



SISTEM TEKNOLOGI BANGUNAN

L.M.F. Purwanto
Ahmad Saifudin Mutaqi
Ridha Wahyutomo
Kristiana Bebbe
Ary Dwi Jatmiko
Firmansyah Bachtiar
Yanuaris Benny Kristiawan

Sistem Teknologi Bangunan

Disusun oleh:

Prof. Dr.-Ing. L.M.F. Purwanto

Ahmad Saifudin Mutaqi

Ridha Wahyutomo

Kristiana Bebhe

Ary Dwi Jatmiko

Firmansyah Bachtiar

Yanuaris Benny Kristiawan

Penerbit:

Universitas Katolik Soegijapranata

Sistem Teknologi Bangunan
Disusun oleh:
Prof. Dr.-Ing. L.M.F. Purwanto
Ahmad Saifudin Mutaqi
Ridha Wahyutomo
Kristiana Bebhe
Ary Dwi Jatmiko
Firmansyah Bachtiar
Yanuarius Benny Kristiawan

Diterbitkan oleh:
Universitas Katolik Soegijapranata
Anggota APPTI No. 003.072.1.1.2019
Anggota IKAPI No 209/ALB/JTE/2021
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Duwur Semarang 50234
Telpon (024)8441555 ext. 1388
Website: <https://www.unika.ac.id/upt-publishing/>
Email Penerbit: ebook@unika.ac.id

Dikeluarkan oleh:
Program Studi Doktor Arsitektur konsentrasi Arsitektur Digital
Fakultas Arsitektur dan Desain
Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang

ISBN:
Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan cara apapun, termasuk fotocopy,
tanpa ijin tertulis dari penulis.
© Universitas Katolik Soegijapranata 2025

Cetakan ke :	5	4	3	2	1
Tahun	29	28	27	26	25

Dalam perjalanan panjang peradaban manusia, bangunan tidak sekadar menjadi tempat bernaung, melainkan juga cerminan kemajuan teknologi, budaya, dan pemikiran suatu zaman. Sistem teknologi bangunan, sebagai disiplin yang terus berkembang, menuntut pendekatan multidisiplin yang menggabungkan prinsip-prinsip rekayasa, arsitektur, keberlanjutan, dan inovasi digital. Buku ini hadir sebagai upaya untuk merangkum perkembangan mutakhir dalam bidang ini, sekaligus menjadi landasan teoretis dan praktis bagi para akademisi, praktisi, serta mahasiswa yang berkecimpung dalam dunia konstruksi dan desain bangunan.

Perkembangan teknologi yang begitu pesat, terutama dalam bidang material konstruksi, sistem energi, otomatisasi, dan kecerdasan buatan, telah membawa perubahan signifikan dalam cara kita merancang dan membangun. Buku ini tidak hanya membahas aspek teknis semata, tetapi juga mengeksplorasi dampak sosial, ekonomi, dan lingkungan dari penerapan teknologi tersebut. Dalam konteks global yang semakin sadar akan perubahan iklim, pembahasan mengenai bangunan hijau, efisiensi energi, dan penggunaan material ramah lingkungan menjadi bagian yang tidak terpisahkan.

Menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan buku ini tidak akan mungkin terlaksana tanpa dukungan dan kontribusi dari banyak pihak. Ucapan terima kasih yang tulus disampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa Angkatan III Program Studi Doktor Arsitektur Konsentrasi Arsitektur Digital Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, yang telah mendukung dengan mengirimkan naskahnya untuk ikut diterbitkan dalam buku ini.

Harapan terbesar adalah agar buku ini dapat menjadi sumber inspirasi dan referensi yang bermanfaat bagi siapapun yang tertarik untuk mendalami sistem teknologi bangunan. Dalam usaha menyajikan pembahasan yang seimbang antara kedalaman analisis akademik dan kemudahan pemahaman, sehingga dapat diakses oleh berbagai kalangan. Kritik dan saran dari pembaca sangat dinantikan untuk penyempurnaan edisi-edisi berikutnya.

Akhir kata, semoga buku ini dapat memberikan kontribusi berarti bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan praktik di bidang teknologi bangunan. Mari bersama-sama terus berinovasi dan berkarya untuk menciptakan lingkungan binaan yang lebih baik, cerdas, dan berkelanjutan bagi generasi mendatang.

Semarang, April 2025

Prof. Dr.-Ing. L.M.F. Purwanto

DAFTAR ISI

PRAKATA	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	ix

Bab 1 Pendahuluan 1

L.M.F. Purwanto

1.1 Transformasi Teknologi Bangunan	1
1.2 Teknologi Bangunan Modern	2

Bab 2 Evolusi Teknologi Bangunan3

L.M.F. Purwanto

2.1 Sejarah Perkembangan Teknologi Bangunan	3
2.2 Inovasi Konstruksi dari Masa ke Masa.....	8
2.3 Dampak Teknologi pada Desain dan Konstruksi	12

Bab 3 Material dan Teknologi Konstruksi Modern..... 17

L.M.F. Purwanto

3.1 Material Bangunan Tradisional dan Perkembangannya	17
3.2 Material Bangunan Ramah Lingkungan	20
3.3 Inovasi Material Cerdas dalam Konstruksi	22
3.4 Material Komposit dan Aplikasinya.....	24
3.5 Teknologi Pengolahan Material Konstruksi.....	27

Bab 4 Sistem Struktur Bangunan..... 29

L.M.F. Purwanto

4.1. Tipe dan Klasifikasi Sistem Struktur	29
4.2. Prinsip Dasar Perancangan Struktur	31
4.3. Struktur Rangka dan Aplikasinya	33
4.4 Struktur Beton Bertulang dan Prategang	35
4.5. Sistem Struktur yang Adaptif terhadap Bencana Alam.....	38
4.6 Inovasi dalam Struktur Bangunan Modern	40

Bab 5 Teknologi Bangunan Hijau dan Berkelanjutan..... 43

Ahmad Saifudin Mutaqi

5.1 Prinsip Bangunan Berkelanjutan.....	45
5.2 Teknologi Ramah Lingkungan dalam Bangunan.....	51
5.3 Sertifikasi dan Standar Bangunan Hijau	60
5.4 Sertifikasi Bangunan Hijau di Indonesia	69

Bab 6 Sistem Mekanikal, Elektrikal, dan Plumbing (MEP)..... 73

L.M.F. Purwanto; Ridha Wahyutomo; Firmansyah Bachtiar

6.1 Prinsip Dasar Sistem Mekanikal dalam Bangunan	73
6.2 Sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) (<i>Ridha Wahyutomo</i>).....	75
6.3 Sistem Elektrikal dalam Bangunan (<i>L.M.F. Purwanto</i>).....	90
6.4 Sistem Plumbing dan Distribusi Air (<i>L.M.F. Purwanto</i>).....	93
6.5 Sistem Keamanan dan Proteksi Kebakaran (<i>L.M.F. Purwanto</i>).....	95
6.6. Sistem Transportasi Vertikal (Lift dan Eskalator) (<i>Firmansyah Bachtiar</i>).....	97
6.7. Integrasi Teknologi Smart Building dalam MEP (<i>L.M.F. Purwanto</i>)	107
6.8. Sistem Energi Terbarukan dalam Bangunan (<i>L.M.F. Purwanto</i>).....	110
6.9. Pemeliharaan dan Manajemen Sistem MEP (<i>L.M.F. Purwanto</i>).....	113

Bab 7 Teknologi Informasi dalam Desain dan Konstruksi117

Yanuaris Benny Kristiawan; Ary Dwi Jatmiko

- 7.1. Building Information Modeling (BIM) (*Yanuaris Benny Kristiawan*) 118
- 7.2. Teknologi Digital dan Automasi dalam Konstruksi (*Ary Dwi Jatmiko*) 131
- 7.3. Artificial Intelligence (AI) dan Internet of Things (IoT) dalam Konstruksi (*Yanuaris Benny Kristiawan*) 139
- 7.4. Keamanan dan Manajemen Data dalam Konstruksi Digital (*Ary Dwi Jatmiko*) 143

Bab 8 Teknologi Prefabrikasi dan Modularisasi.....149

Kristiana Bebhe

- 8.1 Prinsip-Prinsip Dasar Prefabrikasi 150
- 8.2 Teknologi modular dalam konstruksi modern..... 152
- 8.3 Studi Kasus Proyek Prefabrikasi 155

Bab 9 Manajemen Teknologi Konstruksi161

L.M.F. Purwanto

- 9.1 Sistem Manajemen Konstruksi Berbasis Teknologi 161
- 9.2 Manajemen Risiko dalam Penerapan Teknologi Konstruksi 163
- 9.3 Teknologi untuk Pengawasan dan Pengendalian Proyek 165
- 9.4 Inovasi dalam Pengelolaan Sumber Daya Konstruksi 168

Bab 10 Penutup	177
10.1. Rangkuman dan Kesimpulan	177
10.2. Tantangan dan Peluang Masa Depan.....	179
10.3. Arah Pengembangan Teknologi Bangunan.....	180
Referensi	183
Tentang Penulis	201

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Ziggurat dan Piramid	3
Gambar 2. 2. Bangunan Yunani dan Romawi.....	4
Gambar 2. 3. Katedral Cologne dengan Arsitektur Gotik.....	4
Gambar 2. 4. Home Insurance Building di Chicago	5
Gambar 2. 5. Dimensi BIM.....	6
Gambar 2. 6. Sistem konstruksi modular.....	7
Gambar 2. 7. Smart Building berbasis AI dan IoT	8
Gambar 2. 8. Katedral Notre-Dame di Paris	9
Gambar 2. 9. Iron Bridge di Inggris	10
Gambar 2. 10. Hoover Dam di Amerika Serikat	10
Gambar 2. 11. Robot pemasang batu bata	13
Gambar 2. 12. Beton hijau	15
Gambar 3. 1. Rumah kayu adat Jepang	17
Gambar 3. 2. Batu bata jaman kuno di Mesir	18
Gambar 3. 3. Penggunaan batu alam pada Parthenon di Yunani	18
Gambar 3. 4. Rumah bambu di Jamaika	19
Gambar 3. 5. Mycelium sebagai bahan material ramah lingkungan	21
Gambar 3. 6. FRP (Fiber Reinforced Polymer).....	24
Gambar 3. 7. NFRP - Natural Fiber Reinforced Polymer	25
Gambar 3. 8. Beton daur ulang di Jerman	27
Gambar 4. 1. Cross-Laminated Timber (CLT)	30
Gambar 4. 2. Beban dalam bangunan.....	32
Gambar 4. 3. Struktur Rangka dengan bahan baja	34
Gambar 4. 4. Bangunan tahan gempa	38
Gambar 4. 5. Transformable structures	42
Gambar 5. 1. Sumber Daya Pembangkit Listrik di Indonesia.....	44
Gambar 5. 2. Potensi Energi Surya di Indonesia.....	46
Gambar 5. 3. Memanen Air Hujan dan Manfaatnya	48
Gambar 6. 2. Thermally active building systems (TABS)	75
Gambar 6. 3. Skema inlet dan outlet tata udara.....	78
Gambar 6. 4. Jenis-jenis filter	80
Gambar 6. 5. Aliran turbulen vs laminar di ruang operasi/tindakan.....	81
Gambar 6. 6. Faktor yang mempengaruhi kenyamanan termal dan insulasi pakaian.....	83

Gambar 6. 7. Higrometer klasik.....	86
Gambar 6. 8. Magnehelic Kamar isolasi, Tekanan -5 Pascal	88
Gambar 6. 9. Air lock.....	89
Gambar 6. 10. Evolusi Teknologi Lift.....	99
Gambar 6. 11. Model Lift Penumpang dan Barang	100
Gambar 6. 12. Perbandingan Sistem Lift Hidrolik, Traksi dan Pneumatik ...	101
Gambar 6. 13. Lift Magnetik dengan Pergerakan Vertikal-Horis ontal <i>ontal</i>	103
Gambar 6. 14. Konsep Lift Double-Decker dan TWIN	104
Gambar 6. 15. Penggunaan Augmented Reality dalam Pemeliharaan Lift .	105
Gambar 6. 16. Pola Peletakan Eskalator	106
Gambar 6. 17. Teknologi Eskalator Spiral dan Travelator	107
Gambar 6. 18. Smart Buildings Center	108
Gambar 6. 19. Photovoltaic di rumah Jerman	113
Gambar 6. 20. Digital twin	116
Gambar 7. 1. BIM sebagai Proses dan Alat.....	119
Gambar 7. 2. Pendekatan Geo-BIM dan implementasi konsep smart city...	121
Gambar 7. 3. Skema Level of Detail BIM.....	123
Gambar 7. 4. Dimensi BIM	126
Gambar 7. 5. Tantangan Penggunaan BIM.....	130
Gambar 7. 6. Drafter dengan menggunakan computer.....	131
Gambar 7. 7. Perkembangan Metode Manajemen Informasi dalam Teknologi Konstruksi Digital	133
Gambar 7. 8. Pengelolaan data survey jadi data kontur BIM	133
Gambar 7. 9. Metode Fotogrametri.....	134
Gambar 7. 10. Gambar dalam AutoCAD	135
Gambar 7. 11. Dokumentasi Gambar Kerja ArchiCAD	136
Gambar 7. 12. Virtual Reality dalam pemodelan 3D.....	137
Gambar 7. 13. Contoh Penggunaan Augmented Reality	138
Gambar 7. 14. 3D Printing Bangunan.....	138
Gambar 7. 15. Salah satu referensi arsitektur IOT dan WOT.....	140
Gambar 7. 16. Alur Dokumen / File Proyek	143
Gambar 7. 17. Contoh Penamaan File.....	144
Gambar 7. 18. Pembagian dan Penamaan Folder.....	145
Gambar 7. 19. Contoh Review Terhadap Model	147
Gambar 7. 20. Contoh Catatan Aktifitas Data	148

Gambar 8. 1. Gedung UC Berkeley Collage (1967) salah satu bangunan Prefeb karya Arsitek Ernest J. Kump.....	149
Gambar 8. 2. Proses pembuatan komponen modular prefabrikasi beton..	150
Gambar 8. 3. Proses perakitan produk prefab di Lokasi.....	151
Gambar 8. 4. Contoh ModBox.....	153
Gambar 8. 5. Contoh ModMulti.....	154
Gambar 8. 6. Contoh ModSnap	154
Gambar 8. 7. Proyek Rumah sakit prefab modular di Montreal-Canada	156
Gambar 8. 8. Proses pembangunan RS Pusat Pertamina Jakarta Selatan	157
Gambar 8. 9. Modul ruangan RS Pertamina	157
Gambar 8. 10. Perumahan Dian Sukolilo Regency.....	159
Gambar 8. 11. Perumahan Arsivab V.02	160
Gambar 9. 1. VR digunakan untuk pelatihan pekerja konstruksi	162
Gambar 9. 2. Managemen Risiko di proyek konstruksi.....	164
Gambar 9. 3. Komputasi awan (cloud computing) menjadi tulang punggung dalam sistem pengawasan proyek.....	166
Gambar 9. 4. Augmented Intelligence	168
Gambar 9. 5. Lean Construction.....	169
Gambar 9. 6. Integrated Project Delivery (IPD)	173

Bab 1

Pendahuluan

L.M.F. Purwanto

1.1 Transformasi Teknologi Bangunan

Perkembangan teknologi bangunan telah mengalami transformasi yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir, terutama dengan adanya inovasi dalam penggunaan material dan metode konstruksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Menurut Zhang et al. (2019), pengaruh teknologi pada konstruksi modern semakin nyata dengan munculnya bahan bangunan yang lebih kuat dan ringan, serta teknik konstruksi yang lebih cepat dan hemat biaya. Teknologi ini tidak hanya berdampak pada kecepatan pembangunan, tetapi juga pada kualitas dan keberlanjutan bangunan yang dihasilkan.

Teknologi informasi seperti **Building Information Modeling** (BIM) juga telah mengubah cara perancangan dan pengelolaan proyek konstruksi. BIM memungkinkan perancang dan manajer proyek untuk berkolaborasi lebih efektif melalui model digital yang memuat informasi rinci tentang bangunan, dari tahap desain hingga pemeliharaan. Menurut Eastman et al. (2018), BIM telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi kesalahan dalam proses konstruksi, sehingga semakin banyak digunakan dalam proyek skala besar di seluruh dunia.

Selain itu, isu keberlanjutan dalam konstruksi juga mendorong perkembangan teknologi ramah lingkungan. Penggunaan material bangunan yang memiliki jejak karbon rendah, serta teknologi untuk mengurangi konsumsi energi pada bangunan, menjadi fokus utama dalam industri konstruksi. Khasreen et al. (2020) menekankan pentingnya pengembangan dan penerapan teknologi hijau untuk mencapai target keberlanjutan global, mengingat kontribusi sektor konstruksi terhadap emisi gas rumah kaca.

Namun, adopsi teknologi dalam industri konstruksi tidak lepas dari tantangan, seperti biaya investasi yang tinggi dan kurangnya tenaga kerja yang terampil. Menurut Oesterreich & Teuteberg (2016), meskipun banyak teknologi baru telah tersedia, penerapan di lapangan sering kali terhambat oleh berbagai faktor, termasuk resistensi terhadap perubahan dan kurangnya dukungan dari pemerintah dan sektor swasta. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan lebih lanjut sangat penting untuk memastikan bahwa

teknologi konstruksi dapat diterapkan secara efektif dan berkelanjutan di masa depan.

1.2 Teknologi Bangunan Modern

Pentingnya pemahaman yang mendalam mengenai perkembangan dan penerapan teknologi dalam sistem bangunan modern, maka buku ini dapat menjadi referensi yang komprehensif bagi pembaca di bidang arsitektur khususnya dalam memahami bagaimana teknologi terbaru dapat diterapkan dalam proses perancangan, konstruksi, dan pemeliharaan bangunan. Melalui penjelasan tentang berbagai aspek teknologi bangunan, diharapkan pembaca dapat mengembangkan wawasan yang lebih luas mengenai inovasi yang relevan di bidang konstruksi.

Ruang lingkup buku ini mencakup pembahasan tentang berbagai teknologi yang diterapkan dalam konstruksi bangunan, mulai dari material hingga sistem mekanikal, elektrik, dan plumbing (MEP). Setiap bab akan membahas aspek yang berbeda dari sistem teknologi bangunan, termasuk teknologi ramah lingkungan, inovasi dalam material konstruksi, serta teknologi informasi seperti Building Information Modeling (BIM) dan Internet of Things (IoT) yang semakin banyak digunakan di industri konstruksi. Melalui pendekatan ini, pembaca akan memahami tidak hanya bagaimana teknologi ini berfungsi, tetapi juga bagaimana mereka dapat diintegrasikan secara efektif ke dalam desain dan konstruksi bangunan.

Selain itu, buku ini juga bertujuan untuk mengulas berbagai tantangan dan peluang yang dihadapi dalam penerapan teknologi bangunan, terutama dalam konteks keberlanjutan dan efisiensi. Industri konstruksi saat ini berada di persimpangan antara kebutuhan untuk meningkatkan produktivitas dan tekanan untuk mengurangi dampak lingkungan. Oleh karena itu, pembahasan mengenai teknologi hijau dan sistem bangunan yang lebih efisien akan menjadi bagian penting dalam ruang lingkup buku ini. Pembaca diharapkan dapat memahami peran penting teknologi dalam mewujudkan bangunan yang lebih berkelanjutan di masa depan.

Ruang lingkup juga mencakup diskusi mendalam mengenai sistem struktur bangunan dan bagaimana teknologi inovatif, seperti sistem prefabrikasi dan struktur modular, dapat meningkatkan efisiensi konstruksi. Bab-bab dalam buku ini akan memberikan studi kasus yang relevan untuk menggambarkan penerapan teknologi di berbagai proyek arsitektur modern. Dengan demikian, Pembaca dapat mengaplikasikan pengetahuan ini dalam konteks akademik maupun profesional mereka di masa depan.

Bab 2

Evolusi Teknologi Bangunan

L.M.F. Purwanto

2.1 Sejarah Perkembangan Teknologi Bangunan

Perkembangan teknologi bangunan telah melalui berbagai tahapan, dimulai dari penggunaan bahan-bahan sederhana hingga adopsi teknologi mutakhir yang memungkinkan pembangunan gedung-gedung canggih. Pada awal peradaban manusia, bangunan pertama kali dibuat dari bahan alami yang tersedia di sekitar, seperti tanah liat, batu, dan kayu. Menurut Fitchen (1986), bangunan-bangunan kuno, seperti piramida Mesir dan ziggurat di Mesopotamia (lihat gambar 2.1), menunjukkan kemampuan manusia dalam memanfaatkan material lokal untuk menciptakan struktur yang tahan lama dan monumental. Struktur ini menjadi simbol kekuatan teknologi pada masanya, meskipun dengan metode konstruksi yang sangat terbatas.



Gambar 2. 1. Ziggurat dan Piramid

Seiring dengan berjalannya waktu, munculnya peradaban Yunani dan Romawi (lihat gambar 2.2) membawa revolusi dalam teknik konstruksi dengan penggunaan material yang lebih maju seperti beton dan batu bata. Teknologi pembuatan beton, yang dikembangkan oleh bangsa Romawi, memungkinkan terciptanya struktur-struktur monumental seperti Pantheon di Roma yang masih berdiri kokoh hingga saat ini (Lancaster, 2005). Teknik ini tidak hanya memungkinkan bangunan menjadi lebih besar, tetapi juga memberikan fleksibilitas dalam desain arsitektur yang lebih kompleks.



Gambar 2. 2. Bangunan Yunani dan Romawi

Pada abad pertengahan, perkembangan teknologi bangunan terlihat dari konstruksi katedral dan kastil di Eropa yang dibangun dengan teknik arsitektur gotik (lihat gambar 2.3). Struktur-struktur ini menunjukkan kemajuan dalam penggunaan elemen-elemen struktural seperti lengkung runcing, penopang terbang, dan jendela kaca patri yang besar. Seperti yang dijelaskan oleh Gimpel (1992), penggunaan teknik-teknik ini memungkinkan penciptaan bangunan yang lebih tinggi dan lebih tahan terhadap beban angin serta beratnya sendiri. Teknologi bangunan pada era ini juga mulai mengintegrasikan elemen artistik dan simbolik yang lebih menonjol.



Gambar 2. 3. Katedral Cologne dengan Arsitektur Gotik

Revolusi industri pada abad ke-18 dan 19 membawa perubahan besar dalam teknologi bangunan. Penemuan mesin uap dan teknik produksi massal mempercepat proses pembangunan dan memungkinkan penggunaan material baru seperti besi dan baja. Sebagaimana diuraikan oleh Addis

(2007), teknologi baja memungkinkan pembangunan gedung pencakar langit yang lebih tinggi dan lebih kuat, serta jembatan dengan bentang yang lebih panjang. Gedung pencakar langit pertama, Home Insurance Building di Chicago (lihat gambar 2.4), yang dibangun pada tahun 1885, menandai dimulainya era baru dalam teknologi bangunan dengan penggunaan kerangka baja sebagai elemen struktural utama.



Gambar 2. 4. Home Insurance Building di Chicago

Pada awal abad ke-20, teknologi beton bertulang mulai banyak digunakan dalam konstruksi modern. Menurut Schlaich et al. (1996), beton bertulang memberikan kekuatan tambahan dan fleksibilitas dalam desain bangunan. Hal ini memungkinkan terciptanya struktur-struktur besar seperti stadion, bendungan, dan gedung pencakar langit modern. Selain itu, penggunaan teknologi prategang pada beton juga meningkatkan kekuatan material dan memungkinkan pembangunan jembatan serta struktur besar lainnya dengan bentang yang lebih panjang dan lebih ringan.

Perkembangan teknologi informasi dan komputer pada akhir abad ke-20 membawa revolusi digital dalam konstruksi. Penggunaan perangkat lunak perancangan seperti CAD (Computer-Aided Design) dan BIM (Building Information Modeling) mempermudah perancangan bangunan yang lebih kompleks dan akurat. Menurut Eastman et al. (2011), BIM memungkinkan kolaborasi yang lebih baik antara arsitek, insinyur, dan kontraktor melalui model digital yang mencakup semua informasi penting tentang bangunan.

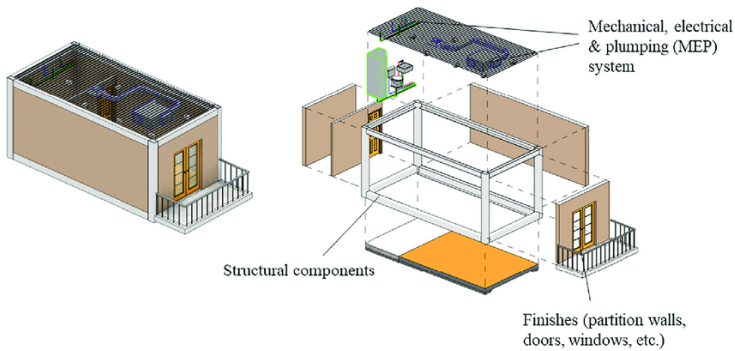
Teknologi ini mempercepat proses desain, mengurangi kesalahan, dan meningkatkan efisiensi dalam konstruksi (lihat gambar 2.5).



Gambar 2. 5. Dimensi BIM

Pada masa yang lebih baru, inovasi dalam teknologi konstruksi berfokus pada keberlanjutan dan efisiensi energi. Material bangunan ramah lingkungan seperti beton hijau dan teknologi bangunan pasif mulai banyak digunakan untuk mengurangi dampak lingkungan. Sebagai contoh, menurut Khatib (2009), beton hijau yang menggunakan bahan daur ulang telah berhasil mengurangi jejak karbon dari proses konstruksi. Selain itu, teknologi bangunan pasif, yang memanfaatkan desain untuk mengurangi kebutuhan energi tanpa harus bergantung pada sistem mekanis, telah menjadi salah satu fokus utama dalam arsitektur modern.

Sistem konstruksi modular dan prefabrikasi (lihat gambar 2.6) juga semakin populer dalam beberapa dekade terakhir. Metode ini memungkinkan pembangunan yang lebih cepat dan efisien, karena komponen bangunan diproduksi di pabrik dan kemudian dirakit di lokasi. Gibb (1999) menjelaskan bahwa teknologi prefabrikasi mengurangi limbah, waktu konstruksi, dan biaya tenaga kerja, menjadikannya pilihan yang semakin menarik dalam proyek-proyek besar seperti perumahan massal dan fasilitas komersial.



Gambar 2. 6. Sistem konstruksi modular

Tidak hanya pada aspek material dan teknik, teknologi bangunan juga berkembang dari segi pengelolaan dan pemantauan proyek. Penggunaan teknologi drone dan sensor cerdas untuk memantau kemajuan proyek secara real-time memberikan visibilitas yang lebih baik dan memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat. Menurut Golparvar-Fard et al. (2015), teknologi ini membantu mengurangi kesalahan manusia dan memperbaiki efisiensi operasional di lapangan.

Di sisi lain, era digital membawa inovasi dalam bentuk robotik dan otomasi dalam konstruksi. Robot-robot konstruksi yang mampu melakukan tugas-tugas berat seperti pengelasan dan pengecoran beton telah mulai digunakan di beberapa proyek besar. Bock & Linner (2015) menyebutkan bahwa teknologi ini tidak hanya mengurangi biaya tenaga kerja, tetapi juga meningkatkan akurasi dan kualitas pekerjaan, terutama dalam proyek-proyek berisiko tinggi seperti pembangunan gedung pencakar langit.

Perkembangan teknologi bangunan juga semakin mengintegrasikan penggunaan energi terbarukan dalam bangunan, seperti panel surya, turbin angin, dan sistem pemanas berbasis geothermal. Penggunaan teknologi ini memungkinkan bangunan menghasilkan energi sendiri dan mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik tradisional. Halliday (2008) menekankan bahwa teknologi ini adalah bagian dari tren menuju arsitektur berkelanjutan yang mengedepankan efisiensi energi dan pelestarian lingkungan.

Ke depan, perkembangan teknologi seperti AI (Artificial Intelligence) dan IoT (Internet of Things) diprediksi akan semakin memengaruhi cara bangunan dirancang, dibangun, dan dikelola. Teknologi AI dapat digunakan untuk memprediksi masalah konstruksi sebelum terjadi, sementara IoT memungkinkan pemantauan bangunan secara terus-menerus untuk mendeteksi kerusakan atau kebutuhan pemeliharaan. Menurut Brous et al.

(2018), integrasi teknologi ini ke dalam bangunan cerdas akan membuat bangunan lebih efisien, aman, dan berkelanjutan di masa mendatang (lihat gambar 2.7).

Keseluruhan evolusi teknologi bangunan menunjukkan bagaimana inovasi terus mendorong batasan dalam perancangan dan konstruksi. Mulai dari penggunaan material sederhana hingga penerapan teknologi digital yang canggih, teknologi telah memungkinkan manusia untuk menciptakan bangunan yang lebih kuat, lebih tinggi, dan lebih efisien. Dengan tantangan global seperti perubahan iklim dan kebutuhan akan bangunan yang lebih berkelanjutan, teknologi bangunan akan terus berkembang untuk menjawab tuntutan zaman.



Gambar 2. 7. Smart Building berbasis AI dan IoT

2.2 Inovasi Konstruksi dari Masa ke Masa

Inovasi dalam konstruksi telah terjadi secara bertahap dari zaman kuno hingga era modern, dengan setiap periode membawa terobosan yang signifikan. Pada zaman kuno, inovasi konstruksi ditandai oleh penggunaan bahan dan teknik sederhana tetapi efektif, seperti penggunaan bata lumpur yang dikeringkan oleh sinar matahari di Mesopotamia, serta teknik penggalian dan penumpukan batu besar yang digunakan dalam pembangunan piramida Mesir (Fleming, 2010). Struktur ini memperlihatkan kemampuan manusia untuk bekerja dengan sumber daya alam lokal dan menciptakan bangunan yang bertahan selama ribuan tahun.

Pada abad pertengahan, inovasi lebih lanjut terjadi dengan pengembangan arsitektur gotik di Eropa, di mana penggunaan lengkung runcing dan penopang terbang memungkinkan konstruksi bangunan yang lebih tinggi dan

lebih terbuka, seperti Katedral Notre-Dame di Paris (lihat gambar 2.8). Sebagaimana dijelaskan oleh Murray (2004), inovasi ini memungkinkan bangunan untuk menahan beban vertikal dan lateral yang lebih besar tanpa perlu tembok tebal, memberikan fleksibilitas yang lebih besar dalam desain interior dan pencahayaan alami.



Gambar 2. 8. Katedral Notre-Dame di Paris

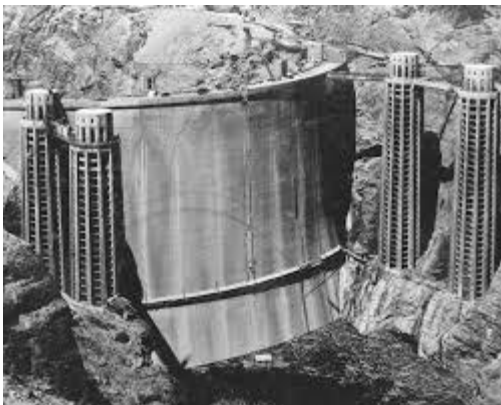
Masuknya era Renaissance pada abad ke-15 di Eropa membawa inovasi besar dalam metode konstruksi dengan kembalinya ke prinsip-prinsip arsitektur Romawi dan Yunani klasik. Teknologi baru dalam bidang teknik seperti penggunaan scaffolding (perancah) modern untuk bangunan-bangunan tinggi mulai diperkenalkan (Kostof, 1995). Ini memudahkan pekerja untuk mengakses area yang sebelumnya sulit dijangkau dan mempercepat proses pembangunan.

Revolusi industri pada abad ke-18 hingga 19 menandai titik balik penting dalam inovasi konstruksi, ketika mesin uap dan bahan baru seperti besi dan baja mulai digunakan secara luas. Inovasi ini memungkinkan terciptanya struktur yang lebih besar dan lebih tinggi, seperti jembatan besi pertama di dunia, Iron Bridge di Inggris (lihat gambar 2.9), yang selesai dibangun pada tahun 1779 (Arnold, 1999). Penggunaan kerangka baja dan teknik pengelasan modern juga memungkinkan dibangunnya gedung pencakar langit pertama di dunia, Home Insurance Building di Chicago pada tahun 1885.



Gambar 2. 9. Iron Bridge di Inggris

Pada abad ke-20, beton bertulang menjadi salah satu inovasi konstruksi paling penting. Penggunaan beton bertulang memungkinkan terciptanya struktur yang lebih fleksibel, tahan lama, dan efisien secara biaya. Pengaruh besar beton dalam industri konstruksi dapat dilihat dalam berbagai proyek monumental, seperti pembangunan Hoover Dam (lihat gambar 2.10) pada tahun 1936 di Amerika Serikat (McCulloch, 2007). Beton bertulang juga memungkinkan inovasi arsitektur seperti bangunan dengan bentang besar tanpa penopang tambahan, yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan.



Gambar 2. 10. Hoover Dam di Amerika Serikat

Selain itu, teknologi prategang mulai digunakan secara luas pada paruh kedua abad ke-20. Teknologi ini memperkuat beton dengan memberikan tegangan pada baja sebelum pengecoran, sehingga meningkatkan kapasitas angkut beban dari struktur yang dihasilkan. Menurut Mehta dan Monteiro (2006), teknologi beton prategang telah memungkinkan konstruksi jembatan

dan gedung tinggi dengan bentang yang lebih panjang dan lebih ringan dibandingkan metode tradisional.

Pada era modern, teknologi digital seperti Building Information Modeling (BIM) telah membawa inovasi revolusioner dalam perencanaan dan manajemen proyek konstruksi. BIM memungkinkan kolaborasi yang lebih efisien antara berbagai pemangku kepentingan dalam proyek, serta pemodelan bangunan yang lebih akurat (Azhar, 2011). BIM juga meningkatkan manajemen siklus hidup bangunan, dari perancangan hingga pemeliharaan, sehingga mengurangi risiko kesalahan dan biaya perbaikan yang tinggi.

Inovasi lain yang muncul dalam beberapa dekade terakhir adalah teknologi konstruksi prefabrikasi dan modular. Dengan metode ini, komponen bangunan diproduksi di luar lokasi konstruksi dan kemudian dirakit di lapangan. Teknologi ini mempercepat proses pembangunan dan mengurangi limbah konstruksi (Gibb & Isack, 2003). Contoh aplikasi teknologi prefabrikasi yang berhasil adalah pembangunan rumah-rumah modular yang digunakan untuk pemukiman cepat pasca bencana.

Selain itu, dalam konteks keberlanjutan, inovasi penting lainnya adalah pengembangan material bangunan ramah lingkungan, seperti beton hijau, yang menggunakan bahan daur ulang dan menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah. Penggunaan teknologi ini telah membantu mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi, yang dikenal sebagai salah satu penyumbang terbesar emisi karbon global (Li, 2011). Inovasi material hijau ini memberikan solusi yang lebih berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan pembangunan di seluruh dunia.

Terakhir, revolusi digital dalam dekade terakhir telah mendorong penerapan kecerdasan buatan (AI) dan Internet of Things (IoT) dalam konstruksi. Teknologi ini memungkinkan pemantauan proyek secara real-time, optimisasi sumber daya, dan pengelolaan risiko yang lebih efektif. Menurut Bock (2015), penggunaan robotika dalam konstruksi juga semakin marak, dengan robot-robot yang dapat melakukan tugas-tugas yang rumit seperti pengecoran beton, pemasangan bata, hingga pengelasan dengan presisi yang lebih tinggi dibandingkan manusia.

2.3 Dampak Teknologi pada Desain dan Konstruksi

Teknologi telah membawa dampak signifikan pada berbagai aspek desain dan konstruksi, mulai dari perubahan metode perancangan hingga cara bangunan dibangun. Salah satu dampak paling terlihat dari teknologi pada desain adalah penggunaan perangkat lunak perancangan berbasis komputer seperti CAD (Computer-Aided Design). Perangkat lunak ini memungkinkan arsitek untuk membuat model bangunan yang lebih rinci dan presisi dibandingkan metode manual tradisional (Eastman et al., 2011). CAD juga memungkinkan perubahan cepat dan otomatis pada desain, sehingga menghemat waktu dan tenaga dalam proses perancangan.

Selain itu, teknologi Building Information Modeling (BIM) telah mengubah cara kolaborasi dalam proyek konstruksi dilakukan. BIM memungkinkan semua pemangku kepentingan, seperti arsitek, insinyur, dan kontraktor, bekerja pada satu model digital yang menyimpan semua informasi tentang bangunan. Ini mengurangi risiko kesalahan dan meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan proyek (Azhar, 2011). Dengan BIM, desain bangunan dapat dimodifikasi secara real-time, dan semua perubahan langsung tercermin dalam dokumen proyek lainnya.

Teknologi juga berpengaruh pada pendekatan desain yang lebih responsif terhadap isu keberlanjutan dan efisiensi energi. Dalam konteks ini, teknologi bangunan pasif, yang memanfaatkan desain untuk mengurangi konsumsi energi, semakin berkembang. Bangunan dengan desain pasif memanfaatkan orientasi, ventilasi alami, dan material yang dapat menyerap dan memantulkan panas untuk mengurangi kebutuhan energi tanpa harus menggunakan sistem mekanis tambahan (Wright, 2008). Teknologi ini mempengaruhi bagaimana arsitek merancang bangunan agar lebih ramah lingkungan.

Selain itu, teknologi material juga telah memungkinkan perancangan bangunan dengan bentuk dan struktur yang lebih kompleks. Bahan canggih seperti beton bertulang, baja prategang, dan material komposit memberikan fleksibilitas lebih besar dalam desain. Bangunan-bangunan dengan desain organik, yang sebelumnya sulit diwujudkan karena keterbatasan material, kini dapat dibangun dengan teknologi material modern (Mehta & Monteiro, 2006). Perkembangan ini mendorong batasan kreativitas dalam arsitektur dan memungkinkan terciptanya gedung-gedung ikonik dengan bentuk yang tidak konvensional.

Teknologi juga memperkenalkan konsep prefabrikasi dan modularisasi yang mempengaruhi desain dan konstruksi secara signifikan. Dengan menggunakan komponen prefabrikasi, arsitek dapat merancang bangunan yang dapat dirakit dengan cepat di lokasi. Metode ini tidak hanya mengurangi waktu konstruksi, tetapi juga mengurangi biaya tenaga kerja dan limbah material (Gibb & Isack, 2003). Prefabrikasi telah memungkinkan pembangunan gedung-gedung besar, termasuk rumah sakit dan perumahan massal, dalam waktu yang jauh lebih singkat.

Di sisi lain, penggunaan teknologi robotika dalam konstruksi juga mulai mengubah cara bangunan didirikan. Robot konstruksi, seperti robot pemasang batu bata (lihat gambar 2.11) dan robot pengecor beton, mampu melakukan pekerjaan dengan presisi tinggi dan dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan pekerja manusia (Bock, 2015). Teknologi ini mempengaruhi desain karena arsitek dan insinyur harus memperhitungkan bagaimana robot akan mengerjakan elemen-elemen tertentu dari bangunan.



Gambar 2. 11. Robot pemasang batu bata

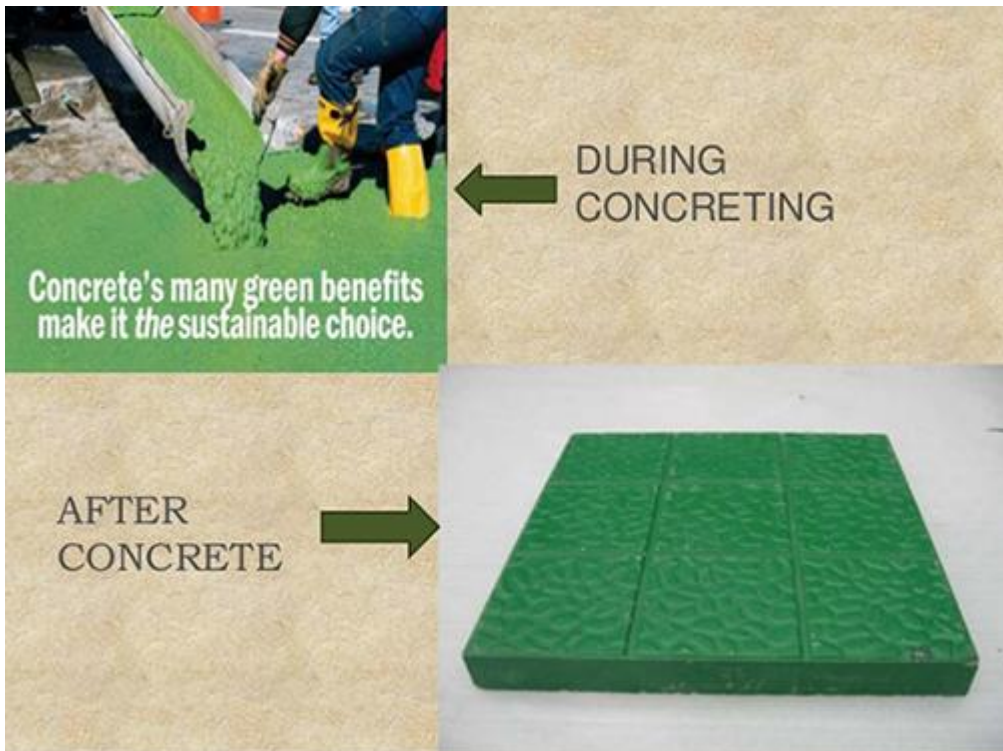
Teknologi kecerdasan buatan (AI) juga berdampak pada desain dan konstruksi. AI memungkinkan perancangan yang lebih efisien dengan menggunakan algoritma untuk mengoptimalkan tata letak, struktur, dan penggunaan material dalam bangunan. Menurut doshi et al. (2020), AI dapat menganalisis data dari proyek sebelumnya untuk memprediksi potensi masalah dan menawarkan solusi yang lebih efisien selama tahap desain. Ini tidak hanya meningkatkan efektivitas perancangan tetapi juga mengurangi biaya proyek secara keseluruhan.

Penggunaan Internet of Things (IoT) dalam bangunan pintar juga membawa perubahan dalam desain dan konstruksi. IoT memungkinkan bangunan terhubung dengan sistem yang dapat memantau dan mengontrol berbagai elemen, seperti suhu, pencahayaan, dan keamanan, secara otomatis (Kyriazis et al., 2017). Teknologi ini mempengaruhi desain bangunan yang harus lebih fleksibel dan adaptif terhadap kebutuhan pengguna yang dinamis. Desain interior, misalnya, harus mempertimbangkan penempatan sensor dan perangkat IoT lainnya agar tidak mengganggu estetika dan fungsi ruangan.

