisten di seluruh divisi
4. Terkelola	Pemantauan metrik tata kelola secara kuantitatif	Evaluasi kinerja tata kelola berbasis data
5. Optimal	Perbaikan berkelanjutan berdasarkan pembelajaran insiden	Budaya tata kelola tertanam dalam seluruh aspek organisasi

2. Kerangka Tata Kelola Data (*Data Governance*)

Tata kelola data merupakan komponen inti tata kelola infrastruktur digital, mencakup kebijakan mengenai kepemilikan data, standar kualitas data, klasifikasi sensitivitas data, dan siklus hidup data dari penciptaan hingga pemusnahan. Sebagaimana telah ditegaskan dalam konteks data sebagai aset strategis, organisasi yang matang memperlakukan data infrastruktur, baik data BIM, data sensor IoT, maupun data operasional lainnya dengan tingkat perhatian tata kelola yang setara dengan aset fisik konvensional.

Kerangka tata kelola data yang efektif menjawab pertanyaan mendasar: siapa yang memiliki data, siapa yang bertanggung jawab atas

kualitasnya, siapa yang berwenang mengakses dan menggunakannya, serta bagaimana kepatuhan terhadap regulasi privasi dipastikan. Bagi *smart infrastructure* yang menghasilkan data dari sensor publik seperti kamera lalu lintas atau sensor kualitas udara, tata kelola data juga perlu mempertimbangkan dimensi etika dan privasi warga.

Tabel 11.7 Klasifikasi Sensitivitas Data pada Ekosistem *Smart Infrastructure*

Tingkat Sensitivitas	Contoh Data	Kontrol yang Direkomendasikan
Publik	Data cuaca umum, informasi layanan publik	Akses terbuka, tanpa autentikasi khusus
Internal	Data operasional rutin, jadwal pemeliharaan	Autentikasi dasar, akses terbatas staf organisasi
Rahasia	Model BIM detail struktural, data pribadi warga (kamera)	Enkripsi, kontrol akses berbasis peran, audit log
Sangat Rahasia	Detail keamanan fasilitas strategis nasional	Enkripsi tingkat tinggi, akses terbatas personel berwenang khusus

3. Peran Kelembagaan dan Manajemen Risiko

Struktur kelembagaan yang jelas menjadi prasyarat tata kelola infrastruktur digital yang efektif. Peran seperti *Chief Information Security Officer* (CISO) atau setara pada organisasi yang lebih kecil bertanggung jawab mengoordinasikan strategi keamanan siber secara menyeluruh, sementara *Data Protection Officer* (DPO) yang diwajibkan berdasarkan regulasi privasi data di banyak negara termasuk Indonesia bertanggung jawab memastikan kepatuhan terhadap regulasi perlindungan data pribadi.

Manajemen risiko keamanan siber pada tataran kelembagaan mengintegrasikan penilaian risiko ke dalam siklus perencanaan strategis organisasi secara berkelanjutan, bukan aktivitas satu kali. Strategi Keamanan Siber Nasional (SKSN) Indonesia menetapkan delapan

sasaran utama yang mencerminkan pendekatan kelembagaan komprehensif: tata kelola, manajemen risiko, kesiapsiagaan dan ketahanan, perlindungan infrastruktur informasi vital, kemandirian kriptografi nasional, pembangunan kapabilitas-kapasitas-kualitas, kebijakan keamanan siber, dan kerja sama internasional.

SKSN disusun selaras dengan lima nilai dasar kehidupan berbangsa dan bernegara Indonesia: Kedaulatan, Kemandirian, Keamanan, Kebersamaan, dan Adaptif. Kelima nilai ini menegaskan bahwa strategi keamanan siber nasional tidak dapat dipisahkan dari konteks kedaulatan digital yang lebih luas, kemampuan bangsa mengelola dan melindungi ruang sibernya sendiri tanpa ketergantungan berlebihan pada teknologi maupun keahlian asing, sejalan dengan sasaran kemandirian kriptografi nasional yang secara eksplisit disebutkan dalam SKSN. Tujuan akhir SKSN mencakup terwujudnya keamanan siber, perlindungan ekosistem perekonomian digital nasional, peningkatan kapabilitas keamanan siber yang andal, serta dukungan terhadap terciptanya ruang siber global yang terbuka, aman, stabil, dan bertanggung jawab.

Tabel 11.8 Delapan Sasaran Strategi Keamanan Siber Nasional (SKSN) Indonesia

No	Sasaran	Fokus Utama
1	Tata Kelola	Struktur dan proses pengambilan keputusan keamanan siber
2	Manajemen Risiko	Identifikasi, penilaian, dan mitigasi risiko siber sistematis
3	Kesiapsiagaan dan Ketahanan	Kapasitas merespons dan memulihkan diri dari insiden
4	Perlindungan Infrastruktur Informasi Vital	Pengamanan aset informasi strategis nasional
5	Kemandirian Kriptografi Nasional	Pengembangan kapabilitas enkripsi domestik
6	Pembangunan Kapabilitas, Kapasitas, dan Kualitas	Peningkatan SDM dan infrastruktur keamanan siber

No	Sasaran	Fokus Utama
7	Kebijakan Keamanan Siber	Kerangka regulasi dan kebijakan pendukung
8	Kerja Sama Internasional	Kolaborasi lintas negara menghadapi ancaman global

Tabel 11.9 Peran Kelembagaan Kunci dalam Tata Kelola Keamanan Siber Organisasi

Peran	Tanggung Jawab Utama	Tingkat Organisasi
Dewan Direksi/Pimpinan	Pengawasan strategis risiko siber, alokasi anggaran	Strategis (fungsi <i>Govern</i> NIST CSF)
<i>Chief Information Security Officer</i> (CISO)	Koordinasi strategi keamanan siber menyeluruh	Taktis-manajerial
<i>Data Protection Officer</i> (DPO)	Kepatuhan regulasi privasi data pribadi (UU PDP)	Kepatuhan/hukum
Tim Respons Insiden (CERT/CSIRT)	Deteksi, respons, dan pemulihan insiden siber	Operasional teknis
Seluruh Karyawan/Personel Proyek	Kepatuhan kebijakan, kewaspadaan terhadap phishing	Operasional-individual

4. Tata Kelola Kolaboratif Multi-Stakeholder

Sebagaimana ditegaskan dalam konteks fragmentasi kelembagaan pengelolaan sumber daya air, tata kelola infrastruktur digital yang efektif menuntut koordinasi lintas-lembaga yang seringkali sulit diwujudkan dalam praktik. Kajian mengenai penegakan hukum siber di Indonesia menemukan bahwa sinergi antarlembaga, Kementerian Komunikasi dan Informatika (Kominfo), BSSN, Kepolisian Republik Indonesia, dan sektor swasta masih belum berjalan

efektif, menciptakan kesenjangan koordinasi yang dapat dieksploitasi aktor jahat (Yusuf et al., 2021).

Model tata kelola kolaboratif yang matang idealnya melibatkan pemerintah sebagai regulator dan fasilitator, sektor swasta sebagai penyedia teknologi dan operator infrastruktur, akademisi sebagai sumber riset dan pengembangan kapasitas, serta komunitas sebagai pemangku kepentingan yang terdampak langsung oleh keputusan tata kelola, empat pihak yang secara eksplisit disebutkan sebagai pemangku kepentingan SKSN. Forum kolaborasi lintas-sektor seperti *Indonesia Privacy & Security Summit* yang melibatkan BSSN, asosiasi pengusaha, dan pelaku industri keamanan siber menjadi contoh konkret mekanisme tata kelola kolaboratif yang mendorong sinergi antarpemangku kepentingan.

D. Regulasi dan Standarisasi Teknologi Infrastruktur

1. Kerangka Regulasi dan Standar Internasional

Tiga kerangka standar internasional paling banyak dirujuk dalam praktik keamanan siber infrastruktur adalah ISO 27001, *NIST Cybersecurity Framework* (CSF), dan ISA/IEC 62443. ISO 27001 merupakan standar tersertifikasi yang menetapkan persyaratan spesifik bagi Sistem Manajemen Keamanan Informasi (*Information Security Management System/ISMS*), mengharuskan organisasi mengikuti siklus *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) secara berkelanjutan untuk memperoleh dan mempertahankan sertifikasi (Sprintzeal, 2026).

Siklus PDCA yang menjadi inti sertifikasi ISO 27001 terdiri atas empat tahap berkelanjutan: tahap Rencanakan (*Plan*) mencakup penyusunan kebijakan ISMS selaras dengan visi dan tujuan organisasi; tahap Lakukan (*Do*) mencakup implementasi kebijakan, prosedur, dan kontrol keamanan yang telah direncanakan; tahap Periksa (*Check*) mencakup pemantauan berkelanjutan dan audit internal terhadap efektivitas ISMS; dan tahap Tindak (*Act*) mencakup penerapan tindakan korektif berdasarkan temuan audit sebelum siklus berulang kembali (Sprintzeal, 2026). Sifat siklikal ini menegaskan bahwa sertifikasi ISO 27001 bukan pencapaian satu kali, melainkan komitmen perbaikan berkelanjutan yang sejalan dengan prinsip pemantauan berkelanjutan yang telah ditegaskan dalam konteks *smart water management*.

NIST Cybersecurity Framework versi 2.0, yang dirilis pada 26 Februari 2024 sebagai pembaruan besar pertama sejak 2018 setelah

mengumpulkan masukan dari lebih dari 4.000 partisipan di 100 negara, memperluas cakupan dari yang awalnya berfokus pada infrastruktur kritikal menjadi kerangka yang dapat diadopsi seluruh jenis organisasi. Perubahan paling signifikan adalah penambahan fungsi Tata Kelola (*Govern*) sebagai fungsi inti yang melengkapi lima fungsi sebelumnya yaitu Identifikasi (*Identify*), Lindungi (*Protect*), Deteksi (*Detect*), Respons (*Respond*), dan Pulihkan (*Recover*), serta penguatan panduan manajemen risiko rantai pasok (Cyberhaven, 2025).

Tabel 11.10 Enam Fungsi Inti *NIST Cybersecurity Framework 2.0*

Fungsi	Fokus Utama	Contoh Penerapan pada Infrastruktur
<i>Govern</i> (Tata Kelola)	Pengawasan strategis risiko siber di tataran manajemen puncak	Kebijakan keamanan siber proyek BIM
<i>Identify</i> (Identifikasi)	Pemetaan aset, data, dan risiko organisasi	Inventarisasi seluruh sensor IoT dan sistem SCADA
<i>Protect</i> (Lindungi)	Implementasi kontrol keamanan preventif	Enkripsi, IAM, <i>defense in depth</i>
<i>Detect</i> (Deteksi)	Pemantauan berkelanjutan untuk anomali	Deteksi anomali data sensor
<i>Respond</i> (Respons)	Tindakan tanggap ketika insiden terdeteksi	Protokol darurat manual bendungan
<i>Recover</i> (Pulihkan)	Pemulihan layanan dan pembelajaran pascainsiden	<i>Business continuity planning</i>

ISA/IEC 62443 dikembangkan secara spesifik untuk keamanan sistem otomasi dan kendali industri, menjadikannya standar yang paling relevan bagi konteks *cyber-physical systems* infrastruktur yang telah dibahas sepanjang buku ini, dibandingkan ISO 27001 dan NIST CSF yang dirancang untuk cakupan teknologi informasi yang lebih umum. Banyak organisasi infrastruktur kritikal mengadopsi kombinasi ketiga standar ini secara bersamaan, ISO 27001 untuk tata kelola keamanan

informasi organisasi secara keseluruhan, NIST CSF sebagai kerangka komunikasi risiko dengan manajemen puncak, dan IEC 62443 untuk kontrol teknis spesifik pada sistem OT.

Tabel 11.11 Perbandingan Cakupan Standar Keamanan Siber Internasional

Standar	Fokus Utama	Sifat
ISO 27001	Sistem Manajemen Keamanan Informasi organisasi	Tersertifikasi, dapat diaudit pihak ketiga
NIST CSF 2.0	Kerangka komunikasi risiko fleksibel lintas organisasi	Panduan sukarela, tidak tersertifikasi
ISA/IEC 62443	Keamanan sistem otomasi dan kendali industri (OT)	Standar teknis spesifik domain industri

2. Regulasi Keamanan Siber dan Data di Indonesia

Kerangka regulasi keamanan siber dan data di Indonesia dibangun melalui beberapa instrumen hukum utama. Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022 tentang Pelindungan Data Pribadi (UU PDP) menjadi landasan hukum komprehensif pertama Indonesia mengenai perlindungan data pribadi, dengan sanksi pidana hingga enam tahun penjara bagi pelaku kebocoran data serta potensi tuntutan perdata hingga dua persen dari pendapatan perusahaan yang mengakibatkan kebocoran data pribadi. UU PDP mulai berlaku efektif penuh sejak Oktober 2024, menandai era baru akuntabilitas hukum atas pengelolaan data pribadi di Indonesia.

Pasal 16 ayat (2) UU PDP menetapkan tujuh prinsip pengumpulan data pribadi yang wajib dipatuhi setiap pengendali data: dilakukan secara terbatas dan spesifik, sah secara hukum, dan transparan; sesuai dengan tujuannya; menjamin hak subjek data pribadi; dilakukan secara akurat, lengkap, tidak menyesatkan, dan mutakhir; melindungi keamanan data dari akses, pengungkapan, atau pengubahan yang tidak sah; memberitahukan tujuan pemrosesan serta kegagalan perlindungan data; dan memusnahkan data setelah masa retensi berakhir. Ketujuh prinsip ini secara langsung relevan bagi pengelola *smart infrastructure*

dan *smart city*, mengingat sistem tersebut secara rutin mengumpulkan data yang berpotensi bersinggungan dengan data pribadi warga, seperti data dari kamera pengawasan lalu lintas atau sensor okupansi gedung.

Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2024 tentang Informasi dan Transaksi Elektronik (perubahan kedua dari UU ITE) mengatur ruang lingkup lebih luas mencakup keamanan informasi, transaksi elektronik, dan pencegahan kejahatan siber, meskipun implementasinya menghadapi kritik terkait potensi tafsir ganda pada pasal-pasal tertentu yang berpotensi membatasi kebebasan berekspresi (Al-Bahst, 2024). Peraturan Pemerintah Nomor 71 Tahun 2019 tentang Penyelenggaraan Sistem dan Transaksi Elektronik menetapkan kewajiban setiap Penyelenggara Sistem Elektronik untuk menyelenggarakan sistem elektroniknya secara andal, aman, dan bertanggung jawab.

Tabel 11.12 Kerangka Regulasi Keamanan Siber dan Data Pribadi Indonesia

Regulasi	Tahun	Cakupan Utama
UU No. 27/2022 tentang Pelindungan Data Pribadi	2022 (efektif 2024)	Kewajiban pelindungan data pribadi, sanksi pidana dan perdata
UU No. 1/2024 tentang ITE (perubahan kedua)	2024	Keamanan informasi, transaksi elektronik, pencegahan kejahatan siber
PP No. 71/2019 tentang PSTE	2019	Kewajiban keandalan dan keamanan sistem elektronik
Perpres No. 28/2021 tentang BSSN	2021	Kelembagaan otoritas keamanan siber nasional
RUU Keamanan dan Ketahanan Siber (RUU KKS)	Dalam pembahasan	Kerangka hukum komprehensif keamanan siber (belum disahkan)

3. Kelembagaan Keamanan Siber Indonesia

Badan Siber dan Sandi Negara (BSSN), yang dibentuk melalui Peraturan Presiden Nomor 28 Tahun 2021, merupakan lembaga pemerintah yang berada di bawah dan bertanggung jawab kepada Presiden, mengoptimalkan pelaksanaan tugas dan fungsi di bidang

keamanan siber dan sandi negara. BSSN bekerja sama dengan Kementerian Komunikasi dan Digital, Kepolisian Republik Indonesia melalui Direktorat Tindak Pidana Siber, serta otoritas pengawas data sektoral dalam menjalankan mandat perlindungan siber nasional.

Insiden PDNS, pembentukan dan pelatihan tim *Computer Emergency Response Team* (CERT) di instansi-instansi vital menjadi salah satu langkah konkret penguatan kapasitas respons insiden secara cepat dan terkoordinasi. Meskipun kerangka kelembagaan telah terbentuk, survei BSSN menunjukkan kurang dari separuh lembaga pemerintah di Indonesia memiliki kebijakan keamanan siber yang memadai, menegaskan kesenjangan implementasi yang sejalan dengan pola kesenjangan implementasi teknologi.

4. Sertifikasi Profesi Keamanan Siber

Sertifikasi kompetensi BIM ialah profesi keamanan siber juga memiliki kerangka sertifikasi yang diakui secara internasional, seperti *Certified Information Systems Security Professional* (CISSP) dan *Certified Information Security Manager* (CISM), yang menjadi acuan kompetensi bagi profesional keamanan siber senior. Bagi konteks Indonesia, sertifikasi *Data Protection Officer* mulai berkembang seiring implementasi UU PDP, meskipun kerangka sertifikasi nasional yang terstandardisasi secara resmi, setara SKKNI BIM masih dalam tahap pengembangan lebih lanjut.

Kesenjangan tenaga ahli keamanan siber bersertifikat di Indonesia sejalan dengan kesenjangan kompetensi digital mulai dari kesenjangan kompetensi BIM hingga kesenjangan analitik data *smart water*. Perguruan tinggi dan lembaga pelatihan vokasi di Indonesia perlu memperluas program studi dan pelatihan keamanan siber yang terintegrasi dengan kurikulum teknik sipil dan infrastruktur, memastikan generasi insinyur masa depan memiliki pemahaman dasar keamanan siber yang memadai untuk bekerja dengan sistem BIM dan IoT.