Teknologi pencetakan 3D adalah inovasi lainnya yang membawa perubahan besar dalam konstruksi. Pencetakan 3D memungkinkan bangunan atau komponen bangunan dicetak langsung dari model digital, mengurangi waktu dan biaya konstruksi secara signifikan (Bos et al., 2016). Pencetakan 3D juga mempengaruhi desain dengan memungkinkan arsitek untuk menciptakan bentuk-bentuk yang sebelumnya sulit atau tidak mungkin dilakukan dengan teknik konstruksi konvensional.

Dampak teknologi terhadap desain dan konstruksi juga terlihat dari segi keselamatan kerja. Dengan adanya teknologi drone, misalnya, pemantauan proyek dapat dilakukan dengan lebih aman dan efisien (Golparvar-Fard et al., 2015). Drone digunakan untuk memantau area yang sulit dijangkau, seperti atap atau bangunan tinggi, tanpa menempatkan pekerja dalam bahaya. Teknologi ini juga membantu mengurangi risiko kecelakaan di lokasi konstruksi.

Dari perspektif keberlanjutan, teknologi juga mendorong pengembangan bangunan ramah lingkungan melalui penggunaan material daur ulang dan sistem energi terbarukan. Material seperti beton hijau (gambar 2.12) yang dibuat dengan bahan daur ulang, mengurangi jejak karbon dari proses konstruksi (Li, 2011). Desain bangunan yang mengintegrasikan panel surya dan sistem penyimpanan energi terbarukan juga semakin umum, memungkinkan bangunan untuk menghasilkan energinya sendiri dan mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik konvensional.



Gambar 2. 12. Beton hijau

Teknologi juga mempengaruhi pendekatan terhadap pengelolaan limbah dalam konstruksi. Dengan adanya teknologi daur ulang di lokasi proyek, limbah konstruksi seperti beton dan baja dapat diolah kembali untuk digunakan dalam proyek yang sama (Kumar & Male, 2014). Ini tidak hanya mengurangi biaya material tetapi juga mendukung praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan.

Dampak dari semua teknologi ini tidak hanya pada proses konstruksi tetapi juga pada keberlanjutan operasional bangunan. Bangunan pintar yang terhubung dengan IoT, misalnya, dapat memantau penggunaan energi secara real-time dan menyesuaikan operasi bangunan untuk menghemat energi (Gubbi et al., 2013). Teknologi ini juga memungkinkan pemeliharaan prediktif, di mana sistem otomatis dapat mendeteksi masalah sebelum terjadi kerusakan besar, sehingga mengurangi biaya perbaikan dan memperpanjang umur bangunan.

Dalam skala yang lebih besar, teknologi juga telah memungkinkan terciptanya kota pintar, di mana bangunan, transportasi, dan infrastruktur lainnya terhubung dalam satu sistem yang saling berkomunikasi. Menurut

Bibri (2018), kota pintar menggunakan data dari sensor di seluruh kota untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya, meningkatkan efisiensi transportasi, dan meningkatkan kualitas hidup bagi warga. Desain dan konstruksi bangunan di kota pintar harus mempertimbangkan bagaimana bangunan tersebut akan terintegrasi dengan infrastruktur kota yang lebih luas.

Secara keseluruhan, teknologi telah memberikan dampak yang signifikan pada efisiensi, keberlanjutan, dan keselamatan dalam konstruksi. Teknologi telah mengubah cara bangunan dirancang, dibangun, dan dioperasikan. Arsitek dan insinyur kini harus memikirkan tidak hanya bentuk dan fungsi bangunan tetapi juga bagaimana teknologi dapat diintegrasikan untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi limbah, dan memaksimalkan kenyamanan pengguna.

Ke depan, inovasi teknologi seperti AI, IoT, dan robotika diperkirakan akan terus mendominasi industri konstruksi. Seiring dengan meningkatnya permintaan akan bangunan yang lebih cerdas, lebih aman, dan lebih ramah lingkungan, peran teknologi dalam desain dan konstruksi akan semakin penting. Arsitek dan insinyur harus terus beradaptasi dengan perubahan ini untuk memastikan bahwa desain bangunan masa depan tidak hanya estetis tetapi juga efisien dan berkelanjutan.

Bab 3

Material dan Teknologi Konstruksi Modern

L.M.F. Purwanto

3.1 Material Bangunan Tradisional dan Perkembangannya

Material bangunan tradisional telah menjadi fondasi perkembangan arsitektur selama ribuan tahun. Sejak zaman prasejarah hingga era modern, manusia terus mengembangkan bahan konstruksi untuk memenuhi kebutuhan fungsional, estetika, dan keberlanjutan. Material tradisional seperti kayu, batu bata, batu alam, dan tanah liat masih digunakan hingga kini, tetapi telah mengalami berbagai inovasi untuk meningkatkan kinerja, daya tahan, dan efisiensi energi. Perkembangan material konstruksi tidak hanya dipengaruhi oleh kemajuan teknologi tetapi juga oleh faktor budaya, lingkungan, dan ekonomi (Fernandes et al., 2019).

A. Material Tradisional dan Aplikasinya

1. Kayu

Gambar 3. 1. Rumah kayu adat Jepang



Kayu merupakan salah satu material konstruksi tertua yang masih digunakan secara luas. Selain mudah dibentuk, kayu memiliki kekuatan struktural yang baik dan sifat isolasi termal alami. Dalam arsitektur tradisional, kayu digunakan untuk struktur atap, dinding, dan lantai, seperti pada rumah-rumah adat di Jepang (minka) dan Indonesia (rumah panggung). Namun, kayu memiliki kelemahan seperti kerentanan terhadap api, rayap, dan kelembapan. Perkembangan teknologi pengawetan kayu, seperti penggunaan bahan kimia tahan api dan pelapisan dengan resin polimer, telah meningkatkan ketahanannya (Hill, 2020).

2. Batu Bata dan Tanah Liat

Batu bata yang terbuat dari tanah liat telah digunakan sejak peradaban Mesopotamia dan Mesir Kuno. Material ini tahan api, memiliki massa termal yang baik, dan relatif mudah diproduksi. Di Eropa, batu bata menjadi bahan utama dalam konstruksi bangunan abad pertengahan. Perkembangan terbaru meliputi batu bata berlubang (*hollow bricks*) yang lebih ringan dan memiliki insulasi termal lebih baik. Selain itu, penelitian tentang batu bata terstabilisasi (*stabilized earth blocks*) dengan tambahan semen atau kapur telah meningkatkan kekuatannya tanpa mengurangi sifat ramah lingkungan (Muntohar et al., 2018).



Gambar 3. 2. Batu bata jaman kuno di Mesir

3. Batu Alam

Batu alam seperti granit, marmer, dan batu kapur telah digunakan dalam konstruksi monumen dan bangunan megah, seperti Parthenon di Yunani dan Taj Mahal di India. Keunggulan batu alam adalah daya tahan dan estetikanya yang tinggi. Namun, material ini berat dan memerlukan tenaga kerja ahli untuk pemasangannya. Perkembangan teknologi pemotongan batu dengan laser dan CNC (*Computer Numerical Control*) telah mempermudah produksi elemen batu dengan presisi tinggi (Awan et al., 2021).



Gambar 3. 3. Penggunaan batu alam pada Parthenon di Yunani

4. Bambu

Bambu adalah material tradisional yang banyak digunakan di Asia dan Amerika Latin. Kekuatan tariknya yang tinggi membuatnya cocok untuk struktur ringan. Namun, bambu alami rentan terhadap serangan jamur dan serangga. Inovasi seperti laminasi bambu (bamboo laminated timber) dan perlakuan kimia telah meningkatkan ketahanannya, sehingga bambu kini digunakan dalam konstruksi modern sebagai alternatif kayu (Sharma et al., 2020).



Gambar 3. 4. Rumah bambu di Jamaika

B. Tantangan dan Masa Depan Material Tradisional

Meskipun material tradisional telah banyak beradaptasi dengan teknologi modern, beberapa tantangan tetap ada, seperti:

- **Regulasi dan Standarisasi:** Banyak material alami belum memiliki standar konstruksi yang jelas, sehingga penggunaannya terbatas.
- **Biaya Produksi:** Beberapa material rekayasa, seperti CLT dan bambu laminasi, masih lebih mahal dibandingkan beton konvensional.
- **Persepsi Publik:** Material tradisional sering dianggap kurang "modern" dibanding baja atau kaca, sehingga perlu edukasi lebih lanjut.

Ke depan, penelitian tentang material berbasis bio-komposit dan daur ulang akan semakin penting untuk menciptakan konstruksi yang berkelanjutan. Kombinasi antara kearifan lokal dan inovasi teknologi akan menjadi kunci pengembangan material bangunan di masa depan (Pacheco-Torgal et al., 2023).

3.2 Material Bangunan Ramah Lingkungan

Dalam beberapa dekade terakhir, isu lingkungan dan perubahan iklim telah mendorong industri konstruksi untuk mengadopsi material yang lebih berkelanjutan. Material bangunan ramah lingkungan (green building materials) dirancang untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, baik dalam proses produksi, penerapan, maupun daur ulang. Material ini tidak hanya menekan emisi karbon tetapi juga meningkatkan efisiensi energi, mengurangi limbah, dan mendukung kesehatan penghuni. Konsep bangunan hijau (green building) semakin populer, dengan sertifikasi seperti LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) dan BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) menjadi standar global.

Material ramah lingkungan dapat dikategorikan berdasarkan sumbernya, yaitu material alami, material daur ulang, dan material inovatif berbasis teknologi rendah karbon. Penggunaan material ini tidak hanya terbatas pada struktur bangunan tetapi juga meliputi insulasi, finishing, dan sistem energi terbarukan. Salah satu contoh material alami yang telah digunakan sejak lama adalah bambu, yang memiliki kekuatan tarik tinggi dan pertumbuhan cepat, menjadikannya alternatif berkelanjutan untuk kayu. Selain itu, material daur ulang seperti beton dari limbah konstruksi dan plastik daur ulang semakin banyak digunakan dalam proyek-proyek modern.

Salah satu tren terkini dalam material ramah lingkungan adalah penggunaan beton geopolimer. Berbeda dengan beton konvensional yang memerlukan semen Portland—penghasil emisi CO₂ signifikan—beton geopolimer menggunakan bahan seperti abu terbang (fly ash) atau slag sebagai pengganti semen. Material ini tidak hanya mengurangi emisi karbon hingga 80% tetapi juga memiliki ketahanan kimia dan panas yang lebih baik. Selain itu, material komposit berbasis serat alami, seperti rami, flax, dan sabut kelapa, mulai digunakan sebagai penguat dalam panel dinding dan lantai. Serat alami ini ringan, mudah terurai, dan memiliki sifat insulasi yang baik.

Insulasi termal juga menjadi aspek penting dalam bangunan ramah lingkungan. Material seperti wol domba, selulosa daur ulang, dan aerogel menawarkan performa insulasi yang unggul dibandingkan bahan sintesis tradisional. Wol domba, misalnya, bersifat alami, dapat diperbarui, dan memiliki kemampuan menyerap kelembapan tanpa kehilangan sifat insulasinya. Sementara itu, aerogel—meskipun masih relatif mahal—merupakan material insulasi paling efisien saat ini, dengan konduktivitas

termal sangat rendah sehingga dapat mengurangi kebutuhan energi pemanas dan pendingin secara signifikan.

Selain material struktural dan insulasi, finishing ramah lingkungan juga berkembang pesat. Cat rendah VOC (Volatile Organic Compounds) menjadi pilihan karena tidak melepaskan zat berbahaya ke udara dalam ruangan. Lantai dari bahan alami seperti linoleum (terbuat dari minyak biji rami dan serat kayu) atau karet daur ulang semakin populer karena tahan lama dan bebas toksin. Bahkan, material seperti mycelium (jaringan akar jamur) kini digunakan sebagai alternatif busa sintetis untuk panel akustik dan furnitur, karena dapat tumbuh dalam bentuk yang diinginkan dan sepenuhnya terurai setelah tidak digunakan.



Gambar 3. 5. Mycelium sebagai bahan material ramah lingkungan

Teknologi konstruksi juga berperan penting dalam mendukung penggunaan material ramah lingkungan. Metode prefabrikasi dan modular construction memungkinkan pengurangan limbah di lokasi konstruksi, sementara 3D printing menggunakan material daur ulang atau bio-based menawarkan presisi tinggi dengan pemborosan minimal. Contohnya, perusahaan seperti ICON telah mengembangkan teknologi pencetakan 3D untuk membangun rumah menggunakan campuran tanah lokal dan semen rendah karbon, yang tidak hanya murah tetapi juga tahan terhadap cuaca ekstrem.

Tantangan utama dalam adopsi material ramah lingkungan adalah biaya awal yang lebih tinggi dan kurangnya regulasi yang mendukung. Namun, dalam jangka panjang, material ini terbukti lebih hemat energi dan mengurangi biaya pemeliharaan. Selain itu, kesadaran konsumen dan insentif pemerintah mulai mendorong pasar untuk beralih ke solusi yang lebih berkelanjutan. Di beberapa negara, kebijakan seperti pajak karbon dan subsidi untuk bangunan hijau telah mempercepat penggunaan material ramah lingkungan.

Masa depan material konstruksi berkelanjutan akan semakin dipengaruhi oleh inovasi dalam bioteknologi dan ekonomi sirkular. Material seperti beton yang dapat menyembuhkan sendiri (*self-healing concrete*) menggunakan bakteri atau polimer khusus sedang dikembangkan untuk memperpanjang umur bangunan. Sementara itu, konsep "urban mining"—mendaur ulang material dari bangunan yang dibongkar—menjadi solusi untuk mengurangi eksploitasi sumber daya alam. Dengan kemajuan ini, industri konstruksi dapat mencapai target net-zero emission dan menciptakan lingkungan binaan yang lebih sehat untuk generasi mendatang.

3.3 Inovasi Material Cerdas dalam Konstruksi

Material cerdas (*smart materials*) telah membuka babak baru dalam dunia konstruksi dengan kemampuan adaptif dan responsif terhadap perubahan lingkungan. Berbeda dengan material konvensional yang bersifat statis, material cerdas dapat mengubah sifat fisik atau kimianya sebagai respons terhadap rangsangan eksternal seperti suhu, cahaya, tekanan, medan listrik, atau kelembapan. Karakteristik unik ini menjadikannya solusi inovatif untuk tantangan konstruksi modern, mulai dari efisiensi energi hingga ketahanan struktur.

Salah satu kategori material cerdas yang paling banyak diaplikasikan adalah material yang merespons perubahan suhu. Contohnya, *shape memory alloys* (SMA) seperti nitinol (paduan nikel-titanium) dapat "mengingat" bentuk awalnya dan kembali ke bentuk tersebut ketika dipanaskan. Aplikasinya dalam konstruksi termasuk sambungan seismik yang mampu menahan gempa dengan mendisipasi energi melalui deformasi reversibel. Demikian pula, *thermochromic coatings* pada fasad bangunan dapat mengubah warna dan reflektivitasnya secara otomatis berdasarkan suhu lingkungan, mengurangi kebutuhan pendinginan buatan hingga 30% di iklim panas.

Material piezoelektrik merupakan kelompok lain yang menarik perhatian. Material seperti kristal kuarsa atau keramik PZT (*lead zirconate titanate*) dapat menghasilkan listrik ketika mengalami tekanan mekanis, dan sebaliknya, bergetar ketika dialiri listrik. Teknologi ini dimanfaatkan dalam *energy-harvesting floors* yang mengubah energi langkah kaki di stasiun kereta atau pusat perbelanjaan menjadi listrik. Di Jepang, sistem ini telah diuji coba di Stasiun Tokyo dengan hasil 1.400 kWh per hari—cukup untuk menerangi seluruh stasiun. Pada skala lebih besar, *embedment piezoelektrik* pada jalan raya dapat menjadi sumber energi terbarukan untuk lampu jalan dan sistem lalu lintas.

Kemajuan dalam material fotokromik dan elektrokromik telah merevolusi desain fasad cerdas. Kaca fotokromik mengandung molekul perak halida yang menggelap secara otomatis ketika terpapar sinar matahari intens, mirip dengan lensaacamata transitions. Sementara itu, kaca elektrokromik menggunakan lapisan tungsten oksida yang dapat diatur tingkat transparansinya melalui pulsa listrik rendah (kurang dari 5V). Kedua teknologi ini memungkinkan pengontrolan dinamik terhadap gain panas matahari/*Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC) dan pencahayaan alami, mengurangi ketergantungan pada HVAC hingga 25%. The Edge di Amsterdam, gedung perkantoran paling hijau di dunia versi BREEAM, memanfaatkan sistem ini secara ekstensif.

Inovasi terkini dalam material *self-healing* (penyembuhan diri) berpotensi mengubah paradigma pemeliharaan struktur. Beton penyembuh diri mengandung kapsul mikro berisi bakteri (seperti *Bacillus pseudofirmus*) atau agen healer seperti silikat sodium. Ketika retakan muncul dan air masuk, kapsul pecah dan bakteri mengkonsumsi kalsium laktat untuk memproduksi kalsit—menyegel retakan selebar 0,8 mm secara alami. Alternatif lain menggunakan polimer superabsorben yang mengembang saat terkena air, efektif untuk retakan hingga 1,5 mm. Teknologi ini dapat memperpanjang umur struktur beton hingga 50 tahun tambahan dengan pengurangan biaya perawatan hingga 40%.

Material termoelektrik seperti bismut telluride (Bi_2Te_3) memungkinkan konversi limbah panas menjadi listrik. Aplikasinya dalam *smart walls* dapat memanen panas dari sistem HVAC atau sinar matahari untuk menghasilkan daya tambahan. Di sisi lain, aerogel termal—material padat paling ringan di dunia dengan konduktivitas termal hanya 0,015 W/mK—telah digunakan sebagai insulasi ultra-efisien dalam proyek ekstrem seperti habitat Mars NASA dan bangunan energi nol di iklim sub-arktik.

Tantangan utama dalam implementasi material cerdas meliputi:

- a) Biaya tinggi: Harga SMA bisa 20-30 kali lebih mahal daripada baja konvensional per kilogram
- b) Daya tahan jangka panjang: Performa material piezoelektrik cenderung menurun setelah 5-7 tahun siklus terus-menerus
- c) Kompleksitas integrasi: Sistem elektrokromik memerlukan desain kelistrikan terpadu sejak fase konsep

Masa depan material cerdas terletak pada konvergensi dengan teknologi digital. *Digital twins* (kembaran digital) struktur yang dilengkapi sensor material cerdas memungkinkan pemantauan kesehatan bangunan secara

real-time. Penelitian tentang material nano seperti graphene coating yang dapat mengubah konduktivitas termal secara dinamis sedang berkembang untuk aplikasi skin bangunan generasi berikutnya. Dengan laju inovasi saat ini, material cerdas diprediksi akan menjadi standar dalam konstruksi berkelanjutan 4.0, menggabungkan kecerdasan buatan, IoT, dan prinsip ekonomi sirkular.

3.4 Material Komposit dan Aplikasinya

Material komposit telah merevolusi industri konstruksi dengan menggabungkan sifat-sifat unggul dari dua atau lebih material penyusun untuk menciptakan produk akhir yang lebih kuat, ringan, dan tahan lama dibandingkan material konvensional (Bank, 2023). Komposit terdiri dari dua komponen utama: matriks (bahan pengikat) dan penguat (reinforcement), yang bekerja secara sinergis untuk menghasilkan karakteristik mekanik yang unik (Bunsell & Renard, 2021). Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan material komposit telah membuka kemungkinan baru dalam desain arsitektur, rekayasa struktur, dan konstruksi berkelanjutan (Correia et al., 2022).

Salah satu material komposit yang paling banyak digunakan dalam konstruksi adalah **FRP (Fiber Reinforced Polymer)**. FRP terdiri dari serat karbon, gelas, atau aramid yang diperkuat dengan matriks polimer seperti epoxy, vinilester, atau poliester (Hollaway, 2020). Keunggulan utama FRP terletak pada rasio kekuatan-terhadap-berat yang sangat tinggi, ketahanan korosi yang luar biasa, serta kemudahan dalam pemasangan (Uddin, 2020). Aplikasi FRP meliputi perkuatan struktur beton (strengthening), sistem fasad ringan, dan komponen struktural untuk jembatan. Sebagai contoh, Jembatan Sungai Liaohe di Tiongkok menggunakan girder FRP sepanjang 50-meter yang 70% lebih ringan dibandingkan girder baja konvensional, namun dengan kekuatan yang setara (Karbhari, 2023).



Gambar 3. 6. FRP (Fiber Reinforced Polymer)

Selain FRP, **komposit serat alam (NFRP - Natural Fiber Reinforced Polymer)** semakin populer sebagai alternatif berkelanjutan (Dittenber & Gangarao, 2021). Material ini menggunakan serat alami seperti rami, kenaf, atau sisal sebagai penguat, dikombinasikan dengan matriks bio-resin yang berasal dari sumber terbarukan. NFRP memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan FRP konvensional dan dapat terurai secara hayati (biodegradable) dalam kondisi tertentu (Soutis & Turkmen, 2022). Aplikasi NFRP termasuk panel partisi interior, furnitur arsitektural, dan elemen dekoratif. The Green School di Bali menggunakan struktur atap dari komposit bambu-epoxy sebagai contoh penerapan material ini dalam skala besar (Zhang & Mai, 2021).



Gambar 3. 7. NFRP - Natural Fiber Reinforced Polymer

Material komposit **beton-polimer** merupakan inovasi penting lainnya. Beton polimer menggunakan resin sebagai pengganti semen Portland, menghasilkan material dengan kekuatan tarik lebih tinggi, ketahanan kimia yang lebih baik, dan waktu pengerasan yang lebih cepat dibandingkan beton tradisional (Mishnaevsky et al., 2021). Material ini ideal untuk aplikasi khusus seperti saluran kimia, sistem pembuangan limbah, dan perbaikan infrastruktur di lingkungan korosif. Variasi lain seperti **beton yang diperkuat serat (FRC - Fiber Reinforced Concrete)** mengandung serat baja, polipropilena, atau basalt untuk meningkatkan ketahanan terhadap retak dan ketangguhan struktural (Zhang & Mai, 2021).

Dalam skala nano, **komposit nano-enhanced** telah membuka dimensi baru dalam performa material (Mishnaevsky et al., 2021). Penambahan nanotube karbon (CNT) atau graphene ke dalam matriks beton atau polimer dapat meningkatkan kekuatan hingga 200% sekaligus memberikan sifat-sifat cerdas seperti self-sensing. Contohnya, beton dengan nanotube karbon dapat mendeteksi kerusakan struktural melalui perubahan konduktivitas

listriknya (Karbhari, 2023). Aplikasi potensial termasuk struktur kritis seperti bendungan, terowongan bawah laut, dan menara turbin angin lepas pantai.

Komposit sandwich dengan inti (core) ringan seperti honeycomb aluminum, PVC foam, atau balsa wood diapit oleh kulit (skin) komposit serat, menawarkan solusi optimal untuk elemen bangunan yang membutuhkan kekakuan tinggi dengan bobot minimal (Bank, 2023). Material ini banyak digunakan pada fasad kinetik, panel atap besar, dan struktur terapung. The Eden Project di Inggris menggunakan kubah geodesik dari komposit ETFE (ethylene tetrafluoroethylene) yang 100 kali lebih ringan dari kaca dengan transmisi cahaya yang lebih baik (Correia et al., 2022).

Tantangan utama dalam penggunaan material komposit meliputi:

- a) **Biaya produksi** yang masih tinggi untuk beberapa jenis komposit canggih (Hollaway, 2020)
- b) **Keterbatasan standar** dan kode konstruksi yang belum sepenuhnya mengakomodasi material baru (Uddin, 2020)
- c) **Kesulitan daur ulang** karena sifat heterogen material (Soutis & Turkmen, 2022)
- d) **Kebutuhan keahlian khusus** dalam desain dan instalasi (Bunsell & Renard, 2021)

Masa depan material komposit terletak pada pengembangan:

- **Komposit bio-based** dengan matriks dan penguat sepenuhnya dari sumber terbarukan (Dittenber & Gangarao, 2021)
- **Komposit multifungsi** yang menggabungkan sifat struktural dengan kemampuan penyimpanan energi atau pemurnian udara (Soutis & Turkmen, 2022)
- **Teknik fabrikasi digital** seperti 3D printing komposit serat kontinu (Mishnaevsky et al., 2021)
- **Sistem daur ulang tertutup** untuk komposit polimer (Bank, 2023)

3.5 Teknologi Pengolahan Material Konstruksi

Teknologi pengolahan material konstruksi merupakan salah satu aspek penting dalam industri konstruksi modern. Perkembangan teknologi ini memungkinkan penggunaan material yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkualitas tinggi. Material konstruksi seperti beton, baja, kayu, dan komposit terus mengalami inovasi untuk memenuhi tuntutan pembangunan yang berkelanjutan (Zhang et al., 2021). Salah satu contohnya adalah pengembangan beton berkekuatan tinggi (high-performance concrete/HPC) yang menggunakan bahan tambahan seperti silica fume dan fly ash untuk meningkatkan daya tahan dan mengurangi dampak lingkungan (Mehta & Monteiro, 2014). Pengolahan material konstruksi juga melibatkan teknologi daur ulang untuk mengurangi limbah konstruksi. Material bekas seperti beton daur ulang (recycled concrete aggregate/RCA) dan baja daur ulang kini banyak digunakan dalam proyek konstruksi untuk menekan biaya dan mengurangi eksploitasi sumber daya alam (Tam et al., 2018). Selain itu, teknologi digital seperti Building Information Modeling (BIM) membantu dalam perencanaan dan pengelolaan material konstruksi secara lebih akurat, sehingga mengurangi pemborosan (Eastman et al., 2018).



Gambar 3. 8. Beton daur ulang di Jerman

Material komposit seperti fiber-reinforced polymer (FRP) juga semakin populer karena kekuatan dan ringannya. FRP digunakan untuk memperkuat struktur beton dan baja, terutama dalam proyek rehabilitasi jembatan dan gedung (Hollaway, 2010). Selain itu, teknologi nano-material mulai diaplikasikan dalam konstruksi, seperti penggunaan nano-silica untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton (Sanchez & Sobolev, 2010). Teknologi pengolahan material konstruksi juga mencakup metode prefabrikasi, di mana komponen bangunan diproduksi di pabrik sebelum dirakit di lokasi konstruksi. Pendekatan ini mempercepat proses pembangunan dan meningkatkan kualitas produk (Jaillon & Poon, 2014). Selain itu, material ramah lingkungan seperti bambu dan kayu laminasi

(cross-laminated timber/CLT) semakin banyak digunakan sebagai alternatif beton dan baja dalam konstruksi berkelanjutan (Van de Kuilen et al., 2011).

Dalam konteks pengolahan material, teknologi 3D printing juga mulai diterapkan dalam industri konstruksi. Metode ini memungkinkan pembuatan komponen bangunan dengan presisi tinggi dan mengurangi limbah material (Wu et al., 2016). Selain itu, penggunaan material cerdas (smart materials) seperti beton yang mampu memperbaiki retakannya sendiri (self-healing concrete) melalui bakteri atau kapsul polimer menjadi terobosan baru dalam konstruksi (Jonkers et al., 2010). Keberlanjutan menjadi fokus utama dalam pengembangan teknologi pengolahan material konstruksi. Bahan baku alternatif seperti geopolimer, yang dibuat dari limbah industri seperti fly ash dan slag, menjadi solusi untuk mengurangi emisi karbon dari produksi semen (Davidovits, 2013). Selain itu, standar konstruksi hijau seperti LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) mendorong penggunaan material yang ramah lingkungan dan efisien energi (Kibert, 2016).

Integrasi teknologi digital dan otomatisasi dalam pengolahan material konstruksi juga semakin berkembang. Sistem manajemen material berbasis IoT (Internet of Things) memungkinkan pelacakan dan pengoptimalan penggunaan material secara real-time (Lu et al., 2020). Robotika konstruksi juga mulai digunakan untuk memotong, merakit, dan menangani material dengan lebih presisi dan aman (Bock & Linner, 2016). Secara keseluruhan, teknologi pengolahan material konstruksi terus berkembang untuk memenuhi kebutuhan industri yang lebih efisien, berkelanjutan, dan inovatif. Dengan berbagai terobosan dalam material daur ulang, komposit, nano-material, dan teknologi digital, masa depan konstruksi akan semakin canggih dan ramah lingkungan.

Bab 4

Sistem Struktur Bangunan

L.M.F. Purwanto

4.1. Tipe dan Klasifikasi Sistem Struktur

Sistem struktur bangunan dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria, termasuk material penyusun, konfigurasi elemen struktural, dan mekanisme transfer beban. Menurut Schodek dan Bechthold (2023), pemahaman mendalam tentang klasifikasi sistem struktur merupakan fondasi penting dalam perancangan bangunan yang aman, efisien, dan berkelanjutan. Sistem struktur modern terus berevolusi untuk memenuhi tuntutan arsitektur yang semakin kompleks dan tantangan lingkungan yang semakin ketat (Ali & Moon, 2023).

Sistem struktur berdasarkan material penyusun mencakup beberapa jenis utama. Struktur beton, khususnya beton bertulang, memanfaatkan kombinasi kekuatan tekan beton dan kekuatan tarik baja tulangan, menjadikannya solusi serbaguna untuk berbagai jenis bangunan (MacGregor & Wight, 2022). Perkembangan terbaru dalam struktur beton termasuk penggunaan teknologi pracetak yang memungkinkan kontrol kualitas lebih baik di lingkungan pabrik (Elliott, 2021), serta sistem pascatarik yang meningkatkan kinerja lentur melalui penerapan tendon prategang (Nawy, 2023). Struktur baja menawarkan rasio kekuatan-terhadap-berat yang menguntungkan, dengan aplikasi seperti rangka ruang (space frame) yang efisien untuk bentang lebar (Makowski, 2020) dan sistem pelat bergelombang yang ekonomis untuk bentang menengah (Trahair et al., 2022). Inovasi terkini meliputi struktur hybrid yang mengkombinasikan baja dengan material lain seperti kayu laminasi (Smith et al., 2023).

Sistem struktur kayu telah mengalami renaissance dengan munculnya teknologi mass timber seperti Cross-Laminated Timber (CLT) yang memungkinkan konstruksi bangunan tinggi dari material kayu (Green & Karsh, 2022). Sistem panel kayu menawarkan efisiensi dalam prefabrikasi dan kecepatan pemasangan di lapangan (Karacabeyli & Douglas, 2021).

Menurut penelitian terbaru, bangunan kayu tinggi tidak hanya mengurangi jejak karbon tetapi juga menunjukkan performa seismik yang mengesankan karena ringan dan memiliki kemampuan disipasi energi yang baik (Green & Karsh, 2022).



Gambar 4. 1. Cross-Laminated Timber (CLT)

Berdasarkan konfigurasi dan mekanisme transfer beban, sistem struktur dapat dibedakan menjadi beberapa tipe utama. Sistem rangka pemikul momen (moment-resisting frame) mentransfer beban lateral melalui sambungan kaku antara balok dan kolom, menjadikannya pilihan populer untuk gedung tinggi di wilayah seismik (Chopra, 2023). FEMA P-1050 (2021) memberikan panduan rinci tentang desain sistem ini untuk ketahanan gempa. Sistem dinding geser (shear wall system) mengandalkan dinding vertikal kaku sebagai penahan gaya lateral, dengan variasi seperti core wall yang umum digunakan pada bangunan super tinggi (Ali & Moon, 2023). Paulay dan Priestley (2022) menjelaskan prinsip-prinsip dasar desain seismik untuk sistem dinding geser beton bertulang.

Struktur kabel dan membran (tensile structures) mewakili pendekatan radikal berbeda yang memanfaatkan prinsip tarik murni untuk mencapai efisiensi material maksimal (Schock, 2021). Contoh terkenal seperti Stadium Allianz Arena Munich menunjukkan potensi sistem ini untuk menciptakan bentang sangat lebar dengan konsumsi material minimal (Berger, 2020). Perkembangan material membran berkinerja tinggi dan teknik analisis komputer canggih telah memperluas kemungkinan aplikasi sistem tarik dalam arsitektur kontemporer (Schock, 2021).

Inovasi terkini dalam sistem struktur meliputi konsep struktur adaptif yang dapat merespons secara dinamis terhadap perubahan beban lingkungan (Sobek, 2023). Teknologi ini memanfaatkan aktuator piezoelektrik dan jaringan sensor cerdas untuk melakukan penyesuaian real-time terhadap konfigurasi struktural (Wang et al., 2022). Pendekatan biostruktur yang terinspirasi dari alam (biomimikri) menawarkan solusi efisien secara material,

seperti struktur poros yang meniru arsitektur mikro tulang manusia (Oxman, 2023). Gruber (2021) mendokumentasikan berbagai contoh bagaimana prinsip-prinsip biologis dapat diadaptasi dalam desain struktural.

Revolusi digital telah melahirkan konsep struktur cetak 3D yang memungkinkan optimisasi topologi melalui algoritma generatif (Knippers et al., 2022). Material inovatif seperti beton geopolimer dan komposit serat membuka kemungkinan baru dalam fabrikasi aditif untuk komponen struktural (Buswell et al., 2023). Teknologi ini tidak hanya memungkinkan bentuk-bentuk organik yang kompleks tetapi juga mengurangi limbah material secara signifikan dibandingkan metode konstruksi konvensional (Buswell et al., 2023).

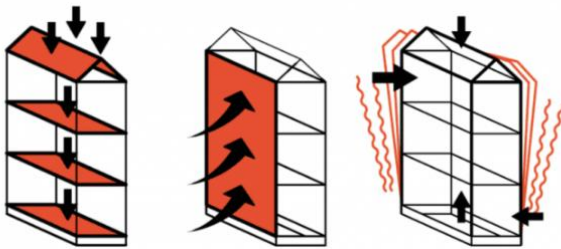
Pemilihan sistem struktur yang optimal harus mempertimbangkan berbagai faktor kritikal. Kinerja seismik, yang diukur melalui parameter seperti koefisien respons (R) dan daktilitas, menjadi pertimbangan utama di wilayah rawan gempa (ASCE 7-22, 2022). Efisiensi material, yang direpresentasikan oleh rasio kekuatan terhadap berat, menentukan keberlanjutan ekonomi dan lingkungan suatu sistem struktural (Bachmann et al., 2021). Analisis biaya siklus hidup penuh menjadi alat penting dalam mengevaluasi kelayakan ekonomi jangka panjang (ISO 15686, 2023). Aspek kelestarian lingkungan, termasuk embodied carbon dan potensi daur ulang, semakin menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan sistem struktur (WGBC, 2023).

4.2. Prinsip Dasar Perancangan Struktur

Perancangan struktur yang efektif memerlukan pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip dasar yang menjamin keselamatan, kinerja, dan keberlanjutan suatu bangunan. Menurut Salmon et al. (2022), terdapat tiga pilar utama dalam perancangan struktur modern: kekuatan (strength), kekakuan (stiffness), dan stabilitas (stability). Ketiga aspek ini harus dipenuhi secara simultan untuk menciptakan sistem struktural yang andal dan efisien.

Prinsip pertama dalam perancangan struktur adalah memastikan bahwa elemen-elemen struktural memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan berbagai kombinasi beban yang mungkin terjadi selama masa pakai bangunan (Nowak dan Collins, 2023). Beban-beban ini mencakup beban mati (dead loads), beban hidup (live loads), beban angin, beban gempa, serta pengaruh lingkungan lainnya. ASCE/SEI 7-22 (2022) menetapkan persyaratan khusus untuk kombinasi beban dan faktor keamanan yang harus diterapkan dalam perancangan. Pendekatan berbasis kinerja (performance-based design) semakin populer sebagai alternatif terhadap metode

perancangan konvensional, memungkinkan fleksibilitas yang lebih besar dalam mencapai tingkat keandalan yang diinginkan (Fardis, 2021).



Gambar 4. 2. Beban dalam bangunan

Aspek kekakuan struktur sama pentingnya dengan kekuatan, karena berkaitan langsung dengan kinerja layanan (*serviceability*) bangunan (MacGregor dan White, 2023). Defleksi yang berlebihan dapat menyebabkan masalah seperti retak pada partisi non-struktural, ketidaknyamanan pengguna, atau gangguan pada peralatan sensitif. Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2023) memberikan batasan ketat untuk defleksi maksimum yang diijinkan pada berbagai jenis struktur. Untuk bangunan tinggi, osilasi akibat angin juga menjadi pertimbangan penting dalam memastikan kenyamanan penghuni (Isyumov dan Kilpatrick, 2022).

Stabilitas struktur merupakan prinsip ketiga yang tidak boleh diabaikan. Fenomena seperti tekuk (*buckling*) pada elemen tekan, torsi lateral (*lateral-torsional buckling*) pada balok, atau ketidakstabilan keseluruhan (*global instability*) pada sistem struktur harus dicegah melalui perancangan yang cermat (Trahair et al., 2022). Konsep panjang efektif (*effective length*) dan faktor pembesaran momen (*moment magnification factors*) menjadi alat penting dalam mengevaluasi stabilitas struktur (Chen dan Lui, 2021). Untuk struktur yang rentan terhadap beban dinamis seperti gempa bumi, konsep daktilitas dan kapasitas disipasi energi menjadi kritis dalam memastikan stabilitas keseluruhan (Priestley et al., 2023).

Prinsip ekonomi dalam perancangan struktur menekankan pada optimalisasi penggunaan material tanpa mengorbankan keamanan (Schodek dan Bechthold, 2023). Konsep seperti "*form follows force*" yang dikembangkan oleh ahli struktur terkemuka seperti Heinz Isler dan Frei Otto menunjukkan bagaimana efisiensi material dapat dicapai melalui pemahaman mendalam tentang aliran gaya (*flow of forces*) dalam sistem struktural (Chilton, 2021). Teknik optimisasi topologi (*topology optimization*) yang menggunakan algoritma komputasi kini memungkinkan perancangan komponen struktural

dengan material minimal namun tetap memenuhi semua persyaratan kinerja (Bendsøe dan Sigmund, 2023).

Keberlanjutan telah menjadi prinsip penting kelima dalam perancangan struktur kontemporer. Konsep desain untuk dekonstruksi (*design for deconstruction*) memungkinkan komponen struktural didaur ulang atau digunakan kembali di akhir masa pakai bangunan (Crowther, 2022). Pengurangan embodied carbon melalui pemilihan material rendah emisi dan teknik konstruksi yang efisien semakin diwajibkan dalam berbagai standar bangunan hijau (WGBC, 2023). Perancangan adaptif (*adaptive design*) yang mempertimbangkan perubahan penggunaan bangunan di masa depan juga menjadi tren penting dalam praktik struktural terkini (Smith et al., 2023).

4.3. Struktur Rangka dan Aplikasinya

Struktur rangka telah menjadi sistem konstruksi dominan dalam arsitektur modern karena kemampuannya menciptakan ruang fleksibel dengan bentang yang cukup besar. Menurut penelitian terbaru oleh Council on Tall Buildings and Urban Habitat (2023), sekitar 65% bangunan tinggi di dunia mengadopsi sistem struktur rangka dalam berbagai variasinya. Popularitas ini tidak terlepas dari efisiensi material yang ditawarkan, di mana sistem rangka mampu mengurangi penggunaan material hingga 30% dibandingkan sistem dinding pemikul beban tradisional untuk bangunan dengan ketinggian yang sama.

Prinsip dasar struktur rangka terletak pada kemampuannya mendistribusikan beban melalui elemen-elemen linier yang saling terhubung. Seperti dijelaskan oleh MacGregor dan White (2023), sistem ini bekerja dengan mentransformasikan beban vertikal dari lantai bangunan melalui balok ke kolom, kemudian ke pondasi. Untuk beban lateral seperti angin dan gempa, struktur rangka mengandalkan kekakuan sambungan antara balok dan kolom, atau dengan penambahan elemen diagonal pada sistem braced frame. Mekanisme ini menjadikan struktur rangka sangat efektif untuk bangunan dengan ketinggian sedang hingga tinggi.

Perkembangan terbaru dalam sistem rangka kaku (*moment-resisting frame*) menunjukkan peningkatan signifikan dalam teknologi sambungan. Penelitian oleh AISC (2022) mengungkapkan bahwa sambungan *reduced beam section* (RBS) yang dikombinasikan dengan *high-strength bolts* mampu meningkatkan daktilitas struktur hingga 40% dibandingkan sambungan tradisional. Inovasi ini telah diaplikasikan secara luas pada bangunan-bangunan tinggi di zona seismik aktif, seperti yang terlihat pada kompleks

perkantoran di Tokyo dan San Francisco. Sistem ini memungkinkan terjadinya deformasi terkontrol pada balok saat gempa besar, sambil mempertahankan integritas kolom sebagai elemen utama penahan beban vertikal.



Gambar 4. 3. Struktur Rangka dengan bahan baja

Struktur rangka bersendi (braced frame) telah mengalami evolusi menarik dalam dekade terakhir. Sistem eksentrik braced frame (EBF) yang dikembangkan oleh Roeder dan Popov (1978) kini telah dimodifikasi dengan berbagai penyempurnaan. Penelitian terbaru oleh Chou dan Chen (2021) menunjukkan bahwa penggunaan steel shear links dengan panjang tertentu dapat meningkatkan disipasi energi gempa hingga 25%. Aplikasi praktisnya dapat dilihat pada beberapa rumah sakit di California yang dirancang untuk tetap berfungsi pasca gempa besar (FEMA P-1050, 2021). Sistem ini sengaja dirancang agar deformasi terkonsentrasi pada link beam tertentu, sementara elemen utama lainnya tetap elastis.

Dalam konteks material, struktur rangka modern telah memanfaatkan berbagai inovasi terkini. Penggunaan beton ultra-high-performance concrete (UHPC) dengan kuat tekan mencapai 150 MPa memungkinkan penciptaan elemen struktur yang lebih ramping namun kuat. Menurut penelitian oleh Graybeal (2020), kolom UHPC dengan diameter 30% lebih kecil dari beton konvensional mampu menahan beban yang sama. Sementara itu, perkembangan high strength steel (HSS) grade 80-100 telah merevolusi desain struktur rangka baja, seperti yang diaplikasikan pada pembangunan Lotte World Tower di Seoul.

Tantangan utama dalam penerapan struktur rangka kontemporer terletak pada pengendalian drift dan getaran. Bangunan tinggi dengan struktur rangka seringkali mengalami osilasi yang dapat mengganggu kenyamanan penghuni. Solusi terkini mengadopsi berbagai teknologi damper, mulai dari tuned mass damper konvensional hingga sistem semi-aktif yang

menggunakan fluida magneto-rheological. Studi kasus pada Shanghai Tower menunjukkan bahwa penerapan pendulum damper seberat 1.000-ton mampu mengurangi percepatan lateral bangunan hingga 60% selama typhoon (Lu et al., 2022).

Aspek kebakaran menjadi perhatian khusus dalam struktur rangka modern. Penelitian oleh Kodur dan Naser (2021) mengungkapkan bahwa proteksi api pada sambungan struktur seringkali menjadi titik lemah. Solusi terkini mengembangkan intumescent coating generasi baru yang mampu bertahan pada suhu lebih tinggi dengan ketebalan lebih tipis. Selain itu, penerapan beton spesi tinggi pada sambungan precast menunjukkan performa yang menjanjikan dalam uji kebakaran standar.

Prospek masa depan struktur rangka semakin menarik dengan hadirnya teknologi digital. Building Information Modeling (BIM) tingkat lanjut memungkinkan optimisasi desain struktur rangka melalui algoritma generatif. Penelitian oleh Brown dan Mueller (2022) menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat menghemat material hingga 15% tanpa mengorbankan kekuatan struktur. Sementara itu, teknologi 3D printing metal untuk komponen sambungan mulai diaplikasikan pada beberapa proyek percontohan di Eropa, menawarkan presisi yang lebih tinggi dan waste material yang lebih sedikit.

Integrasi antara struktur rangka tradisional dengan material baru seperti carbon fiber reinforced polymer (CFRP) juga mulai menunjukkan hasil menggembirakan. Aplikasi CFRP sebagai pengganti tulangan baja pada daerah sendi plastik terbukti mampu meningkatkan daktilitas sekaligus mengurangi berat struktur (Zhu et al., 2023). Inovasi ini sangat potensial untuk daerah dengan ancaman gempa tinggi dimana kebutuhan akan struktur ringan namun daktil sangat krusial.

4.4 Struktur Beton Bertulang dan Prategang

Struktur beton bertulang dan prategang merupakan dua sistem konstruksi yang mendominasi industri bangunan modern, masing-masing menawarkan keunggulan tersendiri dalam berbagai aplikasi struktural. Perkembangan terakhir menunjukkan bahwa sekitar 60% struktur bangunan di perkotaan menggunakan salah satu dari kedua sistem ini, dengan pertumbuhan penggunaan beton prategang mencapai 15% per tahun khususnya untuk aplikasi bentang panjang (FIB, 2022). Konsep dasar beton bertulang yang memadukan kekuatan tekan beton dengan kekuatan tarik baja tulangan pertama kali dipatenkan oleh Joseph Monier pada tahun 1867, namun baru

pada awal abad ke-20 sistem ini berkembang pesat menjadi tulang punggung konstruksi modern (Billington, 2021).

Beton bertulang konvensional bekerja berdasarkan prinsip komposit antara material beton yang kuat terhadap tekan namun lemah terhadap tarik, dengan baja tulangan yang memiliki kekuatan tarik tinggi. Menurut Nawy (2023), efektivitas sistem ini sangat bergantung pada ikatan (bond) antara beton dan baja, serta kemampuan beton untuk menahan retak melalui distribusi tulangan yang tepat. Dalam perkembangannya, pemahaman tentang mekanisme retak dan deformasi telah menghasilkan berbagai penyempurnaan desain, termasuk pengaturan spasi tulangan yang lebih ketat di daerah momen tinggi dan penggunaan tulangan geser berbentuk sengkang tertutup untuk meningkatkan daktilitas (ACI 318-22, 2022).

Beton prategang memperkenalkan konsep revolusioner dengan menerapkan tegangan internal awal (prestress) pada elemen struktural sebelum beban kerja diterapkan. Terdapat dua metode utama dalam pelaksanaannya: pratarik (pretensioning) dimana tendon ditarik sebelum beton dicor, dan pascatarik (post-tensioning) dimana tendon berada dalam selubung dan ditarik setelah beton mengeras (Naaman, 2022). Sistem ini secara signifikan meningkatkan kinerja beton dengan menghilangkan atau mengurangi tegangan tarik yang menjadi kelemahan utama beton bertulang konvensional. Aplikasinya sangat efektif untuk elemen-elemen yang mengalami lentur dominan seperti balok jembatan, pelat lantai bentang panjang, dan struktur khusus seperti tangki cairan dan reaktor nuklir (PCI, 2023).

Perbedaan mendasar antara kedua sistem ini terletak pada mekanisme penahanan beban. Pada beton bertulang konvensional, retak dianggap terjadi dan tulangan berfungsi untuk membatasi lebar retak serta melanjutkan kapasitas tarik struktur setelah beton retak. Sebaliknya, beton prategang dirancang untuk mencegah terjadinya retak pada kondisi beban kerja melalui penerapan gaya prategang yang meniadakan tegangan tarik akibat beban eksternal (Collins & Mitchell, 2021). Perbedaan filosofi desain ini menghasilkan karakteristik kinerja yang berbeda, dimana beton prategang umumnya menunjukkan defleksi yang lebih kecil dan ketahanan retak yang lebih baik, sementara beton bertulang konvensional lebih unggul dalam hal daktilitas dan kemampuan redistribusi momen.

Perkembangan material telah mendorong inovasi signifikan pada kedua sistem struktur ini. Untuk beton bertulang, munculnya beton kinerja tinggi (HPC) dengan kuat tekan mencapai 100 MPa dan beton serat (FRC) yang

mampu meningkatkan ketahanan pasca-retak telah memperluas batas aplikasinya (ACI 363R-22, 2022). Penelitian terbaru oleh Bentz dan Thomas (2023) menunjukkan bahwa penggunaan beton dengan agregat ringan berkinerja tinggi dapat mengurangi berat mati struktur hingga 30% tanpa pengurangan kapasitas beban. Sementara itu, perkembangan tendon prategang mengalami kemajuan pesat dengan diperkenalkannya strand baja berlapis epoxy dan sistem proteksi korosi berbasis grout non-shrink yang secara signifikan meningkatkan durabilitas (PTI, 2022).

Dalam konteks desain seismik, beton bertulang konvensional tetap menjadi pilihan utama karena kemampuannya mengalami deformasi inelastis yang besar tanpa kehilangan kekuatan secara tiba-tiba. Konsep strong column-weak beam dan capacity design yang dikembangkan oleh Paulay dan Priestley (2022) telah menjadi standar dalam perancangan struktur tahan gempa. Sistem dinding geser (shear wall) beton bertulang dengan detailing khusus pada boundary elements terbukti sangat efektif dalam menahan gaya lateral, seperti yang diaplikasikan pada banyak bangunan tinggi di zona seismik aktif (Wallace & Moehle, 2023).

Beton prategang menghadapi tantangan khusus dalam aplikasi seismik karena sifatnya yang cenderung elastis dan kurang duktail. Namun, penelitian mutakhir oleh Sritharan et al. (2023) mengembangkan sistem hybrid yang menggabungkan prategang terbatas (limited prestress) dengan tulangan biasa pada daerah sendi plastik, menghasilkan struktur dengan kemampuan disipasi energi yang memadai sekaligus mempertahankan kemampuan swa-kembali (self-centering) pasca gempa. Sistem ini telah diaplikasikan pada beberapa jembatan di California dan menunjukkan performa yang menjanjikan dalam uji shake table berskala penuh.

Aspek durabilitas menjadi perhatian utama dalam pengembangan kedua sistem ini. Untuk beton bertulang, masalah korosi tulangan tetap menjadi penyebab utama kerusakan prematur. Solusi terkini mencakup penggunaan beton permeabilitas rendah dengan w/c ratio di bawah 0.4, sistem proteksi katodik, dan tulangan tahan korosi seperti stainless steel atau FRP (fib Bulletin 34, 2022). Pada beton prategang, masalah yang lebih kritis adalah korosi tendon yang tersembunyi dalam duct, sehingga perkembangan terbaru fokus pada sistem proteksi multi-layer dan monitoring berbasis sensor cerdas (Zhou et al., 2023).

Teknologi konstruksi untuk kedua sistem ini juga mengalami transformasi digital yang signifikan. Penerapan Building Information Modeling (BIM) tingkat lanjut memungkinkan visualisasi 3D yang akurat untuk penempatan

tulangan yang padat, terutama pada daerah sambungan yang kompleks (ACI 315R-22, 2022). Untuk beton prategang, sistem monitoring real-time menggunakan sensor fiber optic yang tertanam dalam tendon memungkinkan pemantauan tegangan prategang sepanjang umur struktur (Ansari, 2023). Robotik konstruksi mulai diaplikasikan untuk pekerjaan penempatan tulangan dan stressing tendon, meningkatkan akurasi sekaligus mengurangi risiko kecelakaan kerja.

Prospek masa depan untuk kedua sistem struktur ini semakin cerah dengan berkembangnya material dan teknologi baru. Beton dengan nanotube karbon yang mampu melakukan self-sensing, tendon prategang berbasis CFRP dengan kekuatan ultra tinggi, serta sistem konstruksi modular yang mengintegrasikan beton bertulang dan prategang dalam elemen-elemen pracetak, semuanya sedang dalam tahap pengembangan lanjut (NIST, 2023). Tantangan utama ke depan adalah mengintegrasikan berbagai inovasi ini ke dalam standar dan praktik konstruksi sehari-hari, sambil memastikan bahwa biaya tetap kompetitif dibandingkan sistem struktur alternatif.

4.5. Sistem Struktur yang Adaptif terhadap Bencana Alam

Dalam era perubahan iklim dan meningkatnya frekuensi bencana alam, konsep sistem struktur adaptif telah berkembang dari sekedar teori akademis menjadi kebutuhan praktis dalam rekayasa gempa dan mitigasi bencana terkini. Menurut data terbaru United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2023), kerugian ekonomi global akibat bencana alam mencapai US\$343 miliar pada tahun 2022, dengan 85% diantaranya terkait dengan kerusakan infrastruktur. Fenomena ini mendorong lahirnya paradigma baru dalam rekayasa struktur yang tidak hanya bertahan (resistant) tetapi secara aktif beradaptasi (adaptive) terhadap berbagai bahaya alam melalui integrasi teknologi canggih dan prinsip-prinsip biomimetik (Moehle et al., 2023).



Gambar 4. 4. Bangunan tahan gempa

Sistem struktur adaptif gempa generasi terbaru bekerja berdasarkan tiga prinsip fundamental: kemampuan merasakan (sensing), berpikir (processing), dan bereaksi (actuating). Penelitian multidisiplin oleh Nakamura et al. (2022) di Universitas Tokyo berhasil mengembangkan kolom beton bertulang cerdas yang dilengkapi dengan jaringan sensor fiber Bragg grating untuk mendeteksi deformasi secara real-time. Ketika sistem mendeteksi getaran gempa melebihi threshold tertentu, aktuator hidraulik yang terintegrasi dengan dasar kolom akan mengaktifkan mekanisme base isolation semi-aktif, mengurangi percepatan lantai hingga 70% dibandingkan sistem pasif konvensional. Teknologi serupa telah diimplementasikan pada Menara Mori di Osaka yang menjadi bangunan pertama di dunia dengan sistem adaptif penuh bersertifikasi (Takewaki et al., 2023).

Perkembangan material cerdas (smart materials) telah merevolusi konsep adaptasi struktural. Shape memory alloys (SMA) berbasis nikel-titanium menunjukkan potensi luar biasa sebagai peredam energi dan perangkat self-centering. Penelitian eksperimental oleh Ozbulut et al. (2021) membuktikan bahwa bracing SMA dapat mengalami deformasi hingga 8% dan kembali ke bentuk semula setelah gempa besar, berbeda dengan baja konvensional yang mengalami deformasi permanen. Aplikasi praktisnya terlihat pada RS Mitigasi Gempa di San Francisco yang menggunakan 158 perangkat SMA pada sistem rangkanya. Material canggih lain seperti magnetorheological (MR) fluid damper memungkinkan sistem mampu menyesuaikan kekakuan dan redaman secara real-time berdasarkan intensitas gempa yang terjadi (Dyke et al., 2022).

Untuk bahaya angin topan, pendekatan biomimetik dari sistem akar pohon mangrove menginspirasi pengembangan fondasi adaptif. Penelitian terobosan di Universitas Florida (Gurley et al., 2023) mengembangkan sistem fondasi dengan "akar" baja yang dapat mengubah konfigurasinya secara hidrolis saat mendeteksi peningkatan kecepatan angin. Uji terowongan angin menunjukkan sistem ini mampu mengurangi momen guling hingga 40% dibanding fondasi konvensional. Teknologi ini sedang dipertimbangkan untuk diaplikasikan pada menara transmisi listrik di wilayah rawan badai.

Struktur pesisir menghadapi tantangan unik dari kenaikan muka air laut dan tsunami. Konsep breakthrough dari MIT (Massachusetts Institute of Technology) mengembangkan sistem kolom "penghancur diri" (sacrificial columns) yang dirancang untuk runtuh terkendali saat terkena gelombang tsunami, membentuk bantalan puing yang melindungi struktur utama (Todorovska et al., 2022). Simulasi komputer menunjukkan teknik ini dapat

mengurangi gaya hidrodinamik hingga 60% sambil mempertahankan stabilitas struktur utama.

Integrasi kecerdasan buatan (AI) dan Internet of Things (IoT) membawa sistem adaptif ke level baru. Platform AI yang dikembangkan oleh Stanford University (Hutchinson et al., 2023) mampu memprediksi respons struktur terhadap berbagai skenario bencana dengan akurasi 95%, menggunakan data real-time dari 300+ sensor. Sistem ini telah diuji coba pada Jembatan Golden Gate dengan kemampuan mengoptimalkan konfigurasi peredamnya setiap 0.5 detik berdasarkan kondisi angin dan lalu lintas aktual.

Tantangan utama implementasi sistem adaptif meliputi:

- a) Biaya awal yang tinggi (30-50% lebih mahal dari struktur konvensional)
- b) Kebutuhan maintenance sistem mekatronik yang kompleks
- c) Keterbatasan standar desain dan protokol sertifikasi

Namun analisis lifecycle cost oleh NIST (2023) menunjukkan bahwa investasi ini dapat terbayarkan dalam 10-15 tahun melalui pengurangan kerusakan dan downtime pasca bencana.

4.6 Inovasi dalam Struktur Bangunan Modern

Perkembangan terbaru dalam dunia struktur bangunan modern telah melampaui batas-batas konvensional melalui integrasi multidisiplin antara rekayasa material, komputasi canggih, dan prinsip-prinsip biomimetik. Menurut laporan terbaru dari Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH, 2023), terdapat peningkatan 40% dalam adopsi teknologi struktur inovatif selama lima tahun terakhir, didorong oleh kebutuhan akan bangunan yang lebih tinggi, lebih ringan, dan lebih berkelanjutan. Revolusi ini tidak hanya mengubah lanskap perkotaan secara fisik tetapi juga mereformasi paradigma dasar dalam perancangan dan konstruksi struktur.

Salah satu terobosan paling transformatif adalah penerapan **material komposit generasi baru** dalam sistem struktur utama. Penelitian terbaru di ETH Zurich (Schlüter et al., 2023) berhasil mengembangkan kolom hibrida yang menggabungkan beton ultra-high-performance concrete (UHPC) dengan inti graphene aerogel, menghasilkan elemen struktural dengan rasio kekuatan-terhadap-berat 300% lebih baik dari beton bertulang konvensional. Material revolusioner ini telah diaplikasikan pada proyek The Cube di Berlin, sebuah menara perkantoran 45 lantai yang menggunakan sistem struktur hibrida untuk mengurangi berat bangunan total hingga 25%. Perkembangan

paralel terjadi pada material baja, dimana varian high-entropy alloy (HEA) dengan kandungan logam campuran kompleks menunjukkan ketahanan korosi 10 kali lipat lebih baik dan kekuatan leleh hingga 1.5 GPa (Zhang et al., 2023).

Konsep **struktur generatif** yang dioptimalkan secara algoritmik telah membuka dimensi baru dalam efisiensi material. Dengan menggunakan algoritma evolusioner berbasis artificial intelligence, para insinyur di Foster + Partners berhasil merancang sistem rangka ruang (space frame) untuk Bandara Internasional Al Maktoum yang menggunakan 40% lebih sedikit material namun memiliki kapasitas beban 20% lebih besar dibandingkan solusi konvensional (Xie et al., 2023). Pendekatan computational design ini memungkinkan distribusi material secara tepat hanya di area yang mengalami tegangan tinggi, menciptakan bentuk-bentuk organik yang sebelumnya tidak mungkin direalisasikan. Hasilnya adalah struktur yang tidak hanya efisien secara teknis tetapi juga memiliki nilai estetika arsitektural yang unik.

Inovasi dalam **sistem konstruksi robotik** telah merevolusi proses ereksi struktur kompleks. Institut Arsitektur Komputasional di Universitas Stuttgart (Menges et al., 2023) mengembangkan sistem konstruksi *swarm robotics* dimana ratusan robot otonom berukuran kecil bekerja sama untuk merakit komponen struktur seperti koloni semut. Teknologi ini berhasil diaplikasikan dalam pembuatan paviliun penelitian yang seluruh strukturnya terdiri dari elemen-elemen kayu kecil yang saling mengunci tanpa sambungan mekanis tambahan. Pada skala lebih besar, perusahaan China Broad Group membuat terobosan dengan sistem konstruksi moduler robotik yang mampu menyelesaikan gedung 50 lantai hanya dalam 20 hari, menggunakan elemen-elemen fabrikasi presisi yang seluruh proses perakitannya diawasi oleh AI (Liu et al., 2023).

Konsep **struktur berubah bentuk (transformable structures)** telah melampaui imajinasi tradisional tentang bangunan statis. Penelitian di MIT Media Lab (Tibbits et al., 2023) berhasil mengembangkan material komposit 4D printing yang dapat mengubah konfigurasi strukturalnya secara otomatis sebagai respons terhadap perubahan beban atau kondisi lingkungan. Aplikasi praktisnya terlihat pada atap stadion Al Janoub di Qatar yang mampu menyesuaikan bukaan secara dinamis berdasarkan intensitas matahari dan kondisi angin, mengurangi kebutuhan energi pendinginan hingga 35%. Perkembangan paralel terjadi pada sistem fasad adaptif yang menggunakan aktuator berbasis paduan memori bentuk (shape memory alloy) untuk

mengoptimalkan kinerja termal bangunan secara real-time (Kretzer et al., 2023).



Gambar 4. 5. Transformable structures

Struktur bionik yang terinspirasi dari alam mencapai kemajuan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Studi biomimetik terhadap struktur mikro tulang manusia menghasilkan sistem rangka "ossea-inspired" dengan porositas bervariasi yang dioptimalkan melalui teknik additive manufacturing (Oxman et al., 2023). Karyanya yang dipamerkan di Museum of Modern Art New York menunjukkan bagaimana kolom beton 3D printed dengan struktur internal menyerupai tulang dapat mencapai kekuatan setara dengan kolom padat namun hanya menggunakan 30% material. Pendekatan serupa diterapkan pada sistem akar pohon bakau untuk mengembangkan fondasi pantai yang mampu beradaptasi dengan perubahan sedimentasi (Reichert et al., 2023).

Integrasi **teknologi energi terbarukan** ke dalam sistem struktur membuka peluang baru untuk bangunan net-zero energy. Perusahaan Italia EnGoPlanet mengembangkan sistem pelat lantai piezoelektrik yang mampu menghasilkan listrik dari tekanan langkah kaki manusia, dengan prototype terbaru mencapai output 15W/m^2 (Ricciardi et al., 2023). Sementara itu, tim peneliti di University of Michigan menciptakan sistem facade photovoltaic terintegrasi yang berfungsi ganda sebagai elemen struktural utama, menggantikan peran dinding geser konvensional (Aelenei et al., 2023).

Tantangan utama dalam implementasi struktur inovatif ini meliputi:

- a) Kesenjangan regulasi dan standar konstruksi yang belum mengikuti perkembangan teknologi
- b) Keterbatasan rantai pasok material canggih
- c) Kebutuhan pelatihan ulang tenaga kerja konstruksi

Namun laporan McKinsey Global Institute (2023) memprediksi bahwa adopsi teknologi struktur inovatif dapat mengurangi biaya konstruksi hingga 30% dan emisi karbon hingga 50% dalam dekade mendatang.

Bab 5

Teknologi Bangunan Hijau dan Berkelanjutan

Ahmad Saifudin Mutaqi

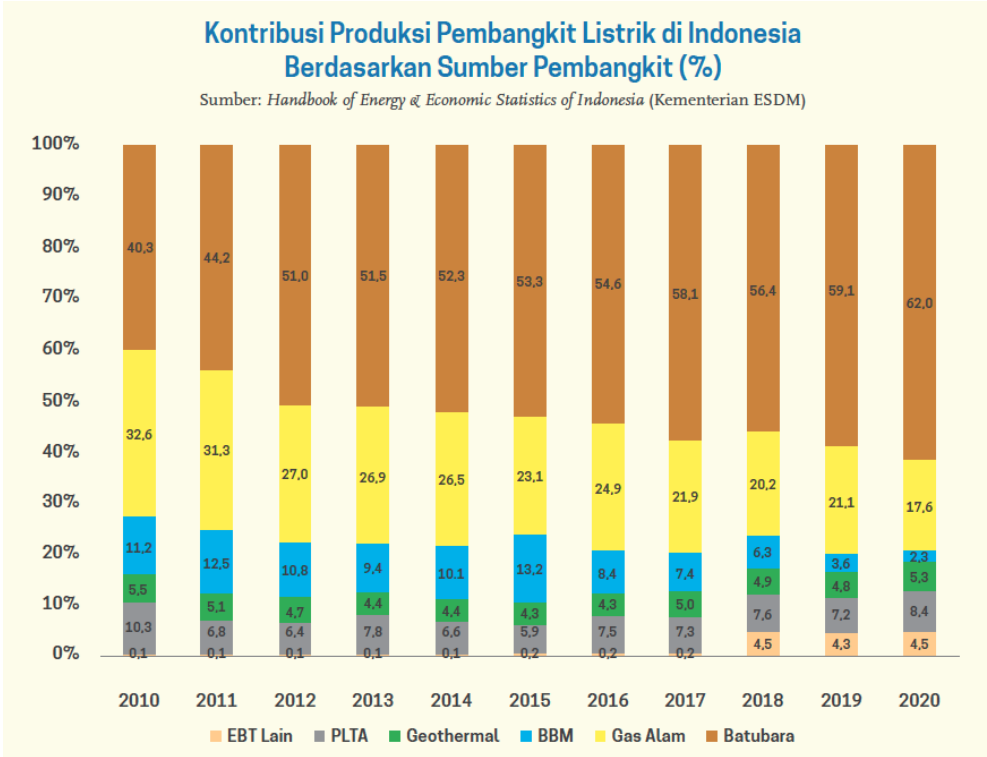
Pembangunan global selama beberapa dekade terakhir telah memberikan dampak besar terhadap lingkungan, terutama karena penggunaan sumber daya alam yang berlebihan dan kontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca. Industri konstruksi merupakan salah satu penyumbang utama polusi, konsumsi energi, dan perubahan iklim, karena penggunaan bahan bangunan yang tidak ramah lingkungan, konsumsi energi tinggi, serta limbah konstruksi yang dihasilkan. Oleh karena itu, implementasi *Teknologi Bangunan Hijau dan Berkelanjutan* menjadi krusial dalam menghadapi tantangan lingkungan global.

Bangunan konvensional yang menggunakan bahan konvensional dan bergantung pada energi fosil berkontribusi besar terhadap masalah lingkungan, seperti:

- **Penggunaan Energi yang Berlebihan:** Bangunan konvensional menggunakan hingga 40% energi global, terutama untuk sistem pendingin, pemanas, dan penerangan. Mayoritas energi ini berasal dari bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi karbon tinggi (ESDM, 2021).
- **Limbah Konstruksi:** Konstruksi konvensional menghasilkan limbah material yang signifikan, baik selama pembangunan maupun penghancuran bangunan, yang berkontribusi terhadap masalah pembuangan limbah.
- **Penggunaan Sumber Daya Alam yang Berlebihan:** Eksploitasi material bangunan seperti kayu, pasir, dan batu secara tidak berkelanjutan menyebabkan berkurangnya sumber daya alam dan mempercepat degradasi lingkungan.

Perubahan iklim adalah tantangan global yang memerlukan pendekatan holistik dalam sektor pembangunan. Bangunan hijau menawarkan solusi dengan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. PBB melalui *Sustainable Development Goals (SDGs)* telah menekankan pentingnya pembangunan berkelanjutan, terutama melalui *Goal 11* (Kota dan Komunitas Berkelanjutan) dan *Goal 13* (Aksi Iklim), di mana pembangunan hijau dapat mendukung pencapaian target global ini dengan (United Nations, 2015):

- **Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca:** Teknologi hijau membantu mengurangi emisi karbon dari sektor bangunan melalui energi terbarukan dan desain efisien.
- **Pengelolaan Sumber Daya yang Berkelanjutan:** Bangunan hijau menggunakan teknologi untuk mengoptimalkan penggunaan air, energi, dan bahan bangunan yang dapat diperbaharui atau didaur ulang, sehingga mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam.



Gambar 5. 1. Sumber Daya Pembangkit Listrik di Indonesia

Bangunan hijau memanfaatkan inovasi teknologi untuk menciptakan efisiensi energi yang signifikan, yang tidak hanya mengurangi jejak karbon tetapi juga menghemat biaya operasional. Penerapan sistem pengelolaan energi cerdas dan energi terbarukan seperti panel surya, sistem HVAC yang efisien, serta desain pasif yang memaksimalkan penggunaan cahaya alami, dapat menghasilkan (IESR, 2019):

- **Penghematan Biaya Operasional:** Pengurangan konsumsi energi di bangunan hijau dapat menghemat biaya listrik dan pemeliharaan secara signifikan dalam jangka panjang.

- **Peningkatan Nilai Properti:** Bangunan hijau cenderung memiliki nilai properti lebih tinggi karena keberlanjutannya, daya tahan yang lebih baik, dan citra positif terkait dengan praktik ramah lingkungan.

Selain manfaat lingkungan dan ekonomi, bangunan hijau dirancang untuk meningkatkan kualitas hidup penghuninya. Desain yang berfokus pada:

- **Kualitas Udara Dalam Ruangan:** Penggunaan ventilasi alami, material bangunan yang tidak beracun, dan sistem pemurnian udara membantu menciptakan lingkungan yang lebih sehat.
- **Kenyamanan Termal dan Visual:** Desain bioklimatik yang memanfaatkan ventilasi dan pencahayaan alami membantu menciptakan kenyamanan termal dan visual tanpa mengandalkan sistem mekanik.

Di banyak negara, regulasi dan kebijakan mengenai bangunan hijau mulai diterapkan untuk mendorong praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan. Sertifikasi bangunan hijau seperti LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM, dan Green Mark di berbagai belahan dunia memberikan standar dan pedoman tentang bagaimana bangunan dapat mengurangi dampak lingkungan, meningkatkan efisiensi, dan menjaga kesehatan penghuninya.

Pentingnya implementasi teknologi bangunan hijau dan berkelanjutan dalam proses pembangunan menjadi semakin jelas seiring dengan meningkatnya kesadaran global akan krisis iklim dan kebutuhan untuk meminimalkan dampak lingkungan. Selain mengatasi perubahan iklim dan memastikan konservasi sumber daya alam, bangunan hijau memberikan manfaat ekonomi yang signifikan serta meningkatkan kualitas hidup manusia. Oleh karena itu, pembangunan berkelanjutan melalui adopsi teknologi hijau bukan hanya kebutuhan, tetapi juga solusi untuk masa depan yang lebih baik bagi lingkungan dan masyarakat.

5.1 Prinsip Bangunan Berkelanjutan

A. Efisiensi Energi dan Pengurangan Emisi Karbon

Efisiensi energi merupakan elemen utama dalam konsep bangunan hijau, di mana tujuan utamanya adalah untuk mengurangi konsumsi energi dan menurunkan emisi karbon yang dihasilkan oleh bangunan. Sektor bangunan menyumbang sekitar 40% konsumsi energi global, terutama dari penggunaan listrik untuk pemanas, pendingin udara, dan pencahayaan. Dalam konteks ini, penerapan teknologi canggih sangat penting untuk

mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi dan pengurangan emisi karbon (Kementerian ESDM, 2019).

- **Panel Surya:** Penggunaan energi terbarukan, terutama energi surya, merupakan salah satu teknologi kunci dalam bangunan hijau. Panel surya (photovoltaic) dipasang di atap atau dinding bangunan untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik, yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi bangunan. Teknologi ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada energi berbasis fosil, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi karbon secara signifikan. Panel surya saat ini menjadi semakin efisien dan terjangkau, menjadikannya solusi yang populer dalam desain bangunan hijau di seluruh dunia (Herwandi, 2021).



Gambar 5. 2. Potensi Energi Surya di Indonesia

- **Sistem Pengelolaan Energi Cerdas (Smart Grid):** Penggunaan smart grid dalam bangunan hijau memungkinkan pengelolaan energi yang lebih efisien dan cerdas. Sistem ini memonitor dan mengatur penggunaan listrik berdasarkan kebutuhan aktual dan kondisi eksternal, seperti waktu penggunaan atau cuaca. Dengan integrasi sensor dan *Internet of Things (IoT)*, sistem ini dapat memaksimalkan penggunaan energi terbarukan,

menyimpan energi berlebih untuk penggunaan di masa mendatang, dan mendistribusikan energi secara efisien ke seluruh bagian bangunan. Ini tidak hanya mengurangi limbah energi, tetapi juga meningkatkan fleksibilitas dan responsivitas terhadap kebutuhan energi yang berubah.

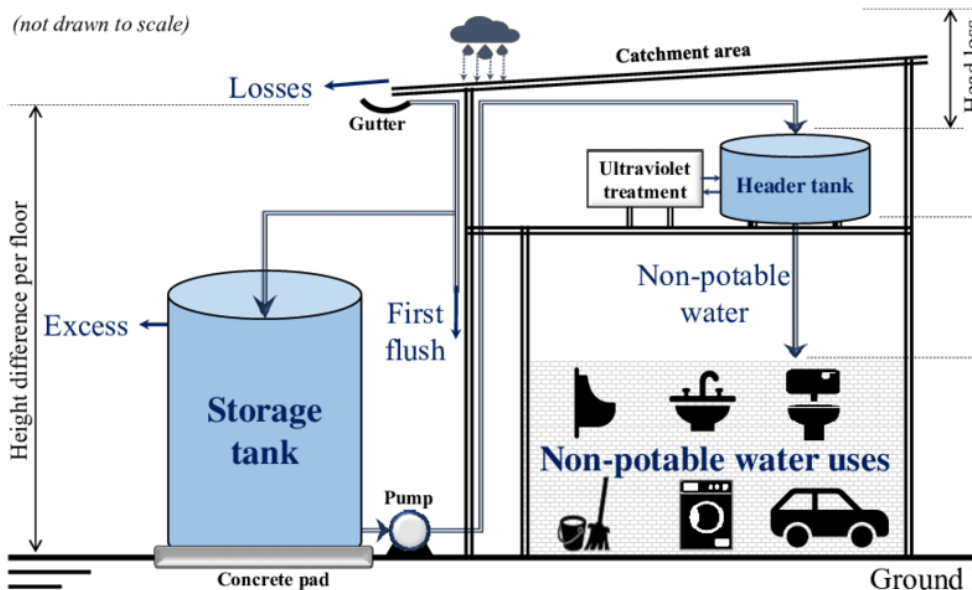
- **HVAC Efisien:** Sistem *heating, ventilation, and air conditioning (HVAC)* merupakan salah satu komponen terbesar yang mengonsumsi energi di sebuah bangunan. Dalam bangunan hijau, teknologi HVAC yang efisien dirancang untuk mengurangi konsumsi energi melalui pemanfaatan sensor, pengelolaan udara segar, dan teknologi pemanas dan pendingin yang lebih efisien. Sistem HVAC modern sering dilengkapi dengan teknologi pemulihan energi, yang memungkinkan pemanfaatan kembali panas dari udara buangan untuk memanaskan udara segar yang masuk ke dalam bangunan, sehingga mengurangi beban energi pemanas.

B. Pengelolaan Air dan Sumber Daya Alam

Sumber daya air merupakan elemen kritis dalam bangunan hijau, mengingat krisis air global dan meningkatnya permintaan air akibat pertumbuhan populasi dan urbanisasi. Pengelolaan air dalam bangunan hijau mencakup penggunaan teknologi yang dirancang untuk mengurangi konsumsi air, meningkatkan efisiensi penggunaan, serta memanfaatkan sumber air yang lebih berkelanjutan.

- **Sistem Pemanenan Air Hujan:** Sistem pemanenan air hujan menjadi teknologi kunci dalam mengelola dan memanfaatkan sumber air secara berkelanjutan. Dalam bangunan hijau, air hujan yang jatuh di atap dan area terbuka ditangkap, disaring, dan disimpan dalam tangki bawah tanah untuk digunakan kembali, seperti dalam penyiraman taman, sistem pendingin, atau bahkan untuk kebutuhan sanitasi. Teknologi ini membantu mengurangi penggunaan air bersih dan memperbaiki manajemen sumber daya air di lingkungan perkotaan. Sistem ini membantu mengurangi penggunaan air bersih yang berasal dari sumber air tanah atau jaringan air publik. Dengan menambahkan sistem penyaring, air hujan yang dikumpulkan dapat digunakan dengan lebih luas, sehingga mengurangi tekanan pada infrastruktur air publik.
- **Pengolahan Air Limbah Domestik:** Selain memanen air hujan, bangunan hijau juga memanfaatkan teknologi pengolahan air limbah domestik untuk daur ulang air. Sistem ini memungkinkan air limbah dari wastafel, pancuran, atau mesin cuci diproses dan digunakan kembali untuk keperluan non-potable, seperti pembilasan toilet atau penyiraman tanaman. Teknologi bangunan hijau sering kali mencakup sistem

pengolahan air limbah yang ramah lingkungan, seperti teknologi *greywater* dan *blackwater* treatment. *Greywater* adalah air limbah dari wastafel, pancuran, dan mesin cuci yang dapat diolah dan digunakan kembali untuk keperluan non-potable. Sistem ini sangat efektif untuk mengurangi konsumsi air bersih dan meminimalkan limbah yang dibuang ke saluran air. Sementara itu, *blackwater* (limbah dari toilet) dapat diolah dengan sistem bioreaktor atau komposting untuk menghasilkan pupuk organik. Teknologi pengolahan air limbah ini membantu mengurangi tekanan pada sumber daya air bersih dan mendukung prinsip ekonomi sirkular dalam pengelolaan sumber daya.



Gambar 5. 3. Memanen Air Hujan dan Manfaatnya

- Penggunaan Air Secara Efisien:** Teknologi efisiensi air dalam bangunan hijau mencakup instalasi perangkat hemat air, seperti keran dan toilet rendah aliran (*low-flow fixtures*) yang dirancang untuk mengurangi konsumsi air tanpa mengorbankan kenyamanan pengguna. Desain bangunan hijau juga mencakup penggunaan alat penghemat air seperti toilet dual-flush, keran rendah aliran, dan sistem irigasi yang efisien. Sensor otomatis pada keran dan sistem pengelolaan air berbasis teknologi cerdas dapat memastikan bahwa air hanya digunakan ketika diperlukan, menghindari pemborosan. Sistem ini dilengkapi dengan sensor otomatis yang meminimalkan pemborosan air, seperti keran yang hanya menyala saat diperlukan atau toilet yang menggunakan air sesuai kebutuhan.

C. Material Ramah Lingkungan

Penggunaan material bangunan yang ramah lingkungan adalah komponen penting dalam desain bangunan hijau. Material ramah lingkungan dipilih berdasarkan faktor-faktor seperti energi yang diperlukan untuk memproduksinya, emisi karbon yang dihasilkan selama proses produksinya, serta potensi untuk didaur ulang setelah penggunaannya (Pradana et al., 2021).

- **Penggunaan Material Daur Ulang:** Material daur ulang adalah bahan yang berasal dari proses pengolahan limbah bangunan atau produk yang sudah tidak digunakan lagi. Material bangunan yang berasal dari proses daur ulang, seperti beton daur ulang, baja bekas, atau kayu reklamasi, membantu mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru. Penggunaan material daur ulang ini juga mengurangi limbah konstruksi dan jejak karbon yang terkait dengan produksi material baru. Sebagai contoh, menggunakan baja daur ulang untuk konstruksi struktural mengurangi emisi karbon yang terkait dengan pembuatan baja baru dari bijih besi. Dengan menggunakan material daur ulang, kebutuhan akan bahan mentah baru berkurang, sehingga mengurangi eksploitasi sumber daya alam dan energi yang diperlukan untuk memproduksi bahan baru.
- **Bahan Bangunan Alami:** Dalam beberapa bangunan hijau, material alami seperti tanah, batu, kayu yang bersertifikat *Forest Stewardship Council (FSC)*, atau bambu sering kali digunakan karena jejak karbon rendah dan sifat alaminya yang berkelanjutan. Bambu, misalnya, tumbuh sangat cepat dan memiliki kekuatan tarik yang tinggi, menjadikannya alternatif yang sangat baik untuk kayu keras dalam konstruksi bangunan. Selain itu, bahan alami ini memiliki sifat insulasi yang baik dan tidak mengandung bahan kimia berbahaya, sehingga lebih sehat untuk penghuni bangunan.
- **Material dengan Jejak Karbon Rendah:** Material dengan jejak karbon rendah adalah bahan yang diproduksi dengan sedikit emisi karbon atau bahkan tanpa karbon sama sekali. Material inovatif seperti beton rendah karbon, bahan berbasis bioplastik, serta komposit alami seperti *hempcrete* (campuran serat hemp dan kapur) digunakan untuk mengurangi emisi karbon yang dihasilkan selama produksi dan aplikasi bahan bangunan. Bahan-bahan ini dirancang untuk memiliki umur panjang, mengurangi kebutuhan perbaikan atau penggantian, serta meningkatkan keberlanjutan bangunan secara keseluruhan. Penggunaan material seperti ini membantu mengurangi dampak lingkungan dari pembangunan secara signifikan.

D. Desain Bioklimatik dan Efisiensi Ruang

Desain bioklimatik adalah pendekatan desain yang mempertimbangkan iklim lokal dan kondisi lingkungan untuk menciptakan bangunan yang efisien secara energi dan nyaman bagi penghuninya. Desain ini memanfaatkan karakteristik alami seperti angin, sinar matahari, dan bayangan untuk mengurangi ketergantungan pada sistem mekanis. Desain bioklimatik berfokus pada pemanfaatan kondisi alamiah dan iklim lokal untuk memaksimalkan efisiensi energi bangunan, terutama dalam hal pencahayaan, ventilasi, dan pengaturan suhu. Dalam prinsip bangunan hijau, desain bioklimatik adalah upaya untuk memanfaatkan lingkungan secara cerdas guna mengurangi ketergantungan pada sistem mekanis yang boros energi.

- **Pertimbangan Iklim Lokal:** Desain bioklimatik bertujuan untuk memaksimalkan kenyamanan termal melalui penggunaan fitur alami. Misalnya, di wilayah tropis, bangunan dapat dirancang dengan atap yang melengkung dan overhang panjang untuk melindungi dari sinar matahari langsung, serta jendela yang dirancang untuk menangkap angin alami guna mendinginkan ruangan tanpa menggunakan pendingin udara. Di iklim dingin, desain bangunan dapat memanfaatkan sinar matahari musim dingin melalui kaca besar yang menghadap ke selatan untuk memaksimalkan pemanasan pasif. Desain bangunan yang memperhitungkan iklim lokal, seperti orientasi bangunan, bentuk atap, dan pemanfaatan material lokal, dapat mengurangi kebutuhan energi untuk pendinginan atau pemanasan. Sebagai contoh, bangunan di iklim panas sering kali dirancang dengan jendela yang menghadap utara atau selatan untuk mengurangi paparan langsung sinar matahari, sementara bangunan di iklim dingin dapat dirancang untuk menangkap lebih banyak sinar matahari di musim dingin.
- **Sirkulasi Udara Alami:** Desain yang memungkinkan sirkulasi udara alami dapat mengurangi kebutuhan energi untuk ventilasi mekanis. Penggunaan jendela yang bisa dibuka, ventilasi silang, dan atrium terbuka menciptakan aliran udara yang memadai tanpa memerlukan ventilasi buatan. Sirkulasi alami ini juga meningkatkan kualitas udara dalam ruangan, membuat bangunan lebih sehat bagi penghuninya. Desain yang mendukung ventilasi alami membantu menjaga sirkulasi udara yang baik tanpa memerlukan pendingin udara. *Cross-ventilation* atau ventilasi silang, di mana udara dapat bergerak bebas di antara jendela yang saling berhadapan, adalah contoh strategi desain yang memaksimalkan penggunaan aliran udara alami. Hal ini mengurangi

kebutuhan energi untuk sistem HVAC dan menciptakan lingkungan dalam ruangan yang lebih nyaman.

- **Pencahayaan Alami:** Melalui penggunaan insulasi yang baik, ventilasi alami, dan orientasi bangunan yang tepat, desain bioklimatik mengurangi ketergantungan pada sistem pemanas dan pendingin. Penggunaan dinding berinsulasi tinggi, jendela ganda, serta atap reflektif juga membantu menjaga suhu dalam bangunan tetap stabil dengan penggunaan energi yang minimal. Penggunaan pencahayaan alami melalui jendela besar, skylight, atau atrium dapat mengurangi kebutuhan energi untuk penerangan di siang hari. Desain yang memaksimalkan cahaya alami tidak hanya membantu mengurangi konsumsi listrik, tetapi juga meningkatkan kenyamanan dan produktivitas penghuni, karena pencahayaan alami dianggap lebih sehat dan menyenangkan daripada pencahayaan buatan.

Keempat prinsip ini membentuk dasar utama bangunan hijau yang tidak hanya membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga meningkatkan efisiensi dan kenyamanan bangunan. Penerapan teknologi hijau seperti panel surya, sistem pengelolaan air, material daur ulang, dan desain bioklimatik tidak hanya berkontribusi pada keberlanjutan, tetapi juga menawarkan solusi praktis untuk menghadapi tantangan lingkungan di masa depan. Dengan mengadopsi prinsip-prinsip di atas, bangunan hijau menawarkan solusi holistik yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga menguntungkan dari segi ekonomi dan kesejahteraan penghuni.