BAB XII

SMART CONSTRUCTION DAN OTOMASI KONSTRUKSI

Industri konstruksi secara historis dikenal sebagai salah satu sektor dengan tingkat produktivitas yang relatif stagnan dibandingkan sektor manufaktur, yang telah lama mengalami transformasi signifikan melalui otomasi dan robotika. Ironisnya, konstruksi, sebagai salah satu sektor tertua dan terbesar dalam perekonomian global, masih sangat bergantung pada tenaga kerja manual untuk sebagian besar prosesnya. Namun demikian, tekanan ganda berupa kelangkaan tenaga kerja terampil, kenaikan biaya material, dan tuntutan keselamatan kerja yang semakin ketat telah mendorong percepatan adopsi teknologi otomasi dan robotika pada industri konstruksi dalam satu dekade terakhir.

A. Otomasi dalam Proses Konstruksi

Otomasi konstruksi merujuk pada penggunaan mesin, perangkat lunak, dan sistem kendali untuk melaksanakan tugas-tugas konstruksi yang sebelumnya dikerjakan secara manual, dengan tingkat intervensi manusia yang berkurang secara bertahap. Otomasi tidak selalu berarti robot humanoid yang menggantikan pekerja secara langsung, melainkan mencakup spektrum luas mulai dari peralatan semi-otomatis yang membantu meringankan beban fisik pekerja hingga sistem yang beroperasi secara mandiri tanpa pengawasan langsung.

1. Konsep dan Evolusi Otomasi Konstruksi: Menuju *Construction 4.0*

Istilah *Construction 4.0* merujuk pada penerapan prinsip Revolusi Industri Keempat, yang mencakup siber-fisik, IoT, big data, dan kecerdasan buatan pada industri konstruksi. Karmakar dan Delhi (2021) mengidentifikasi bahwa *Construction 4.0* tidak sekadar tentang penerapan teknologi individual, melainkan tentang transformasi

menyeluruh terhadap cara proyek konstruksi direncanakan, dikoordinasikan, dan dieksekusi melalui integrasi sistem siber-fisik yang menghubungkan dunia digital (model BIM, data sensor) dengan dunia fisik (material, peralatan, dan struktur yang sedang dibangun).

Evolusi otomasi konstruksi dapat dipetakan melalui beberapa generasi: dimulai dari mekanisasi dasar (penggunaan alat berat konvensional), dilanjutkan dengan otomasi parsial pada proses tertentu (misalnya mesin pencampur beton otomatis), kemudian otomasi terintegrasi yang menghubungkan berbagai proses melalui sistem kendali terpusat, hingga otomasi cerdas berbasis AI yang mampu beradaptasi terhadap kondisi lapangan yang bervariasi tanpa memerlukan pemrograman ulang secara manual untuk setiap skenario.

Tabel 12.1 Evolusi Generasi Otomasi Konstruksi

Generasi	Karakteristik	Contoh Teknologi
Mekanisasi Dasar	Penggunaan alat berat untuk menggantikan tenaga manual	Ekskavator, crane konvensional
Otomasi Parsial	Otomatisasi pada tugas atau proses tertentu	Mesin pencampur beton otomatis, mesin pemotong tulangan CNC
Otomasi Terintegrasi	Koordinasi berbagai proses melalui sistem kendali terpusat	Sistem manajemen alat berat terpusat, jalur produksi prefabrikasi otomatis
Otomasi Cerdas Berbasis AI	Sistem yang beradaptasi terhadap variasi kondisi lapangan secara mandiri	Alat berat otonom, robot konstruksi berbasis <i>machine learning</i>

2. Prefabrikasi dan Manufaktur Modular Otomatis

Prefabrikasi ialah proses manufaktur komponen bangunan di fasilitas produksi lepas lokasi (*off-site*) sebelum diangkut dan dirakit di lokasi proyek, merupakan salah satu domain otomasi konstruksi yang paling matang penerapannya. Berbeda dengan konstruksi konvensional

yang sangat bergantung pada kondisi cuaca dan tenaga kerja lapangan, prefabrikasi memungkinkan produksi komponen bangunan dalam kondisi lingkungan yang terkendali dan konsisten, serupa dengan proses manufaktur pada industri otomotif. Robot industri memainkan peran krusial dalam prefabrikasi otomatis, memastikan hasil produksi yang presisi dan konsisten pada skala produksi tinggi.

Zhu *et al* (2023) mengembangkan pendekatan pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*) untuk perencanaan perakitan waktu nyata pada konstruksi prefabrikasi berbasis robot, yang memungkinkan robot menentukan urutan dan strategi perakitan komponen secara optimal berdasarkan kondisi aktual komponen yang tersedia, alih-alih mengikuti urutan perakitan tetap yang telah ditentukan sebelumnya. Pendekatan adaptif semacam ini penting mengingat variasi kecil pada dimensi komponen prefabrikasi, akibat toleransi manufaktur maupun deformasi selama transportasi dapat memengaruhi strategi perakitan optimal di lokasi proyek.

3. Peralatan Konstruksi Otonom

Selain prefabrikasi, otomasi juga diterapkan pada peralatan konstruksi yang beroperasi langsung di lokasi proyek. Alat berat otonom, seperti bulldoser dan ekskavator yang dapat beroperasi tanpa operator manusia langsung di dalam kabin semakin banyak diterapkan untuk tugas-tugas repetitif seperti perataan tanah dan penggalian pada area yang telah dipetakan secara presisi. Robot pengangkat semi-otomatis yang dirancang untuk membantu pekerja mengangkat material berat, mengikuti instruksi manual pekerja namun dengan bantuan tenaga mekanis, juga menjadi solusi antara yang mengurangi cedera pekerja tanpa memerlukan otomatisasi penuh.

- a. Alat berat otonom penuh: ekskavator dan bulldoser yang dapat beroperasi tanpa operator langsung pada area kerja yang telah dipetakan dan dipagari secara digital (*geofencing*).
- b. Robot pengangkat semi-otomatis (*material unit lift enhancer*): perangkat yang membantu mengurangi beban fisik pekerja saat mengangkat material berat, sambil tetap dikendalikan secara manual oleh pekerja.
- c. Robot pemasang bata dan panel otomatis: robot yang secara presisi menempatkan bata atau panel dinding berdasarkan koordinat yang telah ditentukan dari model BIM.

- d. Sistem pencampuran dan pengecoran beton otomatis: peralatan yang mengatur proporsi campuran beton secara presisi dan mengalirkannya ke lokasi pengecoran tanpa intervensi manual yang intensif.

4. Manfaat dan Tantangan Otomasi Konstruksi

Penerapan otomasi konstruksi memberikan manfaat multidimensi. Dari sisi produktivitas, robot dan peralatan otomatis mampu bekerja secara berkelanjutan tanpa mengalami kelelahan, sehingga secara signifikan meningkatkan kecepatan produksi dibandingkan tenaga kerja manual. Dari sisi keselamatan, otomasi memungkinkan tugas-tugas berisiko tinggi, seperti bekerja pada ketinggian, ruang terbatas, atau lingkungan dengan paparan zat berbahaya dialihkan dari pekerja manusia kepada mesin. Dari sisi kualitas, presisi dan konsistensi hasil kerja robot mengurangi variabilitas yang sering terjadi akibat kelelahan atau perbedaan keterampilan antarpekerja manusia.

Namun demikian, adopsi otomasi konstruksi menghadapi tantangan signifikan. Survei industri konstruksi Eropa menunjukkan bahwa sebagian besar perusahaan menghadapi tekanan ganda berupa kenaikan harga material dan energi di satu sisi, serta kelangkaan tenaga kerja terampil di sisi lain, kondisi yang sesungguhnya mendorong minat terhadap otomasi, namun sekaligus menjadi kendala karena keterbatasan modal untuk investasi teknologi baru. Selain itu, keterbatasan mobilitas robot industri konvensional yang berukuran besar dan berat membatasi penerapannya pada tugas-tugas di lokasi proyek yang beragam kondisinya, mendorong pengembangan robot bergerak (*mobile robot*) yang lebih ringkas namun dengan kapabilitas yang masih terbatas dibandingkan robot industri stasioner.

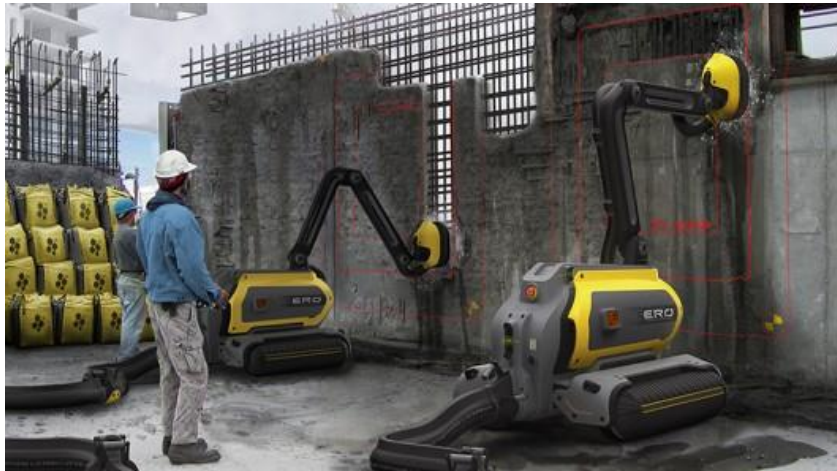
Tabel 12.2 Perbandingan Pertimbangan Investasi Otomasi Konstruksi

Faktor	Tantangan	Strategi Mitigasi
Biaya Investasi Awal	Modal signifikan untuk peralatan dan pelatihan	Skema sewa peralatan, adopsi bertahap dimulai dari teknologi berbiaya rendah
Kompetensi Operator	Keterbatasan tenaga kerja terlatih mengoperasikan teknologi baru	Pelatihan bertahap, kemitraan dengan penyedia teknologi untuk transfer keahlian
Mobilitas Peralatan	Robot industri konvensional kurang fleksibel untuk lokasi beragam	Pengembangan robot bergerak yang lebih ringkas dan portabel
Ketidakpastian Regulasi	Standar keselamatan dan sertifikasi belum sepenuhnya mapan	Kolaborasi dengan asosiasi industri dan regulator untuk penyusunan standar bertahap

B. Robotika dan Teknologi Konstruksi Modern

1. Klasifikasi Robot Konstruksi

Robot konstruksi dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi dan tingkat mobilitasnya. Robot manipulator tetap (*fixed-base manipulator*) umumnya digunakan pada fasilitas prefabrikasi lepas lokasi untuk tugas berulang seperti pengelasan dan perakitan komponen. Robot bergerak beroda atau berkaki (*mobile robot*) digunakan untuk tugas yang memerlukan pergerakan pada area konstruksi yang luas, seperti robot pemetaan progres atau robot inspeksi. Robot terbang (*drone*) digunakan untuk tugas yang memerlukan jangkauan udara. Robotika konstruksi kontemporer semakin terkonsentrasi pada tiga dimensi utama yaitu klasifikasi jenis robot berdasarkan fungsi, penerapan pada tahapan siklus hidup konstruksi tertentu, dan pola kolaborasi manusia-robot yang menyertainya.



Gambar 12.1 Contoh Robot Konstruksi

Tabel 12.3 Klasifikasi Robot Konstruksi Berdasarkan Fungsi dan Tahap Siklus Hidup

Jenis Robot	Karakteristik Mobilitas	Tahap Siklus Hidup Utama	Contoh Tugas
Manipulator Industri Tetap	Statis, terpasang pada fasilitas produksi	Prefabrikasi/manufaktur lepas lokasi	Pengelasan rangka baja, perakitan panel dinding
Robot Bergerak Darat	Mobilitas tinggi pada permukaan datar/medan tertentu	Konstruksi struktural, finishing	Pemasangan bata, pengecatan otomatis, pengangkutan material
Robot Terbang (Drone)	Mobilitas udara tiga dimensi	Survei, pemantauan progres, inspeksi	Pemetaan topografi, dokumentasi progres, inspeksi ketinggian
Robot Bawah Air (ROV)	Mobilitas dalam lingkungan terendam air	Konstruksi dan inspeksi maritim	Inspeksi pondasi tiang pancang, konstruksi bawah air

Selain klasifikasi berdasarkan mobilitas fisik, robot konstruksi juga dapat dibedakan berdasarkan tingkat otonominya, mulai dari robot

yang sepenuhnya dikendalikan jarak jauh oleh operator manusia (*teleoperated*), robot semi-otonom yang melaksanakan sebagian tugas secara mandiri namun tetap memerlukan pengawasan manusia pada titik keputusan kritis, hingga robot otonom penuh yang mampu menyelesaikan tugas dari awal hingga akhir tanpa intervensi manusia pada kondisi operasional yang telah ditentukan. Sebagian besar robot konstruksi yang beroperasi secara komersial saat ini berada pada kategori teleoperasi atau semi-otonom, mengingat kompleksitas dan variabilitas lingkungan konstruksi nyata masih menjadi tantangan signifikan bagi otonomi penuh, serupa dengan tantangan yang dihadapi kendaraan otonom pada lingkungan jalan terbuka.

2. Kolaborasi Manusia-Robot (*Human-Robot Collaboration*)

Alih-alih menggantikan pekerja manusia secara total, tren yang berkembang pada robotika konstruksi kontemporer justru mengarah pada kolaborasi manusia-robot (*Human-Robot Collaboration/HRC*), di mana robot dan pekerja manusia bekerja berdampingan, masing-masing menangani aspek pekerjaan yang paling sesuai dengan kapabilitasnya. Pada prefabrikasi konstruksi kayu, misalnya, robot dapat menangani tugas pengukuran presisi dan pemotongan komponen, sementara pekerja manusia menangani tugas yang memerlukan penilaian kualitatif dan penyesuaian di tempat yang sulit diotomatisasi sepenuhnya.

Penelitian mengenai beban kognitif dan fisik pekerja dalam kolaborasi manusia-robot pada konstruksi prefabrikasi menunjukkan bahwa perancangan alur kerja HRC yang baik perlu mempertimbangkan bukan hanya efisiensi produksi, tetapi juga dampak psikofisiologis terhadap pekerja, mengingat interaksi dengan robot dapat menimbulkan beban kognitif tambahan berupa kebutuhan memantau pergerakan robot demi keselamatan, di samping beban fisik dari tugas itu sendiri. Perancangan HRC yang optimal karenanya memerlukan keseimbangan antara produktivitas dan kenyamanan kerja pekerja manusia yang terlibat.

3. Percetakan 3D Konstruksi (*3D Concrete Printing*)

Percetakan beton tiga dimensi (*3D Concrete Printing/3DCP*), juga dikenal sebagai konstruksi aditif (*Additive Construction*), merupakan salah satu terobosan robotika konstruksi yang paling banyak menarik perhatian publik maupun industri. Teknologi ini bekerja dengan

cara mengekstrusi material cetak, umumnya beton atau material semen alternatif, lapis demi lapis mengikuti jalur yang telah diprogram melalui lengan robot atau sistem gantry, membentuk elemen struktur tanpa memerlukan bekisting konvensional. Hassan, *et al* (2024) memberikan tinjauan komprehensif mengenai sistem percetakan, material, kinerja termal, dan pertimbangan keberlanjutan dari teknologi konstruksi aditif.

Manfaat utama 3DCP meliputi kebebasan desain geometris yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (memungkinkan bentuk lengkung dan struktur kompleks yang sulit dicapai dengan bekisting konvensional), pengurangan limbah material karena material dicetak hanya pada area yang dibutuhkan, serta potensi percepatan waktu konstruksi khususnya untuk struktur berulang seperti perumahan modular. Fonseca dan Matos (2023) turut menyoroti peluang keberlanjutan dan ekonomi sirkular pada 3DCP, termasuk pemanfaatan material daur ulang dan limbah industri sebagai bahan campuran cetak, sejalan dengan tuntutan keberlanjutan konstruksi yang semakin meningkat secara global.

Tabel 12.4 Perbandingan Konstruksi Konvensional dan Percetakan 3D Beton

Aspek	Konstruksi Konvensional	Percetakan 3D Beton (3DCP)
Kebutuhan Bekisting	Memerlukan bekisting sementara yang harus dibongkar	Umumnya tidak memerlukan bekisting konvensional
Kebebasan Geometris	Terbatas pada bentuk yang mudah dicetak bekisting	Sangat tinggi, memungkinkan bentuk lengkung kompleks
Limbah Material	Cenderung tinggi akibat pemotongan dan sisa bekisting	Relatif rendah karena material dicetak sesuai kebutuhan
Kecepatan untuk Struktur Berulang	Bergantung pada ketersediaan tenaga kerja terampil	Berpotensi lebih cepat untuk desain modular berulang

Aspek	Konstruksi Konvensional	Percetakan 3D Beton (3DCP)
Kematangan Regulasi dan Standar	Sudah mapan dan diterima luas	Masih berkembang, standar seperti ISO/ASTM 52939:2023 baru diterbitkan

4. Robot untuk Tugas Berbahaya: Demolisi dan Inspeksi

Selain konstruksi baru, robotika juga berperan penting pada tugas demolisi dan inspeksi struktur yang berisiko tinggi bagi pekerja manusia. Robot demolisi jarak jauh memungkinkan operator mengendalikan mesin penghancur struktur dari jarak aman tanpa harus berada di dekat struktur yang berisiko roboh secara tidak terkendali. Robot inspeksi yang dilengkapi kamera dan sensor dapat memasuki ruang terbatas seperti terowongan, saluran bawah tanah, atau ruang mekanikal yang sempit untuk melakukan pemeriksaan kondisi tanpa membahayakan manusia.