5.2 Teknologi Ramah Lingkungan dalam Bangunan

Penerapan teknologi ramah lingkungan dalam bangunan telah menjadi elemen penting dalam mendorong keberlanjutan dan mengurangi dampak negatif pembangunan terhadap lingkungan. Teknologi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi emisi karbon, meminimalkan limbah, serta memanfaatkan sumber daya alam secara bijaksana. Dengan adanya perubahan iklim dan meningkatnya kesadaran akan pentingnya kelestarian lingkungan, berbagai inovasi teknologi kini hadir untuk menciptakan bangunan yang lebih hijau dan efisien. Dalam upaya menciptakan bangunan yang ramah lingkungan dan mendukung keberlanjutan, teknologi terus berkembang dan menawarkan solusi yang lebih efisien serta berdampak rendah pada lingkungan. Teknologi terbaru dalam bangunan hijau berfokus pada penerapan energi terbarukan, pengelolaan sumberdaya air, material ramah lingkungan, dan teknologi

pengolahan limbah yang berkelanjutan. Berikut ini adalah beberapa teknologi ramah lingkungan yang banyak digunakan dalam bangunan modern (Güney, 2019):

A. Energi Terbarukan: Solusi Berkelanjutan untuk Bangunan Hijau

Penggunaan energi terbarukan telah menjadi komponen mendasar dalam pengembangan bangunan ramah lingkungan. Teknologi ini menawarkan alternatif yang berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang merusak lingkungan dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Bangunan yang memanfaatkan sumber energi seperti matahari, angin, dan panas bumi dapat beroperasi lebih efisien sambil memberikan kontribusi besar terhadap pengurangan jejak karbon global.

1) Panel Surya (Solar Panels)

Panel surya merupakan teknologi paling umum dan sering digunakan dalam bangunan hijau. Teknologi ini bekerja dengan mengubah sinar matahari menjadi energi listrik melalui sel-sel fotovoltaik yang menangkap energi matahari. Selain itu, penggunaan panel surya memberikan berbagai manfaat jangka panjang, antara lain:

- **Mengurangi Biaya Energi:** Panel surya memungkinkan bangunan untuk menghasilkan sebagian besar, atau bahkan seluruh kebutuhan listriknya, mengurangi biaya operasional jangka panjang secara signifikan. Dalam jangka panjang, ini dapat meningkatkan efisiensi ekonomi dan mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik konvensional.
- **Mengurangi Emisi Karbon:** Salah satu dampak positif utama dari penggunaan panel surya adalah penurunan emisi karbon. Dengan mengandalkan sumber energi terbarukan seperti matahari, bangunan dapat mengurangi pembakaran bahan bakar fosil yang menjadi penyebab utama emisi karbon dioksida.
- **Inovasi Sel Surya Perovskite:** Teknologi terbaru dalam sel surya termasuk penggunaan perovskite, bahan yang lebih efisien dalam menyerap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Sel surya perovskite ini lebih fleksibel dan dapat diterapkan pada permukaan yang tidak rata, bahkan di atap bangunan yang tidak memiliki struktur konvensional. Selain itu, sel ini lebih murah dan lebih mudah diproduksi dibandingkan dengan sel surya silikon tradisional, sehingga dapat memfasilitasi adopsi energi terbarukan yang lebih luas.

2) Energi Angin

Energi angin adalah sumber energi terbarukan lainnya yang semakin banyak digunakan dalam desain bangunan hijau, meskipun lebih sering diterapkan pada skala besar seperti ladang angin. Namun, dengan perkembangan teknologi, turbin angin kecil kini dapat diintegrasikan ke dalam desain bangunan, terutama di wilayah dengan potensi angin yang kuat.

- **Turbin Angin Skala Kecil:** Untuk bangunan tertentu, terutama gedung-gedung tinggi atau kawasan industri, turbin angin kecil dapat dipasang di atap atau di sekitar bangunan. Ini memungkinkan gedung untuk memanfaatkan angin sebagai sumber energi listrik tambahan, melengkapi sistem energi surya atau sumber energi terbarukan lainnya.
- **Integrasi dalam Desain Arsitektur:** Penerapan turbin angin dalam arsitektur modern memungkinkan bangunan untuk menggabungkan aspek fungsional dan estetika. Misalnya, beberapa bangunan tinggi telah mengintegrasikan turbin angin dalam desain fasad atau struktur atapnya untuk memaksimalkan potensi energi angin di lingkungan perkotaan.
- **Keberlanjutan Energi Listrik:** Seperti panel surya, penggunaan energi angin memungkinkan gedung untuk memproduksi energi listrik sendiri, sehingga mengurangi ketergantungan pada jaringan energi konvensional. Selain itu, energi angin tidak menghasilkan emisi langsung, sehingga turut berkontribusi dalam pengurangan jejak karbon global.

3) Energi Geothermal

Pemanfaatan energi geothermal (panas bumi) untuk sistem pemanas dan pendingin dalam bangunan menjadi solusi teknologi yang efisien dan ramah lingkungan. Sistem geothermal menggunakan panas yang disimpan di bawah permukaan bumi untuk menjaga suhu ruangan tetap nyaman sepanjang tahun tanpa memerlukan konsumsi energi yang besar dari sumber eksternal.

- **Sistem Pemanas dan Pendingin Geothermal:** Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan panas alami yang terdapat di dalam bumi untuk memanaskan bangunan di musim dingin dan mendinginkannya di musim panas. Sistem ini lebih efisien karena panas dari bumi relatif stabil sepanjang tahun, sehingga mengurangi kebutuhan akan energi tambahan untuk pengaturan suhu dalam ruangan.

- **Efisiensi Energi Tinggi:** Pemanas dan pendingin geothermal dapat menghemat energi hingga 70% dibandingkan dengan sistem pemanas dan pendingin konvensional. Selain itu, sistem ini lebih tahan lama dan memerlukan sedikit perawatan dibandingkan dengan teknologi HVAC tradisional.
- **Manfaat Lingkungan:** Karena tidak ada bahan bakar yang dibakar untuk mengoperasikan sistem geothermal, teknologi ini tidak menghasilkan emisi karbon, sehingga berkontribusi langsung pada pengurangan jejak karbon bangunan. Selain itu, sistem ini mengurangi penggunaan energi yang dihasilkan dari sumber tidak terbarukan seperti batu bara atau gas alam.

Pemanfaatan teknologi energi terbarukan, seperti panel surya, energi angin, dan geothermal, adalah landasan penting dalam mewujudkan bangunan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Teknologi-teknologi ini tidak hanya membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga menawarkan efisiensi energi dan pengurangan biaya operasional. Dengan adopsi yang lebih luas, energi terbarukan dapat menjadi kunci dalam menciptakan lingkungan binaan yang lebih hijau dan mendukung keberlanjutan jangka panjang.

B. Pengelolaan Sumber Daya Air dalam Bangunan Ramah Lingkungan

Pengelolaan sumber daya air yang efisien menjadi salah satu pilar penting dalam desain bangunan ramah lingkungan. Dalam konteks perubahan iklim dan pertumbuhan populasi yang cepat, pemanfaatan air yang bijaksana serta pengurangan penggunaan air bersih sangatlah krusial. Teknologi pengelolaan air modern menawarkan solusi inovatif yang tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan air, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan (Chandra Kirana, 2021).

• Sistem Pemanenan Air Hujan:

Sistem pemanenan air hujan merupakan teknologi yang sangat efektif untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber air bersih yang biasanya diambil dari penyedia air lokal. Proses ini melibatkan beberapa langkah kunci:

- **Pengumpulan dan Penyimpanan:** Air hujan dikumpulkan dari atap bangunan melalui sistem talang dan pipa, kemudian ditampung dalam tangki penyimpanan. Desain sistem ini harus memperhatikan kapasitas tangki yang cukup untuk menampung volume air hujan

yang diperkirakan, serta lokasi penampungan yang tidak mengganggu fungsi bangunan.

- **Filtrasi dan Pengolahan:** Sebelum digunakan, air hujan yang ditampung harus melalui proses filtrasi untuk menghilangkan kotoran dan partikel. Sistem filtrasi ini penting untuk memastikan kualitas air yang layak pakai, terutama jika air tersebut digunakan untuk keperluan seperti penyiraman tanaman atau toilet.
- **Penggunaan Kembali:** Air hujan yang telah disaring dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan non-konsumsi, seperti penyiraman taman, pengisian toilet, atau sebagai air pendingin. Dengan demikian, bangunan dapat mengurangi penggunaan air bersih dari sumber eksternal dan menghemat biaya operasional.

- **Pengolahan Air Limbah**

Sistem pengolahan air limbah domestik di tempat menjadi semakin penting dalam desain bangunan ramah lingkungan. Beberapa teknologi yang digunakan dalam pengolahan air limbah antara lain:

- **Greywater Recycling:** Sistem ini mengumpulkan air limbah dari sumber-sumber seperti pencucian tangan, mandi, atau mencuci piring. Air limbah ini kemudian diolah melalui proses penyaringan dan pemurnian, sehingga dapat digunakan kembali untuk irigasi taman atau pengisian toilet. Pendekatan ini secara signifikan mengurangi kebutuhan air bersih.
- **Blackwater Treatment:** Blackwater mengacu pada air limbah yang berasal dari toilet. Teknologi pengolahan blackwater biasanya lebih kompleks, melibatkan proses biologi dan kimia untuk mengolah limbah menjadi air bersih yang aman untuk digunakan. Sistem ini bisa berupa instalasi yang lebih kecil dan ramah lingkungan, seperti sistem biogas, yang juga dapat menghasilkan energi dari limbah.
- **Manfaat Lingkungan:** Dengan memproses dan menggunakan kembali air limbah, bangunan tidak hanya mengurangi dampak lingkungan dari pembuangan limbah tetapi juga menghemat penggunaan air bersih yang semakin langka.

- **Penggunaan Air secara Efisien**

Selain memanfaatkan air hujan dan mengolah air limbah, bangunan ramah lingkungan juga dirancang untuk mengoptimalkan penggunaan air dengan berbagai perangkat hemat air dan teknologi cerdas. Beberapa contoh teknologi yang digunakan meliputi:

- **Perangkat Hemat Air:** Keran dan toilet bertekanan rendah dirancang untuk menggunakan air lebih sedikit tanpa mengurangi fungsi. Misalnya, toilet dual-flush memungkinkan pengguna memilih jumlah air yang digunakan berdasarkan jenis limbah, sehingga menghemat air secara signifikan.
- **Sistem Irigasi Otomatis:** Sistem irigasi modern dilengkapi dengan sensor kelembaban tanah yang mampu mengukur kebutuhan air tanaman secara real-time. Dengan cara ini, air hanya digunakan ketika benar-benar diperlukan, sehingga menghindari pemborosan.
- **Monitoring dan Pengelolaan:** Teknologi IoT dapat digunakan untuk memantau konsumsi air secara terus menerus, memberikan data yang berharga untuk mengelola penggunaan air dan mendeteksi kebocoran atau inefisiensi dalam sistem. Sistem ini memungkinkan pengelola bangunan untuk mengambil tindakan yang tepat waktu dan efisien dalam pengelolaan sumber daya air.

Pengelolaan sumber daya air yang efektif adalah kunci dalam menciptakan bangunan ramah lingkungan. Dengan memanfaatkan sistem pemanenan air hujan, pengolahan air limbah, dan perangkat hemat air, bangunan tidak hanya dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan sumber daya air. Teknologi-teknologi ini memberikan solusi inovatif untuk tantangan pengelolaan air di era modern, memastikan bahwa air digunakan secara efisien dan berkelanjutan untuk generasi mendatang.

C. Material Ramah Lingkungan dalam Konstruksi Bangunan Hijau

Pemilihan material bangunan adalah salah satu aspek kunci dalam upaya mencapai keberlanjutan dalam industri konstruksi. Material ramah lingkungan berperan penting dalam menurunkan jejak karbon bangunan, baik melalui penggunaan sumber daya terbarukan maupun material hasil daur ulang. Dengan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dari konstruksi, semakin banyak arsitek dan pengembang yang berfokus pada penggunaan material yang lebih berkelanjutan. Berikut adalah beberapa jenis material ramah lingkungan yang semakin banyak digunakan dalam konstruksi bangunan hijau (Pradana et al., 2021):

• Material Daur Ulang

Material daur ulang adalah bahan yang diambil dari produk yang sudah tidak terpakai dan diproses kembali untuk digunakan dalam konstruksi baru. Beberapa jenis material daur ulang yang umum digunakan meliputi:

- **Baja:** Baja daur ulang berasal dari limbah industri dan bangunan yang telah tidak terpakai. Proses daur ulang baja mengurangi kebutuhan untuk menambang bijih besi baru dan menghemat energi dalam proses produksi.
- **Aluminium:** Aluminium adalah material ringan dan tahan korosi yang juga dapat didaur ulang tanpa kehilangan kualitasnya. Penggunaan aluminium daur ulang dalam konstruksi membantu mengurangi jejak karbon dan menghemat energi.
- **Kaca:** Kaca bekas dapat didaur ulang dan digunakan kembali dalam berbagai aplikasi bangunan, termasuk jendela dan fasad. Penggunaan kaca daur ulang mengurangi limbah konstruksi dan mengurangi kebutuhan akan produksi kaca baru.

Penggunaan material daur ulang tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga mendukung ekonomi sirkular dengan mengurangi pemborosan sumber daya dan limbah.

- **Kayu Rekayasa (Cross-Laminated Timber/CLT)**

Kayu rekayasa, terutama Cross-Laminated Timber (CLT), adalah salah satu inovasi signifikan dalam dunia konstruksi yang berfokus pada keberlanjutan. Keunggulan kayu rekayasa antara lain:

- **Alternatif untuk Baja dan Beton:** CLT menawarkan kekuatan dan ketahanan yang mirip dengan baja dan beton, namun dengan jejak karbon yang lebih rendah. Kayu menyerap karbon dioksida dari atmosfer selama masa pertumbuhannya, sehingga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca.
- **Keberlanjutan Sumber Daya:** Kayu yang digunakan untuk CLT sering kali berasal dari hutan yang dikelola secara berkelanjutan, sehingga tidak hanya membantu dalam penggunaan sumber daya terbarukan tetapi juga mendukung pelestarian hutan.
- **Kemudahan Konstruksi:** Penggunaan CLT memungkinkan proses konstruksi yang lebih cepat dan efisien, mengurangi waktu dan biaya proyek. Material ini juga memiliki kemampuan isolasi termal yang baik, membantu mengurangi kebutuhan energi untuk pemanasan dan pendinginan bangunan.

- **Bahan Bio-Komposit**

Bahan bio-komposit adalah alternatif berkelanjutan yang terbuat dari serat alami, seperti rami, bambu, atau serat tanaman lainnya, yang dicampur dengan resin atau matriks lainnya. Kelebihan bahan bio-komposit antara lain:

- **Ramah Lingkungan:** Bahan bio-komposit memiliki jejak karbon yang rendah dan dapat terurai secara alami, sehingga mengurangi dampak limbah konstruksi.
- **Kekuatan dan Ringan:** Bahan ini sering kali lebih kuat dibandingkan dengan bahan konvensional dan lebih ringan, menjadikannya pilihan yang ideal untuk berbagai aplikasi struktural dan non-struktural.
- **Isolasi Termal:** Bahan bio-komposit juga memiliki sifat isolasi termal yang baik, membantu menjaga suhu di dalam bangunan dan mengurangi penggunaan energi.

- **Beton Rendah Karbon**

Inovasi dalam teknologi beton telah memungkinkan pembuatan beton dengan emisi karbon yang lebih rendah. Beberapa jenis beton ramah lingkungan yang muncul antara lain:

- **Carbon-Capture Concrete:** Jenis beton ini dirancang untuk menyerap karbon dioksida dari atmosfer selama proses pengeringan. Dengan cara ini, beton tidak hanya digunakan sebagai bahan konstruksi, tetapi juga membantu mengurangi konsentrasi CO₂ di atmosfer.
- **Penggunaan Material Pengganti:** Dalam pembuatan beton, bahan pengganti seperti fly ash, slag, atau agregat daur ulang dapat digunakan untuk mengurangi jumlah semen yang dibutuhkan, yang merupakan salah satu penyebab utama emisi karbon dalam produksi beton.
- **Sistem Produksi Berkelanjutan:** Beberapa produsen beton telah mengadopsi praktik produksi berkelanjutan yang mengurangi energi yang digunakan dalam pembuatan beton, termasuk penggunaan energi terbarukan dan pengurangan limbah selama proses produksi.

Pemilihan material ramah lingkungan dalam konstruksi bangunan hijau adalah langkah penting menuju keberlanjutan dan efisiensi energi. Dengan menggunakan material daur ulang, kayu rekayasa, bahan bio-komposit, dan beton rendah karbon, bangunan dapat secara signifikan mengurangi jejak karbonnya dan berkontribusi pada pelestarian lingkungan. Adopsi material ini tidak hanya membantu memenuhi standar keberlanjutan, tetapi juga mendorong inovasi dalam desain dan teknik konstruksi, menciptakan ruang binaan yang lebih sehat dan berkelanjutan untuk generasi mendatang.

D. Pengelolaan Limbah Konstruksi dalam Bangunan Ramah Lingkungan

Pengelolaan limbah konstruksi menjadi salah satu aspek penting dalam desain dan implementasi bangunan ramah lingkungan. Fokus utama dari pengelolaan limbah ini adalah meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan melalui pengurangan, daur ulang, dan pemanfaatan kembali material yang dihasilkan selama proses konstruksi. Berikut adalah beberapa pendekatan dan teknologi yang dapat diterapkan untuk mencapai pengelolaan limbah konstruksi yang berkelanjutan:

- **Sistem Zero Waste**

Konsep zero waste berupaya untuk meminimalkan limbah dengan cara mengurangi, mendaur ulang, dan memanfaatkan kembali bahan-bahan yang ada. Dalam konteks konstruksi, penerapan prinsip ini melibatkan beberapa strategi berikut:

- **Perencanaan yang Cermat:** Mengimplementasikan perencanaan konstruksi yang cermat untuk meminimalkan limbah dari awal proyek. Hal ini termasuk pengukuran dan estimasi material yang tepat serta desain yang mempertimbangkan pengurangan material yang terbuang.
 - **Daur Ulang Material:** Menerapkan sistem untuk mendaur ulang material konstruksi yang tidak terpakai. Misalnya, puing-puing beton yang dihasilkan selama pembangunan dapat dihancurkan dan digunakan kembali sebagai agregat untuk beton baru atau sebagai material dasar untuk jalan dan fondasi.
 - **Pemanfaatan Kembali Bahan:** Menggunakan kembali bahan-bahan yang masih layak pakai dari proyek sebelumnya. Misalnya, kayu, batu bata, dan bahan lainnya dapat disortir dan digunakan kembali dalam proyek baru tanpa melalui proses daur ulang yang kompleks.
- **Teknologi Pengolahan Limbah Organik**

Pengelolaan limbah organik yang dihasilkan selama fase konstruksi dan operasional bangunan juga merupakan komponen penting dalam upaya keberlanjutan. Teknologi ini mencakup beberapa pendekatan:

- **Komposter Modern:** Menggunakan sistem komposting untuk mengolah limbah organik, seperti sisa makanan dan material tumbuhan, menjadi pupuk organik. Sistem komposter modern dapat mempercepat proses dekomposisi dan menghasilkan pupuk yang berguna untuk taman dan lanskap di sekitar bangunan.

- **Anaerobic Digesters:** Teknologi anaerobic digestion dapat digunakan untuk mengolah limbah organik menjadi biogas. Proses ini melibatkan penguraian bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi tanpa oksigen. Biogas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk keperluan pemanas atau listrik di lokasi pembangunan.
- **Sistem Pemanenan Energi:** Beberapa bangunan ramah lingkungan menerapkan sistem yang memungkinkan pemanfaatan energi dari limbah organik, baik melalui biogas atau metode lainnya. Ini tidak hanya membantu mengurangi limbah tetapi juga meningkatkan efisiensi energi bangunan.

Pengelolaan limbah konstruksi yang efektif sangat penting dalam menciptakan bangunan ramah lingkungan. Dengan menerapkan prinsip zero waste dan teknologi pengolahan limbah organik, proyek konstruksi dapat mengurangi dampak lingkungan dan mempromosikan keberlanjutan. Hal ini tidak hanya bermanfaat bagi lingkungan, tetapi juga memberikan keuntungan ekonomi melalui pengurangan biaya pengelolaan limbah dan pemanfaatan sumber daya yang lebih efisien. Adopsi teknologi ini merupakan langkah maju menuju industri konstruksi yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab.

Secara keseluruhan teknologi ramah lingkungan dalam bangunan merupakan kunci untuk menciptakan masa depan yang lebih berkelanjutan. Dengan adopsi energi terbarukan, pengelolaan sumberdaya air, pemanfaatan material yang ramah lingkungan, serta pengelolaan limbah konstruksi tidak hanya membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga memberikan keuntungan ekonomi dan sosial jangka panjang. Inovasi teknologi ini merupakan langkah penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan memenuhi kebutuhan pembangunan yang berkelanjutan.

5.3 Sertifikasi dan Standar Bangunan Hijau

Sertifikasi dan standar bangunan hijau telah menjadi salah satu instrumen kunci dalam mengarahkan industri konstruksi menuju praktik yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Dalam era yang semakin sadar akan perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya alam, keberadaan sistem sertifikasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa setiap bangunan yang dibangun, baik itu perumahan, komersial, maupun institusional, mematuhi prinsip-prinsip keberlanjutan yang holistik.

Keberlanjutan dalam konstruksi tidak hanya terkait dengan efisiensi energi atau pengurangan emisi karbon, tetapi juga menyentuh aspek-aspek yang lebih luas seperti pengelolaan air, penggunaan material ramah lingkungan, kualitas udara dalam ruangan, serta dampak sosial dan ekonomi terhadap komunitas sekitarnya. Melalui sertifikasi bangunan hijau, berbagai indikator keberlanjutan dapat dinilai secara sistematis, memungkinkan para pemangku kepentingan—mulai dari arsitek, insinyur, hingga pengembang—untuk merancang dan membangun struktur yang tidak hanya mengedepankan kenyamanan dan fungsionalitas, tetapi juga berdampak positif terhadap lingkungan alam dan manusia. Sistem sertifikasi ini memberikan kerangka kerja yang terstandarisasi, yang memastikan bahwa semua aspek keberlanjutan dipertimbangkan sejak tahap perencanaan hingga fase operasional bangunan. Dengan adanya standar yang jelas, seperti LEED, BREEAM, atau Green Star, pengembang dapat dengan mudah mengidentifikasi area yang memerlukan peningkatan, baik dalam hal efisiensi energi, pengelolaan air, pemilihan material, maupun aspek kesejahteraan penghuni. Sertifikasi juga memberikan jaminan kepada pengguna atau investor bahwa bangunan tersebut memenuhi standar tertinggi dalam keberlanjutan, sekaligus menambah nilai ekonomi dan reputasi bangunan di pasar global yang semakin kompetitif. Pada akhirnya, penerapan standar bangunan hijau tidak hanya berfungsi sebagai respons terhadap tantangan lingkungan global, tetapi juga sebagai wujud tanggung jawab sosial dalam membangun masa depan yang lebih berkelanjutan bagi generasi mendatang.

A. Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)

LEED adalah salah satu sistem sertifikasi bangunan hijau yang paling banyak diadopsi secara global. Dikembangkan oleh U.S. Green Building Council (USGBC), LEED bertujuan untuk memberikan pedoman yang jelas dan terukur bagi pembangunan gedung yang lebih ramah lingkungan serta berkelanjutan. Sistem sertifikasi ini mengukur keberlanjutan sebuah bangunan berdasarkan berbagai kriteria utama, memastikan bahwa bangunan tersebut tidak hanya efisien secara operasional tetapi juga memiliki dampak positif terhadap lingkungan dan kesehatan penghuninya (Elkhapery et al., 2021).

- **Efisiensi Energi**

Salah satu fokus utama dalam sertifikasi LEED adalah efisiensi energi, di mana bangunan dievaluasi berdasarkan kemampuan mereka dalam memanfaatkan energi secara optimal. Ini mencakup penerapan teknologi

energi terbarukan seperti panel surya atau turbin angin, penggunaan sistem pencahayaan hemat energi, dan peningkatan isolasi bangunan untuk mengurangi kebutuhan pemanasan dan pendinginan. Pengurangan emisi karbon melalui penggunaan energi yang lebih bersih dan efisien juga menjadi perhatian utama dalam kriteria ini.

- **Pengelolaan Air**

Selain energi, pengelolaan air merupakan aspek penting lainnya. Bangunan yang disertifikasi LEED diharuskan untuk meminimalkan penggunaan air melalui berbagai strategi, seperti instalasi perlengkapan hemat air, pemanenan air hujan untuk keperluan irigasi atau toilet, serta pengolahan air limbah agar bisa digunakan kembali. Dengan demikian, bangunan dapat mengurangi ketergantungan pada sumber air eksternal dan mendukung konservasi air.

- **Material dan Sumberdaya**

Kriteria berikutnya adalah material dan sumber daya, LEED mendorong penggunaan material yang memiliki dampak lingkungan minimal, seperti material daur ulang, material lokal yang mengurangi jejak karbon dari transportasi, serta bahan-bahan yang tidak menghasilkan limbah berbahaya. Pengelolaan limbah konstruksi juga dinilai, dengan perhatian khusus pada daur ulang material bangunan untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan.

- **Kualitas Lingkungan Dalam Ruangan**

Selain itu, kualitas lingkungan dalam ruangan menjadi bagian penting dari evaluasi LEED. Bangunan dinilai berdasarkan kemampuan mereka dalam menyediakan lingkungan yang sehat bagi penghuni, melalui pencahayaan alami yang cukup, ventilasi yang baik, penggunaan material dengan emisi kimia rendah, dan pengendalian kualitas udara dalam ruangan. Faktor-faktor ini memastikan bahwa selain efisiensi energi dan sumber daya, kesehatan dan kesejahteraan penghuni juga menjadi prioritas.

- **Tingkat Sertifikasi**

LEED memiliki beberapa tingkat sertifikasi, yaitu Certified, Silver, Gold, dan Platinum. Tingkatan ini diberikan berdasarkan skor total bangunan dalam memenuhi berbagai indikator keberlanjutan yang telah ditetapkan. Semakin tinggi skor bangunan, semakin tinggi pula tingkat sertifikasinya, dengan Platinum menjadi standar tertinggi yang menunjukkan performa keberlanjutan terbaik.

B. Building Research Establishment Environmental Assessment Method

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) adalah salah satu sistem penilaian keberlanjutan bangunan yang paling awal dan paling terkenal di Eropa. Dikembangkan di Inggris oleh Building Research Establishment (BRE), BREEAM telah menjadi standar utama untuk menilai kinerja keberlanjutan bangunan di seluruh dunia. Sistem ini memberikan panduan yang komprehensif bagi pengembang dan arsitek dalam merancang dan membangun bangunan yang tidak hanya efisien secara energi tetapi juga ramah lingkungan, nyaman untuk penghuni, dan terintegrasi dengan baik dalam konteks sosial dan infrastruktur (BRE Global Limited, 2016).

- **Manajemen Energi**

Salah satu aspek utama yang dinilai oleh BREEAM adalah **manajemen energi**, di mana penilaian difokuskan pada bagaimana bangunan mengelola konsumsi energi dan sumber energinya. Bangunan yang disertifikasi BREEAM harus mampu meminimalkan penggunaan energi melalui strategi yang meliputi efisiensi sistem pencahayaan, pemanas, dan pendingin, serta integrasi teknologi energi terbarukan. Manajemen energi yang baik tidak hanya mengurangi emisi karbon, tetapi juga mengurangi biaya operasional jangka panjang.

- **Transportasi**

Transportasi adalah kategori lain yang penting dalam penilaian BREEAM. Sistem ini menilai bagaimana bangunan terhubung dengan infrastruktur transportasi yang ada, termasuk aksesibilitas ke transportasi umum dan dukungan terhadap penggunaan kendaraan rendah emisi seperti sepeda atau mobil listrik. BREEAM juga mempertimbangkan ketersediaan fasilitas parkir sepeda, stasiun pengisian kendaraan listrik, serta fasilitas pejalan kaki, yang semuanya membantu mengurangi dampak lingkungan dari transportasi dan mendorong mobilitas yang lebih berkelanjutan.

- **Kesehatan dan Kesejahteraan**

Dalam hal **kesehatan dan kesejahteraan**, BREEAM memberikan perhatian khusus pada kualitas lingkungan dalam ruangan. Ini mencakup pencahayaan alami yang optimal, ventilasi yang baik, kualitas udara yang bersih, serta kenyamanan termal bagi penghuni. Tujuan dari penilaian ini adalah untuk memastikan bahwa bangunan tidak hanya efisien dalam hal energi dan sumber daya, tetapi juga menyediakan lingkungan yang sehat dan nyaman bagi penghuninya, yang pada akhirnya dapat meningkatkan produktivitas dan kualitas hidup.

- **Material**

Material juga menjadi fokus utama dalam sistem penilaian BREEAM. Bangunan dinilai berdasarkan penggunaan material yang ramah lingkungan, seperti material daur ulang atau material dengan jejak karbon rendah. Selain itu, BREEAM juga mendorong penggunaan material yang memiliki daya tahan tinggi dan dapat didaur ulang pada akhir masa pakainya, sehingga mengurangi limbah konstruksi dan dampak terhadap lingkungan.

- **Tingkat Sertifikasi**

Seperti sistem sertifikasi lainnya, BREEAM menawarkan beberapa **tingkat sertifikasi** berdasarkan kinerja keberlanjutan sebuah bangunan, mulai dari Pass, Good, Very Good, Excellent, hingga Outstanding. Tingkat sertifikasi ini mencerminkan sejauh mana bangunan telah memenuhi kriteria keberlanjutan yang ditetapkan oleh BREEAM, dengan "Outstanding" sebagai kategori tertinggi yang menunjukkan kinerja keberlanjutan yang luar biasa. Sertifikasi BREEAM tidak hanya menambah nilai ekonomi dan reputasi bangunan, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi dampak lingkungan dari sektor konstruksi di seluruh dunia.

C. Green Star

Green Star adalah sistem penilaian bangunan hijau yang dikembangkan dan dikelola oleh Green Building Council of Australia (GBCA), yang berfungsi sebagai panduan untuk mengukur keberlanjutan dalam industri konstruksi di Australia. Sistem ini menilai bangunan berdasarkan sejumlah kriteria utama yang dirancang untuk meminimalkan dampak lingkungan dan meningkatkan kualitas hidup bagi penghuninya. Green Star tidak hanya fokus pada aspek teknis seperti efisiensi energi dan penggunaan material berkelanjutan, tetapi juga menilai inovasi dalam desain dan pengelolaan bangunan (GBCA, 2020).

- **Manajemen**

Salah satu aspek yang menjadi perhatian dalam sertifikasi Green Star adalah **manajemen**, yang berfokus pada pengelolaan proyek konstruksi secara efisien dan bertanggung jawab. Ini mencakup pengelolaan limbah konstruksi, penggunaan sumber daya yang bijak, dan pelaksanaan praktik yang mendukung keberlanjutan selama proses pembangunan. Dengan penerapan manajemen yang baik, proyek bangunan tidak hanya dapat mengurangi limbah, tetapi juga menghemat biaya dan mempercepat waktu penyelesaian konstruksi.

- **Energi**

Energi juga menjadi komponen penting dalam penilaian Green Star. Bangunan dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam menghemat energi, baik melalui penggunaan sistem pemanas, pencahayaan, dan pendingin yang efisien, maupun integrasi sumber energi terbarukan seperti panel surya. Sertifikasi Green Star mendorong penggunaan teknologi yang dapat mengurangi konsumsi energi konvensional dan meminimalkan emisi karbon, yang sejalan dengan target keberlanjutan global dalam mengurangi jejak karbon dari sektor konstruksi.

- **Material**

Material yang digunakan dalam pembangunan juga merupakan faktor kunci yang dinilai oleh Green Star. Sistem ini memberikan penekanan pada penggunaan material berkelanjutan, termasuk material yang dapat didaur ulang dan memiliki jejak karbon rendah. Material yang dipilih harus mempertimbangkan siklus hidupnya, dari produksi hingga pembuangan, guna memastikan bahwa dampaknya terhadap lingkungan diminimalisir.

- **Inovasi**

Di luar kriteria teknis, inovasi dalam desain dan konstruksi juga dinilai dalam sertifikasi Green Star. Bangunan yang mampu menerapkan pendekatan inovatif yang meningkatkan keberlanjutan, seperti teknologi baru atau praktik pengelolaan sumber daya yang lebih efisien, dapat memperoleh poin tambahan. Ini memberikan insentif bagi para desainer dan pengembang untuk terus mencari cara baru dalam memperbaiki kinerja bangunan dari sudut pandang keberlanjutan.

Sistem Green Star menilai bangunan pada skala dari **1 hingga 6 bintang**, dengan 6 bintang dianggap sebagai standar tertinggi yang menunjukkan performa keberlanjutan yang luar biasa. Sebuah bangunan yang menerima sertifikasi 6 bintang diakui sebagai “world leadership” dalam praktik pembangunan hijau, menunjukkan bahwa bangunan tersebut tidak hanya memenuhi tetapi melampaui standar keberlanjutan yang ada

D. Excellence in Design for Greater Efficiencies (EDGE)

EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) adalah standar bangunan hijau yang dikembangkan oleh International Finance Corporation (IFC), yang merupakan bagian dari Bank Dunia. Sertifikasi ini dirancang khusus untuk negara berkembang, dengan tujuan memberikan solusi keberlanjutan yang dapat diakses, praktis, dan terjangkau. EDGE menawarkan pendekatan yang sederhana namun efektif dalam mencapai efisiensi energi dan pengelolaan sumber daya, serta fokus pada pengurangan dampak lingkungan dari bangunan (Internasional Finance Corporatin, 2013).

- **Pengurangan Penggunaan Energi**

Salah satu fokus utama sertifikasi EDGE adalah ****pengurangan penggunaan energi****. Bangunan yang disertifikasi EDGE harus mampu mengurangi konsumsi energi setidaknya sebesar 20% dibandingkan dengan bangunan konvensional. Hal ini dapat dicapai melalui berbagai strategi, termasuk penggunaan teknologi seperti sistem pencahayaan LED, peralatan hemat energi, dan integrasi sumber energi terbarukan seperti panel surya. Penghematan energi ini tidak hanya berdampak positif pada lingkungan dengan mengurangi emisi karbon, tetapi juga mengurangi biaya operasional jangka panjang bagi pemilik bangunan.

- **Penghematan Air**

Selain efisiensi energi, penghematan air juga menjadi salah satu kriteria utama dalam sertifikasi EDGE. Teknologi hemat air, seperti keran bertekanan rendah, sistem pemanenan air hujan, dan toilet hemat air, digunakan untuk mengurangi konsumsi air dalam bangunan. Pengelolaan air yang efisien ini sangat penting, terutama di negara berkembang di mana akses terhadap air bersih mungkin terbatas. Dengan menerapkan solusi yang memungkinkan penggunaan air secara lebih bijak, bangunan EDGE membantu menjaga sumber daya air sekaligus mengurangi beban pada infrastruktur air setempat.

- **Material**

Material yang digunakan dalam konstruksi bangunan juga menjadi perhatian utama dalam sertifikasi EDGE. EDGE mendorong penggunaan material dengan jejak karbon rendah dan yang dapat didaur ulang, sehingga proses konstruksi bangunan tidak hanya lebih ramah lingkungan, tetapi juga lebih berkelanjutan. Material seperti beton rendah karbon, bahan daur ulang, dan material alami seperti kayu dari sumber yang bertanggung jawab sering digunakan untuk mencapai kriteria ini.

Keunggulan utama dari sertifikasi EDGE adalah pendekatannya yang praktis dan mudah diterapkan di pasar negara berkembang. Sistem ini memberikan alat yang sederhana untuk menghitung potensi penghematan energi, air, dan material di proyek bangunan, yang memungkinkan pengembang untuk dengan cepat mengidentifikasi strategi keberlanjutan yang efektif. Fleksibilitas dan biaya yang lebih rendah menjadikan EDGE sebagai pilihan yang ideal untuk negara-negara berkembang yang berusaha mengadopsi praktik pembangunan hijau tanpa mengorbankan keterjangkauan atau aksesibilitas.

Green Building Index (GBI)

Green Building Index (GBI) adalah sistem sertifikasi bangunan hijau yang dikembangkan khusus untuk konteks iklim tropis dan lingkungan di Asia Tenggara, terutama Malaysia. Sistem ini memberikan panduan bagi arsitek, insinyur, dan pengembang untuk merancang bangunan yang lebih ramah lingkungan, efisien energi, dan berkelanjutan, sambil tetap mempertimbangkan tantangan iklim dan sosial-ekonomi di kawasan tersebut.

- **Efisiensi Energi**

Salah satu kriteria utama yang dinilai dalam GBI adalah efisiensi energi. Di kawasan tropis yang seringkali memiliki suhu tinggi dan kelembapan yang tinggi, pengelolaan energi sangat penting untuk menjaga kenyamanan termal bangunan tanpa mengandalkan konsumsi energi yang berlebihan. GBI mendorong penerapan teknologi seperti penggunaan sistem pendingin udara yang efisien, pemanfaatan energi terbarukan seperti panel surya, serta desain bangunan yang memungkinkan ventilasi alami dan pencahayaan maksimal. Dengan cara ini, bangunan dapat secara signifikan mengurangi jejak karbonnya.

- **Pengelolaan Air**

Pengelolaan air juga menjadi fokus penting dalam GBI, mengingat tantangan air di wilayah tropis yang sering mengalami hujan deras namun juga rentan terhadap kekeringan di beberapa musim. Teknologi hemat air seperti sistem pemanenan air hujan dan pengolahan air limbah sangat didorong dalam sertifikasi ini, dengan tujuan memaksimalkan penggunaan air yang tersedia dan mengurangi ketergantungan pada pasokan air bersih dari sumber eksternal.

- **Kualitas Lingkungan Dalam Ruangan**

GBI juga menilai kualitas lingkungan dalam ruangan, memastikan bahwa bangunan tidak hanya ramah lingkungan dari segi energi dan sumber daya, tetapi juga menyediakan ruang yang sehat dan nyaman bagi penghuni. Hal ini dicapai dengan memastikan adanya ventilasi alami yang baik, pencahayaan alami yang cukup, serta kualitas udara dalam ruangan yang tinggi. Penggunaan material non-toksik dan desain yang memperhatikan aliran udara alami menjadi bagian penting dari penilaian ini.

E. Material Berkelanjutan

Selain itu, GBI mendorong penggunaan material berkelanjutan dalam konstruksi bangunan. Material yang memiliki dampak rendah terhadap lingkungan, seperti bahan daur ulang, material alami, atau bahan lokal yang diproduksi secara berkelanjutan, menjadi pilihan utama dalam pembangunan bangunan yang disertifikasi oleh GBI. Penggunaan material ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan dari proses konstruksi, tetapi juga mendukung ekonomi lokal.

- **Tingkat Sertifikasi**

GBI menawarkan berbagai tingkat sertifikasi yang mencerminkan tingkat keberlanjutan sebuah bangunan, yaitu Certified, Silver, Gold, dan Platinum, dengan Platinum sebagai level tertinggi yang menunjukkan bangunan dengan performa lingkungan terbaik. Tingkat sertifikasi ini didasarkan pada pencapaian skor dalam kategori penilaian yang mencakup efisiensi energi, pengelolaan air, kualitas lingkungan dalam ruangan, material berkelanjutan, serta kategori lainnya yang berkaitan dengan keberlanjutan bangunan.

5.4 Sertifikasi Bangunan Hijau di Indonesia

Di Indonesia, sertifikasi bangunan hijau diatur oleh berbagai regulasi pemerintah dan juga didukung oleh inisiatif swasta. Pemerintah berperan melalui Undang-Undang Bangunan Gedung (**UUBG**) **Nomor 28 Tahun 2002**, yang menetapkan bahwa Bangunan Gedung Hijau (BGH) harus memenuhi Standar Teknis Bangunan Gedung. Ini mencakup kinerja yang signifikan dalam hal penghematan energi, air, serta sumber daya lainnya melalui penerapan prinsip-prinsip bangunan hijau sesuai dengan fungsi dan klasifikasi bangunan. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (**Permen PUPR**) **Nomor 21 Tahun 2021** memberikan kerangka yang lebih spesifik dalam penerapan undang-undang ini, memastikan bahwa bangunan hijau tidak hanya memenuhi standar teknis, tetapi juga memiliki kinerja lingkungan yang diukur secara menyeluruh (Peraturan Pemerintah No 16 tahun 2021, 2021).

Selain peran pemerintah, masyarakat Indonesia juga didorong untuk berpartisipasi dalam gerakan bangunan hijau melalui organisasi swadaya masyarakat seperti **Green Building Council Indonesia** (GBCI). Organisasi ini berperan penting dalam mengedukasi publik mengenai pentingnya praktik terbaik lingkungan di sektor bangunan. GBCI juga aktif memfasilitasi transformasi berkelanjutan dalam industri bangunan dengan tujuan mengubah pasar bangunan menuju penerapan prinsip-prinsip bangunan hijau. Organisasi ini bekerja sama dengan berbagai pemangku kepentingan, termasuk profesional konstruksi, pengembang, lembaga pendidikan, dan pemerintah untuk mempromosikan kesadaran dan penerapan bangunan hijau (Direktirat Penilaian, 2014).

Salah satu kontribusi penting GBCI adalah melalui sertifikasi bangunan hijau menggunakan alat penilaian unik yang dikenal sebagai **Greenship**. Program ini memberikan sertifikasi kepada bangunan yang memenuhi standar keberlanjutan di berbagai kategori, seperti pengelolaan energi, efisiensi air, penggunaan material berkelanjutan, dan kesehatan lingkungan dalam ruangan. GBCI juga berkolaborasi dengan organisasi internasional dan lokal lainnya untuk memastikan bahwa standar yang diterapkan di Indonesia sesuai dengan praktik global.

Dengan menjadi anggota tetap dari **Green Building Council World**, GBC Indonesia berperan sebagai perwakilan resmi Indonesia dalam komunitas bangunan hijau global. Ini memastikan bahwa sertifikasi bangunan hijau di Indonesia tidak hanya relevan secara lokal tetapi juga diakui dan dihormati di panggung internasional, memberikan keuntungan kompetitif bagi bangunan yang disertifikasi di Indonesia.

Saat ini, Green Building Council Indonesia (GBCI) mengelola dua sistem sertifikasi bangunan hijau yang berbeda, yaitu sertifikasi GREENSHIP dan sertifikasi EDGE.

Sertifikasi GREENSHIP didasarkan pada alat pemeringkatan yang dikembangkan oleh GBCI untuk menilai keberlanjutan bangunan di berbagai aspek. Sertifikasi ini dirancang untuk mencakup berbagai jenis proyek bangunan, yang saat ini mencakup enam kategori:

- **Bangunan Baru:** Sertifikasi untuk bangunan yang baru dibangun dengan fokus pada keberlanjutan mulai dari perencanaan hingga konstruksi.
- **Bangunan Lama:** Untuk bangunan yang telah ada dan membutuhkan evaluasi serta peningkatan keberlanjutan.
- **Ruang Interior:** Sertifikasi ini dirancang untuk menilai ruang interior bangunan, memastikan aspek ramah lingkungan diterapkan dalam desain dan penggunaan interior.
- **Rumah:** Fokus pada penerapan prinsip bangunan hijau untuk rumah tinggal.
- **Lingkungan Sekitar:** Menilai keberlanjutan area yang lebih luas di sekitar bangunan, seperti komunitas atau kawasan pemukiman.
- **Net Zero Healthy:** Sertifikasi yang difokuskan pada bangunan yang mampu mencapai emisi karbon nol dengan tetap mempertahankan kesehatan dan kenyamanan penghuninya.



*Gambar 5. 4. Gedung Kementrian PUPR dan Mina Bahari KKP
peraih penghargaan ASEAN Energy Award 2019 & 2023*

Selain itu, GBCI juga bekerja sama dengan **International Finance Corporation** (IFC) untuk mengelola sertifikasi EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies). Sertifikasi ini dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan negara berkembang dengan tujuan memberikan solusi keberlanjutan yang terjangkau dan cepat. EDGE berfokus pada pengurangan konsumsi energi, air, dan material dengan jejak karbon rendah.

Dengan menjalankan kedua sistem ini, GBCI menyediakan pendekatan yang beragam dan fleksibel untuk meningkatkan praktik bangunan hijau di berbagai skala dan jenis proyek, baik dalam konteks lokal maupun global.

Kesimpulan tentang **sertifikasi bangunan hijau** secara keseluruhan adalah bahwa sertifikasi ini memainkan peran penting dalam mendorong praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Sertifikasi bangunan hijau menyediakan standar dan pedoman yang membantu pengembang, arsitek, dan pemilik bangunan merancang, membangun, serta mengoperasikan bangunan dengan dampak lingkungan yang lebih rendah.

Berbagai sistem sertifikasi seperti **LEED**, **BREEAM**, **Green Star**, **EDGE**, **GBI**, dan **GREENSHIP** menilai bangunan berdasarkan kriteria seperti efisiensi energi, penggunaan material ramah lingkungan, pengelolaan air, dan kualitas lingkungan dalam ruangan. Sistem-sistem ini juga mempertimbangkan aspek sosial dan ekonomi, sehingga menciptakan bangunan yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga sehat dan nyaman bagi penghuninya serta ekonomis dalam operasionalnya.

Sertifikasi bangunan hijau meningkatkan kesadaran dan tanggung jawab lingkungan dalam sektor konstruksi, mendukung pengurangan emisi karbon, efisiensi energi, dan pelestarian sumber daya alam. Selain itu, bangunan yang bersertifikasi hijau memiliki daya tarik lebih bagi investor dan penghuni karena dapat mengurangi biaya operasional dan menawarkan lingkungan yang lebih sehat.

Secara keseluruhan, sertifikasi bangunan hijau berfungsi sebagai alat transformasi penting dalam menciptakan sektor konstruksi yang berkelanjutan, efisien, dan lebih berkontribusi terhadap penanggulangan perubahan iklim.

Bab 6

Sistem Mekanikal, Elektrikal, dan Plumbing (MEP)

L.M.F. Purwanto; Ridha Wahyutomo; Firmansyah Bachtiar

6.1 Prinsip Dasar Sistem Mekanikal dalam Bangunan

Sistem mekanikal dalam bangunan modern telah berkembang menjadi jaringan kompleks yang tidak hanya menjamin kenyamanan penghuni tetapi juga memainkan peran kunci dalam efisiensi energi dan keberlanjutan bangunan. Menurut ASHRAE Handbook 2023, sistem mekanikal kontemporer mengkonsumsi 40-60% total energi bangunan, sekaligus menyumbang 35% dari biaya konstruksi awal untuk bangunan komersial skala besar. Pemahaman mendalam tentang prinsip dasar sistem ini menjadi fondasi penting dalam merancang bangunan yang responsif terhadap tantangan lingkungan dan kebutuhan pengguna abad ke-21.

Prinsip pertama yang mendasari sistem mekanikal bangunan adalah **keseimbangan termodinamika**, di mana pertukaran panas antara bangunan dan lingkungannya harus dikelola secara optimal. Konsep ini melibatkan tiga mekanisme utama: konduksi melalui material bangunan, konveksi melalui aliran udara, dan radiasi melalui permukaan bangunan (Cengel & Ghajar, 2023). Dalam praktiknya, prinsip ini diwujudkan melalui sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) yang tidak lagi berfungsi sebagai unit terpisah tetapi terintegrasi dalam konsep building-as-a-system. Contoh mutakhir adalah penerapan radiant cooling systems yang menggabungkan pelat beton aktif (active chilled beams) dengan ventilasi displacement, mengurangi konsumsi energi hingga 50% dibandingkan sistem udara paksa konvensional (Schiavon et al., 2023).

Kontrol lingkungan mikro telah berevolusi dari pendekatan satu-untuk-semua (one-size-fits-all) menjadi sistem yang sangat tersegmentasi dan responsif. Penelitian terbaru di Center for the Built Environment UC Berkeley (2023) mengembangkan konsep personal environmental control systems yang memungkinkan setiap individu mengatur kondisi termal dalam radius 1.5 meter melalui aplikasi smartphone. Sistem ini menggunakan jaringan sensor IoT dan outlet udara lokal yang dapat menyesuaikan kecepatan,

suhu, dan arah aliran udara secara real-time. Dalam skala makro, integrasi antara sistem mekanikal dengan elemen arsitektur pasif seperti double-skin facades dan thermal mass optimization menjadi standar baru dalam desain bangunan performa tinggi (Hensen & Lamberts, 2023).

Prinsip **ventilasi cerdas** telah mengalami transformasi paradigma sejak pandemi COVID-19. Standar ventilasi ASHRAE 62.1-2023 sekarang merekomendasikan sistem yang mampu beradaptasi dengan kepadatan hunian dan kualitas udara dalam ruangan secara dinamis. Teknologi mutakhir seperti demand-controlled ventilation (DCV) dengan sensor CO₂ dan VOC (volatile organic compounds) dapat menyesuaikan laju pertukaran udara dari 0.5 hingga 8 ACH (air changes per hour) berdasarkan kebutuhan aktual (Persily & de Jonge, 2023). Inovasi lain termasuk sistem filtrasi elektrostatik bipolar yang mampu menangkap partikel hingga 0.01 mikron dengan pressure drop 50% lebih rendah dari filter HEPA konvensional (Zhang et al., 2023).

Dalam aspek **distribusi energi termal**, terjadi pergeseran dari sistem sentralisasi ke jaringan desentralisasi yang lebih resilien. Sistem jaringan dingin perkotaan (district cooling systems) generasi keempat sekarang menggabungkan thermal energy storage dengan pompa panas cerdas yang dapat beroperasi secara bidireksional, berfungsi sebagai penyimpan energi termal ketika terdapat surplus energi terbarukan (Rezaie & Rosen, 2023). Pada skala bangunan, perkembangan micro-channel refrigerant distribution systems memungkinkan efisiensi perpindahan panas 30% lebih tinggi dengan charge refrigerant 60% lebih sedikit dibandingkan sistem konvensional (Kim & Braun, 2023).

Integrasi sistem mekanikal dengan struktur bangunan mencapai kemajuan signifikan melalui konsep thermally active building systems (TABS). Inovasi terbaru di ETH Zurich (Le Dréau & Heiselberg, 2023) berhasil mengembangkan beton termokromik yang mengandung phase-change materials (PCM) dalam agregatnya, mampu menyimpan dan melepas panas latens secara otomatis berdasarkan suhu lingkungan. Sistem ini diintegrasikan dengan jaringan pipa kapiler berdiameter 3mm yang tertanam dalam pelat lantai, menciptakan permukaan radiasi yang sangat homogen dengan respon termal cepat.



Gambar 6. 1. *Thermally active building systems (TABS)*

Prinsip **resilience dan redundansi** menjadi pertimbangan utama dalam desain sistem mekanikal modern. Bangunan pencakar langit terbaru seperti Salesforce Tower di San Francisco mengadopsi konsep N+1 redundancy untuk semua sistem kritis, termasuk multiple chilled water plants yang dapat dioperasikan secara independen (ASHRAE Journal, 2023). Pendekatan "load-shedding" melalui zoning cerdas memungkinkan bangunan tetap beroperasi pada kapasitas terbatas selama pemadaman listrik, menggunakan hanya 20% dari kebutuhan energi normal.

Tantangan utama dalam implementasi prinsip-prinsip ini meliputi:

1. Koordinasi multidisplin yang kompleks antara arsitek, insinyur, dan kontraktor
2. Biaya awal yang lebih tinggi untuk sistem berteknologi maju
3. Kebutuhan pemeliharaan berbasis prediktif dengan dukungan AI

Namun studi lifecycle analysis oleh NREL (2023) menunjukkan bahwa investasi dalam sistem mekanikal mutakhir dapat mencapai ROI dalam 5-7 tahun melalui penghematan energi dan peningkatan produktivitas penghuni.

6.2 Sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning)

(Ridha Wahyutomo)

Berdasarkan penelitian dari The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS) pada tahun 2001, 87% aktifitas manusia ada di dalam ruang (*indoor activity*). Dengan kalimat lain, dalam 1 hari ada 20,88 jam adalah rata-rata waktu yang dihabiskan manusia untuk berada di dalam ruangan. Oleh karena itu, penyediaan udara di sebuah bangunan harus memberikan udara yang hampir bebas dari debu, bau, kimia dan polutan radioaktif. Khususnya jika dalam proses pelayanan kesehatan yang terdapat pasien dengan keluhan

sakit di area pernafasan. Dalam hal demikian, sistem udara ditujukan untuk memberikan udara yang dapat berselang-seling berganti (*intermittent*).

HVAC Heating, Ventilation, dan Air Conditioning merupakan kesatuan fungsi pemanas, ventilasi, dan pendingin udara. Akronim ini menggambarkan tiga fungsi yang digabungkan dalam penataan udara, khususnya untuk menciptakan tatanan udara yang berkualitas. Dalam sistem HVAC dilengkapi dengan alat kendali kelembaban dan filter. Pengendali kelembaban untuk mengatur kelembaban udara. Alat ini dapat menambah atau mengurangi kelembaban sesuai dengan kebutuhan, sehingga menciptakan lingkungan yang nyaman. Adapun filter menyaring partikel-partikel seperti debu, serbuk sari, dan polutan lainnya. Filter ini membantu menjaga kualitas udara dalam ruangan.

Heating, Ventilation, dan Air Conditioning memainkan peran dalam proses yang berlangsung di dalam bangunan tersebut untuk menciptakan lingkungan yang nyaman dan sehat, baik di rumah, kantor, gedung komersial, maupun industri. HVAC akan mengatur pemasukan udara yang berkualitas, aliran udara yang adekuat dalam mengeliminasi polutan, pengaturan temperatur, pengaturan kelembaban, bahkan pengaturan tekanan. Dengan implementasi HVAC, tata letak arsitektur akan terpengaruh seperti posisi *airlock*, pintu dan lobi. Komponen arsitektural ini akan menentukan tekanan dalam ruang dan fungsi pencegahan kontaminasi silang antar ruang.

A. Kualitas Udara

Beberapa hal yang harus ditata terkait penyediaan kualitas udara:

1) Intake Udara Luar (*Outdoor Intake*)

Intake udara luar, juga dikenal sebagai outdoor intake, adalah komponen penting dalam sistem ventilasi dan pendingin udara di berbagai bangunan. Intake ini harus ditempatkan sejauh mungkin dan terarah, tidak asal menghembuskan udara. Tujuan dari intake udara luar adalah untuk mengambil udara segar dari luar dan memasukkannya ke dalam bangunan untuk memastikan sirkulasi udara yang sehat. Berikut adalah beberapa prinsip dasar dan pedoman untuk peletakkan intake udara luar:

(a) Jarak dari sumber polusi

Intake udara luar harus ditempatkan sedemikian rupa sehingga jauh dari sumber polusi seperti saluran knalpot, tempat sampah, atau sistem ventilasi yang mengeluarkan udara kotor. Hal ini untuk menghindari

pengambilan udara yang tercemar dan memastikan kualitas udara dalam ruangan yang baik.

(b) Ketinggian intake

Intake udara luar sebaiknya ditempatkan pada ketinggian yang cukup untuk menghindari pengambilan udara yang tercemar oleh kendaraan, debu jalanan, atau pencemaran udara di permukaan tanah. Idealnya, intake udara luar harus ditempatkan di atas level tanah dan di atas tingkat pencemaran potensial. Tidak kurang dari 1,8 m di atas permukaan lantai, atau jika dipasang di atas atap pada 0,9 m di atas permukaan atap.

(c) Penghalang fisik

Intake udara luar harus dilindungi oleh penghalang fisik, seperti *grating* atau filter, untuk mencegah masuknya hewan, serangga, dan benda-benda asing lainnya ke dalam sistem ventilasi. Penghalang fisik ini juga membantu menjaga kebersihan udara yang masuk ke dalam bangunan.

(d) Arah angin dominan

Intake udara luar sebaiknya ditempatkan pada sisi bangunan yang terkena angin dominan. Hal ini membantu dalam mengoptimalkan aliran udara segar ke dalam bangunan. Jika memungkinkan, perencanaan arah intake harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti pola angin setempat dan kecepatan angin rata-rata.

(e) Filter udara

Intake udara luar harus dilengkapi dengan filter udara yang efektif untuk menghilangkan partikel-partikel debu, polutan udara, dan alergen lainnya sebelum udara masuk ke dalam sistem ventilasi. Filter udara harus diperiksa dan dibersihkan secara teratur untuk menjaga kualitas udara yang masuk ke dalam bangunan.

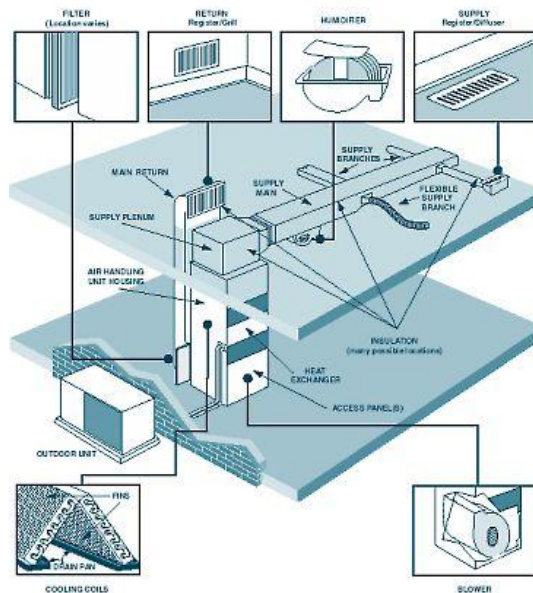
(f) Jarak dari ventilasi lainnya

Intake udara luar sebaiknya ditempatkan dengan jarak yang memadai dari ventilasi lainnya, seperti exhaust fan atau outlet udara. Hal ini membantu dalam menghindari sirkulasi udara yang tidak diinginkan antara intake dan exhaust, serta menjaga keseimbangan tekanan udara yang baik di dalam bangunan. Arahkan jarak tidak kurang dari 9 m dari beberapa area seperti cerobong outlet buangan dari peralatan pembakaran, outlet buangan ventilasi atau bangunan yang berdekatan, menara pendingin, cerobong *vent plumbing* (*ventilasi plomeri*), dan area yang dapat mengumpulkan gas buang kendaraan dan asap berbahaya lainnya.

2) Outlet Pembuangan (Exhaust Outlets)

Outlet pembuangan (*exhaust outlets*) adalah komponen yang digunakan dalam sistem pembuangan untuk mengeluarkan gas buang dari suatu sistem. Outlet pembuangan terutama digunakan dalam sistem pemanas dan sistem ventilasi.

Fungsi utama outlet pembuangan adalah mengarahkan gas buang dari sistem keluar dari kendaraan atau bangunan. Gas buang yang dihasilkan oleh sistem mengandung berbagai zat berbahaya dan polutan, seperti karbon monoksida, hidrokarbon, nitrogen oksida, dan partikel-partikel kecil. Outlet pembuangan ini harus ditempatkan minimal 3 m diatas permukaan lantai dan jauh dari pintu, area yang dihuni dan pengoperasian jendela. Lokasi yang lebih baik dari outlet pembuangan berdiri tegak ke atas atau horizontal jauh dari intake udara luar.



Gambar 6. 2. Skema inlet dan outlet tata udara

3) Filter Udara

Filter udara adalah komponen yang digunakan untuk membersihkan udara dari partikel-partikel padat, debu, polutan, dan kontaminan lainnya sebelum udara masuk ke dalam sistem ventilasi atau mesin. Filter udara biasanya digunakan dalam sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air*

Conditioning) dan peralatan lain yang membutuhkan sirkulasi udara yang bersih.

Filter udara bekerja dengan menangkap partikel-partikel padat yang terbawa oleh udara melalui media penyaringannya. Media penyaring tersebut dapat terbuat dari berbagai bahan, seperti serat kertas, serat sintetis, serat logam, atau kombinasi dari bahan-bahan tersebut. Partikel yang lebih besar dari ukuran pori filter akan terjebak di dalamnya, sementara udara bersih akan terus mengalir ke dalam sistem.

Penting untuk secara teratur membersihkan atau mengganti filter udara agar tetap efektif. Jika filter udara terlalu kotor atau tersumbat, dapat mengurangi aliran udara yang masuk ke sistem, menyebabkan penurunan performa dan efisiensi. Selain itu, filter udara yang kotor juga dapat menyebabkan penumpukan debu dan kotoran di dalam sistem, yang dapat merusak komponen-komponen lain.

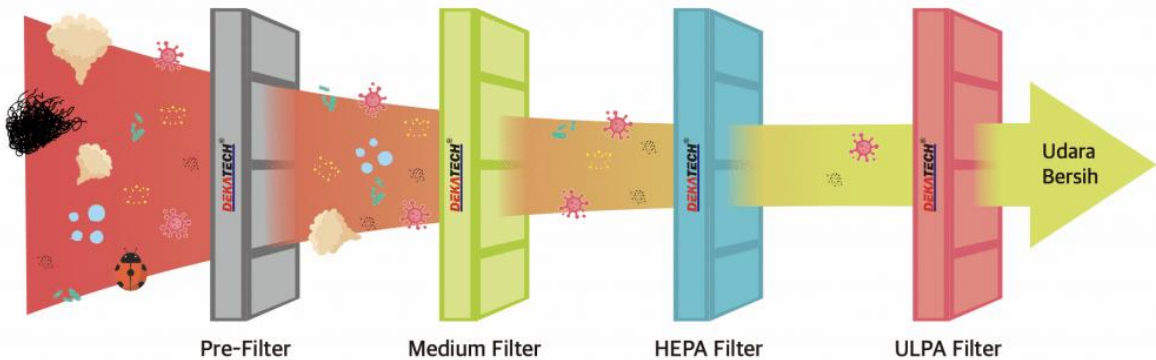
Kapan waktu yang tepat untuk mengganti filter udara tergantung pada faktor-faktor seperti jenis filter yang digunakan, lingkungan di mana kendaraan atau peralatan beroperasi, dan frekuensi penggunaannya. Sebaiknya mengikuti panduan pabrik atau memeriksa manual pengguna untuk mengetahui jadwal penggantian yang direkomendasikan.

Mengganti filter udara secara teratur adalah langkah yang penting untuk menjaga kualitas udara dan memastikan sistem ventilasi atau mesin beroperasi dengan baik.

Semua efisiensi filter didasarkan pada standar ASHRAE 52.1. Berikut ini adalah panduan untuk instalasi filter:

- (a) Filter HEPA yang mempunyai efisiensi uji DOP 99,97% harus digunakan pada sistem pasokan udara yang melayani ruang
- (b) Semua filter harus dipasang dengan tepat untuk mencegah kebocoran antar segmen filter dan antaraudukan filter dan rangka pendukungnya. Kebocoran kecil memungkinkan udara terkontaminasi melalui filter menghancurkan kegunaan filter sebagai pembersih udara terbaik.
- (c) Sebuah manometer harus dipasang dalam sistem filter untuk mengukur penurunan tekanan di setiap kelompok filter. Tindakan pencegahan ini dimaksudkan untuk mengetahui secara akurat kapan filter harus diganti.

ILUSTRASI PROSES FILTRASI



Gambar 6. 3. Jenis-jenis filter

B. Aliran Udara

Aliran udara yang tepat dalam bangunan sangat penting untuk menjaga kualitas udara dalam ruangan dan mencegah penyebaran polutan dan infeksi. Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan dalam aliran udara adalah sebagai berikut:

1) Ventilasi dan peredaran udara

Fasilitas pelayanan kesehatan harus dilengkapi dengan sistem ventilasi yang memadai. Sistem ventilasi yang baik akan membantu mengarahkan aliran udara bersih dari zona yang bersih ke zona yang berisiko tinggi (seperti pada bangunan ruang operasi atau ruang isolasi). Hal ini membantu mengurangi penyebaran partikel dan mikroorganisme di udara.

2) Filtrasi udara

Penggunaan filter udara yang efektif sangat penting dalam menyaring partikel-partikel berbahaya dari udara. Filter udara dengan efisiensi tinggi, seperti filter HEPA (*High-Efficiency Particulate Air*), sering digunakan dalam ruang operasi dan ruang isolasi untuk menghilangkan partikel berukuran kecil, termasuk mikroorganisme.

3) Tekanan udara

Pemeliharaan tekanan udara yang sesuai antara berbagai area dalam fasilitas pelayanan kesehatan penting untuk mengendalikan aliran udara. Misalnya, ruang isolasi biasanya memiliki tekanan negatif (udara mengalir masuk ke ruangan), yang membantu mencegah kontaminan keluar dari ruangan dan menyebar ke ruang lain.

4) Pemisahan zona dan aliran laminar

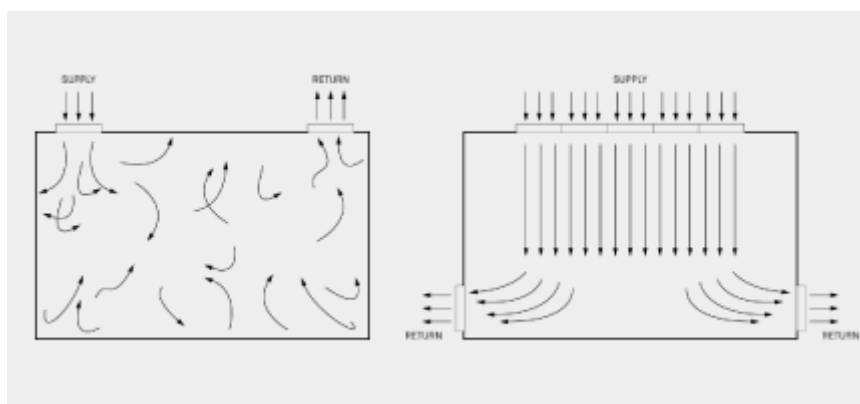
Pada bangunan pelayanan kesehatan sering menggunakan pemisahan fisik antara zona-zona berbeda, seperti ruang bersih, ruang steril, ruang operasi, dan ruang tunggu. Aliran laminar, di mana udara mengalir secara sejajar dan teratur, digunakan dalam ruang operasi untuk mengurangi kontaminasi.

5) Pembersihan udara

Selain sistem ventilasi utama, pembersihan udara tambahan seperti pembersihan permukaan. Adapun penggunaan perangkat UV (*Ultraviolet*) atau sistem pembersih udara portabel seperti HEPA portabel tidak direkomendasikan berdasarkan Minnesota Department of Health yang diadopsi oleh The Centers for Disease Control and Prevention (CDC) untuk mengurangi kontaminan udara dalam ruangan.

Aliran perlu diatur agar sesuai dengan konsep laminar. Bilangan Reynold menjadi penentu apakah aliran udara berpola laminar atau turbulen. Jika bilangan Reynold rendah, maka aliran udara cenderung aliran laminar. Aliran udara laminar di ruang operasi bedah didefinisikan sebagai aliran udara yang secara dominan searah bila tidak terhalang. Pola aliran udara laminar searah biasanya dicapai pada kecepatan $0,46 \pm 0,10$ m/ detik.

Sistem aliran udara laminar telah digunakan untuk pengobatan pasien yang sangat rentan terhadap infeksi. Di antara pasien tersebut ada yang menjalani terapi radiasi, kemoterapi terkonsentrasi, transplantasi organ, amputasi dan penggantian sendi.



Gambar 6. 4. Aliran turbulen vs laminar di ruang operasi/tindakan

Aliran udara yang tidak diinginkan antara ruangan dan lantai sering sekali sulit untuk dikendalikan. Hal tersebut terjadi karena adanya pintu yang terbuka, gerakan manusia, ataupun perbedaan temperatur.

Di fasilitas pelayanan kesehatan, seperti rumah sakit, puskesmas, atau klinik, sistem aliran udara didesain sedemikian rupa untuk memastikan sirkulasi udara yang baik di dalam bangunan. Biasanya, ada beberapa zona berbeda dengan persyaratan aliran udara yang berbeda pula. Zona-zona ini meliputi:

- 1) Zona Bersih (*Clean Zone*): Zona ini meliputi area-area seperti ruang operasi, ruang perawatan intensif, atau ruang steril. Aliran udara di zona ini harus diatur sedemikian rupa sehingga udara yang masuk merupakan udara bersih dan terbebas dari kontaminan. Biasanya, sistem filtrasi khusus digunakan untuk menyaring partikel-partikel kecil dan mikroorganisme yang dapat menjadi sumber infeksi.
- 2) Zona Semi-Bersih (*Semi-Clean Zone*): Zona ini meliputi area-area seperti ruang rawat inap, ruang pemeriksaan, atau ruang pasien umum. Meskipun tidak seketat zona bersih, aliran udara di zona ini tetap dijaga untuk mengontrol penyebaran kontaminan. Udara segar yang sudah melalui proses filtrasi akan terus mengalir ke ruangan ini, tetapi tidak sebaik zona bersih.
- 3) Zona Kontaminasi (*Contaminated Zone*): Zona ini meliputi area-area seperti ruang isolasi pasien dengan penyakit menular atau ruang pasien dengan kondisi khusus seperti tuberkulosis. Di zona ini, aliran udara diatur sedemikian rupa sehingga udara dari ruang ini tidak dapat masuk ke zona-zona lain yang lebih bersih. Sistem exhaust (penghisap) dan perlindungan tambahan digunakan untuk mencegah penyebaran kontaminan.

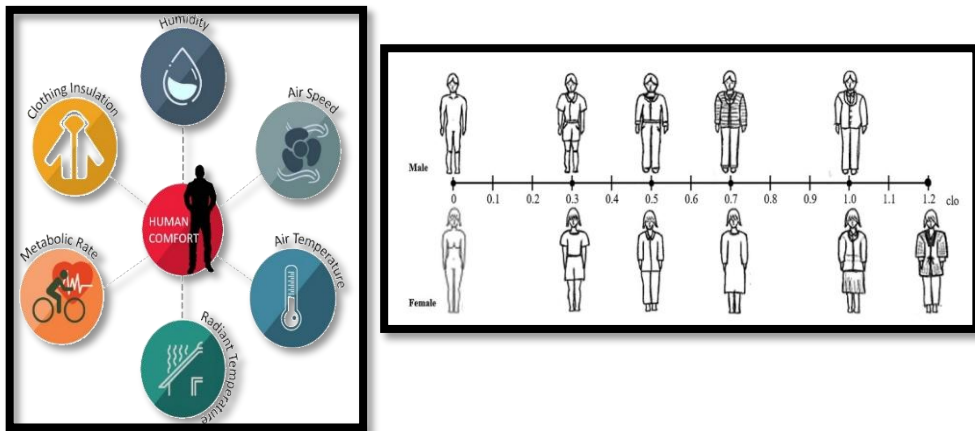
Selain zona-zona tersebut, penting juga untuk memperhatikan arah aliran udara di dalam fasilitas pelayanan kesehatan. Biasanya, prinsip aliran udara yang diterapkan adalah dari zona yang bersih ke zona yang kurang bersih. Dengan demikian, udara dari zona bersih tidak akan terhisap ke zona yang lebih berisiko.

C. Temperatur Udara

Dalam bangunan, pengaturan temperatur udara yang tepat sangatlah penting. Temperatur udara yang sesuai dapat menciptakan lingkungan yang nyaman bagi penghuni bangunan. Selain itu, pengendalian temperatur udara juga berperan dalam menjaga kebersihan, mencegah penyebaran polutan, dan memastikan keamanan peralatan yang sensitif terhadap perubahan temperatur.

Pentingnya temperatur udara yang tepat dalam bangunan sering disebut sebagai kenyamanan termal yang merupakan interaksi dari empat faktor iklim (*climatic factors*) yakni suhu udara (°C), suhu radiasi (°C), kelembaban

udara (%) dan kecepatan angin, serta fungsi dari 2 (dua) faktor individu yakni: jenis aktifitas (yang dinyatakan dengan laju metabolisme tubuh) serta jenis pakaian (yang dinyatakan dalam unit clo) yang dikenakan oleh seseorang.



Gambar 6. 5. Faktor yang mempengaruhi kenyamanan termal dan insulasi pakaian

Usaha untuk mendapatkan kenyamanan termal terutama adalah mengurangi perolehan panas, memberikan aliran udara yang cukup dan membawa panas keluar bangunan serta mencegah radiasi panas, baik radiasi langsung matahari maupun dari permukaan dalam yang panas. Perolehan panas dapat dikurangi dengan menggunakan bahan atau material yang mempunyai daya tahan terhadap panas yang besar, sehingga laju aliran panas yang menembus bahan tersebut akan terhambat.

Pemilihan warna bangunan juga mendukung perwujudan kenyamanan termal ini. Warna terang mempunyai penyerapan radiasi matahari yang kecil sedang warna gelap, demikian pula sebaliknya. Penyerapan panas yang besar akan menyebabkan temperatur permukaan naik. Sehingga akan jauh lebih besar dari temperatur udara luar.

Kenyamanan termal yang lebih baik akan dimiliki bangunan berventilasi alami yang memungkinkan ventilasi silang dan dengan volume ruang yang lebih besar dengan jarak lantai dan langit-langit yang lebih tinggi. Perletakan dan orientasi dari bangunan juga sangat mempengaruhi penghematan energi dan kenyamanan termal. Untuk mengurangi panas matahari di Indonesia, bangunan diorientasikan membujur dari Timur ke Barat, bagian bukaan diarahkan menghadap selatan dan utara sehingga lebih menghemat energi pendinginan. Pada kondisi tertentu kadang tidak dimungkinkan untuk meletakkan massa bangunan pada kondisi ideal seperti ketentuan di atas

namun hal-hal ini dapat diatasi dengan penggunaan sun shading serta penggunaan material yang tepat seperti bagian transparan atau bukaan seperti kaca dan jendela pada bagian yang tidak terpanaskan dan pasangan masif pada bagian yang terpanaskan.

Temperatur ruang juga dipengaruhi oleh sinar matahari, oleh karena itu ada kaidah penghindaran paparan sinar matahari terutama pada waktu pagi dan sore yang secara ideal adalah bangunan membujur dari Timur ke Barat. Adanya atap, shading dan parapet mampu mengurangi sinar matahari yang masuk ke ruang sehingga panas matahari tidak masuk, akan tetapi perlu diwaspadai jika ruang menjadi lebih gelap. Oleh sebab itu sumber cahaya seharusnya mengambil dari pencahayaan alami dengan memasukkan terang langit.

AC (*Air Conditioner*) merupakan alat yang dirancang agar temperatur udara mencapai titik nyaman dengan kata lain dingin atau sejuk. Hal ini sesuai dengan kondisi Indonesia yang memiliki iklim tropis lembab.

Ada tiga hal yang harus diketahui terkait AC, yaitu:

- 1) BTU/h (*British Thermal Unit per hour*), merupakan kemampuan pendinginan dari AC setiap jam nya.
- 2) Daya listrik (*Watt*), menunjukkan tenaga yang dibutuhkan ketika AC dalam kondisi menyala.
- 3) PK adalah singkatan dari bahasa Belanda '*Paarkdekracht*' yang berarti tenaga kuda, sedangkan dalam bahasa Inggrisnya HP (*Horse Power*). Menunjukkan daya dari kompresor yang terdapat di dalam AC.

Adapun penentuan kebutuhan daya kompresor AC yang dibutuhkan sebuah ruangan menggunakan rumus:

Panjang (P) x Lebar (L) x 537 BTU/h

Rumus tersebut tidak mencantumkan tinggi karena diasumsikan tinggi sebuah ruang 2,7-3 meter. Hasil penghitungan dalam satuan BTU/h kemudian disesuaikan dengan tabel PK AC sebagai berikut

AC $\frac{1}{2}$ PK = ± 5.000 BTU/h

AC $\frac{3}{4}$ PK = ± 7.000 BTU/h

AC 1 PK = ± 9.000 BTU/h

AC $1\frac{1}{2}$ PK = ± 12.000 BTU/h

AC 2 PK = ± 18.000 BTU/h

Misalnya ruang dengan panjang 4 meter dan lebar 5 meter, maka kebutuhan AC masuk dalam penghitungan

$4\text{m} \times 5\text{m} \times 537 \text{ BTU/h} = 10.740 \text{ BTU/h}$ yang dapat dikatakan setara dengan AC 1 PK atau AC $1\frac{1}{2}$ PK. Dengan pertimbangan penghematan energi maka dapat dipilih AC $1\frac{1}{2}$ PK.

D. Kelembaban Udara

Dalam bangunan, faktor kelembaban udara memainkan peran penting dalam menjaga kenyamanan penghuni atau orang-orang yang berada dalam bangunan. Kelembaban udara yang tidak seimbang dapat mempengaruhi kualitas udara, kesehatan, dan kinerja peralatan yang dioperasikan.

Kelembaban udara merujuk pada jumlah uap air yang terkandung dalam udara. Kondisi ini dapat diukur dalam bentuk persentase kelembaban relatif "*relative humidity*" (RH) atau dalam satuan absolut seperti gram/m^3 .

Pengaturan kelembaban ditujukan untuk beberapa kepentingan yang memiliki dampak pada hunian. Kelembaban udara yang rendah atau tinggi dapat berdampak negatif pada kesehatan manusia. Kelembaban yang rendah dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, kulit kering, dan meningkatkan risiko infeksi saluran pernapasan. Di sisi lain, kelembaban yang tinggi dapat menciptakan kondisi yang ideal untuk pertumbuhan mikroorganisme seperti jamur dan bakteri. Selain itu, di fasilitas pelayanan kesehatan, beberapa peralatan medis, seperti ventilator dan *humidifier*, membutuhkan kelembaban udara yang tepat untuk berfungsi dengan baik. Kelembaban yang tidak seimbang dapat mempengaruhi akurasi pengukuran peralatan dan menyebabkan kerusakan pada komponen sensitif.

Kelembaban udara dapat diukur dengan menggunakan alat yang disebut higrometer yang pada umumnya menggunakan sensor yang dapat mendeteksi perubahan volume atau konduktivitas listrik yang berkaitan dengan kelembaban udara.



Gambar 6. 6. Higrometer klasik

Dari pengukuran tersebut maka tersusun langkah-langkah untuk mempertahankan kelembaban udara yang tepat. Penting untuk terus memantau kelembaban udara di fasilitas pelayanan kesehatan. Pemasangan higrometer dan jadwal pengukuran rutin akan membantu mengidentifikasi masalah kelembaban. Sistem pengatur suhu dan kelembaban yang terintegrasi dalam HVAC harus dipelihara dengan baik dan diperiksa secara berkala. Pembersihan dan penggantian filter udara secara teratur akan membantu menjaga kualitas udara yang baik. Hal yang tidak boleh disingkirkan adalah memastikan sirkulasi udara yang baik dengan ventilasi yang adekuat. Sistem ventilasi yang efektif salah satunya memastikan pintu dan jendela agar tetap tertutup rapat untuk mencegah kebocoran udara yang tidak diinginkan.

Untuk mengatasi kelembaban udara yang rendah atau tinggi, penggunaan *humidifier* (untuk meningkatkan kelembaban) atau *dehumidifier* (untuk mengurangi kelembaban) dapat dihadirkan sesuai kondisi kebutuhan ruang dengan catatan difungsikan setelah ada kajian. Dengan pengaturan kelembaban maka, kelembaban udara yang tepat akan membantu mengurangi konsentrasi partikel-partikel yang dapat menyebabkan alergi dan gangguan pernapasan. Kelembaban udara yang seimbang akan meningkatkan kenyamanan dan produktivitas penghuni bangunan. Hal terpenting dengan kelembaban udara yang tepat dapat membantu

menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan penyebaran infeksi di lingkungan perawatan.

Sebagaimana halnya AC, maka kelembaban pun dapat diatur yang pada umumnya diturunkan kelembabannya. Alat yang digunakan adalah *dehumidifier* (alat penurun kelembapan ruangan) yang merupakan peralatan yang diletakkan di ruangan dalam ruang untuk menyingkirkan kelembapan berlebih dari udara.

E. Tekanan Udara

Tekanan udara umumnya dipakai di fasilitas pelayanan kesehatan, seperti rumah sakit atau klinik, dengan kepentingan untuk menjaga kebersihan, kenyamanan, dan keamanan pasien serta staf medis. Ada beberapa zona dengan tingkat tekanan udara yang berbeda di dalam fasilitas kesehatan. Berikut adalah beberapa zona umum yang ditemukan di fasilitas pelayanan kesehatan dan tingkat tekanan udara yang umumnya diterapkan:

1) Zona Positif:

Zona ini memiliki tekanan udara yang lebih tinggi dibandingkan dengan area sekitarnya. Tujuan dari zona ini adalah mencegah masuknya kuman dan kontaminan dari lingkungan eksternal ke dalam area yang terlindungi, seperti ruang operasi atau ruang isolasi. Tekanan udara positif membantu mendorong udara bersih keluar dari zona ini, mengurangi risiko infeksi.

2) Zona Negatif:

Zona ini memiliki tekanan udara yang lebih rendah dibandingkan dengan area sekitarnya. Zona negatif digunakan untuk mencegah penyebaran kuman atau partikel berbahaya ke area lain di fasilitas kesehatan. Contohnya, ruang isolasi untuk pasien dengan penyakit menular sering menggunakan tekanan udara negatif, sehingga udara dari ruangan tersebut tidak menyebar ke area lain.

3) Zona Netral:

Zona ini memiliki tekanan udara yang seimbang atau hampir sama dengan area sekitarnya. Biasanya, zona netral digunakan untuk ruang-ruang seperti ruang tunggu atau ruang administrasi, di mana tidak ada persyaratan khusus untuk pengendalian tekanan udara.

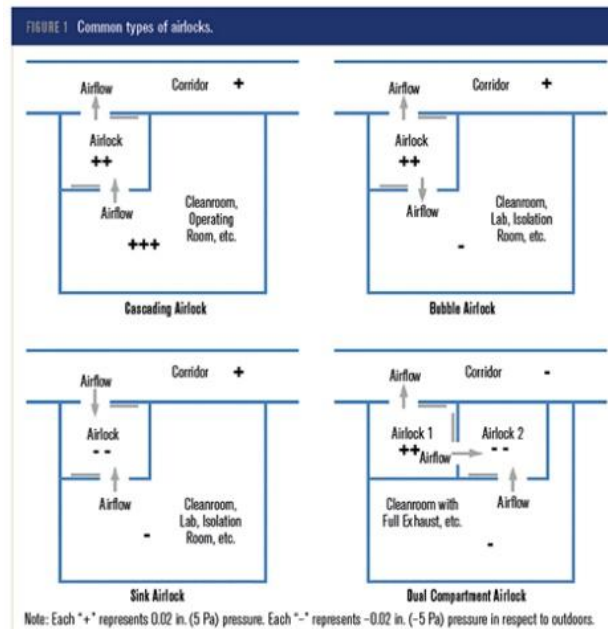
Setiap ruang yang diatur tekanannya dilengkapi *magnehelic* yang ditempatkan di sisi luar kamar di sisi yang menghadap koridor. *Magnehelic* yang dipakai memiliki skala nol di tengah dengan skala ke kanan dan ke kiri, masing-masing berinterval kelipatan sepuluh, maksimal sampai angka 30, dan memiliki satuan *pascal*. Semakin jarum bergerak ke kanan dari titik nol, maka semakin positif tekanan. Begitu pula jika jarum semakin ke kiri dari titik nol maka menunjukkan bahwa tekanan semakin negatif. Untuk mengetahui jenis tekanan dan besarnya tekanan, maka dilakukan pengamatan pada *magnehelic*. Gambar 6 menunjukkan *magnehelic* di ruang perawatan yang memiliki tekanan negatif, ditandai dengan jarum *magnehelic* menunjuk ke arah kiri, ke angka 5 *pascal*. Artinya kamar tersebut memiliki tekanan negatif sebesar -5 *pascal*.



Gambar 6. 7. *Magnehelic* Kamar isolasi, Tekanan -5 Pascal

Suatu perbedaan tekanan udara dapat dijaga hanya di ruangan yang seluruhnya tertutup. Oleh karena itu, penting untuk mencegah kebocoran udara dari semua pintu atau pembatas antara area yang berdekatan. Hal ini paling baik dilakukan dengan menggunakan penahan cuaca dan penutup pintu antara dua area secara cepat mengurangi perbedaan tekanan di antara area tersebut. Apabila terjadi bukaan, suatu pertukaran udara alami berlangsung karena arus termal yang ditimbulkan dari perbedaan temperatur antara dua area.

Untuk area kritis yang membutuhkan baik pemeliharaan tekanan pada ruang-ruang yang berdekatan dan gerakan petugas antara area kritis dan ruang berdekatan, diindikasikan penggunaan kunci udara (*air lock*) atau ruang antara.



Gambar 6. 8. Air lock

F. Ventilasi Udara

Pada bangunan apapun, udara luar yang segar dan bersih dalam jumlah besar diperlukan untuk mengendalikan kontaminan dan bau.

Ada tiga kriteria dasar untuk ventilasi:

- 1) *Ventilation rate* (laju ventilasi): jumlah dan kualitas udara luar yang dimasukkan ke dalam ruangan;
- 2) Arah aliran udara: arah aliran udara harus dari zona bersih ke zona kurang bersih; dan
- 3) Pola distribusi udara atau aliran udara: pasokan udara ke setiap bagian ruangan untuk meningkatkan pelarutan dan pembuangan polutan dari ruangan.