Pada konteks terowongan bawah tanah dalam pembangunan, kerangka inspeksi berbasis visi yang memanfaatkan robot otonom untuk lokasi konstruksi terowongan yang belum sepenuhnya terpetakan menunjukkan bagaimana robotika dapat beroperasi pada lingkungan dinamis dengan hambatan yang berubah-ubah, sebuah tantangan yang lebih kompleks dibandingkan operasi robot pada lingkungan terkendali.

C. Drone untuk Survei dan Monitoring Proyek

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) atau drone telah menjadi salah satu teknologi yang paling cepat diadopsi pada industri konstruksi, mengingat kemampuannya menghasilkan data spasial beresolusi tinggi secara cepat, aman, dan dengan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan metode survei konvensional. Liang, Lee, Bae, Kim, dan Seo (2023) menegaskan bahwa penggunaan UAV untuk pemantauan dan inspeksi pada industri konstruksi telah menarik perhatian signifikan karena potensinya meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan akurasi pengumpulan data.

1. Jenis dan Sensor Drone untuk Konstruksi

Drone yang digunakan pada industri konstruksi umumnya dilengkapi dengan berbagai jenis sensor sesuai kebutuhan aplikasi. Kamera RGB resolusi tinggi digunakan untuk dokumentasi visual dan pemetaan fotogrametri. Sensor *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*) memungkinkan pemetaan permukaan yang presisi bahkan pada area dengan vegetasi lebat, menghasilkan model elevasi digital yang akurat. Kamera termal digunakan untuk mendeteksi kebocoran panas pada selubung bangunan atau mengidentifikasi area dengan suhu tidak normal yang mengindikasikan potensi masalah struktural maupun mekanikal-elektrikal.

Tabel 12.5 Jenis Sensor Drone dan Aplikasinya pada Konstruksi

Jenis Sensor	Prinsip Kerja	Aplikasi Utama
Kamera RGB Resolusi Tinggi	Menangkap citra visual untuk pemetaan fotogrametri	Pemetaan topografi, dokumentasi progres, orthomosaik
<i>LiDAR</i>	Pengukuran jarak berbasis pantulan sinar laser	Pemodelan elevasi presisi, survei area bervegetasi lebat
Kamera Termal (Inframerah)	Deteksi variasi suhu permukaan	Deteksi kebocoran panas selubung bangunan, anomali termal struktur
Sensor Multispektral	Menangkap citra pada berbagai panjang gelombang	Analisis kondisi vegetasi dan lingkungan sekitar proyek

2. Survei Topografi dan Pemodelan 3D

Survei topografi berbasis drone menggantikan sebagian besar pekerjaan survei terestrial konvensional yang memerlukan waktu lebih lama dan tenaga kerja lebih intensif. Melalui teknik fotogrametri, ribuan citra yang saling tumpang tindih yang diambil drone diproses menjadi model titik awan (*point cloud*), model elevasi digital (*Digital Elevation Model/DEM*), dan peta orthomosaik yang presisi. Ketika dikombinasikan dengan koreksi *Real-Time Kinematic* (RTK) atau *Post-*

Processed Kinematic (PPK) menggunakan titik kontrol tanah, survei drone dapat mencapai akurasi hingga tingkat sentimeter, setara dengan metode survei terestrial konvensional namun dengan cakupan area yang jauh lebih luas dalam waktu yang jauh lebih singkat.

Data hasil survei drone menjadi masukan penting bagi perhitungan volume galian dan timbunan tanah (*earthwork*) pada tahap awal konstruksi, memungkinkan perencana memantau kesesuaian antara volume pekerjaan tanah aktual dengan perencanaan, serta mengestimasi volume stok material di lapangan secara akurat tanpa memerlukan pengukuran manual yang memakan waktu.

Sebagai ilustrasi, pada proyek pematangan lahan berskala besar, survei drone yang dilakukan secara berkala, misalnya setiap dua minggu memungkinkan kontraktor memantau volume kumulatif galian dan timbunan yang telah diselesaikan dibandingkan target volume kontrak, sehingga penagihan progres pekerjaan tanah kepada pemilik proyek dapat didasarkan pada data volumetrik yang objektif dan dapat diverifikasi, alih-alih estimasi visual yang rentan terhadap perselisihan antara kontraktor dan pengawas proyek mengenai volume pekerjaan yang telah diselesaikan.

3. Pemantauan Progres dan Perbandingan dengan Model BIM

Salah satu aplikasi paling bernilai dari drone konstruksi adalah pemantauan progres proyek secara berkala, mingguan maupun bulanan yang memungkinkan manajer proyek membandingkan kondisi aktual lapangan dengan jadwal perencanaan maupun model BIM 4D (model BIM yang terintegrasi dengan dimensi waktu penjadwalan). Model "drone" tiga dimensi yang dihasilkan dari citra udara dapat ditumpangtindihkan (*overlay*) dengan model BIM pada tahap desain, memungkinkan identifikasi otomatis terhadap deviasi antara progres aktual dan rencana, termasuk area yang mengalami keterlambatan maupun elemen yang terpasang tidak sesuai posisi rencana.

Integrasi semacam ini memperkuat keterkaitan antara sub-bab ini dengan konsep BIM yang telah dibahas pada bab-bab awal buku ini: BIM menyediakan representasi rencana (*as-planned*), sementara drone menyediakan representasi kondisi aktual (*as-built*) secara berkala sepanjang durasi konstruksi, sehingga kesenjangan antara rencana dan realisasi dapat dipantau secara sistematis dan objektif, bukan hanya berdasarkan laporan naratif dari lapangan.

4. Inspeksi Keselamatan dan Deteksi Kerusakan

Drone telah menjadi teknologi yang penting dalam inspeksi keselamatan konstruksi karena mampu menjangkau area yang sulit diakses dan berisiko tinggi tanpa membahayakan petugas. Berbagai bagian infrastruktur, seperti jembatan, gedung bertingkat, menara, bendungan, atap, cerobong, maupun perancah (*scaffolding*), dapat diperiksa dari udara menggunakan kamera beresolusi tinggi, kamera termal, atau sensor khusus. Dengan demikian, proses inspeksi dapat dilakukan lebih cepat, aman, dan efisien dibandingkan metode konvensional yang mengharuskan petugas bekerja di ketinggian atau menggunakan peralatan khusus.

Data citra dan video yang diperoleh drone kemudian dianalisis menggunakan teknologi *machine learning* dan *Artificial Intelligence* (AI) untuk mengidentifikasi berbagai jenis kerusakan secara otomatis. Algoritma pengolahan citra mampu mendeteksi retak, korosi, deformasi, kebocoran, kerusakan permukaan, hingga perubahan bentuk struktur yang mungkin sulit dikenali melalui inspeksi visual biasa. Proses otomatisasi ini meningkatkan akurasi dan konsistensi hasil inspeksi serta mengurangi kemungkinan kesalahan akibat faktor manusia.

Pemanfaatan drone juga mendukung penerapan pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*). Data hasil inspeksi yang dikumpulkan secara berkala dapat dibandingkan untuk memantau perkembangan kerusakan dari waktu ke waktu. Dengan bantuan *Big Data Analytics* dan AI, pengelola infrastruktur dapat memprediksi potensi kegagalan struktur, menentukan prioritas perbaikan, serta menyusun jadwal pemeliharaan yang lebih tepat sebelum kerusakan berkembang menjadi lebih serius.

Dalam konsep *smart infrastructure*, integrasi drone dengan IoT, *Building Information Modeling* (BIM), dan *digital twin* memungkinkan hasil inspeksi diperbarui secara langsung pada model digital aset. Hal ini memberikan informasi yang lebih akurat mengenai kondisi infrastruktur sehingga pengambilan keputusan menjadi lebih cepat dan berbasis data. Selain meningkatkan keselamatan pekerja, penggunaan drone juga membantu mengurangi waktu inspeksi, menekan biaya operasional, dan meningkatkan keandalan pengelolaan infrastruktur sepanjang siklus hidupnya.

D. Konstruksi Berbasis Teknologi Digital

1. *Digital Twin* dalam Siklus Hidup Konstruksi

Digital twin konstruksi merupakan representasi virtual dinamis dari proyek yang sedang dibangun, yang diperbarui secara berkelanjutan berdasarkan data aktual dari lapangan termasuk *data drone*, sensor IoT, dan laporan progres. Jiang, Ma, Broyd, dan Chen (2021) menegaskan bahwa *digital twin* pada sektor teknik sipil memungkinkan simulasi dan validasi skenario konstruksi sebelum dieksekusi secara fisik, mengurangi risiko kesalahan yang mahal untuk diperbaiki setelah pekerjaan fisik selesai. Kajian sistematis terkini menunjukkan bahwa penerapan *digital twin* pada tahap konstruksi memungkinkan pemantauan waktu nyata terhadap progres, keselamatan lokasi, dan utilisasi peralatan, meskipun sebagian besar penelitian *digital twin* masih terfokus pada tahap operasi pascakonstruksi dibandingkan tahap konstruksi itu sendiri, menandakan adanya peluang pengembangan lebih lanjut pada domain ini.

Pada konstruksi jembatan, Honghong, Gang, Haijiang, Tian, dan Annan (2023) mengusulkan kerangka *digital twin* yang disempurnakan dengan BIM untuk mendukung transformasi digital sepanjang siklus hidup penuh proyek jembatan, mulai dari tahap desain, konstruksi, hingga operasi, menunjukkan bagaimana kontinuitas data lintas fase yang sering kali terputus pada praktik konvensional dapat dipertahankan melalui pendekatan *digital twin* yang dirancang sejak tahap awal proyek.

2. Integrasi BIM, Robotika, Drone, dan IoT

Ekosistem *smart construction* yang matang mengintegrasikan keempat teknologi yang telah dibahas: BIM menyediakan model rujukan desain yang menjadi dasar instruksi kerja bagi robot konstruksi maupun titik pembanding bagi data drone; robotika mengeksekusi tugas fisik berdasarkan instruksi yang diturunkan dari model BIM; drone menyediakan data pemantauan progres dan validasi hasil kerja terhadap rencana; serta sensor IoT menyediakan data kondisi lingkungan dan peralatan secara berkelanjutan. Hu, Olgun, dan Assaad (2024) mengembangkan kerangka *digital twin* berbasis BIM yang mengintegrasikan penginderaan IoT nirkabel dengan pemrosesan sinyal digital dan analisis struktural untuk pemantauan kesehatan struktural

secara waktu nyata, mengilustrasikan bagaimana keempat lapisan teknologi ini dapat bekerja secara sinergis bahkan sejak tahap konstruksi.

3. Rantai Pasok Digital dan Manajemen Material Berbasis Data

Otomasi dan digitalisasi konstruksi tidak hanya terjadi pada tahap eksekusi fisik di lapangan, tetapi juga meluas pada manajemen rantai pasok material konstruksi. Sistem pelacakan material berbasis kode identifikasi digital (*barcode* atau *Radio Frequency Identification*/RFID) memungkinkan pemantauan pergerakan material dari pabrik hingga lokasi proyek secara real-time, terintegrasi dengan jadwal konstruksi pada model BIM 4D untuk memastikan material tiba tepat waktu sesuai kebutuhan tahapan pekerjaan, mengurangi risiko penumpukan material berlebih di lokasi proyek yang terbatas ruangnya maupun keterlambatan akibat material yang belum tersedia saat dibutuhkan. Integrasi data rantai pasok dengan platform *big data* konstruksi, memungkinkan analisis prediktif terhadap potensi keterlambatan pengiriman material berdasarkan pola historis pemasok, sehingga manajer proyek dapat mengantisipasi risiko rantai pasok sebelum benar-benar berdampak pada jadwal konstruksi secara keseluruhan.

4. Tantangan Adopsi *Smart Construction* di Indonesia

Adopsi teknologi *smart construction* di Indonesia menghadapi tantangan yang khas bagi negara berkembang dengan struktur industri konstruksi yang didominasi oleh perusahaan skala kecil dan menengah. Investasi awal untuk robotika, drone, dan platform *digital twin* memerlukan modal yang signifikan, sementara margin keuntungan pada banyak proyek konstruksi domestik relatif tipis. Selain itu, kesenjangan kompetensi tenaga kerja konstruksi dalam mengoperasikan teknologi digital menuntut investasi pelatihan yang tidak sedikit, sejalan dengan tantangan kompetensi sumber daya manusia.

Meskipun demikian, adopsi bertahap tetap dimungkinkan, dimulai dari teknologi dengan biaya investasi relatif terjangkau dan manfaat yang dapat dirasakan segera, seperti drone survei yang dapat disewa per proyek tanpa memerlukan kepemilikan aset penuh, atau robot pengangkat semi-otomatis yang menawarkan manfaat keselamatan kerja dengan biaya investasi yang jauh lebih rendah dibandingkan robot industri penuh. Pendekatan bertahap semacam ini konsisten dengan peta

jalan kematangan implementasi teknologi digital yang menekankan pentingnya membangun fondasi sebelum melangkah menuju kapabilitas yang lebih kompleks.



BAB XIII

KEBERLANJUTAN DAN KETAHANAN INFRASTRUKTUR

Infrastruktur sipil dibangun untuk melayani masyarakat selama puluhan tahun, bahkan lebih dari satu abad untuk beberapa jenis aset seperti bendungan dan jembatan besar. Rentang waktu layanan yang panjang ini menuntut infrastruktur tidak hanya berfungsi secara teknis pada saat dibangun, tetapi juga tetap relevan, aman, dan berkelanjutan menghadapi perubahan kondisi lingkungan, sosial, dan iklim yang terjadi sepanjang masa layannya. Laporan tahunan *Institution of Civil Engineers* (ICE) menegaskan bahwa efisiensi, ketahanan, dan pengurangan karbon perlu ditangani secara bersamaan, bukan sebagai agenda yang terpisah, mengingat infrastruktur menghadapi ancaman ganda dari perubahan iklim maupun tuntutan dekarbonisasi global.

A. Infrastruktur Berkelanjutan

Infrastruktur berkelanjutan merujuk pada perencanaan, desain, konstruksi, dan operasi infrastruktur yang mempertimbangkan dampak jangka panjang terhadap lingkungan, masyarakat, dan perekonomian secara seimbang, tidak hanya berfokus pada kinerja teknis dan efisiensi biaya jangka pendek semata. Konsep ini semakin menjadi arus utama dalam praktik teknik sipil global, ditandai dengan lahirnya berbagai standar dan kerangka penilaian formal dalam beberapa tahun terakhir.

1. Konsep dan Tiga Pilar Keberlanjutan (*Triple Bottom Line*)

Kerangka keberlanjutan infrastruktur umumnya didasarkan pada prinsip *triple bottom line*, yang menekankan keseimbangan tiga pilar: pilar lingkungan (*environmental*), yang mencakup pengurangan dampak ekologis, konservasi sumber daya alam, dan mitigasi perubahan iklim; pilar sosial (*social*), yang mencakup pemerataan akses layanan infrastruktur, keterlibatan masyarakat, dan peningkatan kualitas hidup;

serta pilar ekonomi (*economic*), yang mencakup efisiensi biaya siklus hidup dan keberlanjutan finansial jangka panjang aset. Ketiga pilar ini perlu dipertimbangkan secara terintegrasi, karena optimasi pada satu pilar secara terpisah berpotensi mengorbankan pilar lainnya, misalnya infrastruktur yang sangat efisien secara ekonomi jangka pendek namun mengabaikan dampak lingkungan jangka panjang tidak dapat dikategorikan sebagai infrastruktur yang benar-benar berkelanjutan.

2. Standar dan Kerangka Penilaian Keberlanjutan Infrastruktur

Untuk mengoperasionalkan konsep keberlanjutan yang cenderung abstrak, berbagai lembaga profesi teknik sipil telah mengembangkan standar dan kerangka penilaian formal. *American Society of Civil Engineers* (ASCE) menerbitkan ASCE/COS 73-23: *Standard Practice for Sustainable Infrastructure*, standar pertama yang secara khusus mengatur praktik keberlanjutan infrastruktur, sebagai respons terhadap meningkatnya frekuensi bencana terkait cuaca ekstrem yang menimbulkan kerugian miliaran dolar setiap tahunnya di berbagai negara (ASCE, 2023).

Kerangka penilaian lain yang banyak diadopsi secara global adalah *Envision*, yang dikembangkan oleh *Institute for Sustainable Infrastructure* (ISI) bekerja sama dengan Program Zofnass untuk Infrastruktur Berkelanjutan di *Harvard University Graduate School of Design*. Berbeda dengan LEED yang berfokus pada bangunan gedung, *Envision* dirancang untuk seluruh jenis infrastruktur sipil seperti jalan, jembatan, sistem air, dan fasilitas energi dan mengevaluasi proyek melalui 64 indikator keberlanjutan (disebut *credit*) yang terorganisasi dalam lima kategori: Kualitas Hidup, Kepemimpinan, Alokasi Sumber Daya, Dunia Alami, serta Iklim dan Ketahanan.