Inti droplet akan dilarutkan di udara luar, atau disaring secara internal dengan filter HEPA khusus yang menghilangkan sebagian besar (99,97%), percik renik (*aerosol*) sebelum kembali masuk sirkulasi udara biasa. Jika filter HEPA

tidak digunakan, udara harus dibuang langsung ke luar, jauh dari ventilasi udara yang masuk, manusia, dan hewan.

Sistem HVAC harus diperiksa, dipelihara, dan dibersihkan secara teratur. Standar yang ketat untuk pemasangan dan pemeliharaan sistem ventilasi sangat penting untuk memastikan bahwa sistem tersebut efektif dan membantu menciptakan lingkungan yang aman di dalam fasilitas kesehatan secara keseluruhan.

6.3 Sistem Elektrikal dalam Bangunan (*L.M.F. Purwanto*)

Sistem elektrikal modern telah menjadi sistem saraf yang menghidupkan bangunan kontemporer, berkembang jauh melampaui fungsi dasar penerangan dan daya menjadi infrastruktur cerdas yang mengintegrasikan energi, data, dan kendali otomatis. Menurut laporan terbaru International Energy Agency (IEA, 2023), konsumsi listrik bangunan menyumbang 55% dari total permintaan listrik global, dengan pertumbuhan tahunan sebesar 3% yang didorong oleh digitalisasi dan elektrifikasi sistem bangunan. Perkembangan ini menuntut pendekatan revolusioner dalam desain sistem elektrikal yang tidak hanya memenuhi kebutuhan saat ini tetapi juga antisipatif terhadap tantangan masa depan.

A. Prinsip Dasar Sistem Elektrikal Modern

Desain sistem elektrikal kontemporer berdiri pada tiga pilar utama: keandalan (reliability), efisiensi (efficiency), dan kecerdasan (intelligence). National Electrical Code (NEC 2023) menekankan pentingnya sistem proteksi berlapis yang menggabungkan circuit breaker arus sisa (RCBO), surge protection devices (SPD), dan sistem pembumian (earthing) kelas I untuk menjamin keselamatan penghuni (NFPA 70, 2023). Penelitian terbaru oleh Gellings dan Taylor (2023) menunjukkan bahwa pendekatan desain resilien dengan konsep microgrid terintegrasi dapat mengurangi downtime sistem elektrikal hingga 90% selama gangguan jaringan utama.

Sistem distribusi daya telah berevolusi dari topologi radial konvensional menuju jaringan hibrida yang menggabungkan sumber tradisional dengan energi terbarukan. Menurut IEEE Standard 1547-2023, integrasi photovoltaic (PV) skala bangunan memerlukan inverter cerdas dengan kemampuan grid-forming yang dapat beroperasi dalam mode islanding selama pemadaman jaringan (Blaabjerg et al., 2023). Contoh inovatif terlihat pada kompleks perkantoran The Edge di Amsterdam, dimana 65% kebutuhan dayanya

dipenuhi oleh sistem PV atap yang terintegrasi dengan battery energy storage system (BESS) berkapasitas 4.2 MWh (Li et al., 2023).

B. Inovasi dalam Sistem Penerangan

Revolusi teknologi LED telah mentransformasi sistem penerangan dari beban listrik utama menjadi komponen cerdas yang terintegrasi dengan Internet of Things (IoT). Penelitian DOE (2023) mengungkapkan bahwa penerangan menyumbang 17% dari total konsumsi listrik bangunan komersial, namun dapat dikurangi hingga 80% melalui adopsi sistem adaptif berbasis sensor. Sistem Human-Centric Lighting (HCL) mutakhir menggabungkan spektrum cahaya dinamis yang meniru siklus alami circadian, dengan studi oleh Figueiro et al. (2023) menunjukkan peningkatan produktivitas pekerja kantor sebesar 12% dan kualitas tidur 18% lebih baik.

Pengembangan terkini dalam Power over Ethernet (PoE) lighting systems memungkinkan distribusi daya dan data melalui kabel jaringan tunggal, menciptakan ekosistem penerangan digital yang sepenuhnya dapat diprogram (Mahmoud et al., 2023). Sistem ini, seperti yang diimplementasikan di The Crystal Building London, menggunakan protokol komunikasi DALI-2 dan KNX untuk kontrol granulasi hingga tingkat individu fitting, dengan efisiensi sistem mencapai 92% (Doulos et al., 2023).

C. Manajemen Energi Cerdas

Building Energy Management Systems (BEMS) generasi kelima telah mengadopsi kecerdasan buatan untuk optimasi konsumsi energi real-time. Menurut studi oleh Zhao et al. (2023), algoritma deep reinforcement learning dapat mengurangi beban puncak bangunan hingga 25% melalui strategi precooling dan load shifting yang diprediksi. Sistem seperti Siemens Desigo CC sekarang mengintegrasikan data dari 15+ sub-sistem bangunan untuk membuat keputusan operasional holistik (Afram et al., 2023).

Konsep digital twin untuk sistem elektrik memungkinkan simulasi dan monitoring kondisi aktual jaringan listrik bangunan. Penelitian NIST mengembangkan model twin untuk sistem kritis rumah sakit yang dapat memprediksi kegagalan komponen dengan akurasi 94% 72 jam sebelum terjadinya (Guo et al., 2023). Teknologi ini menggunakan jaringan sensor IoT yang mengukur tidak hanya parameter listrik dasar tetapi juga kondisi termal, vibrasi, dan partial discharge pada peralatan tegangan menengah.

D. Infrastruktur Pengisian Kendaraan Listrik

Permintaan akan Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) dalam bangunan telah melonjak 300% sejak 2020 menurut BloombergNEF (2023). Standar baru IEC 61851-1:2023 menetapkan persyaratan untuk sistem pengisian bidireksional vehicle-to-building (V2B) yang memungkinkan mobil listrik berfungsi sebagai sumber daya darurat (Tani et al., 2023). Inovasi terbaru termasuk pengisian induktif 22 kW yang tertanam dalam lantai parkir dan manajemen beban dinamis yang mengalokasikan daya berdasarkan prioritas dan jadwal pengguna (Richardson et al., 2023).

E. Sistem Pentanahan dan Proteksi

Perkembangan sistem pentanahan (earthing) telah mencapai tingkat baru dengan material konduktif inovatif seperti beton karbon-doped. Uji laboratorium oleh IEEE (2023) menunjukkan material ini mencapai resistansi bumi 0.2 ohm tanpa chemical treatment, jauh lebih baik daripada elektroda tembaga konvensional (Yamane et al., 2023). Untuk proteksi sambaran petir, sistem Early Streamer Emission (ESE) generasi ketiga sekarang mampu memberikan radius proteksi hingga 120m dengan waktu penyalaan 25μs.

F. Integrasi dengan Sistem Bangunan Lain

Sistem elektrik modern tidak lagi berdiri sendiri tetapi terintegrasi penuh dengan sistem mekanikal, keselamatan, dan telekomunikasi melalui protokol terbuka seperti BACnet/IP dan Modbus TCP. Penelitian terbaru di Carnegie Mellon University (2023) mengembangkan gateway universal yang dapat menerjemahkan antara 15+ protokol industri berbeda, memungkinkan interoperabilitas penuh perangkat dari berbagai vendor (Bergés et al., 2023).

Tantangan dan Solusi

1. Kesenjangan Keterampilan: Survei NFPA (2023) mengungkap 78% kontraktor menghadapi kesulitan menemukan teknisi terlatih untuk sistem canggih. Solusinya termasuk program sertifikasi micro-credential berbasis VR (Huang et al., 2023).
2. Keamanan Siber: Serangan pada sistem kontrol bangunan meningkat 400% sejak 2020. Pendekatan zero-trust architecture dengan enkripsi end-to-end menjadi solusi (Zhou et al., 2023).
3. Biaya Awal: Analisis LCC oleh NREL (2023) menunjukkan ROI 5-7 tahun untuk sistem canggih melalui penghematan energi.

6.4 Sistem Plumbing dan Distribusi Air (L.M.F. Purwanto)

Sistem plumbing modern telah berevolusi menjadi jaringan cerdas yang tidak hanya menjamin pasokan air bersih dan pembuangan limbah yang efisien, tetapi juga berperan penting dalam konservasi sumber daya dan keberlanjutan bangunan. Menurut laporan terbaru World Health Organization (WHO, 2023), bangunan bertanggung jawab atas 12% dari total konsumsi air global, dengan sistem plumbing yang dirancang dengan baik mampu mengurangi penggunaan air hingga 40% tanpa mengorbankan kenyamanan pengguna. Perkembangan terkini dalam teknologi sistem plumbing mencerminkan integrasi antara prinsip rekayasa tradisional dengan inovasi material, digitalisasi, dan konsep ekonomi sirkular.

A. Desain Sistem Plumbing Kontemporer

Pendekatan modern dalam perancangan sistem plumbing mengadopsi konsep "hierarchical water distribution" yang membagi jaringan menjadi beberapa zona tekanan independen untuk mengoptimalkan efisiensi energi dan konsistensi tekanan (ASPE, 2023). Penelitian terbaru oleh Zhang et al. (2023) menunjukkan bahwa sistem zoning dengan pressure-reducing valves (PRVs) cerdas dapat mengurangi kebocoran air hingga 25% dibandingkan sistem konvensional. Standar IPC (International Plumbing Code) 2023 kini merekomendasikan penggunaan pemodelan hidraulik BIM tingkat lanjut untuk memprediksi kinerja sistem dalam berbagai skenario operasional, termasuk simulasi tekanan dinamis selama periode penggunaan puncak.

B. Inovasi dalam Sistem Penyediaan Air

Teknologi jaringan pipa telah mengalami revolusi material dengan diperkenalkannya sistem komposit HDPE (high-density polyethylene) dengan lapisan antibakteri nano-perak yang mampu menghambat pertumbuhan biofilm hingga 99% (Liu et al., 2023). Sistem distribusi air panas terkini mengadopsi konsep "instantaneous circulation" dengan pompa kecepatan variabel dan pipa berpemanas untuk menghilangkan penantian air panas sekaligus mengurangi kehilangan energi (ASHRAE, 2023). Bangunan pencakar langit seperti Ping An Finance Centre di Shenzhen telah menerapkan sistem "upfeed water distribution" yang menggunakan tekanan hidrostatik alami untuk mengurangi kebutuhan pompa booster hingga 40% (Leung et al., 2023).

C. Sistem Pengelolaan Air Limbah

Konsep "zero-liquid discharge" dalam pengolahan air limbah bangunan mendapatkan momentum dengan perkembangan teknologi membran

bioreaktor (MBR) generasi ketiga yang mampu menghasilkan air daur ulang dengan kualitas air minum (EPA, 2023). Sistem pemisahan cerdas (intelligent separation systems) kini dapat membedakan antara greywater dan blackwater secara otomatis menggunakan sensor kualitas air berbasis AI, memungkinkan pemanfaatan kembali 80% greywater untuk penyiraman toilet dan irigasi (Chen et al., 2023). Inovasi lain termasuk toilet komposering vakum yang hanya menggunakan 0.5 liter air per penyiraman, 90% lebih hemat dari toilet konvensional.

D. Teknologi Penghemat Air

Perangkat plumbing cerdas generasi terkini menggabungkan sensor gerak, kontrol aliran otomatis, dan konektivitas IoT untuk optimasi penggunaan air. Penelitian oleh Koop et al. (2023) menunjukkan bahwa keran pintar dengan teknologi "flow modulation" dapat mengurangi konsumsi air hingga 60% tanpa terasa oleh pengguna. Sistem shower daur ulang dengan filtrasi ultrafine sekarang mampu memproses dan mendaur ulang air secara real-time, mempertahankan kualitas air sambil mengurangi konsumsi hingga 75%. Untuk aplikasi skala besar, teknologi "condensate recovery" pada sistem HVAC dapat mengumpulkan hingga 1000 liter air suling per hari dari udara untuk digunakan kembali dalam bangunan (Gleick et al., 2023).

E. Integrasi dengan Sistem Bangunan Lain

Sistem plumbing modern semakin terintegrasi dengan sistem manajemen bangunan melalui platform IoT. Studi kasus di Edge Olympic Building Amsterdam menunjukkan bagaimana integrasi antara sistem plumbing, energi, dan data bangunan dapat mencapai penghematan air 50% melalui prediksi pola penggunaan dan deteksi kebocoran presisi (Platt et al., 2023). Digital twin untuk sistem plumbing memungkinkan pemantauan kondisi pipa secara real-time dengan sensor akustik yang dapat mendeteksi kebocoran sekecil 0.1 liter per menit pada jarak 100 meter.

F. Tantangan dan Solusi

1. **Penuaan Infrastruktur:** ASCE (2023) memperkirakan 20% air bersih terbuang karena kebocoran pipa. Solusinya termasuk pipa self-healing dengan mikroenkapsulasi resin polimer (Jiang et al., 2023).
2. **Kualitas Air:** WHO melaporkan peningkatan kontaminan emerging. Pendekatan "multi-barrier protection" dengan filtrasi UV dan karbon aktif menjadi solusi (NSF, 2023).
3. **Regulasi:** Perbedaan standar internasional menghambat inovasi. Inisiatif "Global Plumbing Standards Convergence" sedang dikembangkan.

6.5 Sistem Keamanan dan Proteksi Kebakaran (*L.M.F. Purwanto*)

Sistem keamanan dan proteksi kebakaran modern telah berkembang menjadi jaringan cerdas yang terintegrasi penuh dengan arsitektur bangunan dan sistem teknologi lainnya. Menurut laporan terbaru National Fire Protection Association (NFPA, 2023), bangunan dengan sistem proteksi kebakaran canggih mengalami 65% lebih sedikit kerugian material dan 78% lebih sedikit korban jiwa dibandingkan bangunan dengan sistem konvensional. Perkembangan terkini dalam sistem ini mencerminkan pendekatan holistik yang menggabungkan pencegahan, deteksi dini, respons cepat, dan mitigasi dampak pasca kebakaran.

A. Evolusi Sistem Deteksi Kebakaran

Sistem deteksi kebakaran generasi kelima telah beralih dari teknologi titik (point detection) menuju pendekatan jaringan sensor multispektral yang mampu mengidentifikasi berbagai parameter kebakaran secara simultan. Penelitian terbaru di Underwriters Laboratories mengembangkan detektor yang menggabungkan:

- **Pemantauan partikel 3D** untuk mendeteksi asap dalam berbagai ukuran (0.003-10 mikron)
- **Spektroskopi laser** untuk analisis gas pembakaran spesifik
- **Thermal imaging** dengan resolusi 0.01°C untuk pemetaan panas spasial
- **Analisis pola aliran udara** untuk prediksi penyebaran api

Sistem ini mampu membedakan antara sumber bahaya nyata (seperti api yang berkembang) dengan kondisi non-bahaya (seperti uap atau debu) dengan akurasi 99.7%, secara signifikan mengurangi alarm palsu yang selama ini menjadi masalah utama. Integrasi dengan kecerdasan buatan memungkinkan sistem belajar dari pola historis bangunan tertentu, meningkatkan akurasi deteksi sebesar 40% setelah masa pelatihan 6 bulan (Wang et al., 2023).

B. Inovasi dalam Sistem Pemadaman

Teknologi pemadaman kebakaran telah melampaui konsep tradisional sprinkler dan gas, berkembang menjadi sistem cerdas yang dapat menyesuaikan dengan jenis dan lokasi kebakaran spesifik:

1. Water Mist Systems Generasi Ketiga

Menggunakan nozzle bertekanan ultra-tinggi (80-200 bar) yang menghasilkan droplet air berukuran mikron. Penelitian FM Global

menunjukkan sistem ini efektif pada kebakaran kelas A, B, dan C dengan penggunaan air 90% lebih sedikit dibanding sprinkler konvensional. Keunggulan utamanya adalah kemampuan mendinginkan permukaan secara cepat sekaligus mengurangi kadar oksigen lokal tanpa merusak peralatan elektronik sensitif.

2. Pemadaman Berbasis Aerosol Cerdas

Menggabungkan senyawa kalium dan strontium dalam bentuk aerosol ultra-halus yang secara kimiawi menginterupsi rantai reaksi pembakaran. European Fire Safety Alliance melaporkan efektivitas 3x lebih tinggi dibanding sistem gas inert konvensional, dengan waktu respons di bawah 10 detik dan tidak beracun bagi manusia.

3. Sistem Pemadaman Elektromagnetik

Teknologi terobosan dari Harvard University (2023) menggunakan medan elektromagnetik terfokus untuk menekan api tanpa bahan pemadam fisik. Meski masih dalam tahap pengembangan, sistem ini menunjukkan potensi revolusioner untuk proteksi ruang server dan laboratorium sensitif.

C. Integrasi Sistem Evakuasi Cerdas

Sistem evakuasi modern telah beralih dari konsep "alarm massal" menuju panduan evakuasi dinamis berbasis kondisi aktual kebakaran. Penelitian di University of Greenwich (2023) mengembangkan:

- **Papan petunjuk digital adaptif** yang mengubah rute evakuasi secara real-time berdasarkan penyebaran api
- **Lantai fotoluminesens** dengan panduan jalur yang aktif saat deteksi asap
- **Sistem komunikasi LiFi** (Light Fidelity) yang tetap berfungsi saat infrastruktur WiFi gagal
- **Asap terkendali** untuk simulasi kondisi darurat dalam pelatihan reguler

Studi kasus di Bandara Changi Singapura menunjukkan sistem ini mampu mengurangi waktu evakuasi hingga 55% dibanding sistem konvensional.

D. Material Konstruksi Tahan Api

Revolusi material bangunan tahan api mencakup perkembangan:

- **Beton geopolimer** dengan ketahanan api hingga 1.200°C tanpa kehilangan kekuatan
- **Pelapis intumescent generasi baru** yang mengembang 50x lebih tebal saat terpapar panas
- **Kaca tahan api** dengan lapisan hydrogel yang mengaktifkan pendinginan saat terpapar api
- **Komposit struktural** yang menggunakan serat basalt dan keramik nano

Uji coba di Laboratorium Nasional Argonne (2023) menunjukkan material ini dapat memperpanjang waktu integritas struktural selama kebakaran dari 60 menit menjadi 240 menit - cukup untuk operasi penyelamatan skala besar.

E. Manajemen Asap Canggih

Sistem pengendalian asap generasi keempat menggunakan:

- **Ventilasi cerdas** dengan prediksi pola penyebaran asap berbasis CFD
- **Filtrasi elektrostatik** yang membersihkan 95% partikel berbahaya
- **Teknologi pembersihan udara** plasma dingin untuk menetralkan gas beracun

Implementasi di terowongan MRT Jakarta menunjukkan efektivitas 90% dalam mempertahankan kualitas udara selama simulasi kebakaran.

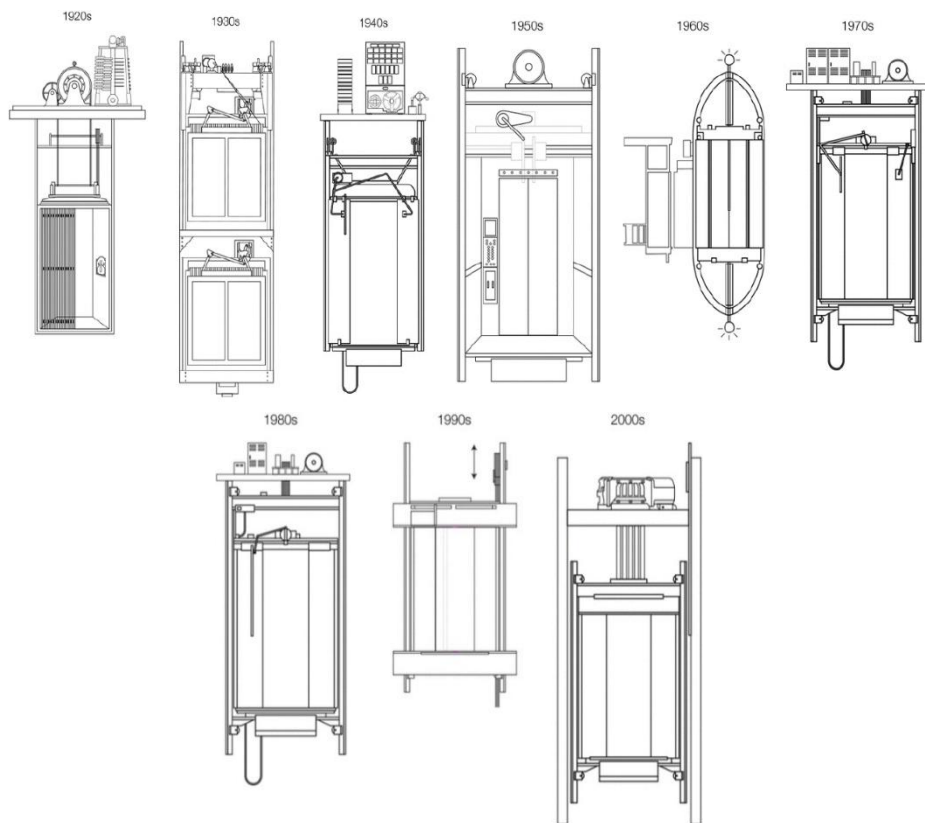
6.6. Sistem Transportasi Vertikal (Lift dan Eskalator) *(Firmansyah Bachtiar)*

Sistem transportasi vertikal merupakan sistem untuk memindahkan manusia atau barang secara vertikal dalam suatu bangunan. Proses pemindahan ini dapat melibatkan tenaga manusia maupun dapat berlangsung secara otomatis dengan bantuan mesin. Teknologi lift dan eskalator merupakan jawaban terhadap kebutuhan mobilitasi vertikal untuk mempersingkat waktu tempuh dan mengurangi penggunaan tenaga manusia.

Teknologi lift awalnya berkembang untuk kebutuhan mengangkat beban berat menggunakan alat bantu seperti tali dan katrol. Lift pada jaman kuno teridentifikasi penggunaannya pada proses pemindahan batu-batu pada

pembangunan Piramida di Mesir dan untuk mengangkat para gladiator menuju arena pertarungan di Koloseum Roma (Strakosch, 1983). Pada era Renaissance di jaman Raja Louis XV, lift mulai diperuntukkan secara khusus untuk memindahkan raja ke lantai atas istana menggunakan bantuan tenaga manusia. Pendekatan baru terhadap teknologi lift muncul di era revolusi industri, ketika kebutuhan produksi massal membutuhkan sistem pemindahan barang produksi yang lebih efisien dari segi waktu dan tenaga. Lift dengan teknologi uap dan hidrolik (tekanan cairan) mulai hadir untuk membantu aktivitas khususnya di bangunan industri dan pertambangan (Gray, 2002).

Perkembangan lift dengan tenaga listrik memberikan katalis terhadap perkembangan teknologi bangunan di masa-masa berikutnya. Werner von Siemens adalah pihak yang pertama kali memperkenalkan lift dengan tenaga listrik yang lebih memberikan pengalaman berpindah tempat secara lebih cepat dan aman. Perkembangan lift dengan tenaga listrik ini kemudian berkembang sejalan dengan berkembangnya teknologi bangunan yang memungkinkan terwujudnya bangunan pencakar langit. Perencanaan lift dalam suatu bangunan tidak terlepas dari peran beberapa pihak yaitu arsitek, ahli teknik sipil dan juga ahli mekanikal-elektrikal. Peran ahli dari teknik sipil dan mekanikal-elektrikal lebih pada konteks teknis alat, sedangkan arsitek berperan dalam menentukan kebutuhan, penempatan, zonasi dan tipe lift yang sesuai dengan keperluan.



Gambar 6. 9. Evolusi Teknologi Lift

Perkembangan teknologi lift menghasilkan beberapa tipe lift yang dapat digunakan sebagai fasilitas transportasi vertikal dalam bangunan. Tipe lift dilihat dari tipe penggunaannya dapat terbagi menjadi lift penumpang dan barang. Lift penumpang diperuntukkan dalam konteks lift untuk hunian dan komersial. Lift hunian berbentuk kecil dan terbatas hanya untuk 1-2 orang, menggunakan sistem yang relatif sederhana seperti hidrolik atau pneumatik dan umumnya dirancang dengan elemen kaca untuk memungkinkan visual ke arah luar. Lift komersial umumnya memiliki variasi ukuran yang lebih beragam dan dirancang untuk dapat mengangkut penumpang dalam jumlah banyak. Lift ini banyak digunakan di perkantoran, sekolah, hunian vertikal, fasilitas umum maupun fungsi komersial khususnya pada bangunan dengan ketinggian di atas 4 lantai. Bentuk lift yang dipergunakan pada perkantoran

umumnya bersifat tertutup, namun pada fungsi bangunan yang membutuhkan visual ke arah luar seperti hotel dan pusat perbelanjaan sering ditemukan model lift dengan bentuk tabung kaca.

Selain lift penumpang, juga terdapat lift barang yang lebih diperuntukkan untuk pemindahan barang berukuran besar. Lift barang memiliki berbagai macam tipe sesuai dengan kebutuhan pengangkutan barang. Lift barang pada bangunan industri umumnya memiliki ukuran lebih besar dan menggunakan material lift yang lebih kokoh terhadap benturan benda berat. Lift barang di bangunan non industri umumnya diperlukan untuk dapat membawa barang-barang dalam troli atau untuk kebutuhan mengangkut perabotan ke lantai atas. Pada beberapa bangunan khusus seperti rumah sakit, diperlukan lift yang mampu mengangkut ranjang pasien dan kursi roda. Pada beberapa bangunan terdapat juga model lift yang memberikan opsi dua bukaan pintu dari arah yang berbeda. Pada perkembangan sistem teknologi parkir, terdapat juga lift untuk mengangkut kendaraan pada suatu gedung yang memungkinkan pengaturan penempatan secara otomatis pada ruang parkir vertikal.

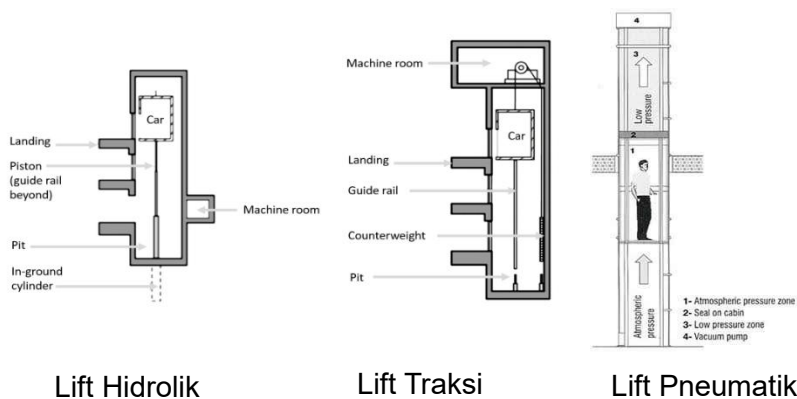


Gambar 6. 10. Model Lift Penumpang dan Barang

Jika dilihat dari sistem penggerak lift yang masih digunakan pada abad ke 21, maka teknologi lift dapat terbagi menjadi lift hidrolik, pneumatik dan traksi. Lift hidrolik digerakkan dengan sistem piston yang digerakkan cairan tekanan tinggi untuk menaikkan dan menurunkan kabin lift. Penggunaan lift hidrolik terutama pada bangunan bertingkat rendah dan untuk transportasi barang dengan beban yang relative berat. Kecepatan lift hidrolik dapat mencapai 46 m per menit Lift hidrolik cenderung lebih hemat biaya operasional namun

membutuhkan ruang yang cukup besar di bagian bawah lift untuk mesin piston. Perkembangan lain dari lift yang didorong oleh tenaga dari sisi bawah kabin adalah lift pneumatik yang memadukan tenaga listrik dan sistem tekanan udara untuk mengangkat landasan lift. Lift pneumatik cenderung hanya optimal digunakan pada bangunan bertingkat rendah seperti hunian karena daya dorongnya yang terbatas.

Lift model traksi beroperasi menggunakan bantuan tenaga listrik dan kabel. Penggunaan lift traksi lebih efisien untuk bangunan bertingkat tinggi. Sistem traksi umumnya menempatkan mesin penggerak di sisi atas kabin dan memberikan waktu tempuh yang lebih cepat karena dukungan kabel baja dan katrol yang digerakkan dengan motor listrik. Efisiensi energi dapat terjaga lebih baik, namun membutuhkan biaya dan ruang yang lebih besar dibandingkan lift hidrolik. Lift traksi terbagi menjadi lift traksi dengan gigi penggerak (*geared traction elevator*) dan tanpa gigi penggerak (*gearless traction elevator*). Lift traksi dengan gigi penggerak memiliki *gearbox* untuk menggerakkan kabin dan dapat menghasilkan kecepatan hingga 152 meter per menit sedangkan lift traksi tanpa gigi penggerak dapat menghasilkan kecepatan lebih tinggi yaitu 610 meter per menit (Al-Kodmany, 2023)



Gambar 6. 11. Perbandingan Sistem Lift Hidrolik, Traksi dan Pneumatik

Perkembangan teknologi mesin dan komputasi turut mendorong munculnya berbagai tipe lift baru yang menghasilkan efisiensi ruang yang lebih baik dan kecepatan tempuh yang lebih tinggi. Lift dengan ruang mesin di bagian atas menciptakan kebutuhan ruang tambahan di atas gedung untuk penempatan peralatan dan juga untuk kebutuhan akses pemeliharaan. Hal ini terkadang secara estetika mengganggu tampilan bangunan karena adanya bentuk tambahan yang berpengaruh pada estetika tampak bangunan. Lift traksi

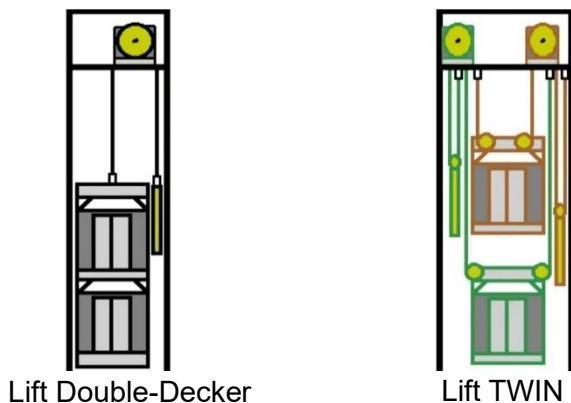
dalam perkembangannya juga menghadirkan tipe yang mereduksi kebutuhan ruang mesin di bagian atas ruang luncur lift. Terdapat tipe lift MRL (*Machine-Room-Less*) dengan sistem penggerak yang berada di dalam ruang lift. Model lift ini mengeliminasi kebutuhan ruang di atas bangunan, namun memiliki akses dan perawatan yang lebih rumit karena mesin yang berada di dalam ruang luncur lift. Secara kemampuan daya jelajah, lift dengan ruang mesin memiliki kemampuan efektif untuk menjangkau bangunan dengan jumlah lantai yang banyak. Tipe lift MRL memiliki keterbatasan kemampuan daya jelajah yang direkomendasikan maksimal setinggi 25 lantai namun memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi hingga 30-40% dibandingkan tipe lift dengan ruang mesin (Al-Kodmany, 2023).

Memasuki era digital, perkembangan teknologi bangunan juga berdampak pada pengembangan tipe lift yang semakin efisien dalam proses penggunaan maupun operasional. Kemajuan teknologi lift dapat dilihat antara lain dari aspek pendayagunaan energi, efisiensi kebutuhan perangkat, dan integrasi kecerdasan buatan. Pendayagunaan energi untuk penggerakan kabin lift mulai memiliki alternatif seperti pemanfaatan unsur magnet sebagai penggerak. Teknologi lift ini mereduksi kebutuhan akan komponen kabel katrol dan pemberat serta menggantikannya dengan sistem berbasis rel magnetik (Huscio & Trochimczuk, 2016). Lift ini disebut MULTI, dan dikembangkan oleh TK Elevator (Thyssen Krupp Elevator) dan memungkinkan lift untuk bergerak secara horisontal dan vertikal dalam ruang luncur yang sama. Konsep magnetik ini diterapkan melalui pendekatan daur ulang energi panas dari pergerakan lift (saat meluncur dan saat pengereman) yang digunakan untuk menghasilkan tenaga pada piranti rel yang dapat menggerakkan kabin lift. Hal ini mendorong efisiensi penggunaan tenaga listrik serta mendukung daya jangkau lantai yang lebih tinggi dibandingkan lift konvensional.



Gambar 6. 12. Lift Magnetik dengan Pergerakan Vertikal-Horisontal

Dalam konteks efisiensi penggunaan peralatan, terdapat teknologi baru terkait lift tingkat (*double-decker*) yang dapat melayani lantai ganjil dan genap sekaligus dalam satu perjalanan. Konsep *double-decker* ini muncul untuk mengurangi kebutuhan energi yang besar dari operasional setiap mesin lift. Konsep ini memiliki keterbatasan terkait bentuk kabin lift yang besar dan akses penggunaan kabin yang terbatas hanya melayani lantai ganjil atau genap saja. Ketika penumpang naik dari lantai ganjil dan hendak menuju ke lantai genap, maka penumpang harus beralih ke pintu lift di atas dengan menggunakan tangga/eskalator. Konsep sejenis diterapkan dalam konsep lift ganda yang disebut Lift TWIN, yaitu dua kabin lift terpisah yang bergerak dalam satu ruang luncur yang sama dan untuk mengatur jarak keduanya dilakukan melalui sensor otomatis (Belmonte & Trabucco, 2021).



Gambar 6. 13. Konsep Lift Double-Decker dan TWIN

Perkembangan kecerdasan buatan turut berpengaruh dalam pengembangan teknologi lift. Kemampuan komputasi dengan sistem kecerdasan buatan dapat mengatur operasional lift dengan menganalisa pola pergerakan pengguna, waktu tunggu dan penyesuaian kecepatan. Koneksi lift dengan internet juga memungkinkan pemantauan yang lebih akurat terhadap kondisi lift dan permasalahan sistem untuk antisipasi terhadap keamanan pengguna.

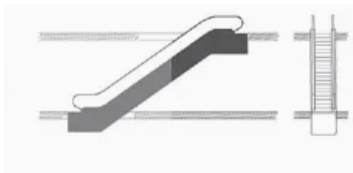
Secara sistem penggunaan, akses terhadap lift di apartemen yang saat ini mayoritas berbasis *tap* kartu, mulai berkembang melalui sistem pengenalan wajah yang langsung mengenali lantai tempat penghuni tinggal. Teknologi terbaru memungkinkan pengguna lift dapat memilih lantai dari *smartphone* langsung tanpa harus masuk ke dalam lift. Teknologi *Augmented Reality* (A.R) juga mulai diterapkan dalam industri lift, khususnya dalam konteks untuk mengamati sistem operasional dan kebutuhan pemeliharaan tanpa harus masuk ke dalam ruang lift. Kemampuan sistem yang dikembangkan oleh Thyssen Krupp AG yang berkolaborasi dengan Microsoft mampu menghadirkan teknologi MAX untuk mendukung konsep lift pintar. Penerapan teknologi tersebut memungkinkan teknisi untuk menggunakan

A.R. dalam menganalisa kondisi komponen lift sehingga dapat dihindari terjadinya kerusakan melalui monitor awal terhadap data digital yang ada.

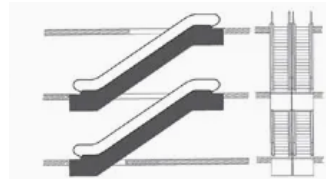


Gambar 6. 14. Penggunaan Augmented Reality dalam Pemeliharaan Lift

Selain lift, opsi bagi pengguna untuk dapat berpindah otomatis secara vertikal adalah dengan menggunakan eskalator. Eskalator adalah pengembangan dari fungsi tangga dengan menghilangkan kebutuhan pergerakan tenaga manusia yang digantikan dengan pergerakan oleh tenaga mesin. Eskalator pertama kali muncul pada suatu wahana hiburan di Amerika Serikat. Eskalator tersebut berupa pijakan bersudut miring yang dioperasikan dengan bantuan sabuk berjalan dari bahan kayu. Pada awal abad ke-20, eskalator dengan bentuk berjenjang mulai ditemukan dan terjadi perubahan material dari kayu ke logam yang menawarkan daya tahan yang lebih baik. Kelebihan eskalator dibandingkan dengan lift adalah penggunaan dan operasionalnya yang relatif mudah, sistem yang lebih sederhana dan kemudahan pengguna untuk melihat visual sekitar. Keterbatasan eskalator adalah kemampuan untuk transportasi dengan jarak tertentu dan kecepatan yang relatif lebih lambat. Penempatan eskalator pada ruang merupakan tanggung jawab dari arsitek dengan mempertimbangkan kemudahan akses dari pintu masuk dan sirkulasi, estetika terhadap ruangan, dan juga efektivitas dalam menampung arus pengguna dalam satu waktu tertentu. Jika dilihat dari pengaturan posisi eskalator, maka terdapat eskalator tunggal, paralel dan silang. Eskalator tunggal terdiri dari satu jalur eskalator yang diletakkan pada arah tertentu sedangkan eskalator paralel merupakan eskalator yang disusun secara berpasangan antara jalur naik dan jalur turun. Pola silang merupakan peletakan jalur eskalator yang bersilangan dengan arah yang berbeda dengan kombinasi arah naik dan turun.



Eskalator Tunggal



Eskalator Paralel



Eskalator Silang

Gambar 6. 15. Pola Peletakan Eskalator

Selain berbentuk linear, perkembangan teknologi juga membuka peluang pengembangan eskalator dalam bentuk yang berbeda. Keberadaan tangga spiral atau putar menjadi inspirasi pengembangan eskalator berbentuk spiral. Eskalator tipe ini secara dimensi membutuhkan ruang lebih besar dan secara operasional memakan biaya lebih besar karena kompleksitas pemasangan yang lebih rumit. Eskalator spiral umumnya digunakan pada fungsi bangunan yang menawarkan suasana kemewahan seperti hotel, museum dan hall eksebsi, Eskalator juga dikembangkan dalam konteks pergerakan horisontal melalui teknologi travelator. Travelator pada prinsipnya adalah bidang pijakan yang bergerak secara datar ataupun bersudut. Pergerakan travelator datar umumnya ditemukan di fasilitas transportasi dengan bangunan yang luas seperti misalnya bandara. Selain secara horisontal, travelator juga digunakan untuk berpindah secara vertikal layaknya eskalator. Perbedaannya adalah pada travelator bidang pijakan kaki berbentuk datar dan tidak berjenjang. Fungsi utama travelator terutama untuk kemudahan akses saat pengguna membawa barang, sehingga teknologi ini banyak ditemukan di bandara atau stasiun untuk mengakomodasi penumpang yang membawa koper dan juga di bangunan sarana perbelanjaan yang membutuhkan pergerakan dengan troli.



Gambar 6. 16. Teknologi Eskalator Spiral dan Travelator

Teknologi sensor mulai diterapkan untuk mengefisiensikan operasional eskalator dan travelator untuk penghematan energi. Pada saat tidak ada pengunjung yang naik, maka eskalator akan berhenti dan akan bergerak kembali setelah ada gerakan kaki yang menginjak eskalator. Pengembangan eskalator dengan teknologi digital juga berperan dalam mengatur kecepatan eskalator sesuai dengan karakteristik gerak pengguna. Kecerdasan buatan akan memberikan informasi yang lebih akurat terhadap kondisi eskalator sehingga kebutuhan perbaikan dan pemeliharaan dapat diidentifikasi sebelumnya. Teknologi eskalator juga dikembangkan dalam konteks kenyamanan pengguna dan estetika. Terdapat tipe eskalator yang secara otomatis terintegrasi dengan sistem *sanitizer* ultra violet pada sandaran tangan eskalator yang bergerak. Hal ini sebagai respon terhadap fakta bahwa sandaran tangan merupakan bagian eskalator yang paling tidak higienis. Dari segi estetika, beberapa eskalator dikembangkan dengan pendekatan estetika khusus seperti badan eskalator yang dibuat transparan atau pun integrasi media digital pada badan eskalator.

6.7. Integrasi Teknologi Smart Building dalam MEP (L.M.F. Purwanto)

Integrasi teknologi smart building dalam sistem Mechanical, Electrical, and Plumbing (MEP) telah merevolusi cara bangunan dirancang, dioperasikan, dan dipelihara. Menurut penelitian terbaru dari Smart Buildings Center (2023), bangunan dengan sistem MEP terintegrasi secara cerdas menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga 45% dan pengurangan

biaya operasional sebesar 30-40% dibandingkan bangunan konvensional. Transformasi ini tidak hanya mengoptimalkan kinerja masing-masing subsistem, tetapi menciptakan ekosistem bangunan yang saling terhubung dan mampu beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kebutuhan penghuni dan kondisi lingkungan.

What Does a BMS Do?

1. The role of the BMS in day to day **building operation**
2. **Building Control** Applications
3. Measuring and Monitoring **building performance**
4. Interaction with other **building systems**



Building Management Systems Basics

Gambar 6. 17. Smart Buildings Center

Dasar dari integrasi ini terletak pada konsep Internet of Things (IoT) yang menghubungkan berbagai komponen MEP melalui jaringan sensor dan aktuator cerdas. Sebuah studi oleh MIT Digital Building Lab (2023) mengungkapkan bahwa bangunan mutakhir kini memiliki rata-rata 1 sensor per 10 meter persegi, menghasilkan lebih dari 5 juta data point setiap harinya.

Data ini diolah oleh platform Building Management System (BMS) generasi terbaru yang menggunakan algoritma machine learning untuk mengidentifikasi pola penggunaan dan mengoptimalkan kinerja sistem secara real-time. Contoh nyata terlihat pada Salesforce Tower di San Francisco, di mana integrasi 12.000 titik sensor dengan sistem HVAC, pencahayaan, dan elevator mampu mengurangi konsumsi energi tahunan sebesar 28% (Johnson Controls, 2023).

Sistem mekanikal telah mengalami transformasi paling signifikan dalam era smart building. Unit pengkondisian udara modern tidak lagi beroperasi sebagai perangkat tunggal, tetapi sebagai bagian dari jaringan terdistribusi yang saling berkoordinasi. Penelitian ASHRAE (2023) menunjukkan bagaimana chiller cerdas dengan kemampuan prediktif maintenance dapat mengurangi downtime hingga 60% dan meningkatkan efisiensi operasional sebesar 25%. Sistem ventilasi pun telah berevolusi menjadi lebih adaptif, dengan penggunaan sensor kualitas udara yang mampu mendeteksi tidak hanya CO₂ tetapi juga senyawa organik volatil (VOC) dan partikel halus PM_{2.5}. Bangunan The Edge di Amsterdam menjadi contoh sempurna bagaimana integrasi antara sistem mekanikal dengan data occupansi real-time dapat menciptakan lingkungan kerja yang optimal sambil meminimalkan jejak karbon (PLP Architecture, 2023).