Tabel 13.1 Lima Kategori Kerangka Penilaian Envision

Kategori	Fokus Utama	Contoh Aspek yang Dinilai
Kualitas Hidup (<i>Quality of Life</i>)	Dampak proyek terhadap kesejahteraan masyarakat	Peningkatan mobilitas, kualitas kesehatan masyarakat, keterlibatan komunitas

Kategori	Fokus Utama	Contoh Aspek yang Dinilai
Kepemimpinan (<i>Leadership</i>)	Tata kelola dan kolaborasi proyek	Perencanaan kolaboratif, manajemen risiko, praktik pengadaan berkelanjutan
Alokasi Sumber Daya (<i>Resource Allocation</i>)	Efisiensi penggunaan material dan energi	Penggunaan material daur ulang, efisiensi energi konstruksi dan operasi
Dunia Alami (<i>Natural World</i>)	Perlindungan ekosistem dan lingkungan	Konservasi habitat, kualitas air, pengelolaan lahan
Iklim dan Ketahanan (<i>Climate and Resilience</i>)	Adaptasi dan mitigasi risiko iklim	Penilaian risiko iklim, desain adaptif, ketahanan jangka panjang

3. Kebijakan Bangunan dan Infrastruktur Hijau di Indonesia

Pemerintah Indonesia menegaskan komitmennya terhadap infrastruktur berkelanjutan melalui serangkaian regulasi. Peraturan Pemerintah Nomor 16 Tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung mendefinisikan Bangunan Gedung Hijau (BGH) sebagai bangunan yang memenuhi standar teknis dan memiliki kinerja terukur secara signifikan dalam penghematan energi, air, dan sumber daya lainnya. Ketentuan ini diturunkan lebih lanjut melalui Peraturan Menteri PUPR Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau, yang mewajibkan pemenuhan target konservasi energi sebesar 25% dan konservasi air minimal 10% pada bangunan gedung yang termasuk kategori wajib BGH (Peraturan Menteri PUPR No. 21 Tahun 2021).

Selain regulasi bangunan gedung hijau, Kementerian PUPR turut menerbitkan Peraturan Menteri PUPR Nomor 10 Tahun 2023 tentang Bangunan Gedung Cerdas, yang mengatur penerapan sistem cerdas pada bangunan gedung sebagai bagian dari strategi peningkatan efisiensi sekaligus pengurangan limbah dan emisi karbon pembangunan infrastruktur nasional. Pada tingkat kebijakan yang lebih luas, Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi

Karbon menjadi instrumen kebijakan pendukung pencapaian target penurunan emisi nasional (*Nationally Determined Contribution/NDC*) sebesar 31,89% secara mandiri dan 43,2% dengan dukungan internasional pada tahun 2030, yang turut menjadi konteks kebijakan bagi seluruh pembahasan efisiensi energi dan karbon.

4. Tantangan Implementasi Infrastruktur Berkelanjutan

Meskipun kerangka kebijakan dan penilaian keberlanjutan infrastruktur semakin matang, implementasinya di lapangan menghadapi tantangan signifikan. Pertama, biaya investasi awal untuk material dan teknologi ramah lingkungan umumnya lebih tinggi dibandingkan pendekatan konvensional, meskipun secara siklus hidup dapat menghasilkan penghematan jangka Panjang, sebuah *trade-off* yang sulit diterima oleh pemilik proyek dengan keterbatasan anggaran awal. Kedua, kurangnya keahlian teknis dalam menerapkan kerangka penilaian seperti *Envision* memerlukan investasi pelatihan dan sertifikasi profesional (*Envision Sustainability Professional/ENV SP*) yang belum banyak tersedia di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia.

Ketiga, ketegangan antara kecepatan pembangunan infrastruktur untuk memenuhi kebutuhan mendesak masyarakat dengan proses perencanaan keberlanjutan yang cenderung memerlukan waktu lebih panjang untuk kajian lingkungan dan sosial yang komprehensif. Keempat, fragmentasi tanggung jawab antarpemangku kepentingan proyek seperti pemilik proyek, konsultan desain, kontraktor, dan pemasok material menyulitkan penerapan pendekatan keberlanjutan yang konsisten sepanjang rantai nilai proyek, mengingat masing-masing pihak sering kali memiliki insentif jangka pendek yang tidak selalu selaras dengan tujuan keberlanjutan jangka panjang proyek secara keseluruhan.

B. Resilient Infrastructure Terhadap Bencana

1. Konsep Ketahanan (*Resilience*) Infrastruktur

Ketahanan infrastruktur dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem untuk mengantisipasi, menyerap, beradaptasi, dan pulih dari gangguan sambil mempertahankan fungsi esensialnya bagi masyarakat. Sharifi (2023) mengonseptualisasikan ketahanan perkotaan melalui kerangka sistem sosial-ekologis-teknologis (*Social-Ecological-*

Technological Systems/SETS), yang menekankan bahwa ketahanan infrastruktur tidak dapat dipahami secara terisolasi dari sistem sosial dan ekologis di sekitarnya, kegagalan infrastruktur teknis sering kali berdampak melalui rantai konsekuensi yang melibatkan sistem sosial dan ekonomi masyarakat yang bergantung padanya.

Datola (2023) mengembangkan kerangka evaluasi ketahanan perkotaan yang komprehensif untuk mendukung integrasi konsep ketahanan ke dalam praktik perencanaan tata ruang, menegaskan bahwa ketahanan bukan sekadar sifat teknis suatu struktur individual, melainkan properti sistemik yang muncul dari interaksi antareleman infrastruktur, tata ruang, dan komunitas yang dilayaninya.

Tabel 13.2 Empat Kapasitas Utama Ketahanan Infrastruktur

Kapasitas	Deskripsi	Contoh Penerapan
Kapasitas Antisipasi	Kemampuan mengidentifikasi dan mempersiapkan diri terhadap potensi ancaman	Pemetaan risiko bencana, sistem peringatan dini
Kapasitas Penyerapan	Kemampuan menyerap dampak gangguan tanpa kegagalan fungsi total	Desain struktur dengan faktor keamanan terhadap beban ekstrem
Kapasitas Adaptasi	Kemampuan menyesuaikan diri terhadap kondisi yang berubah	Desain modular yang dapat dimodifikasi sesuai perubahan kondisi iklim
Kapasitas Pemulihan	Kemampuan kembali berfungsi secara cepat pascagangguan	Rencana kontingensi perbaikan darurat, cadangan sumber daya pemulihan

2. Jenis Ancaman dan Kerentanan Infrastruktur tur

Infrastruktur menghadapi beragam jenis ancaman yang memerlukan strategi mitigasi berbeda. Ancaman terkait iklim mencakup peningkatan frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem, banjir, gelombang panas, serta kenaikan muka air laut yang berdampak signifikan terhadap infrastruktur di wilayah pesisir. Ancaman geologis mencakup gempa

bumi, tanah longsor, dan aktivitas vulkanik, yang menjadi perhatian khusus bagi Indonesia sebagai negara yang terletak pada Cincin Api Pasifik. Ancaman antropogenik mencakup kegagalan akibat kesalahan desain, kurangnya pemeliharaan, maupun sabotase dan serangan siber pada infrastruktur digital.

Kerentanan infrastruktur terhadap ancaman-ancaman ini seringkali diperparah oleh interdependensi antarsistem infrastruktur. Kegagalan pada satu jenis infrastruktur, misalnya jaringan listrik dapat memicu efek domino terhadap infrastruktur lain yang bergantung padanya, seperti sistem pompa air bersih, jaringan telekomunikasi, dan sistem transportasi berbasis sinyal listrik. Fenomena kegagalan berantai akibat interdependensi infrastruktur ini menjadikan penilaian ketahanan infrastruktur modern perlu mempertimbangkan sistem infrastruktur secara holistik, bukan hanya menilai ketahanan setiap aset secara terisolasi.

3. Strategi Desain Tahan Bencana dan Adaptasi Iklim

Strategi desain infrastruktur yang tahan bencana dan adaptif terhadap perubahan iklim mencakup berbagai pendekatan. Pendekatan struktural melibatkan perancangan yang mempertimbangkan skenario beban ekstrem di masa mendatang, bukan hanya beban historis, mengingat proyeksi iklim menunjukkan intensitas curah hujan dan suhu ekstrem yang terus meningkat melampaui data historis yang menjadi basis desain infrastruktur konvensional (OECD, 2024). Pendekatan berbasis alam (*nature-based solutions*) seperti restorasi lahan basah untuk mitigasi banjir atau penanaman vegetasi pesisir untuk meredam gelombang semakin banyak diadopsi sebagai pelengkap solusi struktural konvensional, menawarkan manfaat tambahan berupa konservasi ekosistem dan biaya pemeliharaan yang relatif lebih rendah dalam jangka panjang.

Pendekatan perencanaan tata ruang turut berperan penting, mencakup zonasi yang membatasi pembangunan pada kawasan rawan bencana serta integrasi ruang terbuka hijau untuk mengelola limpasan air hujan secara alami. Keterlibatan masyarakat dalam perencanaan ketahanan turut ditekankan sebagai elemen penting, mengingat pengetahuan lokal masyarakat mengenai pola bencana historis sering kali melengkapi data teknis formal, sekaligus meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap langkah-langkah adaptasi yang diterapkan.

4. Peran Teknologi Digital dalam Ketahanan Infrastruktur

Teknologi digital yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya buku ini memainkan peran penting dalam memperkuat ketahanan infrastruktur. Sensor IoT yang terpasang pada struktur memungkinkan pemantauan kondisi secara berkelanjutan, mendukung deteksi dini kerusakan akibat bencana dalam konteks *Structural Health Monitoring*. Model prediktif berbasis *machine learning* dapat memperkirakan area yang paling berisiko terdampak bencana berdasarkan data historis dan kondisi terkini, mendukung alokasi sumber daya mitigasi yang lebih tepat sasaran.

Digital twin infrastruktur semakin dikembangkan khusus untuk mendukung ketahanan bencana melalui kemampuan simulasi skenario bencana secara virtual sebelum kejadian nyata terjadi, memungkinkan perencanaan menguji efektivitas berbagai strategi mitigasi dan respons darurat tanpa risiko yang menyertai simulasi fisik. Integrasi *digital twin* dengan data cuaca dan iklim secara *real-time* memungkinkan sistem peringatan dini yang lebih responsif terhadap kondisi yang berubah dengan cepat, mendukung pengambilan keputusan evakuasi maupun penutupan sementara infrastruktur kritis berdasarkan data yang mutakhir, bukan hanya prosedur baku yang telah ditetapkan sebelumnya.

C. Efisiensi Energi dan Pengurangan Emisi Karbon

1. Karbon Terwujud (*Embodied Carbon*) versus Karbon Operasional

Emisi karbon yang terkait dengan infrastruktur dapat dibedakan menjadi dua kategori utama. Karbon operasional (*operational carbon*) merujuk pada emisi yang dihasilkan selama masa operasi aset, misalnya konsumsi energi untuk penerangan, pemanasan, pendinginan, dan pengoperasian peralatan mekanikal-elektrikal bangunan maupun infrastruktur. Karbon terwujud (*embodied carbon*), yang juga disebut karbon modal (*capital carbon*) dalam terminologi PAS 2080, merujuk pada emisi yang dihasilkan dari ekstraksi bahan baku, manufaktur material, transportasi, dan proses konstruksi aset, sebelum aset tersebut mulai beroperasi (BSI, 2023).

Selama beberapa dekade terakhir, fokus pengurangan emisi bangunan dan infrastruktur cenderung terpusat pada karbon operasional,

mengingat data dan teknologi untuk mengukur serta menguranginya lebih matang. Namun demikian, seiring bangunan dan infrastruktur menjadi semakin efisien secara operasional, melalui peningkatan efisiensi energi peralatan dan penggunaan energi terbarukan, proporsi karbon terwujud terhadap total emisi siklus hidup aset menjadi semakin signifikan secara relatif, menjadikannya area fokus baru yang penting dalam strategi dekarbonisasi infrastruktur kontemporer.

Tabel 13.3 Perbandingan Karbon Terwujud dan Karbon Operasional

Aspek	Karbon Terwujud (<i>Embodied Carbon</i>)	Karbon Operasional (<i>Operational Carbon</i>)
Sumber Emisi	Ekstraksi bahan baku, manufaktur, transportasi, konstruksi	Konsumsi energi selama operasi aset (listrik, bahan bakar)
Waktu Terjadinya	Terjadi di awal (<i>upfront</i>), sebelum aset beroperasi	Terjadi secara berkelanjutan sepanjang masa operasi aset
Kemudahan Pengukuran	Memerlukan analisis siklus hidup (LCA) rantai pasok	Relatif lebih mudah diukur melalui data konsumsi energi
Strategi Pengurangan Utama	Pemilihan material rendah karbon, desain efisien material, ekonomi sirkular	Efisiensi energi peralatan, transisi ke energi terbarukan

2. Kerangka PAS 2080 dan Manajemen Karbon Siklus Hidup

PAS 2080:2023 (*Publicly Available Specification*), yang dikembangkan oleh *British Standards Institution* (BSI), menjadi standar global terkemuka untuk manajemen karbon menyeluruh siklus hidup pada bangunan dan infrastruktur. Standar ini memperkenalkan pergeseran paradigma dari mantra lama "*Build Nothing, Build Less, Build Clever*" menuju kerangka "*Avoid, Switch, Improve*" yang lebih terstruktur: menghindari kebutuhan pembangunan baru bila memungkinkan, beralih ke material dan metode konstruksi rendah

karbon, serta meningkatkan efisiensi desain dan konstruksi pada seluruh proyek yang tetap dilaksanakan (BSI, 2023).

PAS 2080 menekankan pendekatan kolaboratif yang melibatkan seluruh pemangku kepentingan rantai nilai infrastruktur yaitu pemilik aset, perancang, kontraktor, dan pemasok material dalam komitmen pengurangan karbon yang konsisten pada setiap tahap proyek. Penerapan standar ini pada proyek infrastruktur strategis di Inggris, seperti proyek kereta cepat *High Speed Two* (HS2) yang mewajibkan rantai pasoknya selaras dengan prinsip PAS 2080, menunjukkan bagaimana standar sukarela dapat menjadi mekanisme pendorong dekarbonisasi rantai pasok konstruksi secara luas ketika diadopsi oleh klien infrastruktur berskala besar.

3. Strategi Efisiensi Energi pada Infrastruktur dan Bangunan

Strategi efisiensi energi operasional mencakup berbagai pendekatan mulai dari optimasi desain pasif (orientasi bangunan, selubung bangunan yang efisien secara termal) hingga adopsi sistem mekanikal-elektrikal berefisiensi tinggi dan integrasi energi terbarukan. Regulasi bangunan gedung hijau Indonesia menetapkan target konservasi energi sebesar 25% dan konservasi air minimal 10% dibandingkan baseline bangunan konvensional, sebagai bagian dari strategi nasional pengurangan emisi sektor bangunan.

Integrasi teknologi cerdas, sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri PUPR Nomor 10 Tahun 2023 tentang Bangunan Gedung Cerdas, memperkuat efisiensi energi melalui sistem otomasi yang menyesuaikan penggunaan energi pencahayaan, pendinginan, dan ventilasi berdasarkan pola hunian dan kondisi lingkungan secara *real-time*, sejalan dengan konsep IoT dan analitik data. Pada skala infrastruktur yang lebih luas, integrasi *smart grid* memungkinkan optimasi distribusi energi yang mengurangi kerugian transmisi dan mendukung integrasi sumber energi terbarukan yang bersifat intermiten seperti tenaga surya dan angin.

4. Material Rendah Karbon dan Ekonomi Sirkular

Strategi pengurangan karbon terwujud sangat bergantung pada pemilihan material konstruksi. Material seperti baja dan semen konvensional dikenal memiliki intensitas karbon tinggi akibat proses produksinya yang membutuhkan energi besar dan menghasilkan emisi

langsung dari reaksi kimia produksi. Alternatif rendah karbon mencakup semen dengan kandungan campuran (*supplementary cementitious materials*) yang menggantikan sebagian klinker semen dengan material seperti abu terbang (*fly ash*) atau terak (*slag*), serta baja rendah karbon yang diproduksi menggunakan proses busur listrik dengan sumber energi terbarukan.

Prinsip ekonomi sirkular yang menekankan pengurangan (*reduce*), penggunaan kembali (*reuse*), dan daur ulang (*recycle*) material sepanjang siklus hidup infrastruktur turut menjadi strategi penting pengurangan karbon terwujud, sejalan dengan prinsip bangunan gedung hijau yang telah diatur dalam regulasi Indonesia. Zhuang, Xu, Ye, Hu, dan Jiang (2024) mengulas peluang material berkelanjutan pada percetakan 3D beton, menunjukkan bahwa teknologi konstruksi aditif juga membuka peluang signifikan bagi pengurangan limbah material dan pemanfaatan material daur ulang sebagai bahan campuran cetak, menghubungkan agenda otomasi konstruksi dengan agenda dekarbonisasi infrastruktur secara langsung.

D. Indikator Kinerja Infrastruktur Berkelanjutan

1. Kerangka Indikator Envision secara Mendalam

Kerangka Envision menyediakan 64 indikator (*credit*) yang terorganisasi dalam lima kategori. Setiap indikator dinilai melalui proses verifikasi yang menghasilkan tingkat pencapaian mulai dari Terverifikasi (*Verified*) hingga tingkat tertinggi Platinum, berdasarkan persentase minimum indikator yang berhasil dipenuhi proyek (Institute for Sustainable Infrastructure, 2023). Proses verifikasi independen oleh pihak ketiga memberikan kredibilitas terhadap klaim keberlanjutan proyek, mengurangi risiko *greenwashing* atau klaim keberlanjutan yang tidak didukung bukti substantif.

Tabel 13.4 Tingkat Pencapaian pada Kerangka Penilaian Envision

Tingkat	Kriteria Umum	Implikasi bagi Proyek
Terverifikasi (<i>Verified</i>)	Memenuhi persyaratan dasar keberlanjutan	Proyek menunjukkan komitmen awal terhadap keberlanjutan

Tingkat	Kriteria Umum	Implikasi bagi Proyek
Perunggu (<i>Bronze</i>)	Pencapaian tambahan pada berbagai kategori	Proyek menerapkan praktik keberlanjutan melampaui standar minimum
Perak (<i>Silver</i>)	Pencapaian signifikan pada mayoritas kategori	Proyek menunjukkan integrasi keberlanjutan yang matang
Emas (<i>Gold</i>)	Pencapaian tinggi secara konsisten pada seluruh kategori	Proyek menjadi rujukan praktik terbaik pada konteksnya
Platinum	Pencapaian tertinggi dan inovasi transformasional	Proyek diakui sebagai pemimpin global dalam keberlanjutan infrastruktur

2. Indikator Kunci Keberlanjutan dan Ketahanan (KPI)

Selain kerangka formal seperti Envision, praktisi infrastruktur juga menggunakan indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators/KPI*) yang lebih spesifik dan disesuaikan dengan konteks proyek maupun kebijakan institusional. Indikator ini umumnya dikelompokkan sesuai tiga pilar keberlanjutan, ditambah dimensi ketahanan yang menjadi penekanan khusus.

Tabel 13.5 Contoh Indikator Kunci Keberlanjutan dan Ketahanan Infrastruktur

Dimensi	Contoh Indikator	Satuan/Metode Pengukuran
Lingkungan	Intensitas karbon per unit output infrastruktur	kg CO ₂ e per unit kapasitas (mis. per km jalan, per m ² bangunan)
Sosial	Tingkat aksesibilitas infrastruktur bagi kelompok rentan	Persentase populasi dengan akses dalam radius tertentu

Dimensi	Contoh Indikator	Satuan/Metode Pengukuran
Ekonomi	Biaya siklus hidup dibandingkan biaya konstruksi awal	Rasio biaya operasi-pemeliharaan terhadap biaya investasi awal
Ketahanan	Waktu pemulihan fungsi pascabencana (<i>recovery time</i>)	Jumlah hari hingga fungsi layanan pulih ke tingkat normal
Ketahanan	Tingkat keparahan dampak gangguan terhadap layanan	Persentase penurunan kapasitas layanan selama gangguan

3. Pengukuran dan Pelaporan Kinerja Berkelanjutan

Pengukuran indikator keberlanjutan infrastruktur yang kredibel memerlukan metodologi yang konsisten dan dapat diverifikasi, seperti analisis siklus hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*) untuk pengukuran karbon terwujud, atau *Environmental Product Declaration* (EPD) yang menyediakan data emisi terverifikasi untuk material konstruksi tertentu. Konsistensi metodologi pengukuran menjadi tantangan tersendiri, mengingat berbagai standar dan kerangka penilaian Envision, PAS 2080, LEED, dan standar nasional seperti regulasi bangunan gedung hijau Indonesia memiliki definisi dan batasan pengukuran yang tidak selalu identik, sehingga perbandingan kinerja keberlanjutan antarproyek yang menggunakan kerangka berbeda perlu dilakukan dengan kehati-hatian.

Pelaporan kinerja keberlanjutan yang transparan kepada publik dan pemangku kepentingan menjadi elemen penting akuntabilitas, sejalan dengan prinsip transparansi tata kelola data. Integrasi platform *big data* dan *digital twin* infrastruktur yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya semakin memungkinkan pemantauan indikator keberlanjutan secara *real-time* dan berkelanjutan sepanjang masa operasi aset, bukan hanya penilaian satu kali pada tahap desain atau konstruksi, sehingga kinerja keberlanjutan aktual selama operasi dapat dipantau dan dibandingkan secara berkelanjutan terhadap target yang ditetapkan pada tahap perencanaan.

4. Tantangan dan Masa Depan Pengukuran Keberlanjutan

Pengukuran keberlanjutan infrastruktur menghadapi tantangan yang terus berkembang seiring bertambahnya kompleksitas kerangka penilaian dan tuntutan transparansi data. Tantangan utama meliputi ketersediaan data yang konsisten dan berkualitas tinggi sepanjang rantai pasok konstruksi, terutama untuk pengukuran karbon terwujud yang memerlukan data emisi dari setiap tahap manufaktur material hingga transportasi ke lokasi proyek. Banyak produsen material di negara berkembang, termasuk Indonesia, belum memiliki *Environmental Product Declaration* (EPD) yang terverifikasi, sehingga praktisi sering kali terpaksa menggunakan data generik internasional yang kurang mencerminkan kondisi produksi lokal secara akurat.

Ke depan, integrasi teknologi digital yaitu BIM yang menyimpan data material secara terstruktur, IoT yang memantau konsumsi energi operasional secara *real-time*, dan platform *big data* yang mengagregasi data emisi lintas proyek berpotensi mengatasi tantangan ini secara bertahap, memungkinkan pengukuran keberlanjutan infrastruktur yang lebih otomatis, konsisten, dan berbasis data aktual dibandingkan estimasi manual yang selama ini banyak digunakan. Perkembangan basis data EPD nasional Indonesia untuk material konstruksi lokal menjadi salah satu prasyarat penting yang perlu didorong bersama antara pemerintah, asosiasi industri material, dan lembaga riset, agar pengukuran keberlanjutan infrastruktur domestik dapat mencerminkan kondisi produksi dan rantai pasok Indonesia secara lebih akurat.



DAFTAR PUSTAKA

- Abanda, F. H., & Byers, L. (2021). An evaluation of BIM-based cost estimating and specification mapping in building projects. *Automation in Construction*, 123(2), 103530.
- Abdalhameed, A., & Naimi, S. (2023). BIM-based clash detection for improving design precision and reducing construction costs. *Journal of Building Engineering* (dikutip dalam kajian teknik BIM untuk clash detection, 2025).
- Ahmed, S. (2018). Barriers to BIM implementation: A systematic review synthesizing global barriers to BIM adoption. *Journal reference cited in Barriers to Implementation of Building Information Modeling (BIM) to the Construction Industry: A Review*.
- Ai, D., Mo, F., Yang, F., & Zhu, H. (2022). Electromechanical impedance-based concrete structural damage detection using principal component analysis incorporated with neural network. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 33(17), 2241–2256.
- Akhavian, R., Amani, M., Mootz, J., Ashe, R., & Beheshti, B. (2025). *Building Information Models to Robot-Ready Site Digital Twins (BIM2RDT): An Agentic AI Safety-First Framework*. arXiv preprint, arXiv:2509.20705.
- Aladag, H., Demirdögen, G., & Isik, Z. (2016). Building information modeling (BIM) use in Turkish construction industry. *Procedia Engineering*, 161, 174–179.
- Al-Bahst. (2024). Analisis regulasi keamanan siber dan penegakan hukum kejahatan siber di Indonesia. *AL-BAHST Jurnal Ilmu Sosial, Politik, dan Hukum*, 2(1).
- Alkayem, N. F., Mayya, A., Shen, L., Zhang, X., Asteris, P. G., Wang, Q., & Cao, M. (2024). Co-CrackSegment: A new collaborative deep learning framework for pixel-level semantic segmentation of concrete cracks. *Mathematics*, 12(19), 3105.

- Al-Musawi, A., & Naimi, S. (2023). Comparative analysis of BIM-based and conventional quantity take-off methods. *Journal of Quantity Surveying Practice*.
- American Institute of Architects [AIA]. (2013). *AIA Document G202–2013: Project Building Information Modeling Protocol Form*. Washington, DC: AIA.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2023). ASCE/COS 73-23: Standard Practice for Sustainable Infrastructure. Reston, VA: ASCE.
- Ammar, A., Nassereddine, H., AbdulBaky, N., AbouKansour, A., Tannoury, J., Urban, H., & Schranz, C. (2022). Digital twins in the construction industry: A perspective of practitioners and building authority. *Frontiers in Built Environment*, 8, Article 834671.
- ANTARA News. (2023). Kementerian PUPR tingkatkan penerapan teknologi BIM dalam proyek PSN. *ANTARA News*, 10 Juli 2023.
- Aproplan. (2024). *A history of BIM*. Brussels: Aproplan.
- Asadi, K., & Sacks, R. (2023). Digital twins and construction management: Review of integration frameworks and open challenges. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(3), 03123001.
- Atuahene, B. T., Kanjanabootra, S., & Gajendran, T. (2022). Transformative role of big data through enabling capability recognition in construction. *Construction Management and Economics*, 41(3), 208–231. <https://doi.org/10.1080/01446193.2022.2132523>
- Azari, M. S., Flammini, F., Santini, S., & Caporuscio, M. (2023). A systematic literature review on transfer learning for predictive maintenance in Industry 4.0. *IEEE Access*, 11, 12887–12910.
- Badan Standardisasi Nasional [BSN]. (2023). *SNI 6774:2023 Unit Instalasi Pengolahan Air Minum*. Jakarta: BSN.
- Bado, M. F., Casas, J. R., & Kaklauskas, A. (2022). Digital twin for civil engineering systems: An exploratory review for distributed sensing updating. *Sensors*, 22(9), 3168.
- Baghalzadeh Shishehgharkhaneh, M., Keivani, A., Moehler, R. C., Jelodari, N., & Roshdi Laleh, S. (2022). Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in

- construction industry: A review, bibliometric, and network analysis. *Buildings*, 12(10), 1503.
- Bello, V. S. D. F., Popescu, C., Blanksvärd, T., & Täljsten, B. (2021). Framework for facility management of bridge structures using digital twins. Dalam *IABSE Congress, Ghent: Structural Engineering for Future Societal Needs*.
- BibLus (ACCA Software). (2025). *BIM maturity levels: From stage 0 to stage 3*. Bagnoli Irpino: ACCA Software.
- BibLus (ACCA Software). (2026). *Common Data Environment (CDE) and ISO 19650: Essential for BIM project success*. Bagnoli Irpino: ACCA Software.
- BIMcollab. (2026). *What is BCF?*. Amersfoort: BIMcollab.
- BIMForum. (2023). *2023 Level of Development (LOD) Specification*. Washington, DC: BIMForum.
- BIMForum. (2024). *2024 Level of Development (LOD) Specification (Public Comment Draft)*. Washington, DC: BIMForum.
- Biswas, H. K., Sim, T. Y., & Lau, S. L. (2024). Impact of building information modelling and advanced technologies in the AEC industry: A contemporary review and future directions. *Journal of Building Engineering*, 82, 108165.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2020). *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer.
- BPPSPAM, Kementerian Pekerjaan Umum. (2014). *Pedoman Penurunan Air Tak Berekening (ATR)*. Jakarta: Kementerian PU.
- BSSN (Badan Siber dan Sandi Negara). (2024). *Lanskap keamanan siber Indonesia 2024*. Jakarta: BSSN.
- buildingSMART International. (2023). *Industry Foundation Classes (IFC) and buildingSMART Data Dictionary*. Model Support Group. buildingSMART International.
- buildingSMART International. (2026). *BIM Collaboration Format (BCF)*. Model Support Group. buildingSMART International.
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324.

- CAIA (Chartered Alternative Investment Analyst Association). (2024). *Smart infrastructure: Building back better, and smarter*. CAIA Portfolio for the Future.
- Catenda. (2026). *LOD – Level of Development*. Oslo: Catenda Glossary.
- Cavli Wireless. (2025). *IoT architecture: Layers, components, models explained*. San Jose: Cavli Wireless.
- Cerovsek, T. (2011). A review and outlook for a 'building information model' (BIM): A multi-standpoint framework for technological development. *Advanced Engineering Informatics*, 25(2), 224–244.
- Chacón, R. (2021). Shortcomings in technological infrastructure and regulatory frameworks for advanced digital methodologies adoption in construction. Sebagaimana dikutip dalam tinjauan hambatan implementasi BIM (2025).
- Chang, D., & Mao, B. (2021). Integration of IoT and big data in construction industry: A review. *Automation in Construction*, 129, 103813.
- Chea, C. P., Bai, Y., Pan, X., Arashpour, M., & Xie, Y. (2020). An integrated review of automation and robotic technologies for structural prefabrication and construction. *Transportation Safety and Environment*, 2(2), 81–96.
- Chen, J., & Luo, X. (2022). Legal challenges of AI-enabled construction monitoring. *International Journal of Law in the Built Environment*, 14(2), 145–162.
- Chen, X., Chen, Z., Hu, S., Gu, C., Guo, J., & Qin, X. (2023). A feature decomposition-based deep transfer learning framework for concrete dam deformation prediction with observational insufficiency. *Advanced Engineering Informatics*, 58, 102175.
- Chen, X., Zhao, D., & Li, H. (2021). Probabilistic critical path method for construction schedule forecasting under uncertainty. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(6), 04021067.
- Cheng, J. C. P., & Lu, Q. (2020). Integrating computer vision and BIM for automated construction progress monitoring. *Automation in Construction*, 113(1), 103134.
- Choi, H.-W., Kim, H.-J., Kim, S.-K., & Na, W. S. (2023). An overview of drone applications in the construction industry. *Drones*, 7(8), 515.

- Choovio. (2026). *LoRaWAN vs. NB-IoT: Choosing the right protocol*. Choovio Inc.
- CISA (Cybersecurity and Infrastructure Security Agency). (2024). *2024 Year in Review*. Washington, DC: CISA.
- Climate Adaptation Platform. (2025). *The role of circular economy in climate adaptation*. Climate Adaptation Platform.
- Crognale, M., De Iuliis, M., & Gattulli, V. (2024). A framework for the definition of built heritage digital twins. Dalam *Handbook of Digital Twins*. Springer.
- CSO Online. (2026). *Cybersecurity at the edge: Securing rugged IoT in mission-critical environments*. Foundry.
- Cyberhaven. (2025). *What is the NIST Cybersecurity Framework?*. Cyberhaven Inc.
- Dada, M. A., Majemite, M. T., Obaigbena, A., Daraojimba, O. H., Oliha, J. S., & Nwokediegwu, Z. Q. S. (2024). Review of smart water management: IoT and AI in water and wastewater treatment. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), 1373–1382.
- Dangut, M. D., Jennions, I. K., King, S., & Skaf, Z. (2023). A rare failure detection model for aircraft predictive maintenance using a deep hybrid learning approach. *Neural Computing and Applications*, 35(4), 2991–3009.
- Datola, G. (2023). Implementing urban resilience in urban planning: A comprehensive framework for urban resilience evaluation. *Sustainable Cities and Society*, 98, 104821.
- Deng, Y., et al. (2023). A survey of structural health monitoring advances based on Internet of Things (IoT) sensors. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(10).
- Dereci, U., & Tuzkaya, G. (2024). An explainable artificial intelligence model for predictive maintenance and spare parts optimization. *Supply Chain Analytics*, 8, 100078.
- Díaz, C. G., Zambrana-Vasquez, D., & Bartolomé, C. (2024). Building resilient cities: A comprehensive review of climate change adaptation indicators for urban design. *Energies*, 17(8), 1959.
- Diklat Konstruksi. (2026). *LPJK SKK: Panduan lengkap sertifikasi kompetensi konstruksi*. Jakarta: DiklatKonstruksi.com.

- Dinas PUPR Kota Banda Aceh. (2020). *Era digitalisasi konstruksi (Part 1): Tantangan*. Banda Aceh: Pemerintah Kota Banda Aceh.
- Direktorat Jenderal Aplikasi Informatika [Ditjen Aptika], Kementerian Komunikasi dan Informatika. (2020). *Mengenal lebih dekat konsep smart city dalam pembangunan kota*. Jakarta: Kemkominfo.
- Direktorat Jenderal Aplikasi Informatika [Ditjen Aptika], Kementerian Komunikasi dan Informatika. (2022). *Gerakan Menuju 100 Smart City*. Jakarta: Kemkominfo.
- Direktorat Jenderal Aplikasi Informatika [Ditjen Aptika], Kementerian Komunikasi dan Informatika. (2024). *Lewat enam pilar utama Kominfo berupaya hadirkan 100 smart city*. Jakarta: Kemkominfo.
- Direktorat Jenderal Bina Konstruksi, Kementerian Pekerjaan Umum. (2023). *Konstruksi Indonesia 2023: Mewujudkan pembangunan infrastruktur berkelanjutan di Indonesia melalui transformasi digital dan teknologi konstruksi*. Jakarta: Kementerian PU.
- Direktorat Jenderal Bina Konstruksi, Kementerian PUPR. (2024). *Kementerian PUPR Terus Tingkatkan Pemanfaatan Teknologi BIM dalam Pembangunan Infrastruktur*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR. (2021). *Surat Edaran Nomor 11/SE/Db/2021 tentang Penerapan Building Information Modelling pada Perencanaan Teknis, Konstruksi, dan Pemeliharaan Jalan dan Jembatan*. Jakarta: Ditjen Bina Marga.
- Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR. (2023). *Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 12/P/BM/2023 tentang Pedoman Implementasi Building Information Modelling (BIM) pada Lingkup Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Direktorat Jenderal Infrastruktur Digital [Ditjen SDPPI]. (2024). *100 daerah sukses wujudkan smart city*. Jakarta: Kementerian Komunikasi dan Digital.
- Diskominfo Kotim. (2024). *Kepala BSSN paparkan implementasi UU PDP dan penerapan keamanan siber pada forum Indonesia Privacy & Security Summit 2024*. Kotawaringin Timur: Diskominfo Kotim.

- Doukari, A., Lee, S., & Park, M. (2022). Comparative benchmarking of automated 4D scheduling and conventional planning workflows. *Automation in Construction*, 140, 104389.
- Eastman, C. (1976). General purpose building description systems. *Computer-Aided Design*, 8(1), 17–26.
- Eastman, C., Lividini, J., & Stoker, D. (1975). A database for designing large physical systems. *National Computer Conference and Exposition Proceedings*, 603–611.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2020). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Fabricators* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Edge Computing News. (2025). *IDC: Global edge computing investments to hit \$232bn in 2024*. Edge Computing News.
- Elghaish, F., Abrishami, S., & Hosseini, M. R. (2021). 5D BIM-based cost-schedule integration for earned-value management. *Automation in Construction*, 130, 103861.
- Esfandi, S., Tayebi, S., Byrne, J., Taminiau, J., Giyahchi, G., & Alavi, S. A. (2024). Smart cities and urban energy planning: An advanced review of promises and challenges. *Smart Cities*, 7(1), 414–444.
- European Commission. (2021). *Proposal for a regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence (AI Act)*. Brussels: European Commission.
- Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z. B., Istandar, A., & Singh, S. (2008). *The manager's non-revenue water handbook: A guide to understanding water losses*. Washington, DC: United States Agency for International Development (USAID).
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2013). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons.
- Flah, M., Nunez, I., Ben Chaabene, W., & Nehdi, M. L. (2021). Machine learning algorithms in civil structural health monitoring: A systematic review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 2621–2643.
- Fonseca, M., & Matos, A. M. (2023). 3D construction printing standing for sustainability and circularity: Material-level opportunities. *Materials*, 16(6), 2458.