Di sektor elektrik, konsep microgrid bangunan telah mengubah paradigma distribusi daya secara fundamental. Laporan Schneider Electric (2023) mendokumentasikan bagaimana integrasi photovoltaic atap, battery energy storage system (BESS), dan generator darurat dengan sistem kontrol cerdas memungkinkan bangunan beroperasi secara mandiri selama 72 jam tanpa pasokan dari grid utama. Teknologi digital twin untuk sistem distribusi daya memungkinkan simulasi berbagai skenario operasional sebelum diimplementasikan di dunia nyata, mengurangi risiko kegagalan sistem sebesar 40% (Siemens, 2023). Selain itu, sistem manajemen beban dinamis yang dikembangkan oleh ABB (2023) mampu mengalokasikan daya secara optimal berdasarkan prediksi penggunaan dan harga listrik waktu nyata.

Revolusi digital juga telah menyentuh sistem plumbing yang sering dianggap sebagai aspek paling tradisional dari MEP. Jaringan pipa cerdas generasi terbaru dilengkapi dengan sensor tekanan dan aliran yang dapat mendeteksi kebocoran sekecil 0,1 liter per menit dari jarak 100 meter (Aquilar, 2023). Sistem daur ulang air greywater kini menggunakan teknologi membran bioreaktor (MBR) yang dikombinasikan dengan disinfeksi UV, menghasilkan air daur ulang dengan kualitas yang memenuhi standar WHO untuk penggunaan non-potable (Xylem, 2023). Yang lebih inovatif lagi adalah

penerapan teknologi digital water yang memanfaatkan analitik prediktif untuk mengoptimalkan siklus air seluruh bangunan, seperti yang diimplementasikan di Pinnacle@Duxton Singapura dengan hasil pengurangan konsumsi air sebesar 35% (PUB Singapore, 2023).

Tantangan utama dalam integrasi ini terletak pada kompleksitas interoperabilitas antara berbagai sistem dan protokol yang berbeda. Solusi yang muncul adalah pengembangan platform middleware berbasis cloud yang dapat menerjemahkan antara 15+ protokol industri berbeda, seperti yang dikembangkan oleh Cisco (2023). Tantangan keamanan siber juga menjadi perhatian utama, mengingat sistem MEP yang terhubung rentan terhadap serangan digital. Pendekatan zero-trust architecture dengan enkripsi end-to-end mulai diadopsi secara luas untuk melindungi infrastruktur kritis bangunan.

Dampak ekonomi dari integrasi ini cukup signifikan. Analisis oleh KPMG terhadap 50 bangunan komersial besar menunjukkan bahwa investasi dalam teknologi smart MEP mampu mencapai return on investment dalam 3-5 tahun melalui penghematan energi dan pengurangan biaya pemeliharaan. Lebih penting lagi, bangunan-bangunan ini mengalami peningkatan nilai sewa sebesar 15-20% karena kenyamanan dan keberlanjutan yang mereka tawarkan.

Masa depan integrasi smart MEP akan semakin dipengaruhi oleh perkembangan teknologi seperti 5G edge computing yang memungkinkan pemrosesan data secara lokal dengan latensi ultra-rendah, serta penerapan blockchain untuk manajemen aset dan pemeliharaan prediktif. Konsep cognitive building yang mampu belajar dan beradaptasi secara mandiri akan menjadi standar baru dalam industri properti, menciptakan bangunan yang tidak hanya efisien tetapi juga benar-benar responsif terhadap kebutuhan penghuninya.

6.8. Sistem Energi Terbarukan dalam Bangunan (*L.M.F. Purwanto*)

Revolusi sistem energi terbarukan dalam bangunan telah mengubah paradigma desain arsitektur dan teknik bangunan modern. Menurut laporan terbaru World Green Building Council (2023), bangunan dengan integrasi energi terbarukan yang komprehensif mampu mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik konvensional hingga 80%, sekaligus menurunkan emisi karbon operasional sebesar 65-90%. Transformasi ini tidak hanya terjadi

pada skala teknologi individual, tetapi telah menciptakan ekosistem energi bangunan yang sepenuhnya terintegrasi, di mana setiap komponen arsitektur berfungsi ganda sebagai pembangkit energi.

Perkembangan fotovoltaik bangunan terintegrasi (BIPV) telah mencapai tahap di mana sel surya tidak lagi sekadar ditempelkan pada bangunan, tetapi menjadi bagian intrinsik dari material bangunan itu sendiri. Penelitian terobosan di Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA, 2023) berhasil mengembangkan kaca jendela fotovoltaik transparan dengan efisiensi konversi 32% menggunakan teknologi perovskite tandem. Material inovatif ini memungkinkan fasad bangunan berfungsi sebagai pembangkit listrik tanpa mengorbankan transparansi atau estetika. Penerapan spektakuler terlihat pada bangunan Edge Olympic di Amsterdam, di mana seluruh kulit bangunan seluas 15.000 m² berfungsi sebagai permukaan penangkap energi, menghasilkan 1,2 GWh listrik per tahun - cukup untuk memasok 300 rumah tangga.

Sistem energi angin perkotaan telah mengalami evolusi signifikan dalam satu dekade terakhir. Turbin angin sumbu vertikal (VAWT) generasi baru yang terinspirasi oleh aerodinamika sayap burung hantu mampu beroperasi secara efektif dalam aliran angin perkotaan yang turbulen. Penelitian di Imperial College London menunjukkan bahwa susunan mikro turbin yang terintegrasi dengan atap dan fasad bangunan tinggi dapat memanfaatkan efek Venturi untuk meningkatkan kecepatan angin lokal hingga 3 kali lipat. Pencapaian terbaru yang patut dicatat adalah instalasi turbin angin heliks di antara menara-menara Pearl River Tower di Guangzhou, yang menghasilkan 15% dari total kebutuhan energi bangunan sambil berfungsi sebagai elemen arsitektur ikonik (Skidmore, Owings & Merrill, 2023).

Revolusi dalam sistem penyimpanan energi bangunan mungkin merupakan perkembangan paling krusial dalam memastikan keandalan sistem energi terbarukan. Teknologi baterai aliran vanadium redox dengan kapasitas penyimpanan 20 MWh kini telah tersedia dalam format modular yang dapat diintegrasikan ke dalam ruang basement bangunan komersial. Yang lebih inovatif adalah sistem penyimpanan energi termal menggunakan bahan perubahan fasa (PCM) nano-enhanced yang mampu menyimpan energi panas dan dingin dengan kerapatan energi mencapai 200 Wh/kg. Sistem ini, seperti yang diimplementasikan di bangunan penelitian ETH Zurich (2023), memungkinkan penyimpanan energi surya termal untuk digunakan dalam sistem HVAC dengan efisiensi round-trip mencapai 85%.

Integrasi sistem energi terbarukan dengan infrastruktur bangunan lainnya telah melahirkan konsep "bangunan sebagai pembangkit listrik". Di Singapura, proyek percontohan di Keppel Bay Tower menunjukkan bagaimana integrasi BIPV, sistem penyimpanan energi, dan manajemen beban cerdas dapat menciptakan jaringan mikro bangunan yang sepenuhnya mandiri. Sistem ini menggunakan algoritma prediktif berbasis AI untuk mengoptimalkan aliran energi antara produksi, penyimpanan, dan konsumsi, mencapai pengurangan beban puncak sebesar 40% (Singapore Building and Construction Authority, 2023). Yang lebih menarik adalah perkembangan sistem energi hibrid yang menggabungkan fotovoltaik, angin mikro, dan konversi energi kinetik dari pergerakan manusia dalam bangunan, seperti yang diujicobakan di stasiun kereta api Tokyo yang memanen energi dari langkah kaki penumpang (JR East, 2023).

Tantangan utama dalam implementasi sistem energi terbarukan bangunan terletak pada variabilitas sumber energi dan kebutuhan akan stabilitas jaringan. Solusi terkini melibatkan penggunaan teknologi inverter grid-forming canggih yang dapat mempertahankan frekuensi dan tegangan jaringan bahkan dengan penetrasi energi terbarukan 100% (SMA Solar Technology, 2023). Sistem manajemen energi berbasis digital twin memungkinkan simulasi dan prediksi kinerja sistem dalam berbagai skenario operasional, mengurangi ketidakpastian dalam perencanaan energi.

Dampak ekonomi dari integrasi energi terbarukan dalam bangunan semakin tidak terbantahkan. Studi oleh McKinsey Global Institute terhadap 100 bangunan komersial besar menunjukkan bahwa investasi dalam sistem energi terbarukan terintegrasi memiliki periode pengembalian modal 4-7 tahun, dengan peningkatan nilai properti sebesar 15-25%. Lebih penting lagi, bangunan-bangunan ini menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap fluktuasi harga energi, dengan penghematan biaya operasional mencapai 40-60% selama krisis energi 2022.

Masa depan sistem energi terbarukan dalam bangunan akan semakin dipengaruhi oleh konvergensi teknologi digital dan fisika material. Perkembangan sel surya berbasis quantum dot yang dapat menangkap spektrum cahaya lebih luas, material piezoelektrik yang mengubah tekanan akustik menjadi energi listrik, serta sistem manajemen energi berbasis blockchain untuk perdagangan energi peer-to-peer sedang membentuk lanskap baru dalam desain bangunan berkelanjutan. Yang pasti, integrasi energi terbarukan tidak lagi menjadi pilihan tambahan, melainkan komponen inti dari setiap bangunan masa depan yang ingin tetap relevan dalam era transisi energi global.



Gambar 6. 18. Photovoltaic di rumah Jerman

6.9. Pemeliharaan dan Manajemen Sistem MEP (*L.M.F. Purwanto*)

Pemeliharaan dan manajemen sistem Mechanical, Electrical, and Plumbing (MEP) telah mengalami transformasi fundamental seiring dengan berkembangnya teknologi digital dan tuntutan keberlanjutan dalam industri bangunan. Menurut penelitian terbaru dari Building Owners and Managers Association, biaya pemeliharaan sistem MEP yang efektif dapat mencapai 30-40% dari total biaya operasional bangunan, namun investasi ini mampu memperpanjang umur peralatan hingga 50% dan mengurangi konsumsi energi tahunan sebesar 15-25%. Pendekatan kontemporer dalam manajemen MEP tidak lagi bersifat reaktif, tetapi telah berkembang menjadi strategi proaktif dan prediktif yang memanfaatkan teknologi canggih untuk mengoptimalkan kinerja seluruh sistem bangunan.

Konsep Building Information Modeling (BIM) untuk pemeliharaan telah merevolusi cara fasilitas dikelola, terutama untuk sistem MEP yang kompleks. Studi oleh National Institute of Building Sciences (NIBS, 2023) menunjukkan bahwa implementasi BIM Level 3 untuk manajemen fasilitas dapat mengurangi waktu troubleshooting sistem MEP hingga 70% dan biaya pemeliharaan tahunan sebesar 22%. Model digital as-built yang diperkaya dengan data operasional menjadi living document yang terus diperbarui, mencakup informasi spesifikasi teknis, riwayat perbaikan, hingga petunjuk pemeliharaan spesifik untuk setiap komponen (Smith et al., 2023). Bangunan seperti Taipei 101 telah menerapkan sistem ini secara penuh, di mana setiap perubahan pada sistem MEP langsung direfleksikan dalam model digitalnya,

memungkinkan tim fasilitas untuk merencanakan intervensi pemeliharaan dengan presisi tinggi (JLL, 2023).

Teknologi Internet of Things (IoT) telah menjadi tulang punggung pemeliharaan prediktif sistem MEP modern. Jaringan sensor nirkabel yang dipasang pada peralatan kritis seperti chiller, transformator, dan pompa sirkulasi mampu memantau tidak hanya parameter operasional dasar seperti suhu dan tekanan, tetapi juga kondisi mekanis seperti getaran, kebisingan, dan kondisi pelumas (Lee & Cheng, 2023). Data ini dikumpulkan dalam platform manajemen fasilitas cerdas yang menggunakan algoritma machine learning untuk mendeteksi anomali dan memprediksi kemungkinan kegagalan peralatan. Penelitian IBM (2023) terhadap 50 gedung komersial besar menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat mengurangi downtime peralatan MEP hingga 60% dan biaya perbaikan darurat sebesar 45%.

Sistem manajemen pemeliharaan terkomputerisasi (CMMS) telah berevolusi dari sekadar database jadwal perawatan menjadi platform analitik canggih yang terintegrasi dengan berbagai sistem bangunan. Versi terbaru dari sistem seperti Maximo atau Fiix sekarang menawarkan kemampuan augmented reality untuk panduan pemeliharaan langsung di lapangan, integrasi dengan perangkat wearable teknisi, dan analisis preskriptif untuk mengoptimalkan sumber daya pemeliharaan (McKinsey, 2023). Bangunan Comcast Technology Center di Philadelphia melaporkan peningkatan produktivitas tim fasilitas sebesar 35% setelah mengimplementasikan CMMS generasi terbaru ini.

Strategi pemeliharaan untuk sistem kelistrikan telah mencapai tingkat kecanggihan baru dengan teknologi diagnostik berbasis kondisi. Termografi inframerah yang terintegrasi dengan drone otonom memungkinkan inspeksi rutin panel listrik dan switchgear tanpa perlu mematikan daya (NFPA 70B, 2023). Sistem monitor partial discharge untuk instalasi tegangan menengah dapat mendeteksi degradasi isolasi kabel sebelum menyebabkan kegagalan kritis. Yang lebih inovatif adalah penggunaan teknologi ultrasound untuk mendeteksi busur listrik yang muncul, mengurangi risiko kebakaran listrik hingga 80% menurut penelitian UL Solutions (2023).

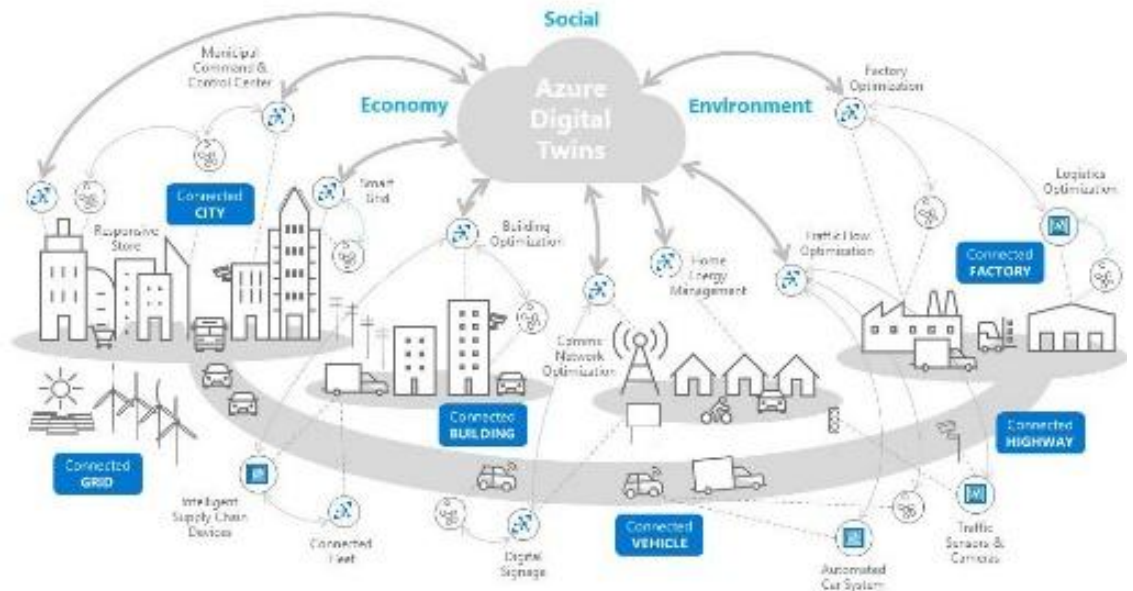
Pada sistem mekanikal, pendekatan pemeliharaan telah bergeser ke konsep reliability-centered maintenance (RCM) yang memprioritaskan intervensi berdasarkan analisis risiko dan dampak. AHU (Air Handling Unit) modern dilengkapi dengan sensor partikulat real-time yang tidak hanya memantau kualitas udara tetapi juga mengindikasikan kondisi filter dan belt (ASHRAE, 2023). Sistem pendingin menggunakan analisis termodinamika berbasis AI

untuk mengoptimalkan siklus refrigerasi dan mendeteksi kebocoran refrigeran dengan akurasi 95% (HVACR Journal, 2023). Contoh penerapan canggih terlihat di Marina Bay Sands Singapura, di mana sistem pemeliharaan prediktif untuk instalasi HVAC-nya mampu mengurangi konsumsi energi tahunan sebesar 1,2 GWh.

Manajemen sistem plumbing kontemporer mengandalkan teknologi akustik canggih dan analisis aliran untuk pemeliharaan preventif. Sensor kebocoran berbasis fiber optic dapat melokalisasi titik kebocoran dalam jaringan pipa yang kompleks dengan ketepatan hingga 10 cm. Sistem pemantauan kualitas air real-time menggunakan spektroskopi UV-Vis dan sensor elektrokimia mampu mendeteksi perubahan komposisi air secara instan, mencegah korosi dan scaling dalam sistem distribusi (NSF, 2023). Penelitian Water Research Foundation (2023) menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat mengurangi kehilangan air akibat kebocoran hingga 75% dalam sistem plumbing bangunan besar.

Integrasi sistem manajemen pemeliharaan dengan teknologi digital twin membuka babak baru dalam optimasi operasional. Model virtual yang terus diperbarui ini tidak hanya mereplikasi kondisi fisik sistem MEP, tetapi juga mensimulasikan berbagai skenario operasi dan intervensi pemeliharaan. Bandara Internasional Changi menggunakan digital twin untuk sistem MEP-nya, memungkinkan tim fasilitas menguji strategi pemeliharaan dalam lingkungan virtual sebelum implementasi nyata, mengurangi risiko kesalahan operasional sebesar 40%.

Tantangan utama dalam implementasi strategi pemeliharaan modern termasuk kesenjangan keterampilan tenaga kerja, fragmentasi data sistem, dan risiko keamanan siber. Solusi yang muncul mencakup program pelatihan berbasis augmented reality untuk teknisi, platform integrasi data berbasis cloud, serta arsitektur keamanan zero-trust untuk sistem kontrol bangunan. Analisis ROI oleh KPMG (2023) menunjukkan bahwa investasi dalam sistem pemeliharaan canggih dapat mencapai break-even point dalam 2-3 tahun melalui pengurangan downtime dan peningkatan efisiensi energi.



Gambar 6. 19. Digital twin

Bab 7

Teknologi Informasi dalam Desain dan Konstruksi

Yanuaris Benny Kristiawan; Ary Dwi Jatmiko

Selama beberapa dekade terakhir, pengembangan teknologi informasi (TI) telah menyebabkan perubahan paradoks dalam industri desain dan konstruksi. Hal ini dapat digambarkan sebagai perkembangan TI yang telah membawa transformasi besar dalam industri desain dan konstruksi, tetapi transformasi ini memunculkan tantangan baru yang tidak mudah. Perubahan yang terjadi bersifat paradoks karena di satu sisi memberikan kemajuan yang signifikan, tetapi di sisi lain menciptakan kompleksitas dan tantangan baru yang harus diatasi oleh para profesional di industri ini. TI telah meningkatkan efisiensi dan akurasi digitalisasi, otomatisasi, dan kecerdasan buatan, tetapi juga mengubah seluruh siklus hidup bangunan dari konseptualisasi ke operasional dan pemeliharaan (S. & L. Eastman, Teicholz, 2008). Sebagaimana dinyatakan Eastman, BIM membuat semua pemangku kepentingan diharapkan dapat bekerja sama dan berkomunikasi dengan lebih baik dalam alur kerja yang sama. Hal ini selanjutnya akan mengubah proses tradisional yang bersifat linear menjadi suatu sistem yang lebih terintegrasi. Pendekatan terintegrasi ini bertujuan merampingkan tahapan dalam desain, konstruksi, dan operasi bangunan. Pada akhirnya, penggunaan BIM diharapkan menghasilkan proyek yang lebih efisien dan efektif. Perkembangan ini telah mengubah pendekatan tradisional menjadi proses basis data yang lebih kolaboratif dan transparan, sehingga mengurangi kesalahan, limbah dan penundaan yang dianggap tak terhindarkan dalam industri konstruksi.

Penggunaan teknologi informasi dalam pembangunan meningkatkan secara signifikan produktivitas dan pengurangan biaya melalui kerja sama yang lebih baik dan keputusan berbasis data (S. Azhar, M. Khalfan, and T. Maqsood, 2012). Pada penelitian Azhar dinyatakan bahwa implementasi teknologi digital dapat mengurangi waktu desain hingga 30 % untuk menghemat biaya konstruksi antara 8% dan 15%. Teknologi ini memungkinkan visualisasi proyek dalam lingkungan simulasi, identifikasi masalah desain, konstruksi, atau operasional, serta kolaborasi yang lebih

erat di antara semua pemangku kepentingan proyek. Dalam penelitian yang lain Bryde dkk menyatakan bahwa melalui implementasi BIM, terjadi peningkatan produktivitas sebesar 25% dan mengurangi biaya proyek hingga 20%. Hal ini dapat terjadi karena pendeteksian konflik yang lebih awal, perkiraan biaya yang lebih akurat, dan penyesuaian yang lebih baik antar sektor (D. Bryde, M. Broquetas, and J. M. Volm, 2013). Berdasarkan dua penelitian di atas dapat dinyatakan bahwa manfaat terbesar penerapan BIM terletak pada pengurangan biaya dan manajemen waktu proyek. Tantangan utama terletak pada budaya dan organisasi.

Proses pengadopsian BIM secara global telah menjadi pendorong utama perubahan digital di sektor konstruksi. Hal ini terjadi karena BIM tidak hanya dipahami sebagai teknologi semata, melainkan suatu metodologi komprehensif yang memungkinkan representasi digital yang akurat dari sifat fisik dan fungsional fasilitas. Melalui BIM serangkaian teknologi, proses, dan pedoman dapat dirancang secara kolaboratif untuk membangun dan mengoperasikannya dalam ruang virtual.

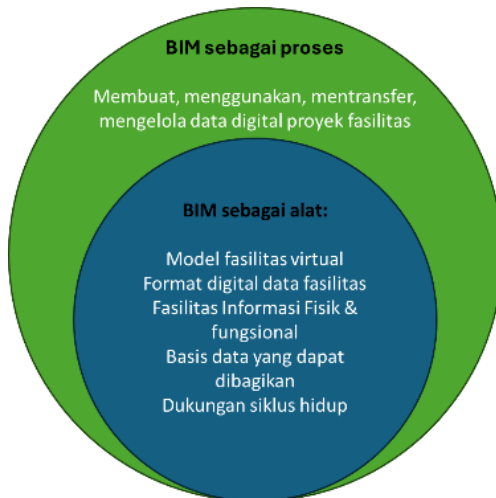
Selain BIM, dikenal pula istilah teknologi Internet of Thing (IoT) yang telah membuka dimensi baru dalam memonitor dan mengontrol proyek konstruksi (B. Dave, A. Buda, A. Nurminen, and K. Främling, 2018). Melalui integrasi IoT dan BIM akan memantau dan mengendalikan proyek konstruksi secara real time, untuk mengurangi ketidakpastian dan risiko. Sensor terintegrasi dan perangkat cerdas memungkinkan pengumpulan data di lokasi konstruksi secara real-time sehingga dapat dipantau kemajuan, penggunaan sumber daya, dan tingkat keamanan pekerja secara lebih detail yang belum pernah terjadi sebelumnya. Selanjutnya istilah "digital twin" yang menyediakan representasi virtual dinamis dari aset fisik disematkan untuk teknologi yang menjembatani gap antara dunia fisik dan digital ini. Istilah "digital twin" pertama kali dinyatakan oleh Dr. Michael Grieves pada awal tahun 2000-an. Konsep ini pertama kali diperkenalkan sebenarnya dalam konteks manajemen siklus hidup produk.

7.1. Building Information Modeling (BIM) (Yanuaris Benny Kristiawan)

Sebagaimana dinyatakan oleh Eastman di atas bahwa Building Information Modeling (BIM) adalah teknologi berbasis model digital yang memungkinkan kolaborasi lebih baik dalam perencanaan, desain, konstruksi, dan operasional bangunan. BIM memungkinkan representasi digital dari karakteristik fisik dan fungsional suatu bangunan dalam satu platform yang dapat diakses oleh berbagai pihak terkait (P. Smith, 2014). Meskipun istilah

"Building Information Modeling" pertama kali muncul dalam makalah GA van Nederveen dan FP Tolman (1992), konsep dasar BIM sebenarnya sudah dikembangkan sejak era 1970-an, dengan penelitian awal oleh Charles Eastman tentang model berbasis objek untuk desain bangunan. Dari sisi perangkat banyak orang lebih mengenal Autodesk yang merilis makalah tentang BIM pada tahun 2002, tetapi konsep dan teknologi BIM sudah dikembangkan sebelum itu oleh perusahaan lain seperti Graphisoft dengan ArchiCAD (1984) dan Bentley Systems dengan MicroStation. Di dunia arsitektur Frank Gehry dikenal sebagai salah satu arsitek yang banyak menggunakan teknologi digital dalam desainnya, Walt Disney Concert Hall tidak sepenuhnya merupakan proyek BIM pertama. Proyek-proyek lain, seperti terminal Bandara Internasional Kuala Lumpur (KLIA) di Malaysia, juga sudah menerapkan metode serupa di era 1990-an. Dapat diperhatikan berikut bagaimana BIM telah didefinisikan dalam berbagai cara oleh para ahli dan berbagai lembaga internasional seperti:

- National Institute of Building Sciences (NIBS) mendefinisikan BIM sebagai "representasi digital dari karakteristik fisik dan fungsional suatu fasilitas yang berfungsi sebagai sumber informasi yang andal untuk pengambilan keputusan selama siklus hidup proyek"



Gambar 7. 1. BIM sebagai Proses dan Alat

- Mengembangkan apa yang dinyatakan dalam NIBS Peckiene dan Ustiovicus menyatakan bahwa BIM adalah proses di mana informasi tentang bangunan atau sekelompok bangunan dihasilkan dan dikelola. Namun, sejumlah besar informasi yang memiliki pengaruh pada setiap struktur (perencanaan, desain, konstruksi, dll.)

terkandung dalam lingkungan atau wilayah bangunan yang direncanakan (A. Peckiene and L. Ustinovičius, 2017)

- Hal serupa juga dinyatakan oleh Succar yang menyatakan bahwa BIM adalah kerangka kerja yang mencakup model informasi, proses, dan alat untuk meningkatkan koordinasi proyek konstruksi (B. Succar, 2009).
- Di dalam ISO 19650 BIM diklasifikasikan sebagai metodologi untuk pengelolaan informasi yang terstruktur dalam proyek konstruksi

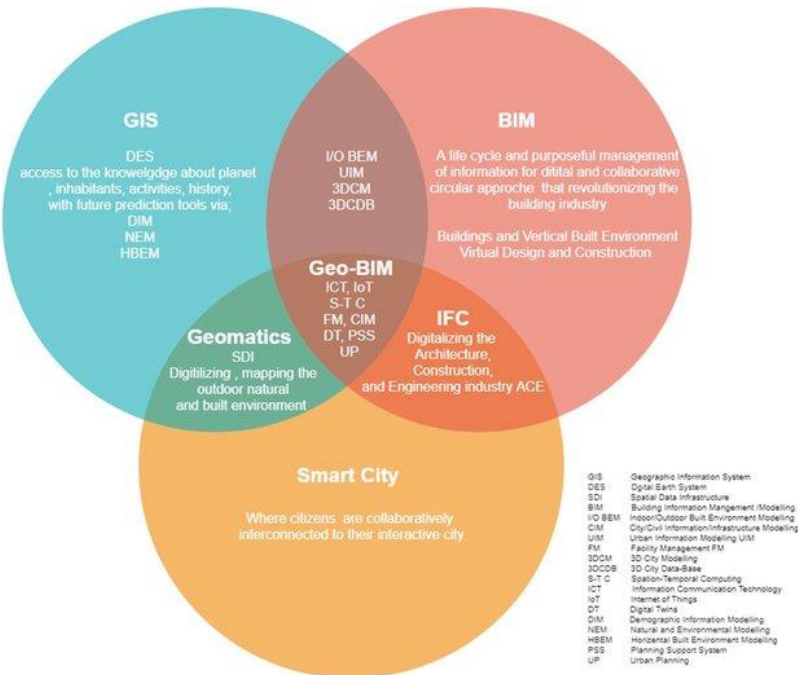
Secara umum definisi di atas sudah tercakup dalam pengertian BIM yang digunakan oleh Kementerian PUPR yaitu pendekatan untuk desain bangunan, konstruksi, dan manajemen, dimana didalamnya terdapat sistem, pengelolaan, metode atau runutan pengerjaan suatu proyek yang diterapkan berdasarkan informasi terkait dari keseluruhan aspek bangunan yang dikelola. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) No. 22/PRT/M/2018, yang ditetapkan pada 14 September 2018 dan diundangkan pada 15 Oktober 2018, mengatur tentang pembangunan bangunan gedung negara . Salah satu poin penting dalam peraturan ini adalah penerapan teknologi Building Information Modeling (BIM) untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam proses konstruksi.

Penerapan BIM dalam skala ruang yang lebih besar dikenal dengan Konsep City Information Modeling (CIM). CIM tercatat pertama kali diperkenalkan oleh Lachmi Khemlani pada tahun 2007 dalam jurnal yang ditulis Zhen Xu:

"The concept of city information modeling (CIM) was presented by Khemlani in 2007. With the development of building information modeling (BIM) technology, Khemlani extended and applied information modeling from the building level to the city level." (Z. Xu, M. Qi, Y. Wu, X. Hao, and Y. Yang, 2021).

Khemlani mengembangkan konsep ini dengan memperluas penerapan Building Information Modeling (BIM) dari skala bangunan ke skala kota, sehingga CIM awalnya dipahami sebagai bentuk teknologi BIM yang diterapkan khusus untuk kota. Sebelumnya, Charles M. Eastman, seorang arsitek dan profesor asal Amerika, dikenal sebagai pelopor dalam bidang pemodelan informasi bangunan. Ia mengembangkan sistem Building Description System (BDS) yang kemudian dikenal sebagai cikal bakal BIM (C. M. Eastman and S. Rafael, 2008). Meskipun kontribusi Eastman berfokus pada skala bangunan, karyanya menjadi dasar bagi pengembangan konsep CIM di masa mendatang.

Perkembangan gagasan BIM skala kota dilakukan dalam penelitian Al Furjadi dkk yang merelasikan konsep BIM, Smart City dan GIS untuk meningkatkan komunikasi dan menjembatani kesenjangan antara industri Geospasial dan konstruksi. Model Kota 3D atau *3D City Model* (3DCM) sangat penting untuk perencanaan kota karena memungkinkan konsep City Information Modeling (CIM), yang merupakan penerapan Building Information Modeling (BIM) dalam skala kota. Model ini adalah virtualisasi dunia nyata yang digunakan untuk komputasi awan dan spasial-temporal dalam menciptakan Digital Twins untuk Kota Pintar. Geomatics memainkan peran penting dalam pembangunan 3DCM, meskipun terdapat keterbatasan pada data yang diperoleh dari penginderaan jarak jauh. Oleh karena itu, informasi geospasial sukarela / *Volunteer Geo-Information*(VGI) dan dataset spasial dari OpenStreetMap (OSM) banyak digunakan dalam rekonstruksi 3DCM. CIM mengintegrasikan berbagai sumber data dan model untuk menganalisis dan mengelola sistem kota, yang mendukung perencanaan kota yang berkelanjutan dan transformasi kota menjadi lebih pintar serta tahan lama. Model Kota 3D harus menyertakan data geometris, atribut, dan informasi dengan Level of Detail (LoD) yang sesuai, yang memungkinkan aplikasi dan analisis spasial-temporal yang lebih baik selama siklus hidup aset perkotaan dan lingkungan yang dibangun.



Gambar 7. 2. Pendekatan Geo-BIM dan implementasi konsep smart city

7.1.1 Level of Detail dan Dimensi BIM

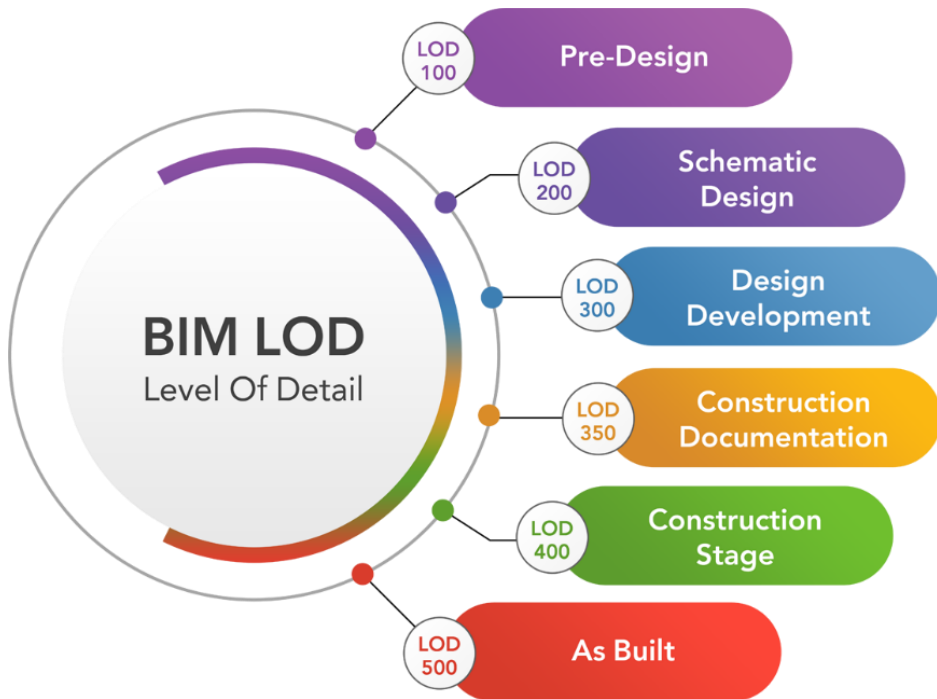
Dapat dinyatakan bahwa prinsip BIM adalah proses pembuatan model dan data secara bersamaan dan dikolaborasikan oleh semua pihak yang terlibat dalam proses perencanaan, perancangan, fabrikasi, pembangunan dan pemeliharaan. Seiring waktu, BIM berkembang dari konsep dasar menjadi berbagai jenis implementasi, seperti disampaikan Eastman (2008). Dalam konteks Building Information Modeling (BIM), terdapat dua konsep penting yang sering dibahas: Level of Development (LOD) dan Dimensi BIM. Keduanya memiliki peran yang berbeda dalam pengembangan dan penggunaan model BIM.

1. Level of Development (LOD)

LOD mengacu pada tingkat pengembangan dan keandalan informasi yang disajikan dalam model BIM. Ini menunjukkan sejauh mana elemen model telah didefinisikan, baik secara geometris maupun informasional, serta sejauh mana pemangku kepentingan dapat mengandalkan informasi tersebut. Terdapat beberapa tingkatan LOD yang umum digunakan :

- **LOD 100 (Konsep):** Model berisi representasi konseptual dengan informasi dasar seperti area, volume, dan orientasi.
- **LOD 200 (Skematik):** Elemen model memiliki ukuran, bentuk, dan lokasi perkiraan.
- **LOD 300 (Desain Detail):** Elemen model didefinisikan dengan detail yang tepat, termasuk ukuran, bentuk, lokasi, dan orientasi yang akurat.
- **LOD 350 (Dokumentasi Konstruksi):** Menambahkan detail tentang bagaimana elemen berinteraksi dengan sistem lain dan elemen bangunan lainnya.
- **LOD 400 (Fabrikasi):** Elemen model mencakup detail yang diperlukan untuk fabrikasi dan konstruksi, termasuk informasi spesifik manufaktur.
- **LOD 500 (As-Built):** Merepresentasikan kondisi akhir bangunan setelah konstruksi selesai, sesuai dengan apa yang terbangun di lapangan.

Penggunaan LOD membantu memastikan bahwa semua pihak memiliki pemahaman yang jelas tentang tingkat detail dan keandalan informasi dalam model pada setiap tahap proyek.



Gambar 7. 3. Skema Level of Detail BIM

2. Dimensi BIM

Dimensi dalam BIM merujuk pada lapisan informasi tambahan yang ditambahkan ke model 3D dasar untuk meningkatkan fungsionalitas dan analisis. Setiap dimensi menambahkan jenis data atau perspektif tertentu. Berikut adalah penjelasan dari 2D BIM hingga 10D BIM:

- **2D BIM – Sumbu XY:** 2D BIM Umumnya belum dimasukkan dalam dimensi BIM. Merupakan representasi bangunan dalam dua dimensi (panjang dan lebar), biasanya berupa gambar teknis atau rencana dasar tanpa informasi kedalaman atau tinggi.
- **BIM 3D:** Representasi model digital tiga dimensi dalam proyek konstruksi dengan elemen geometris dan informasi terkait. Model ini mencakup informasi rinci mengenai geometri, material, struktur, dan sistem bangunan lainnya. BIM memungkinkan para profesional di bidang arsitektur, teknik sipil, dan konstruksi untuk berkolaborasi dalam satu platform digital yang sama, sehingga mereka dapat memperoleh informasi yang sama tentang suatu proyek konstruksi (P. Smith, 2014).

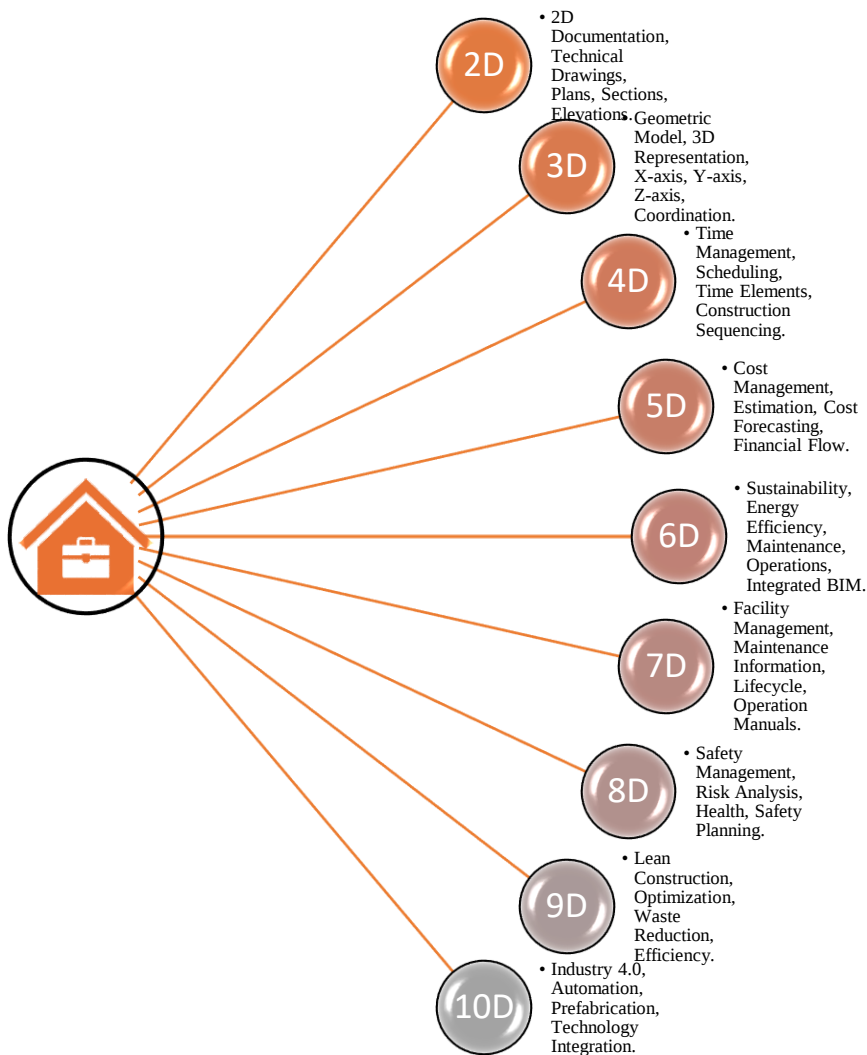
- **BIM 4D - Waktu:** Mengintegrasikan aspek waktu (penjadwalan), urutan, durasi dan tonggak dalam model 3D BIM untuk simulasi konstruksi. Hal ini memungkinkan para pemangku kepentingan proyek untuk memvisualisasikan dan menganalisis urutan konstruksi, mengenali potensi konflik, dan membuat keputusan yang lebih terinformasi sepanjang proses pembangunan (J. Wiley *et al.*. 1981). Contoh penerapan 4D BIM dalam proyek arsitektur adalah pembangunan gedung perkantoran hijau di Jakarta pada tahun 2025. Proyek ini menggunakan BIM untuk mencapai efisiensi energi dan meminimalisir limbah konstruksi. Penerapan BIM memungkinkan optimasi desain untuk memaksimalkan cahaya alami dan mengurangi kebutuhan pencahayaan buatan
- **BIM 5D - Biaya:** Menambahkan informasi biaya proyek dalam model BIM untuk mendukung manajemen anggaran.
- **BIM 6D – Keberlanjutan dan Manajemen Siklus Hidup:** Memasukkan aspek keberlanjutan dan efisiensi energi dalam model BIM. Data terkait kinerja energi, pemilihan material, dan dampak bangunan terhadap lingkungan ditambahkan dengan dimensi ini. BIM 6D membantu tim proyek membuat pilihan desain yang berkelanjutan dan mengoptimalkan kinerja bangunan dalam jangka panjang, termasuk efisiensi energi dan biaya operasional.
- **BIM 7D – Pengoperasian dan Pemeliharaan:** Digunakan untuk manajemen operasional dan pemeliharaan bangunan setelah konstruksi selesai. BIM 7D memungkinkan manajer fasilitas untuk dengan mudah mengelola aset dan tugas pemeliharaan karena mencakup informasi tentang peralatan, sistem, manual, dan detail garansi. Hal ini sangat membantu dalam manajemen fasilitas, melacak perbaikan, dan memastikan pengoperasian bangunan yang efisien sepanjang masa pakainya.