- Gao, Y., Chen, Z., & Hu, W. (2025). Current status and future prospects of digital twin technology applications in intelligent transportation infrastructure management. *IET Intelligent Transport Systems*.
- Gheorghe, C., & Soica, A. (2025). Revolutionizing urban mobility: A systematic review of AI, IoT, and predictive analytics in adaptive traffic control systems for road networks. *Electronics*, 14(4), 719.
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Mubarak, M. F., Mubarik, M., Rejeb, A., & Nilashi, M. (2022). Identifying industry 5.0 contributions to sustainable development through a mixed-method literature analysis. *Journal of Cleaner Production*, 350, Article 131354.
- Godager, B., et al. (2024). Exploring the enterprise BIM concept in practice: The case of asset management in a Norwegian hospital. *Journal of Information Technology in Construction*, 29, 549–572.
- Godager, B., Mohn, K., Merschbrock, C., Klakegg, O. J., & Huang, L. (2022). Towards an improved framework for enterprise BIM: The role of ISO 19650. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 478–495.
- Godager, B., Onstein, E., & Huang, L. (2022). The concept of an EN ISO 19650 information container. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(4), 245.
- Gouda Mohamed, A., & Mousa, M. (2024). Clash detection and design precision enhancement through BIM implementation in construction projects. *International Journal of Construction Management*.
- Graganiello, C., Mariniello, G., Pastore, T., & Asprone, D. (2024). BIM-based design and setup of structural health monitoring systems. *Automation in Construction*, 158, 105245.
- Hakimi, O., Abudayyeh, O., Almatared, M., Alhawiti, A., & Houshyar, A. (2023). Data fusion for smart civil infrastructure management: A conceptual digital twin framework. *Buildings*, 13(11), 2725.
- Hakimi, O., Liu, H., & Abudayyeh, O. (2024). Digital twin-enabled smart facility management: A bibliometric review. *Frontiers of Engineering Management*, 11, 32–49.
- Hall, A. T., Bello, E., & Rahman, M. (2023). Multi-criteria analysis of barriers to building information modeling (BIM) adoption for

- SMEs in New Zealand construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30(9), 3798–3816.
- HashStudioz. (2025). *Smart water management using IoT in 2024*. HashStudioz Technologies.
- Hassan, H., Rodriguez-Ubinas, E., Al Tamimi, A., Trepce, E., Mansouri, A., & Almehairbi, K. (2024). Towards innovative and sustainable buildings: A comprehensive review of 3D printing in construction. *Automation in Construction*.
- He, Z., et al. (2022). Integrated structural health monitoring in bridge engineering. *Automation in Construction*, 136, 104168.
- Hesser, D. F., Mostafavi, S., Kocur, G. K., & Markert, B. (2021). Identification of acoustic emission sources for structural health monitoring applications based on convolutional neural networks and deep transfer learning. *Neurocomputing*, 453, 1–12.
- Honghong, S., Gang, Y., Haijiang, L., Tian, Z., & Annan, J. (2023). Digital twin enhanced BIM to shape full life cycle digital transformation for bridge engineering. *Automation in Construction*, 147, 104736.
- Hosamo, H. H., Imran, A., Cardenas-Cartagena, J., Svennevig, P. R., Svidt, K., & Nielsen, H. K. (2022). A review of the digital twin technology in the AEC-FM industry. *Advances in Civil Engineering*, 2022.
- Hossam, O. M. A., & Youssef, N. A. H. (2024). Deep learning-based integration of IoT and intelligent infrastructure: Enabling real-time decision-making in smart environments. *Journal of Sustainable Technologies and Infrastructure Planning*, 8(4), 71–90.
- Hosseinzadeh, A., Chen, F. F., Shahin, M., & Bouzary, H. (2023). A predictive maintenance approach in manufacturing systems via AI-based early failure detection. *Manufacturing Letters*, 35, 1093–1101.
- Hu, X., Olgun, G., & Assaad, R. H. (2024). An intelligent BIM-enabled digital twin framework for real-time structural health monitoring using wireless IoT sensing, digital signal processing, and structural analysis. *Expert Systems with Applications*, 252(Part A), 124204.
- Huang, W., Zhang, Y., & Zeng, W. (2022). Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems

- in smart cities. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 36, Article 100781.
- Hussain, M., Ye, Z., Chi, H.-L., & Hsu, S.-C. (2024). Predicting degraded lifting capacity of aging tower cranes: A digital twin-driven approach. *Advanced Engineering Informatics*, 59, Article 102310.
- IBM. (2025). The role of AI in predictive maintenance. IBM Think Insights.
- Idrissi, Z. K., Lachgar, M., & Hrimech, H. (2024). Blockchain, IoT and AI in logistics and transportation: A systematic review. *Transport Economics and Management*, 2, 275–285.
- Indonesia.go.id. (2023). *Transformasi digital wujudkan pembangunan berkelanjutan*. Jakarta: Kementerian Komunikasi dan Informatika.
- Infobanknews. (2024). *Ngeri! Ada 122,79 juta serangan siber ke RI, sektor ini target utamanya*. Jakarta: Infobanknews.
- Institute for Sustainable Infrastructure (ISI). (2023). *Envision Sustainable Infrastructure Framework*. Washington, DC: ISI & Zofnass Program, Harvard University Graduate School of Design.
- Institution of Civil Engineers (ICE). (2023). *Infrastructure in 2023: A Horizon Scan*. London: ICE.
- INTECH Automation & Intelligence. (2022). *ISO-27001, ISA/IEC-62443, and NIST CSF: Selecting the right standard/framework for your OT cybersecurity program*. INTECH.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2018). *ISO 19650-1:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works — Part 1: Concepts and principles*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2019). *ISO 37122: Sustainable cities and communities — Indicators for smart cities*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2020). *ISO 19650: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000:2014 — Asset management: Overview, principles and terminology*. ISO.

- International Organization for Standardization. (2019). *ISO 19650-1:2018 — Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM)*. ISO.
- Izbash, Y., & Babayev, V. (2024). Digital evolution in AEC industry: Bridging BIM, building codes, and future technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Jabker.com. (2025). *SKK Konstruksi jabatan kerja bidang Building Information Modeling (Modeller, Manajer BIM)*. Jakarta: Jabker.com.
- JES BIM. (2026). *ISO 19650 in practice: Transforming construction through structured information management*. JESBIM.com.
- Jia, J., He, W., Xu, B., & Chen, X. (2023). Deep learning for structural health monitoring: A review. *Sensors*, 23, 2238.
- Jiang, F., Ding, Y., Song, Y., Geng, F., & Wang, Z. (2023). Digital twin-driven framework for fatigue lifecycle management of steel bridges. *Structural and Infrastructure Engineering*, 19(12), 1826–1846.
- Johansson, M., & Roupé, M. (2024). Real-world applications of BIM and immersive VR in construction. *Automation in Construction*, 158, 105233.
- Justo-Silva, R., Ferreira, A., & Flintsch, G. (2021). Review on machine learning techniques for developing pavement performance prediction models. *Sustainability*, 13(9), 5248.
- Karmakar, A., & Delhi, V. S. K. (2021). Construction 4.0: What do we know and where are we headed? *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 526–545.
- Kayikci, Y., & Kabadurmus, O. (2022). Barriers to the adoption of the mobility-as-a-service concept: The case of Istanbul, a large emerging metropolis. *Transport Policy*, 129, 219–236.
- Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2023). *Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) Nomor 3 Tahun 2023 Bidang Building Information Modeling*. Jakarta: Kemnaker RI.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2016). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2016 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum*. Jakarta: Kementerian PUPR.

- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 22/PRT/M/2018 tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Khan, B. S., Jangsher, S., Ahmed, A., & Al-Dweik, A. (2022). URLLC and eMBB in 5G Industrial IoT: A survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3, 1134–1163.
- Kompasiana. (2022). *Istilah dimensi BIM pada lampiran PP Nomor 16 Tahun 2021*. Jakarta: Kompasiana.com.
- Kravets, A. G., Bykov, A., & Shumeiko, N. (2021). Society 5.0 and the convergence of cyber-physical systems. Sebagaimana dikutip dalam Facilitating Construction 5.0 for smart, sustainable and resilient buildings, *Smart and Sustainable Built Environment* (2024).
- Kumar, A., Tanwar, S., & Park, J. H. (2024). Layered architecture of IoT. Dalam *Emerging Technologies and Applications in the IoT Ecosystem*. Hershey: IGI Global.
- Labee, P., Rasouli, S., & Liao, F. (2022). The implications of Mobility as a Service for urban emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103128.
- Lembaga Pengembangan Jasa Konstruksi [LPJK]. (2025). *Skema sertifikasi kompetensi kerja bidang Building Information Modeling*. Jakarta: LPJK.
- Li, J., Guo, J., Li, B., & Meng, L. (2024). Novel instance-based transfer learning for asphalt pavement performance prediction. *Buildings*, 14(3), 852.
- Liang, H., Lee, S.-C., Bae, W., Kim, J., & Seo, S. (2023). Towards UAVs in construction: Advancements, challenges, and future directions for monitoring and inspection. *Drones*, 7(3), 202.
- Liao, L., & Teo, E. A. L. (2018). Organizational change perspective on people management in BIM implementation in building projects. *Journal of Management in Engineering*, 34(3).
- Lopez-Carreiro, I., Monzon, A., & Lopez-Lambas, M. E. (2023). MaaS implications in the smart city: A multi-stakeholder approach. *Sustainability*, 15(14), 1–27.
- Maas, B. (2022). Literature review of Mobility as a Service. *Sustainability*, 14(14), 8962.

- Malekloo, A., Ozer, E., AlHamaydeh, M., & Girolami, M. (2022). Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights. *Structural Health Monitoring*, 21(4), 1906–1955.
- Marinelli, M. (2023). From Industry 4.0 to Construction 5.0: Exploring the path towards human–robot collaboration in construction. *Buildings*, 13(5), 1274.
- Megahed, N. A., & Hassan, A. M. (2022). Evolution of BIM to DTs: A paradigm shift for the post-pandemic AECO industry. *Urban Science*, 6(4), 67.
- Mercer, C. (2019). Professional identity and resistance to digital transformation in engineering practice. Sebagaimana dikutip dalam Barriers to Implementation of BIM to the Construction Industry: A Review.
- Milesight. (2025). *What is LoRaWAN: The \$3.7B IoT protocol that's growing 41% annually*. Milesight IoT.
- Miller, D., Ho, N.-M., Talebian, N., & Javanbakht, Z. (2023). Real-time monitoring of early-age compressive strength of concrete using an IoT-enabled monitoring system: An investigative study. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(2), 75.
- Mishra, M., Lourenço, P. B., & Ramana, G. V. (2022). Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. *Journal of Building Engineering*, 48, 103954.
- Mohammadi, M., Rashidi, M., Yu, Y., & Samali, B. (2023). Integration of TLS-derived bridge information modeling (BrIM) with a decision support system (DSS) for digital twinning and asset management of bridge infrastructures. *Computers in Industry*, 147, Article 103881.
- Musarat, M. A., Irfan, M., Alaloul, W. S., Maqsoom, A., & Ghufra, M. (2023). A review on the way forward in construction through Industrial Revolution 5.0. *Sustainability*, 15(18), 13862.
- National Institute of Standards and Technology. (2022). *Champlain Towers South Investigation Report*. NIST.
- National Transportation Safety Board. (2019). *Collapse of Pedestrian Bridge over SW 8th Street, Miami, Florida* (Accident Report).
- Neuroject. (2024). *Clash detection in BIM: Ultimate guide 2024*. Neuroject.com.

- Neuroject. (2024). *What are BIM dimensions? 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D BIM*. Neuroject.com.
- NIST (National Institute of Standards and Technology). (2024). *Cybersecurity Framework (CSF) 2.0*. Gaithersburg, MD: NIST.
- OECD. (2024). *Infrastructure for a Climate-Resilient Future*. Paris: OECD Publishing.
- Olugbade, S., Ojo, S., Imoize, A. L., Isabona, J., & Alaba, M. O. (2022). A review of artificial intelligence and machine learning for incident detectors in road transport systems. *Mathematical and Computational Applications*, 27(5), 77.
- Onososen, A. O., Musonda, I., Onatayo, D., Tjebane, M. M., Saka, A. B., & Fagbenro, R. K. (2023). Impediments to construction site digitalisation using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Drones*, 7(1), 45.
- Onungwa, I., Olugu-Uduma, N., & Shelden, D. R. (2021). Cloud BIM technology as a means of collaboration and project integration in smart cities. *SAGE Open*, 11(3), 21582440211033250.
- Osterwisch, Z., Rinchi, O., Alsharoa, A., Ghazzai, H., & Massoud, Y. (2024). The role of intelligent transportation systems and artificial intelligence in energy efficiency and emission reduction (arXiv:2401.14560).
- Ozturk, G. B. (2021). Digital twin research in the AECO-FM industry. *Journal of Building Engineering*, 40, Article 102730.
- PDAM Pintar. (2022). *Mari mengenal Non Revenue Water!*. Jakarta: PDAM Pintar.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 16 Tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung*. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 14 Tahun 2021 tentang Perubahan atas Peraturan Pemerintah tentang Jasa Konstruksi*. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 16 Tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung*. Jakarta: Sekretariat Negara.

- Peng, Z., Li, J., & Hao, H. (2023). Development and experimental verification of an IoT sensing system for drive-by bridge health monitoring. *Engineering Structures*, 293, 116705.
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau. (2021).
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 2023 tentang Bangunan Gedung Cerdas. (2023).
- Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 76 Tahun 2021 tentang Sistem Manajemen Transportasi Cerdas di Bidang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan. (2021).
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 16 Tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung. (2021).
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2024 tentang Jalan Tol. (2024).
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 39 Tahun 2019 tentang Satu Data Indonesia. (2019). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2019 Nomor 112.
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon untuk Pencapaian Target Kontribusi yang Ditetapkan Secara Nasional dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca dalam Pembangunan Nasional. (2021).
- Pirdavani, A., Muzyka, S., Vandervoort, V., & Van Hoya, S. (2023). Application of building information modeling (BIM) for transportation infrastructure: A scoping review. *Transportation Research Procedia*, 73, 110–117.
- Rakholia, R., Suárez-Cetrulo, A. L., Singh, M., & Carbajo, R. S. (2025). Integrating AI and IoT for predictive maintenance in Industry 4.0 manufacturing environments: A practical approach. *Information*, 16(9), 737.
- Revizto. (2026). *BIM dimensions explained: 2D, 3D, 4D, 5D, 6D and beyond*. Revizto Blog.
- Rey-Moreno, M., Periañez-Cristóbal, R., & Calvo-Mora, A. (2023). Reflections on sustainable urban mobility, Mobility as a Service

- (MaaS) and adoption models. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 274.
- RIB Software. (2025). *The history of BIM: Exploring its evolution & future*. Stuttgart: RIB Software.
- Risk & Insurance. (2026). *Four converging threats are making critical infrastructure increasingly fragile*. Risk & Insurance.
- Röhrig, C., & Cramer, B. (2025). LPWAN based IoT architecture for distributed energy monitoring in deep indoor environments. Dalam *Proceedings of the 6th International Conference on Building Energy and Environment (COBEE 2025)*. Eindhoven: COBEE.
- Roosipuu, P., Annus, I., Kuusik, A., Kändler, N., & Alam, M. M. (2023). Monitoring and control of smart urban drainage systems using NB-IoT cellular sensor networks. *Water Science and Technology*, 88(2), 339–354.
- Rosati, R., et al. (2023). From knowledge-based to big data analytic model: A novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(1), 107–121.
- Rytter, A. (1993). *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures* [Disertasi doctoral]. Aalborg University.
- Safikhani, S., Keller, S., Schweiger, G., & Pirker, J. (2022). Immersive virtual reality for extending the potential of building information modeling in architecture, engineering, and construction sector: Systematic review. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 503–526.
- Setiawan, B., & Nugroho, A. (2024). Internet of Things (IoT) in structural health monitoring: A decade of research trends. *Jurnal Teknik Sipil*, 23(2), 123–139.
- Sharafat, A., Latif, K., & Seo, J. (2021). BIM-GIS-based integrated framework for underground utility management system for earthwork operations. *Applied Sciences*, 11(12), 5721.
- Sharif, S., & Rahman, M. (2022). Integrating smart mobility and transit-oriented development performance indicators for eco-friendly urban living. Dalam kajian *Smart city frameworks SWOT analysis* (Frontiers, 2024).

- Sharifi, A. (2023). Resilience of urban social-ecological-technological systems (SETS): A review. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104910.
- Shin, M.-H., Jung, J.-H., & Kim, H.-Y. (2022). Quantitative and qualitative analysis of applying Building Information Modeling (BIM) for infrastructure design process. *Buildings*, 12(9), 1476.
- Sholeh, M. N., Fauziyah, S., & Khasani, R. R. (2020). Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: A case study. *E3S Web of Conferences*, 202, Article 02012.
- Silva, R., et al. (2024). Design coordination challenges between architectural, structural, and MEP disciplines in 2D CAD-based practices. *Journal of Construction Engineering*.
- SKALA Course. (2025). *Sertifikasi SKK BIM resmi BNSP: BIM Manager, BIM Coordinator, BIM Modeler, BIM Juru Gambar*. Jakarta: SKALA Academy.
- Snaptrude. (2025). *What are BIM dimensions: A complete guide to 3D, 4D, 5D, 6D, 7D & 8D*. Snaptrude.com.
- Sompolgrunk, A., Banihashemi, S., Golzad, H., & Le Nguyen, K. (2024). Strategic alignment of BIM and big data through systematic analysis and model development. *Automation in Construction*, 168, Article 105801.
- Soon, T. J., et al. (2024). Automated quantity take-off accuracy in BIM-based quantity surveying practice. *Journal of Quantity Surveying and Construction Business*.
- Spencer Jr., B. F. (2025). Artificial intelligence for structural health monitoring: From vibration-based methods to vision-based deep learning. *Structural Engineering and Mechanics*, 87(2), 123–145.
- Spencer, B. F., Hoskere, V., & Narazaki, Y. (2019). Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring. *Engineering*, 5(2), 199–222.
- Sprintzeal. (2026). *Cybersecurity framework guide 2026*. Sprintzeal.
- Strand & Co. (2026). *BIM clash detection process: Step-by-step guide 2025*. Strand-Co.com.
- Styer, J., Tunstall, L., Landis, A., & Grenfell, J. (2024). Innovations in pavement design and engineering: A 2023 sustainability review. *Heliyon*, 10(13), e33602.

- Suawa, P., Meisel, T., Jongmanns, M., Huebner, M., & Reichenbach, M. (2022). Modeling and fault detection of brushless direct current motor by deep learning sensor data fusion. *Sensors*, 22(9), 3516.
- Sun, L., Shang, Z., Xia, Y., Bhowmick, S., & Nagarajaiah, S. (2020). Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection. *Journal of Structural Engineering*, 146(5), 04020073.
- Taşcı, B., Omar, A., & Ayvaz, S. (2023). Remaining useful lifetime prediction for predictive maintenance in manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 184, 109566.
- Te, M. C. L., Bautista, J. A. T., Dimacali, S. M. E. V., Lood, A. V. M., Pangan, M. G. M., & Chua, A. Y. (2024). A smart IoT urban flood monitoring system using a high-performance pressure sensor with LoRaWAN. *HighTech and Innovation Journal*, 5(4), 918–936.
- TeamTweaks. (2024). *Smart water management using IoT in 2024*. TeamTweaks.
- TechNet. (2024). *Smart infrastructure*. Washington, DC: TechNet.
- The B1M. (2025). *BIM maturity: Easy as 1, 2, 3*. London: The B1M.
- Thinkproject. (2025). *ISO 19650 guide: BIM, CDEs & information management*. Munich: Thinkproject.
- Thompson, E. A., Lu, P., Alimo, P. K., Atuobi, H. B., Akoto, E. T., & Abbew, C. K. (2025). Revolutionizing railway systems: A systematic review of digital twin technologies. *High-speed Railway*, 3(3), 238–250.
- Toh, G., et al. (2020). Review of vibration-based structural health monitoring using machine learning. *Applied Sciences*, 10, 1680.
- Tuhaise, V. V., Tah, J. H. M., & Abanda, F. H. (2023). Technologies for digital twin applications in construction. *Automation in Construction*, 152, 104931.
- Ubertini, F., Comanducci, G., & Cavalagli, N. (2016). Vibration-based structural health monitoring of a historic bell-tower using output-only measurements and multivariate statistical analysis. *Structural Health Monitoring*, 15(4), 438–457.
- Ucar, A., Karakose, M., & Kırımça, N. (2024). Artificial intelligence for predictive maintenance applications: Key components, trustworthiness, and future trends. *Applied Sciences*, 14(2), 898.

- Ulrich, S., Schildorfer, W., Aigner, W., Thonhofer, E., & Neubauer, M. (2023). How can a digital twin sustainably enhance integration and service quality for road authorities? *Transportation Research Procedia*, 72, 3909–3916.
- United-BIM. (2025). *Clash detection in BIM: A complete guide for construction teams*. United-BIM.com.
- United-BIM. (2026). *BIM Level of Development (LOD) 100, 200, 300, 350, 400, 500*. United-BIM.com.
- ViBIM. (2025). *BIM maturity levels explained: Level 0, 1, 2, 3*. ViBIM Global.
- ViBIM. (2026). *What is 5D BIM? The complete guide to cost management in construction*. ViBIM Global.
- Vignali, V., et al. (2021). Building Information Modelling (BIM) application for an existing road infrastructure. *Automation in Construction*, 128, 103752.
- Waqar, A., Othman, I., & Almujiabah, H. (2024). Internet of Things (IoT) for safety and efficiency in construction building site operations. *Scientific Reports*, 14, Article 78931.
- Waqar, A., Othman, I., Shafiq, N., & Mansoor, M. S. (2023). Integration of passive RFID for small-scale construction project management. *Data and Information Management*, 7(4), Article 100055.
- Waqar, A., Othman, I., Shafiq, N., & Mansoor, M. S. (2023). Integration of passive RFID for small-scale construction project management. *Data and Information Management*, 7(4), Article 100055.
- Wasiq, S., & Golroo, A. (2024). Probabilistic pavement performance modeling using hybrid Markov chain: A case study in Afghanistan. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03023.
- Werbińska-Wojciechowska, S., Giel, R., & Winiarska, K. (2024). Digital twin approach for operation and maintenance of transportation system—Systematic review. *Sensors*, 24(18).
- Wijaya, T., et al. (2024). Emerging trends in the integration of smart sensor technologies in structural health monitoring: A contemporary perspective. *PMC Reviews*.
- Wimmer, J., & Braml, T. (2024). Digital twins for engineering structures—An industry 4.0 perspective. *Structural Concrete*, 25, 4202–4218.

- WizzDev. (2025). *IoT architecture layers*. Kraków: WizzDev.
- Wu, S., Hou, L., & Zhang, G. K. (2022). Real-time mixed reality-based visual warning for construction workforce safety. *Automation in Construction*, 139, Article 104252.
- Xage Security. (2024). *2024 in review: Cyber threats and the fight to secure critical infrastructure*. Global Security Mag Online.
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535.
- Xylem. (2018). *Smart water: Leak detection and non-revenue water*. Xylem Inc.
- Yessoufou, F., & Zhu, J. (2023). Classification and regression-based convolutional neural network and long short-term memory configuration for bridge damage identification using long-term monitoring vibration data. *Structural Health Monitoring* (advance online publication).
- Yitmen, I., Almusaed, A., & Alizadehsalehi, S. (2023). Investigating the causal relationships among enablers of the Construction 5.0 paradigm: Integration of operator 5.0 and society 5.0 with human-centricity, sustainability, and resilience. *Sustainability*, 15(11), 9105.
- Zabala-Vargas, S., Jaimes-Quintanilla, M., & Jimenez-Barrera, M. H. (2023). Big data, data science, and artificial intelligence for project management in the architecture, engineering, and construction industry: A systematic review. *Buildings*, 13(12), 2944. <https://doi.org/10.3390/buildings13122944>
- Zhang, X., Cheng, Z., Du, L., & Du, Y. (2023). Progressive classifier mechanism for bridge expansion joint health status monitoring system based on acoustic sensors. *Sensors*, 23(11), 5090.
- Zhao, J., & Wang, H. (2023). Machine learning based pavement performance prediction for data-driven decision of asphalt pavement overlay. *Structure and Infrastructure Engineering*, 21(6), 1–16.
- Zhao, L., et al. (2021). Digital-twin-based evaluation of nearly zero-energy building for existing buildings based on scan-to-BIM. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–11.

- Zhou, Y., et al. (2024). Physics-informed deep learning-based real-time structural response prediction method. *Engineering*, 35(4), 147–164.
- Zhu, A., Dai, T., Xu, G., Pauwels, P., De Vries, B., & Fang, M. (2023). Deep reinforcement learning for real-time assembly planning in robot-based prefabricated construction. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 20, 1515–1526.
- Zhuang, Z., Xu, F., Ye, J., Hu, N., & Jiang, L. (2024). A comprehensive review of sustainable materials and toolpath optimization in 3D concrete printing. *npj Materials Sustainability*, 2, 12.
- Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., & Celent, L. (2022). From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology. *Energies*, 15(14), 5221.



GLOSARIUM

Aset Infrastruktur	Seluruh fasilitas fisik seperti jalan, jembatan, bendungan, gedung, dan utilitas yang dikelola untuk mendukung pelayanan publik dan aktivitas ekonomi.
<i>Artificial Intelligence (AI)</i>	Teknologi kecerdasan buatan yang digunakan untuk menganalisis data, memprediksi kondisi infrastruktur, dan mendukung pengambilan keputusan dalam teknik sipil.
<i>Big Data</i>	Kumpulan data berukuran sangat besar yang dihasilkan dari berbagai sumber dan dimanfaatkan untuk analisis serta pengelolaan proyek konstruksi.
BIM	Metode pemodelan digital yang mengintegrasikan informasi geometri, material, biaya, jadwal, dan siklus hidup bangunan dalam satu model.
<i>Cloud Computing</i>	Teknologi penyimpanan dan pengolahan data melalui internet yang memungkinkan kolaborasi proyek secara real time..
<i>Computer-Aided Design</i>	Perangkat lunak yang digunakan untuk membuat gambar teknik secara digital sebelum berkembang menjadi sistem BIM.
<i>Dashboard</i>	Tampilan visual yang menyajikan data proyek, kondisi infrastruktur, dan indikator kinerja secara terpadu.
Data Sensor	Informasi yang diperoleh dari sensor untuk memantau kondisi struktur, lingkungan, atau aktivitas konstruksi.

<i>Digital Twin</i>	Representasi digital suatu aset fisik yang selalu diperbarui menggunakan data aktual untuk mendukung simulasi dan pemantauan.
Digitalisasi Konstruksi	Transformasi proses konstruksi dari metode konvensional menuju sistem berbasis teknologi digital.
Efisiensi Proyek	Kemampuan menyelesaikan proyek dengan penggunaan waktu, biaya, dan sumber daya yang optimal.
Estimasi Biaya	Proses memperkirakan kebutuhan dana pembangunan berdasarkan data teknis dan analisis pekerjaan.
<i>Facility Management</i>	Pengelolaan bangunan dan infrastruktur setelah tahap konstruksi untuk menjaga fungsi dan kinerjanya.
Fiber Optik	Media transmisi data berkecepatan tinggi yang mendukung komunikasi sistem infrastruktur cerdas.
<i>Green Construction</i>	Pendekatan pembangunan yang memperhatikan efisiensi energi, pengurangan limbah, dan keberlanjutan lingkungan.
<i>Hybrid Infrastructure</i>	Infrastruktur yang menggabungkan sistem fisik dengan teknologi digital untuk meningkatkan kinerja layanan.
Hidrologi Digital	Penerapan teknologi digital dalam pemantauan dan analisis sistem hidrologi.
<i>Smart Infrastructure</i>	Infrastruktur yang memanfaatkan teknologi digital, sensor, dan komunikasi

data untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan.

<i>Internet of Things (IoT)</i>	Jaringan perangkat yang saling terhubung melalui internet untuk mengumpulkan, mengirim, dan bertukar data secara otomatis.
Interoperabilitas	Kemampuan berbagai sistem atau aplikasi untuk saling bertukar dan menggunakan data secara efektif.
<i>Scheduling</i>	Perencanaan waktu pelaksanaan setiap aktivitas proyek agar berjalan sesuai target.
Keselamatan Konstruksi	Upaya melindungi pekerja, peralatan, dan lingkungan selama pelaksanaan proyek.
Kinerja Infrastruktur	Tingkat kemampuan suatu infrastruktur dalam menjalankan fungsi sesuai standar yang ditetapkan.
Konektivitas Digital	Kemampuan sistem dan perangkat untuk saling terhubung dalam pertukaran informasi.
<i>Lifecycle Management</i>	Pengelolaan seluruh tahapan umur infrastruktur mulai dari perencanaan hingga pembongkaran.
<i>Lean Construction</i>	Pendekatan manajemen konstruksi yang berfokus pada pengurangan pemborosan dan peningkatan nilai proyek.
<i>Machine Learning</i>	Cabang kecerdasan buatan yang memungkinkan sistem mempelajari pola data untuk menghasilkan prediksi.

Manajemen Proyek	Proses perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan pengendalian proyek agar mencapai tujuan secara efektif.
<i>Monitoring Real Time</i>	Pemantauan kondisi proyek atau infrastruktur secara langsung menggunakan teknologi digital.
<i>Network Infrastructure</i>	Jaringan komunikasi yang menghubungkan perangkat, sensor, dan sistem informasi.
<i>Non-Destructive Testing</i>	Metode pemeriksaan kondisi struktur tanpa merusak material yang diuji.
Otomasi Konstruksi	Pemanfaatan teknologi untuk mengurangi pekerjaan manual dalam proses pembangunan.
Operasi Infrastruktur	Tahap penggunaan dan pengelolaan infrastruktur setelah selesai dibangun.
<i>Predictive Maintenance</i>	Strategi pemeliharaan berdasarkan prediksi kerusakan menggunakan data sensor dan analitik.
Perencanaan Digital	Perencanaan proyek yang memanfaatkan teknologi informasi dan model digital.
Proyek Terintegrasi	Pelaksanaan proyek yang melibatkan koordinasi seluruh pihak melalui sistem informasi bersama.
<i>Quality Control</i>	Proses pengawasan mutu pekerjaan agar memenuhi standar teknis yang telah ditetapkan.
<i>Remote Monitoring</i>	Pemantauan kondisi proyek atau infrastruktur dari lokasi yang berbeda melalui jaringan komunikasi.

Risiko Konstruksi	Potensi kejadian yang dapat menghambat keberhasilan proyek dari aspek biaya, waktu, mutu, maupun keselamatan.
<i>Smart Sensor</i>	Perangkat elektronik yang mampu mendeteksi kondisi tertentu serta mengirimkan data secara otomatis.
Simulasi Struktur	Proses pemodelan perilaku struktur menggunakan perangkat lunak sebelum pembangunan dilakukan.
<i>Smart City</i>	Konsep kota yang memanfaatkan teknologi digital untuk meningkatkan kualitas pelayanan dan pengelolaan infrastruktur.
<i>Sustainability</i>	Prinsip pembangunan yang memperhatikan keseimbangan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan.
Teknologi Konstruksi	Penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam proses pembangunan infrastruktur.
Transformasi Digital	Perubahan menyeluruh menuju penggunaan teknologi digital dalam seluruh proses organisasi dan proyek.
<i>Unified Data Environment</i>	Lingkungan data terpadu yang memungkinkan seluruh informasi proyek tersimpan dan dikelola secara terpusat.
<i>Wireless Sensor Network</i>	Jaringan sensor nirkabel yang digunakan untuk mengumpulkan dan mengirimkan data kondisi infrastruktur secara berkelanjutan.



INDEKS

A

analisis, 1, 4, 10, 19, 27, 37, 38,
39, 51, 57, 61, 62, 67, 69, 70,
71, 78, 80, 82, 85, 93, 95, 101,
102, 104, 105, 116, 117, 126,
127, 137, 138, 140, 143, 145,
146, 147, 178, 179, 215, 216,
217, 227, 231, 237, 238, 247,
251

aset, i, 1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12,
13, 14, 19, 20, 21, 22, 27, 29,
30, 55, 56, 61, 62, 68, 69, 70,
71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78,
80, 81, 82, 83, 89, 91, 94, 97,
99, 104, 109, 110, 111, 112,
113, 114, 115, 116, 117, 118,
119, 122, 123, 124, 125, 126,
127, 128, 129, 135, 139, 140,
141, 142, 143, 144, 146, 147,
167, 188, 194, 195, 197, 200,
217, 219, 224, 226, 227, 228,
231, 237, 247, 251

B

berbasis, i, 2, 6, 8, 10, 13, 16, 19,
20, 23, 26, 28, 29, 30, 31, 32,
35, 36, 37, 39, 40, 41, 43, 44,
50, 53, 61, 63, 69, 70, 71, 72,
78, 79, 85, 90, 92, 93, 94, 95,
96, 97, 98, 99, 101, 102, 103,
105, 106, 108, 109, 111, 112,
114, 115, 117, 118, 119, 120,
121, 125, 131, 134, 135, 136,

137, 138, 139, 140, 143, 146,
147, 151, 153, 154, 155, 156,
158, 162, 163, 164, 167, 170,
172, 174, 178, 181, 182, 183,
184, 194, 195, 196, 206, 207,
213, 214, 216, 217, 224, 225,
232, 238, 247

D

data, i, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11,
12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20,
22, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 31,
35, 37, 38, 39, 40, 41, 50, 55,
56, 57, 58, 63, 64, 65, 66, 67,
68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75,
76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83,
84, 85, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
97, 98, 100, 101, 102, 103,
104, 105, 106, 108, 109, 110,
111, 112, 113, 114, 115, 116,
117, 119, 120, 121, 122, 123,
124, 125, 126, 127, 128, 129,
130, 131, 132, 133, 134, 135,
136, 137, 138, 139, 140, 141,
142, 143, 144, 145, 146, 147,
148, 149, 150, 151, 152, 153,
154, 155, 156, 157, 158, 159,
161, 163, 164, 168, 169, 170,
173, 174, 176, 177, 181, 182,
183, 184, 186, 187, 188, 189,
190, 191, 193, 194, 195, 196,
198, 200, 201, 202, 203, 204,
205, 213, 214, 216, 217, 225,

226, 227, 228, 231, 232, 237,
238, 239, 240, 241, 246, 251
desain, 3, 4, 17, 18, 19, 20, 24,
26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 35,
36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43,
44, 45, 46, 48, 49, 51, 55, 69,
76, 86, 87, 89, 91, 105, 112,
120, 126, 127, 140, 146, 165,
188, 190, 211, 212, 215, 216,
219, 221, 222, 224, 225, 227,
228, 231, 247
digital, i, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11,
12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19,
20, 21, 22, 25, 26, 44, 55, 63,
67, 73, 74, 75, 76, 77, 84, 85,
92, 94, 96, 97, 98, 102, 104,
109, 110, 111, 112, 114, 115,
116, 117, 118, 122, 125, 129,
131, 138, 140, 141, 145, 146,
147, 149, 160, 162, 163, 164,
165, 166, 170, 171, 185, 189,
191, 194, 195, 196, 197, 198,
199, 204, 206, 207, 213, 214,
216, 217, 224, 225, 231, 232,
237, 238, 240, 241, 246, 251

E

elemen, 3, 4, 11, 13, 25, 26, 28,
37, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46,
48, 49, 51, 52, 53, 54, 59, 60,
61, 68, 69, 73, 77, 86, 95, 97,
98, 100, 102, 104, 108, 113,
116, 117, 118, 120, 124, 140,
141, 161, 163, 211, 215, 225,
231, 247

I

informasi, i, 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10,
11, 13, 15, 16, 22, 23, 24, 25,
26, 27, 28, 29, 30, 31, 43, 55,
56, 57, 62, 63, 67, 73, 74, 76,
77, 80, 82, 86, 97, 101, 104,
105, 111, 112, 113, 115, 122,
123, 124, 125, 128, 144, 149,
150, 151, 152, 153, 161, 162,
185, 188, 189, 190, 192, 195,
196, 197, 201, 202, 237, 239,
240, 241, 247, 251
infrastruktur, i, 1, 2, 5, 7, 9, 11,
12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21,
25, 27, 33, 34, 47, 57, 58, 61,
64, 65, 66, 67, 70, 73, 74, 75,
76, 77, 78, 80, 81, 83, 85, 86,
87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94,
95, 96, 102, 105, 106, 109,
110, 111, 112, 113, 115, 117,
118, 120, 121, 122, 124, 125,
126, 127, 128, 129, 130, 131,
132, 133, 137, 138, 139, 140,
141, 142, 143, 144, 145, 146,
147, 149, 152, 153, 156, 158,
160, 161, 162, 163, 164, 166,
168, 169, 171, 175, 182, 185,
186, 187, 188, 189, 190, 191,
192, 193, 194, 195, 196, 197,
198, 199, 200, 201, 204, 219,
220, 221, 222, 223, 224, 225,
226, 227, 228, 229, 230, 231,
232, 237, 238, 239, 240, 241,
246, 251
integrasi, i, 1, 8, 11, 13, 14, 15,
18, 26, 27, 47, 49, 53, 54, 59,
60, 67, 68, 69, 70, 73, 74, 76,

80, 86, 87, 92, 94, 98, 108,
109, 111, 122, 123, 124, 129,
136, 140, 142, 143, 144, 156,
158, 159, 161, 166, 168, 173,
180, 205, 223, 225, 228, 230,
232, 247

J

jaringan, 1, 2, 4, 7, 10, 12, 13,
14, 15, 17, 18, 25, 42, 55, 56,
57, 58, 59, 64, 65, 66, 67, 69,
71, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 83,
86, 87, 88, 89, 92, 99, 103,
105, 111, 113, 117, 118, 119,
120, 124, 128, 129, 131, 132,
133, 136, 142, 143, 147, 149,
151, 153, 155, 158, 161, 162,
163, 164, 166, 169, 170, 171,
173, 174, 175, 176, 177, 178,
179, 180, 181, 182, 183, 185,
188, 189, 191, 192, 193, 224,
240, 247

K

keamanan, 15, 17, 30, 39, 69,
72, 78, 110, 130, 131, 146,
147, 163, 164, 169, 174, 184,
185, 186, 188, 189, 190, 191,
192, 193, 194, 195, 196, 197,
198, 199, 200, 201, 202, 203,
204, 223, 247, 251

kerangka, 1, 5, 9, 13, 16, 19, 29,
33, 34, 35, 86, 87, 94, 95, 97,
113, 115, 117, 118, 126, 127,
129, 133, 134, 140, 141, 142,
143, 145, 149, 159, 163, 164,
165, 170, 172, 177, 190, 192,

194, 199, 200, 201, 203, 213,
216, 219, 220, 222, 223, 227,
230, 231, 247

konstruksi, i, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10,
12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20,
24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33,
35, 36, 44, 45, 46, 48, 49, 50,
51, 52, 53, 54, 55, 60, 61, 76,
78, 89, 91, 93, 96, 97, 101,
107, 108, 112, 120, 122, 125,
126, 127, 131, 147, 205, 206,
207, 208, 209, 210, 211, 212,
213, 214, 215, 216, 217, 219,
221, 226, 227, 228, 229, 230,
231, 232, 238, 239, 246, 251

konvensional, 2, 13, 15, 16, 17,
25, 26, 27, 29, 36, 37, 38, 39,
40, 44, 50, 52, 53, 54, 55, 58,
59, 64, 67, 69, 70, 71, 72, 73,
74, 75, 77, 78, 80, 90, 93, 94,
98, 99, 100, 102, 116, 126,
141, 150, 153, 154, 160, 162,
168, 169, 171, 172, 173, 182,
184, 185, 188, 190, 192, 195,
206, 208, 209, 211, 212, 213,
214, 216, 222, 225, 228, 238,
247

M

manajemen, i, 10, 11, 13, 25, 30,
31, 35, 49, 53, 60, 69, 70, 71,
72, 73, 81, 82, 85, 88, 94, 95,
97, 106, 109, 111, 112, 113,
115, 118, 122, 125, 127, 128,
131, 135, 136, 140, 142, 153,
155, 158, 159, 166, 169, 170,
171, 172, 174, 180, 181, 189,

192, 194, 197, 200, 201, 206,
217, 221, 227, 239, 247, 251
model, 1, 2, 3, 4, 6, 9, 11, 12, 13,
14, 16, 19, 23, 24, 25, 26, 27,
28, 29, 31, 34, 35, 37, 38, 39,
41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48,
49, 50, 51, 53, 54, 56, 58, 61,
67, 68, 69, 70, 74, 75, 76, 77,
78, 81, 83, 84, 90, 92, 95, 97,
102, 103, 104, 105, 109, 112,
113, 114, 115, 116, 117, 118,
119, 121, 122, 123, 124, 126,
127, 128, 129, 132, 133, 134,
135, 136, 137, 139, 140, 141,
142, 143, 144, 145, 146, 147,
148, 165, 184, 188, 189, 190,
194, 206, 207, 213, 214, 215,
216, 217, 237, 240, 246

N

O

operasional, 13, 15, 17, 18, 20,
28, 29, 30, 35, 40, 42, 49, 52,
62, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 74,
75, 78, 81, 86, 89, 91, 99, 101,
106, 112, 113, 118, 123, 125,
130, 146, 150, 151, 154, 158,
161, 163, 164, 169, 171, 172,
173, 176, 181, 187, 194, 195,
196, 210, 226, 228, 232, 247

P

pemantauan, i, 11, 16, 18, 19,
53, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 64,
65, 69, 70, 71, 73, 86, 89, 90,
91, 92, 93, 94, 96, 98, 99, 100,

101, 106, 107, 108, 109, 118,
119, 120, 126, 127, 129, 134,
136, 140, 143, 144, 150, 169,
171, 172, 174, 175, 176, 177,
179, 180, 182, 184, 187, 190,
192, 193, 200, 210, 213, 215,
216, 217, 225, 231, 238, 247,
251

pendekatan, i, 21, 27, 28, 31, 35,
36, 37, 39, 40, 43, 44, 50, 51,
52, 53, 66, 67, 70, 71, 77, 80,
86, 90, 92, 93, 99, 102, 103,
105, 111, 121, 125, 128, 136,
140, 142, 143, 150, 156, 157,
159, 167, 181, 186, 197, 207,
216, 222, 225, 228, 247, 251

penerapan, i, 5, 12, 17, 18, 23,
25, 27, 32, 34, 35, 40, 44, 49,
52, 59, 65, 66, 72, 76, 89, 90,
94, 101, 102, 103, 109, 112,
113, 115, 117, 118, 120, 123,
133, 134, 138, 142, 143, 144,
147, 149, 152, 153, 154, 158,
163, 169, 170, 172, 174, 177,
178, 184, 192, 200, 205, 209,
216, 222, 247

perangkat, 3, 10, 15, 16, 17, 19,
21, 22, 23, 24, 25, 31, 39, 43,
44, 46, 47, 49, 51, 55, 58, 61,
63, 65, 66, 74, 98, 99, 100,
109, 114, 118, 130, 131, 133,
140, 144, 148, 151, 154, 156,
159, 162, 163, 174, 186, 187,
188, 189, 191, 192, 193, 205,
207, 238, 239, 240, 241, 247

proyek, i, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
11, 12, 15, 16, 17, 19, 22, 23,
24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32,

33, 34, 35, 37, 41, 42, 44, 46,
47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55,
57, 61, 66, 68, 78, 91, 92, 112,
113, 115, 122, 123, 125, 126,
127, 128, 130, 146, 147, 187,
200, 205, 206, 207, 208, 214,
215, 216, 217, 220, 221, 222,
227, 228, 229, 230, 232, 237,
238, 239, 240, 241, 247, 251

S

sensor, 1, 2, 3, 4, 6, 10, 11, 12,
13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 55,
56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63,
64, 65, 66, 68, 70, 71, 72, 74,
75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82,
83, 84, 86, 89, 92, 93, 94, 96,
97, 98, 99, 100, 101, 104, 105,
108, 109, 110, 114, 115, 116,
117, 118, 119, 120, 121, 123,
124, 125, 126, 127, 129, 130,
131, 133, 135, 140, 141, 143,
151, 155, 156, 157, 158, 159,
170, 171, 172, 173, 174, 178,
179, 181, 182, 183, 184, 187,
188, 190, 191, 192, 193, 195,
196, 200, 202, 206, 212, 213,
216, 237, 238, 240, 241, 246,
251

sistem, 1, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16,
27, 28, 29, 39, 40, 41, 42, 48,
49, 52, 55, 56, 57, 58, 62, 64,
65, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 76,
77, 79, 80, 81, 82, 85, 86, 87,
89, 90, 92, 93, 94, 96, 97, 98,
99, 105, 106, 107, 108, 109,
111, 118, 120, 121, 122, 124,

127, 128, 130, 131, 132, 136,
138, 140, 142, 143, 146, 147,
148, 149, 150, 151, 152, 153,
154, 157, 158, 159, 161, 162,
163, 164, 165, 166, 168, 169,
170, 171, 172, 173, 174, 175,
178, 179, 180, 181, 182, 184,
185, 186, 187, 188, 189, 190,
191, 192, 193, 194, 195, 200,
201, 202, 203, 204, 205, 206,
211, 221, 222, 223, 224, 225,
228, 237, 238, 239, 240, 246,
251

smart, 1, 4, 9, 14, 15, 18, 21, 69,
70, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79,
80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88,
89, 92, 93, 94, 97, 110, 143,
149, 165, 166, 169, 170, 171,
172, 174, 179, 180, 181, 183,
185, 187, 192, 193, 194, 196,
200, 202, 204, 216, 217, 228,
247, 251

struktur, 1, 2, 4, 6, 11, 13, 18, 26,
28, 32, 38, 39, 40, 41, 42, 44,
45, 46, 48, 52, 56, 57, 59, 60,
61, 63, 64, 66, 70, 76, 93, 94,
95, 96, 98, 99, 100, 102, 103,
104, 106, 108, 109, 110, 111,
116, 117, 119, 120, 121, 122,
125, 128, 129, 132, 134, 135,
137, 140, 141, 142, 145, 146,
194, 206, 209, 211, 212, 214,
215, 217, 223, 225, 237, 240,
241, 247

T

tahap, 9, 10, 17, 18, 19, 20, 24,
27, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 36,
37, 38, 39, 42, 45, 46, 50, 60,
69, 76, 90, 91, 100, 101, 102,
107, 108, 118, 127, 128, 140,
144, 163, 168, 174, 177, 199,
204, 214, 215, 216, 217, 228,
231, 232, 238, 247
teknologi, i, 1, 4, 5, 7, 8, 9, 11,
14, 16, 18, 19, 21, 22, 25, 29,
32, 33, 40, 53, 54, 55, 56, 64,
72, 73, 80, 82, 85, 87, 88, 89,
92, 93, 94, 98, 109, 110, 111,
118, 122, 125, 131, 139, 140,
145, 147, 149, 150, 152, 154,
159, 160, 161, 165, 167, 169,
170, 172, 173, 174, 175, 178,

181, 185, 187, 188, 189, 190,
192, 194, 195, 197, 199, 201,
203, 205, 208, 209, 211, 213,
216, 217, 222, 226, 228, 229,
232, 238, 240, 241, 247, 251

U

utama, 3, 9, 11, 15, 16, 18, 19,
21, 25, 27, 30, 34, 44, 45, 48,
49, 62, 70, 73, 74, 76, 78, 80,
81, 83, 84, 86, 87, 88, 91, 93,
94, 98, 101, 109, 116, 119,
124, 127, 128, 129, 132, 137,
144, 146, 147, 149, 151, 152,
154, 161, 165, 166, 167, 168,
170, 171, 172, 175, 185, 186,
188, 190, 193, 197, 201, 209,
211, 219, 226, 230, 231, 247

BIOGRAFI PENULIS



Ir. Hj. Lindawati MZ, S.T., M.T.

Lahir di Baturaja, 13 November 1964. Lulus S2 di Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Sriwijaya tahun 2012. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Baturaja pada Program Studi Teknik Sipil.



Ir. Muhammad Rizka Fadli Wibowo, S.T., M.T.

Lahir di Baturaja, 28 Juli 1997. Menyelesaikan Studi S2 Magister Teknik Sipil pada Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya tahun 2023. Penulis bekerja sebagai Pengajar di Universitas Baturaja pada Program Studi Teknik Sipil, Selain mengajar, penulis juga menjadi Direktur Utama PT. Bintang Baturaja Karya Perusahaan Bidang Jasa Konsultan Konstruksi yang berada di Baturaja.



Ir. Balqis Fataya Said, S.T., M.T.

Lahir di Palembang, 20 Juli 1999. Menyelesaikan Studi S2 Magister Teknik Sipil dengan Konsentrasi Keahlian Rekayasa dan Manajemen Infrastruktur di Institut Teknologi Bandung pada tahun 2023. Penulis bekerja sebagai Dosen di Universitas Sriwijaya pada Program Studi Teknik Sipil. Aktif sebagai pembicara di bidang organisasi.



SINOPSIS

Buku referensi “Teknik Sipil: BIM, *Internet of Things*, dan *Smart Infrastructure*” membahas secara komprehensif konsep, prinsip, dan implementasi transformasi digital dalam bidang teknik sipil yang didukung oleh teknologi *Building Information Modeling* (BIM), *Internet of Things* (IoT), dan *Smart Infrastructure*. Berangkat dari perkembangan teknologi konstruksi pada era Revolusi Industri 4.0 dan Society 5.0, buku ini mengkaji bagaimana digitalisasi mampu meningkatkan efisiensi perencanaan, pelaksanaan konstruksi, pengelolaan aset, serta pemeliharaan infrastruktur secara cerdas, terintegrasi, dan berkelanjutan. Disusun dengan pendekatan integratif, buku ini memadukan landasan teoritis mengenai sistem informasi, pemodelan digital, sensor cerdas, analisis data, dan konektivitas infrastruktur dengan berbagai praktik penerapannya dalam pembangunan modern. Pembahasan mencakup konsep dasar BIM, teknologi *Internet of Things* dalam pemantauan infrastruktur, *smart construction*, manajemen proyek digital, *digital twin*, analisis data *real time*, pemeliharaan prediktif, keamanan data, keberlanjutan infrastruktur, hingga tantangan dan peluang implementasi *smart infrastructure* dalam mendukung pembangunan yang efisien, tangguh, dan berorientasi pada masa depan.

TEKNIK SIPIL

BIM, INTERNET OF THINGS, DAN SMART INFRASTRUCTURE

Buku referensi “Teknik Sipil: BIM, Internet of Things, dan Smart Infrastructure” membahas secara komprehensif konsep, prinsip, dan implementasi transformasi digital dalam bidang teknik sipil yang didukung oleh teknologi Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), dan Smart Infrastructure. Berangkat dari perkembangan teknologi konstruksi pada era Revolusi Industri 4.0 dan Society 5.0, buku ini mengkaji bagaimana digitalisasi mampu meningkatkan efisiensi perencanaan, pelaksanaan konstruksi, pengelolaan aset, serta pemeliharaan infrastruktur secara cerdas, terintegrasi, dan berkelanjutan. Disusun dengan pendekatan integratif, buku ini memadukan landasan teoritis mengenai sistem informasi, pemodelan digital, sensor cerdas, analisis data, dan konektivitas infrastruktur dengan berbagai praktik penerapannya dalam pembangunan modern. Pembahasan mencakup konsep dasar BIM, teknologi Internet of Things dalam pemantauan infrastruktur, smart construction, manajemen proyek digital, digital twin, analisis data real time, pemeliharaan prediktif, keamanan data, keberlanjutan infrastruktur, hingga tantangan dan peluang implementasi smart infrastructure dalam mendukung pembangunan yang efisien, tangguh, dan berorientasi pada masa depan.