Ekstensi dimensi BIM di luar 3D hingga 7D sebagaimana perkembangan BIM 8D yang sering dikaitkan dengan keselamatan dan kesehatan kerja, BIM 9D untuk keberlanjutan, dan BIM 10D untuk manajemen aset atau aspek lainnya merupakan hasil evolusi kolektif dari praktik dan kebutuhan industri konstruksi. Salah satu kontributor yang menyatakan sistem BIM setelah 7D adalah Dominik Zettler dan Dominik Pleyer (2025). Mereka menyatakan BIM 8D sampai 10D sebagai berikut:

- **8D BIM – Keamanan:** Mengintegrasikan informasi keselamatan untuk mengantisipasi dan menghindari risiko selama proses konstruksi. Dimensi ini memungkinkan analisis terperinci

mengenai aspek keselamatan proyek dan membantu menghindari kecelakaan melalui simulasi virtual. Manfaat penggunaan 8D BIM adalah peningkatan keselamatan kerja, analisis bahaya yang terperinci, pencegahan kecelakaan, dan pelatihan pekerja di lingkungan virtual yang aman.

- **9D BIM - Konstruksi Ramping:** Mengoptimalkan proses konstruksi untuk meminimalkan pemborosan dan memaksimalkan efisiensi. Dimensi ini berfokus pada proses konstruksi ramping yang meningkatkan efisiensi dan mengurangi durasi proyek. Manfaatnya yaitu meningkatkan produktivitas, pengurangan durasi proyek, dan penggunaan sumber daya yang dioptimalkan.
- **10D BIM - Industri 4.0 dan otomatisasi:** Penggunaan teknologi digital untuk mengindustrialisasi proses konstruksi sepenuhnya. Dimensi ini memusatkan data dan mengotomatiskan tugas-tugas kompleks untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi di semua tahap proses konstruksi. Diharapkan dapat terjadi sentralisasi data, otomatisasi tugas-tugas kompleks, dan optimalisasi semua fase proyek melalui penggunaan teknologi digital yang cerdas. Robot yang sepenuhnya otomatis digunakan untuk membuat modul prefabrikasi untuk perakitan selanjutnya berdasarkan perencanaan BIM. Hal ini dimaksudkan untuk menyederhanakan proses sejauh mungkin dan membuatnya bebas dari kesalahan. Pencetakan 3D bangunan juga dimungkinkan dengan proses ini.



Gambar 7. 4. Dimensi BIM

Sebagai gambaran bagaimana BIM diaplikasikan, misalnya dengan membayangkan sebuah proyek konstruksi untuk gedung perkantoran baru. Arsitek dan tenaga insinyur lain yang terlibat dalam perencanaan dapat mendesain bangunan secara visual menggunakan BIM 3D. Adapun BIM 4D membantu manajer konstruksi (MK) untuk mengoptimalkan jadwal konstruksi dan mengkoordinasikan fase-fase konstruksi dengan lebih baik. BIM 5D akan memastikan kontrol biaya atau *budgeting* yang tepat. Terakhir, BIM 6D memungkinkan perencanaan penghematan energi dengan menganalisis berbagai solusi teknis untuk mengurangi konsumsi energi. Setelah selesai, model bangunan kemudian disiapkan untuk manajemen fasilitas. Melalui integrasi dimensi-dimensi ini, sebuah proyek konstruksi diharapkan dapat

direalisasikan dengan lebih efisien, hemat biaya, dan berkelanjutan. Secara detail manfaat penggunaan BIM yang paling menonjol:

1. Perencanaan yang lebih akurat dan efisien
2. Visualisasi proyek penuh
3. Output dengan kualitas lebih tinggi
4. Mengurangi kesalahan dan pengerjaan ulang
5. Mengurangi penundaan dalam menyelesaikan proyek
6. Akses mudah dan real-time ke informasi bangunan
7. Peningkatan komunikasi antar tim
8. Penilaian biaya yang lebih baik
9. Kemampuan untuk memantau perubahan
10. Menurunkan risiko dan biaya untuk melaksanakan proyek
11. Identifikasi dini dan mitigasi bentrokan
12. Memantau dan melacak kemajuan selama konstruksi
13. Meningkatkan produktivitas, efisiensi dan akuntabilitas
14. Meningkatkan keselamatan dan kesehatan kerja.
15. Daya saing – proyek yang lebih baik dan lebih banyak tawaran.

7.1.2 Peran Pekerjaan dalam BIM

Dalam konteks Building Information Modeling (BIM) menggunakan Archicad, terdapat berbagai peran pekerjaan yang berkontribusi pada keberhasilan proyek konstruksi. Berikut adalah beberapa peran utama:

1. **BIM Manager:** Bertanggung jawab untuk mengembangkan dan menerapkan standar BIM dalam organisasi. Mereka memastikan bahwa semua model informasi proyek sesuai dengan parameter teknis dan regulasi, serta memelihara rencana eksekusi BIM untuk setiap proyek.
2. **BIM Coordinator:** Mengelola proses digital dalam proyek, memastikan bahwa semua tim bekerja sesuai dengan rencana eksekusi BIM. Mereka berkoordinasi dengan berbagai disiplin ilmu untuk memastikan integrasi model yang efektif.
3. **BIM Modeler:** Bertanggung jawab untuk membuat dan memodifikasi model 3D menggunakan perangkat lunak seperti Archicad, Revit dan sejenisnya. Mereka memastikan bahwa model tersebut akurat dan sesuai dengan spesifikasi proyek.

4. **Arsitek:** Menggunakan software BIM untuk merancang dan memvisualisasikan proyek arsitektur dalam format 3D, memungkinkan visualisasi yang realistis dan interaktif.
5. **Drafter:** Membantu dalam pembuatan gambar teknis dan detail konstruksi menggunakan software BIM, memastikan bahwa semua dokumentasi sesuai dengan standar dan spesifikasi yang ditetapkan.

Setiap peran ini memiliki tanggung jawab spesifik yang saling mendukung untuk mencapai efisiensi dan akurasi dalam proses desain dan konstruksi menggunakan BIM dan Archicad.

7.1.3 BIM di Indonesia

Aplikasi BIM di Indonesia semakin meluas, terutama dalam proyek-proyek besar seperti pembangunan infrastruktur, gedung tinggi, dan kawasan komersial. Banyak perusahaan mulai mengadopsi BIM untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi risiko kesalahan dalam konstruksi. Adopsi BIM mengalami perkembangan pada beberapa tahun terakhir. Pemerintah melalui Kementerian PUPR telah mengeluarkan berbagai regulasi dan pedoman terkait penerapan BIM dalam proyek infrastruktur, seperti Peraturan Menteri PUPR No. 22/PRT/M/2018 tentang Penerapan Manajemen Konstruksi Berbasis BIM. Beberapa proyek besar yang telah mengimplementasikan BIM di Indonesia termasuk pembangunan Jalan Tol Trans-Sumatera dan revitalisasi Stadion Utama Gelora Bung Karno. Meskipun demikian, tantangan utama dalam penerapan BIM di Indonesia masih meliputi kurangnya tenaga ahli yang terlatih, keterbatasan infrastruktur digital, serta resistensi dari berbagai pemangku kepentingan di industri konstruksi. Untuk mengatasi kendala ini, pemerintah bekerja sama dengan berbagai institusi akademik dan organisasi profesional dalam penyelenggaraan pelatihan serta sertifikasi tenaga kerja berbasis BIM.

Perkumpulan Masyarakat BIM Indonesia atau yang dikenal dengan Institute BIM Indonesia (IBIMI) yang sempat aktif dalam mendorong adopsi BIM melalui edukasi, pelatihan, dan advokasi kebijakan. IBIMI diprakarsai oleh M. Kharis Alfi S., dan Aswin Indraprastha sejak tahun 2018. Perkumpulan ini merupakan organisasi yang terdiri dari para profesional dan akademisi yang berkomitmen untuk mempercepat transformasi digital dalam industri konstruksi Indonesia. IBIMI bekerja sama dengan berbagai instansi pemerintah dan swasta dalam mengadakan pelatihan dan sertifikasi berbasis BIM untuk meningkatkan kualitas sumber daya manusia di industri konstruksi. Mereka aktif dalam forum-forum diskusi terkait kebijakan

digitalisasi konstruksi serta terlibat dalam penyusunan roadmap BIM nasional.

Building Information Modeling (BIM) diharapkan menjadi standar utama dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi di Indonesia. Hal ini ditegaskan melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Nomor 22/PRT/M/2018 tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara. Peraturan tersebut mewajibkan penerapan BIM pada bangunan gedung negara yang tidak sederhana dengan kriteria luas di atas 2.000 m² dan lebih dari dua lantai. Pemerintah Indonesia berusaha mendorong implementasi BIM dalam proyek infrastruktur lainnya. Hal tersebut dapat dilihat dari Kementerian PUPR yang merekomendasikan perluasan penerapan BIM di setiap unit organisasi pada tahun 2021. Penerapannya tidak terbatas pada bangunan gedung negara, tetapi juga mencakup proyek jalan, jembatan, dan infrastruktur lainnya.

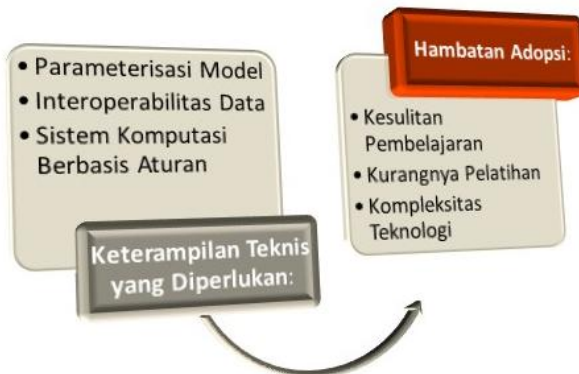
Penerapan BIM di Indonesia juga didukung oleh standar internasional, seperti ISO 19650, yang mengatur konsep dan prinsip dalam desain serta digitalisasi informasi bangunan untuk pekerjaan konstruksi. Standar ini membantu memastikan bahwa implementasi BIM dilakukan secara konsisten dan efektif, meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kualitas dalam industri konstruksi nasional. Dengan adanya regulasi dan standar tersebut, diharapkan implementasi BIM dapat meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kualitas dalam industri konstruksi di Indonesia, sejalan dengan perkembangan teknologi dan kebutuhan pembangunan yang semakin kompleks.

7.1.4 Tantangan Penggunaan BIM oleh Arsitek dalam Proyek Konstruksi

Building Information Modeling (BIM) telah menjadi salah satu teknologi paling berpengaruh dalam industri arsitektur, teknik, dan konstruksi (AEC). Namun, penerapannya masih menghadapi berbagai tantangan yang dapat mempengaruhi efektivitas penggunaannya dalam proyek-proyek arsitektur. Tantangan-tantangan ini mencakup aspek teknis, ekonomi, dan sosial yang memerlukan perhatian dari berbagai pemangku kepentingan.

Salah satu tantangan utama dalam penggunaan BIM adalah kompleksitas adopsi teknologi dan kurva pembelajaran yang masih berjarak lebar. Menurut Ghaffarianhoseini et al. banyak arsitek mengalami kesulitan dalam menguasai perangkat lunak BIM karena membutuhkan pemahaman

mendalam tentang parameterisasi model, interoperabilitas data, dan sistem komputasi berbasis aturan (A. Ghaffarianhoseini *et al.*, 2017). Hal ini diperburuk oleh kurangnya pelatihan yang memadai di kalangan profesional arsitektur, yang menghambat integrasi penuh BIM dalam praktik desain mereka. Untuk memperjelas tantangan ini, Gambar berikut menunjukkan skema keterkaitan antara keterampilan teknis yang diperlukan dan hambatan adopsi yang dihadapi oleh arsitek.



Gambar 7. 5. Tantangan Penggunaan BIM

Interoperabilitas -kemampuan berbagai sistem untuk berkomunikasi, bertukar data, dan menggunakan informasi yang telah dipertukarkan- antar perangkat lunak BIM masih menjadi kendala signifikan. Eastman dkk menekankan bahwa perbedaan format file antar platform BIM sering kali menyebabkan inkonsistensi dalam pertukaran data antara berbagai disiplin ilmu di dalam proyek konstruksi (S. & L. Eastman, Teicholz,, 2008). Ketidakcocokan format data ini mengakibatkan hilangnya informasi penting selama transfer file, yang pada akhirnya menghambat kolaborasi yang efektif antara arsitek, insinyur, dan kontraktor.

Dari perspektif ekonomi, biaya awal implementasi BIM yang tinggi sering kali menjadi penghalang bagi banyak perusahaan arsitektur, terutama yang berskala kecil dan menengah. Smith mengungkapkan bahwa investasi awal dalam perangkat lunak BIM, pelatihan tenaga kerja, dan infrastruktur perangkat keras dapat menjadi beban finansial yang berat (Smith, 2014). Meskipun dalam jangka panjang BIM menawarkan penghematan biaya melalui efisiensi operasional, banyak perusahaan masih enggan atau menunda untuk mengadopsi teknologi ini karena kendala biaya awal.

Dari segi sosial dan budaya, resistensi terhadap perubahan juga menjadi tantangan dalam implementasi BIM. Succar mencatat bahwa banyak profesional di industri konstruksi masih mempertahankan metode tradisional

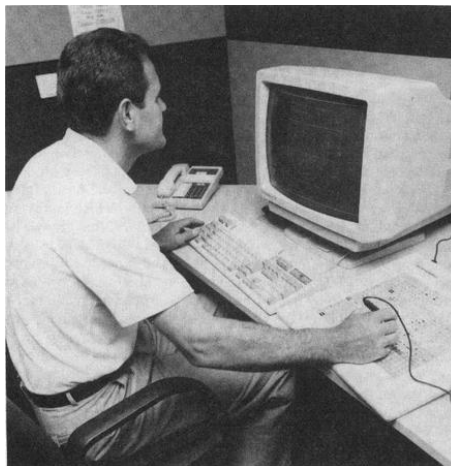
dalam perancangan dan pengelolaan proyek. Kurangnya pemahaman tentang manfaat BIM dan ketakutan akan perubahan dalam alur kerja sering kali menyebabkan hambatan dalam transisi ke teknologi ini.

Selain itu, standar dan regulasi terkait BIM yang belum seragam di berbagai negara juga menjadi tantangan besar. Liu dkk menunjukkan bahwa perbedaan regulasi dan standar BIM antar negara menyebabkan ketidakjelasan dalam penerapan teknologi ini dalam proyek-proyek global. Beberapa negara telah mengembangkan pedoman khusus untuk penggunaan BIM dalam proyek konstruksi, namun adopsi yang tidak seragam menghambat integrasi BIM secara luas.

Dengan demikian, meskipun BIM menawarkan berbagai manfaat bagi arsitek dalam proyek konstruksi, tantangan teknis, ekonomi, sosial, dan regulasi masih menjadi hambatan utama dalam implementasinya. Oleh karena itu, diperlukan upaya bersama dari pemerintah, industri, dan akademisi untuk mengembangkan solusi yang dapat mengatasi hambatan-hambatan ini dan mendorong adopsi BIM yang lebih luas.

7.2. Teknologi Digital dan Automasi dalam Konstruksi (Ary Dwi Jatmiko)

Dunia konstruksi berkembang pesat menuju ke industri otomasi, dengan masuknya teknologi digital mempercepat perkembangannya. Teknologi digital sudah lama masuk ke dalam industri konstruksi, terutama di tahap perencanaan. Dimulai dengan diperkenalkan Computer Aided Design oleh Dr. Patrick Hanratty dengan nama Pronto di tahun 1957.



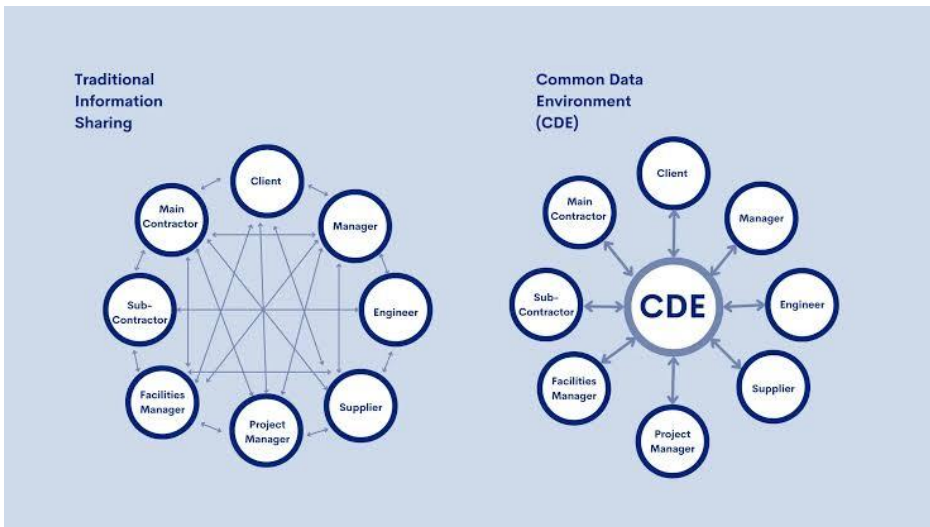
Gambar 7. 6. Drafter dengan menggunakan computer

Pada awalnya CAD dikembangkan untuk kebutuhan manufaktur di bidang permesinan, terutama di bidang industri otomotif dan aviasi. Untuk bidang bangunan atau konstruksi, penggunaan teknologi digital diperkenalkan oleh Graphisoft dengan perangkat lunak ArchiCAD di tahun 1984. Autodesk baru masuk pada tahun 2000 dengan perangkat lunak Revit.

Perkembangan terus terjadi dengan tujuan mempercepat kerja dan koordinasi, dengan pemanfaatan internet, ada beberapa perkembangan diantaranya penggunaan *2D & 3D model library* yang diperkenalkan oleh PARTCommunity pada tahun 2000, dan penyimpanan berbasis *cloud* (awan) yang diperkenalkan oleh Autodesk dengan Autodesk 360 pada tahun 2012. Pada saat ini di atas tahun 2018, sudah berkembang pemanfaatan peralatan tambahan untuk kebutuhan pemindaian obyek bangunan, visualisasi berbasis virtual reality, bahkan augmented reality.

7.2.1 Common Data Environment (CDE)

Dalam pelaksanaan proyek pada saat ini penyimpanan berbasis awan (*cloud*) sangat dibutuhkan dan sudah menjadi standar pada penggunaan *Building Information Modeling* (BIM) di Indonesia, pada umumnya disebut menggunakan Common Data Environment (CDE). Penggunaan CDE bukan hanya untuk kebutuhan penyimpanan tetapi juga sebagai media untuk melakukan koordinasi dari semua pemangku kepentingan, meliputi pemilik, perancang, manager, pemasok, tenaga ahli, kontraktor, regulator, dan pihak-pihak lain yang berkepentingan (gambar 7.22). Semua ini juga sesuai dengan penerapan ISO 19650 tentang Implementasi *Building Information Modeling*.

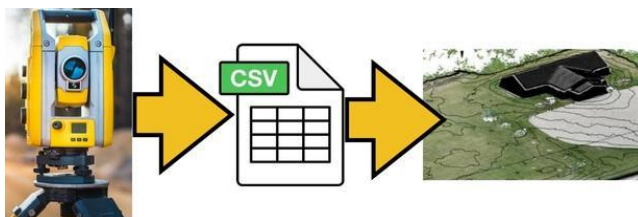


Gambar 7. 7. Perkembangan Metode Manajemen Informasi dalam Teknologi Konstruksi Digital

Penggunaan CDE membuat koordinasi antar pihak dapat berlangsung secara simultan dan akurat. Selain itu semua kegiatan yang dilakukan tercatat secara baik, sehingga menunjang dalam melakukan kontrol, atau evaluasi untuk pelaksanaan kegiatan konstruksi, mulai dari tahap pemograman sampai serah terima proyek.

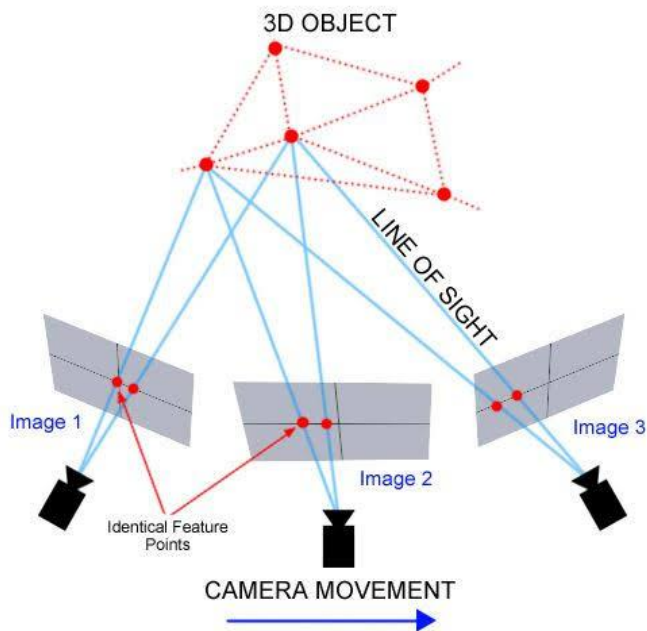
7.2.2 Digitasi Kontur atau Obyek

Pada proyek konstruksi, banyak hal yang dapat memanfaatkan teknologi digital, mulai dari data yang telah tersedia secara online, seperti data kontur, data cuaca, data garis edar matahari, dan lain-lain, juga ada data yang dihasilkan di lapangan dengan memanfaatkan teknologi digital. Sebagai contoh untuk pengukuran lahan menggunakan alat ukur *total station* dapat memanfaatkan data dalam format csv untuk masuk langsung ke perangkat lunak BIM (gambar 7.8).



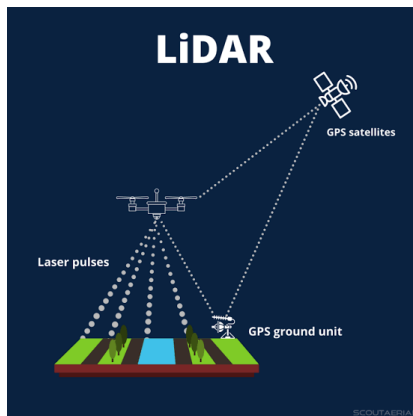
Gambar 7. 8. Pengelolaan data survey jadi data kontur BIM

Dalam kegiatan konstruksi banyak pemasukan data secara digital yang sering disebut digitasi, meliputi data lingkungan sekitar, seperti lahan, vegetasi, atau bangunan sekitar. Hal ini dilakukan agar data analisa terhadap proyek tersebut dapat lebih menyeluruh, dan mencerminkan keadaan yang sesungguhnya. Pengambilan data ini bisa menggunakan fotogrametri atau pemindaian menggunakan LiDAR. Pengambilan data fotogrametri adalah metode pembuatan metode 3 dimensi dengan menggunakan gambar fotografi melalui udara (melalui pesawat atau *drone*) atau dari darat. Kemudian gambar tersebut dihubungkan titik-titik pada gambar dan dilakukan interpolasi sehingga merepresentasikan 3 dimensi, dan sekaligus terhubung dengan Global Position System (GPS).



Gambar 7. 9. Metode Fotogrametri

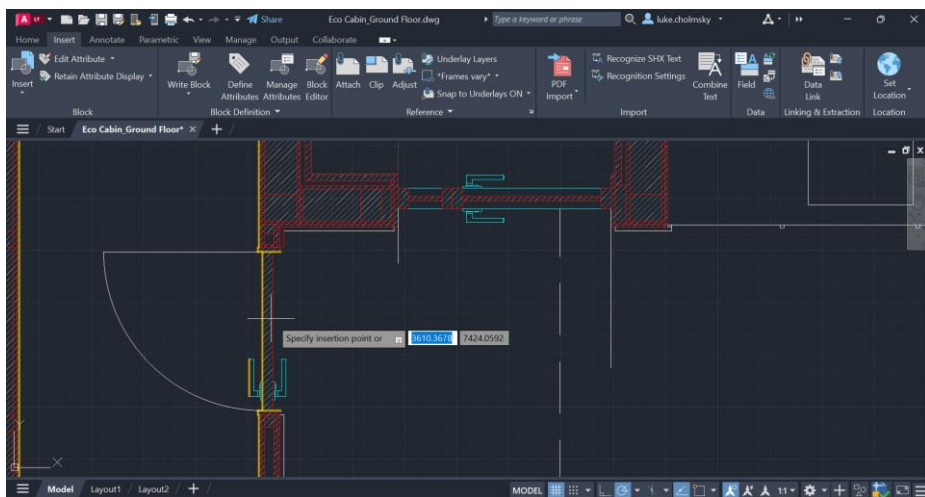
Metode digitasi lain yang hampir sama yaitu dengan menggunakan LiDAR (Light Detection and Ranging). Metode ini menggunakan laser untuk melakukan pengukuran jarak antara sensor dan obyek atau permukaan, dan pada umumnya dipadukan juga oleh sensor GPS. Keunggulan penggunaan LiDAR adalah tingkat akurasi yang tinggi. Penggunaan fotogrametri atau LiDAR pada umumnya untuk kebutuhan pemodelan bangunan, survei lokasi, pembuatan peta, pendokumentasian situs bersejarah, pemetaan bencana alam, dan dapat pula untuk pergerakan kendaraan otomatis.



Sistem LiDAR

7.2.3 Tampilan Hasil Gambar Digital

Dalam menampilkan hasil gambar bisa dalam bentuk 2 dimensi dan 3 dimensi. Dalam bentuk 2 dimensi pada umumnya dalam bentuk sketsa atau gambar kerja. Pada umumnya dalam format AutoCAD dengan ekstensi .dwg, seperti yang terlihat pada gambar 7.10.



Gambar 7. 10. Gambar dalam AutoCAD

Atau dapat pula ditampilkan dalam bentuk format Adobe Acrobat dengan ekstensi .pdf. Hasil ini biasanya dipergunakan untuk dokumen proyek.

Selain dalam 2 dimensi juga menghasilkan gambar 3 dimensi, yang dikenal dengan istilah model. Format gambar 3 dimensi dihasilkan oleh masing-masing perangkat lunak, contohnya: Trimble Sketchup dengan ekstensi .skp, AutoCAD dengan ekstensi .dxf atau .dwg, Revit dengan ekstensi .rvt, ArchiCAD dengan ekstensi .pln (solo project), dan lain sebagainya. Berikut contoh file dalam ArchiCAD pada gambar 7.11.



Gambar 7. 11. Dokumentasi Gambar Kerja ArchiCAD

Selain itu ada pula dengan format untuk pertukaran file antar perangkat lunak, sehingga dapat dibaca di beberapa perangkat lunak, dan pada umumnya dipergunakan untuk kebutuhan fabrikasi seperti pencetakan 3 dimensi (3D printing). Diantaranya adalah .stl, .obj, .dae, .fbx, dan lain sebagainya. Selain itu ada format pertukaran file yang dipergunakan dalam ekosistem BIM, yang disebut 'Open BIM', dengan ekstensi .ifc. Perbedaannya file open BIM mengandung informasi tambahan yang terdapat dalam modelnya, seperti nama material, spesifikasi, sifat material dan beberapa keterangan lainnya.

7.2.4 Hasil Pemodelan 3 Dimensi

Untuk menampilkan hasil pemodelan 3 dimensi ada beberapa macam. Apabila ditampilkan menjadi sebuah gambar pada umumnya disebut hasil rendering. Pada umumnya untuk menunjukkan bentuk melalui media cetak, website, atau media sosial berbentuk foto. Kalau dalam bentuk video tentang obyek tersebut, dinamakan animasi. Hal ini banyak ditampilkan dalam media digital seperti video promosi, Reel, YouTube, Tik Tok dan media lainnya.

Selain dalam bentuk rendering dan animasi, ada cara lain untuk menampilkan model 3 dimensi, yaitu menggunakan Virtual Reality (VR) dan Augmented Reality (AR). Virtual Reality merupakan realitas maya, Dimana merupakan hasil dari simulasi sebuah lingkungan dengan computer, dan pengguna masuk ke dalam lingkungan tersebut. Seperti yang ada di gambar 7.12.



Gambar 7. 12. Virtual Reality dalam pemodelan 3D

Pada umumnya hal ini dipergunakan untuk memperlihatkan kepada pengguna hasil dari pemodelan lingkungan atau peralatan.

Sedangkan AR hampir sama dengan VR, hanya model yang dihasilkan masuk ke dalam suasana sekitar pengguna. Penggunaan AR dalam konstruksi pada umumnya untuk mengetahui proporsi atau ketepatan dari model terhadap lingkungan sekitar, baik dalam maupun luar ruangan.



Gambar 7. 13. Contoh Penggunaan Augmented Reality

7.2.5 Otomasisasi Dalam Industri Konstruksi

Dengan telah dihasilkannya model 3 dimensi yang sesuai dengan spesifikasi aslinya, maka model beserta data yang terkandung dapat diberikan kepada pemasok material atau komponen untuk pemesanan. Atau apabila komponen tersebut perlu diproduksi maka fabrikator dapat memanfaatkan model dan data untuk memenuhi pesanan. Beberapa fabrikator memanfaatkan data tersebut untuk kebutuhan produksi. Diantaranya perakitan besi beton untuk kebutuhan struktur atau panel prefabrikasi, yang nanti akan dibahas lebih lanjut pada bab 8. Selain untuk kebutuhan fabrikasi komponen dapat juga otomatisasi dalam membuat bangunan seperti melakukan pencetakan rumah atau 3D printing rumah. Seperti gambar 7.14.



Gambar 7. 14. 3D Printing Bangunan

Pemanfaatan pencetakan untuk bangunan sudah diterapkan di beberapa negara, di Indonesia ada percobaan untuk menggunakannya. Masih menjadi

studi karena membutuhkan penyesuaian material yang dipergunakan, proses pelaksanaan dan perhitungan ekonomis. Dengan pemanfaatan peralatan ini proses Pembangunan menjadi lebih terencana dan terkontrol.

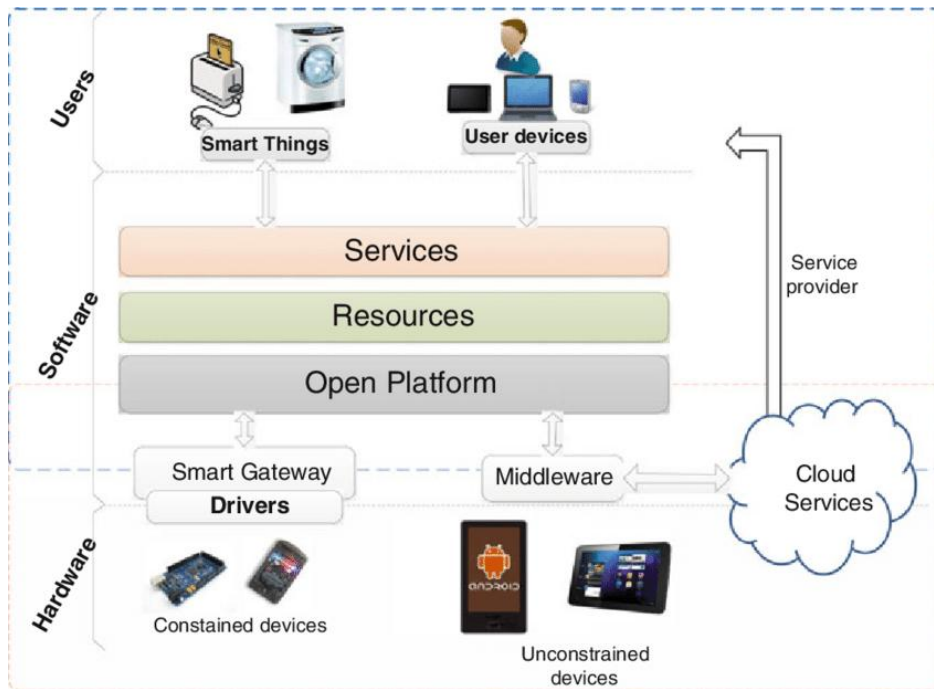
7.3. Artificial Intelligence (AI) dan Internet of Things (IoT) dalam Konstruksi (*Yanuaris Benny Kristiawan*)

Secara umum kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence atau AI) dan Internet of Things (IoT) adalah dua teknologi yang saling melengkapi dan bersama-sama menciptakan sistem yang lebih cerdas dan efisien. Dengan menghubungkan perangkat fisik ke internet, IOT memungkinkan pengumpulan dan pertukaran data secara real-time. Di sisi lain, AI memproses dan menganalisis data untuk membuat keputusan otomatis yang cerdas. Artificial Intelligence of Things (AloT) menggabungkan keduanya. Integrasi antara Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence atau AI) dan Internet of Things (IoT) telah menciptakan sinergi yang signifikan dalam perkembangan teknologi modern. IoT merujuk pada jaringan perangkat fisik yang dilengkapi dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi lainnya yang memungkinkan pertukaran data melalui internet. Di sisi lain, AI berfokus pada pengembangan sistem yang dapat meniru kecerdasan manusia, seperti pembelajaran, penalaran, dan pengambilan keputusan. Kombinasi keduanya, sering disebut sebagai AloT (Artificial Intelligence of Things), memungkinkan perangkat tidak hanya mengumpulkan data tetapi juga menganalisis dan mengambil keputusan secara otonom.

7.3.1. Gambaran Umum AI

Saat ini Artificial Intelligence (AI) sudah menjadi subjek yang banyak dibicarakan, dipraktekkan dan dikembangkan oleh berbagai kalangan. Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence, AI) merupakan cabang ilmu komputer yang berfokus pada pengembangan sistem yang dapat meniru proses kognitif manusia seperti pembelajaran, penalaran, dan pengambilan keputusan. Menurut Russell dan Norvig (2020), “AI merupakan upaya untuk mengembangkan mesin yang dapat berpikir dan belajar secara mandiri, sehingga dapat menyelesaikan masalah kompleks yang sebelumnya hanya dapat diselesaikan oleh manusia” (p. 23). Penerapan AI dalam industri konstruksi dan arsitektur tidak hanya membuka peluang untuk meningkatkan

efisiensi dan produktivitas, tetapi juga mendorong inovasi dalam desain, pemeliharaan, dan pengelolaan bangunan.



Gambar 7. 15. Salah satu referensi arsitektur IOT dan WOT

Sejarah AI pada Bidang Konstruksi dengan Penekanan pada Bidang Arsitektur belum lama diterapkan. Penerapan AI dalam konstruksi mulai muncul sejak akhir abad ke-20, ketika sistem pakar mulai digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan pada proyek konstruksi. Bock (2015) mencatat bahwa “penggunaan sistem pakar pada tahun 1980-an merupakan tonggak awal dari adopsi teknologi cerdas dalam konstruksi, meskipun keterbatasan komputasi menghambat perkembangan lebih lanjut pada masa itu” (T. Bock, 2015).

Di bidang arsitektur, revolusi digital terutama didorong oleh pengenalan Building Information Modeling (BIM), yang kemudian membuka jalan bagi integrasi AI dalam proses desain. Gu dan London (2010) menyatakan, “BIM telah menjadi fondasi bagi inovasi teknologi di bidang arsitektur karena menyediakan data yang terstruktur yang dapat dianalisis secara mendalam dengan menggunakan algoritma AI”. Perkembangan teknologi komputasi awan dan big data dalam dekade terakhir semakin mempercepat adopsi AI di sektor konstruksi dan arsitektur, memungkinkan analisis data real-time dan optimisasi proses melalui machine learning.

Jenis-jenis AI pada Konstruksi dengan Penekanan pada Bidang Arsitektur berkembang sesuai konteks perkembangan sistem konstruksi. Dalam konteks konstruksi dan arsitektur, terdapat beberapa jenis AI yang telah diterapkan untuk mendukung proses desain, manajemen, dan pemeliharaan bangunan:

a. Machine Learning (ML)

ML memungkinkan sistem untuk mempelajari pola dari data historis dan membuat prediksi, seperti estimasi biaya, durasi proyek, dan potensi risiko kegagalan. Yao dan Issa (2019) menyatakan, “Machine learning telah merevolusi cara kita menganalisis data konstruksi, karena model prediktif yang dikembangkan memungkinkan identifikasi dini terhadap potensi masalah dalam proyek” (N. Malik, R. Ahmad, and M. Al-Hussein, 2019)

b. Deep Learning (DL)

DL merupakan sub-bidang ML yang menggunakan jaringan saraf tiruan berlapis untuk melakukan analisis yang lebih kompleks, seperti pengenalan pola dalam citra bangunan. Bock (2015) menyebutkan, “Penerapan deep learning dalam pengawasan struktural memungkinkan deteksi otomatis terhadap keretakan dan cacat material yang sebelumnya sulit dikenali oleh mata manusia” (T. Bock, 2015)

c. Generative Design

Generative design menggunakan algoritma AI untuk menghasilkan berbagai alternatif desain berdasarkan parameter tertentu. Pan dan Zhang (2021) berpendapat, “Generative design memungkinkan eksplorasi solusi desain yang tak terbatas, memberikan arsitek pilihan inovatif yang optimal berdasarkan kriteria efisiensi dan estetika” (Y. Pan and L. Zhang, 2021).

d. Natural Language Processing (NLP)

NLP digunakan untuk mengekstraksi informasi penting dari dokumen proyek, kontrak, dan spesifikasi teknis. Russell dan Norvig (2020) menuliskan, “Dengan memanfaatkan NLP, sistem AI dapat dengan cepat mengidentifikasi dan mengekstrak informasi kritis dari volume dokumen yang sangat besar, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat” (S. Russell and P. Norvig, 2025)

Selanjutnya perlu diperhatikan kelebihan dan tantangan dalam penggunaan AI pada bidang konstruksi dengan Penekanan pada Bidang Arsitektur Penerapan AI dalam konstruksi dan arsitektur menawarkan sejumlah kelebihan signifikan. Menurut Pan dan Zhang (2021), “AI dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional dengan mengotomatisasi proses desain dan prediksi, sehingga mengurangi waktu dan biaya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek” (Y. Pan and L. Zhang, 2021). Beberapa kelebihan utamanya meliputi:

- **Peningkatan Efisiensi dan Produktivitas:** AI memungkinkan analisis data real-time yang mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat, serta mengoptimalkan proses desain dan manajemen proyek (J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, 2013).
- **Penghematan Biaya:** Dengan prediksi yang lebih akurat dan sistem pemeliharaan prediktif, AI dapat mengurangi biaya operasional dan meminimalkan downtime pada proyek konstruksi (T. Bock, 2015)
- **Inovasi dalam Desain:** Teknologi generative design membuka peluang bagi arsitek untuk mengeksplorasi alternatif desain yang inovatif dan sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan (Y. Pan and L. Zhang, 2021)

Namun demikian, terdapat pula tantangan yang perlu diatasi dalam penerapan AI di bidang ini. Al-Fuqaha et al. (2015) mengemukakan, “Meskipun AI menawarkan potensi yang besar, tantangan utama yang dihadapi meliputi keterbatasan kualitas dan ketersediaan data, serta isu keamanan siber yang dapat menghambat integrasi sistem AI dalam proyek konstruksi” (Al-Fuqaha et al., 2015, p. 2350). Selain itu, resistensi terhadap perubahan dan kebutuhan akan tenaga ahli yang memahami teknologi AI dan konteks konstruksi juga menjadi kendala dalam adopsi secara luas.

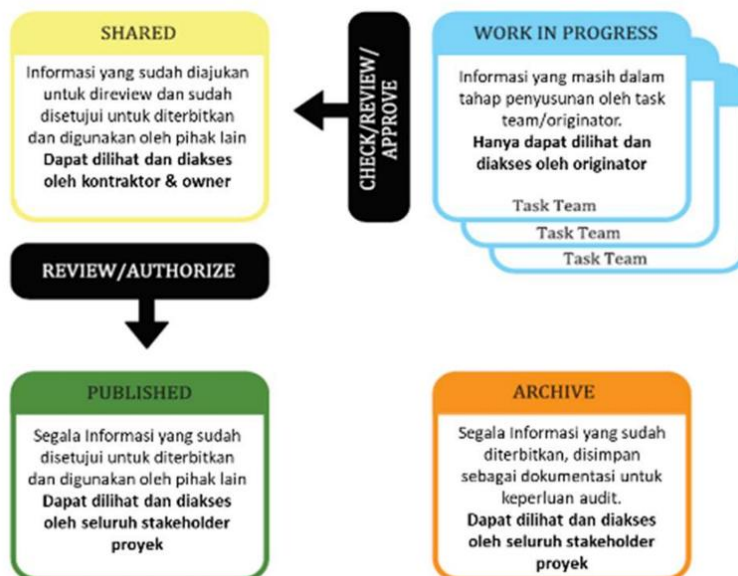
Penerapan AI dalam bidang arsitektur dan konstruksi menawarkan transformasi signifikan dalam cara proyek dirancang, dikelola, dan dipelihara. Dengan adopsi teknologi seperti machine learning, deep learning, generative design, dan NLP, AI mampu meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan inovasi. Namun, tantangan seperti kualitas data, keamanan siber, dan kesiapan sumber daya manusia harus diatasi agar potensi penuh AI dapat terealisasi dalam industri ini. Seiring dengan kemajuan teknologi, integrasi AI diharapkan akan terus berkembang, menciptakan paradigma baru dalam perancangan dan pengelolaan bangunan.

7.4. Keamanan dan Manajemen Data dalam Konstruksi Digital (Ary Dwi Jatmiko)

Dengan masuknya teknologi digital di bidang konstruksi khususnya bangunan, manajemen data dan keamanan menjadi salah satu hal yang perlu diperhatikan. Penggunaan data ini cukup penting karena sebagai file merupakan media komunikasi antar pihak baik di dalam tim, antar tenaga ahli, perusahaan yang berhubungan, manajemen proyek, pemilik proyek dan regulator. Dalam tim sendiri pada umumnya dibagi menjadi masing-masing disiplin, meliputi : arsitektur (site, bangunan, lanskap dan interior), struktur (struktur bawah, struktur atas), MEP (air bersih, air kotor & air bekas, hydrant & sprinkle, air hujan & air kondensasi, HVAC, penerangan, beban kontak, transportasi, pompa, keamanan & CCTV, tata suara, dan lainnya disesuaikan dengan kebutuhan)

7.4.1 Manajemen Data

Dengan data yang disampaikan di atas, file yang dihasilkan dalam proses konstruksi digital sangat banyak dan beragam, sehingga diperlukan pengaturan data yang baik. Manajemen data ini meliputi penamaan file, pengaturan folder, format data dan pertukaran data. Manajemen data akan sangat terbantu apabila menggunakan Common Data Environment (CDE), dan dalam mengimplementasikan alur dokumen / file yang dipergunakan dapat berdasar SOP Implementasi BIM (BIM PU), seperti grafis berikut ini:



Gambar 7. 16. Alur Dokumen / File Proyek

Dengan menerapkan laur dokumen atau file, manajemen data dapat dilaksanakan dengan lebih tertata, sehingga menghindarkan kesalahan data sekaligus sebagai proses pertanggungjawaban proyek yang lebih jelas. Penerapan ini juga diatur beberapa hal berikut ini:

A. Penamaan File

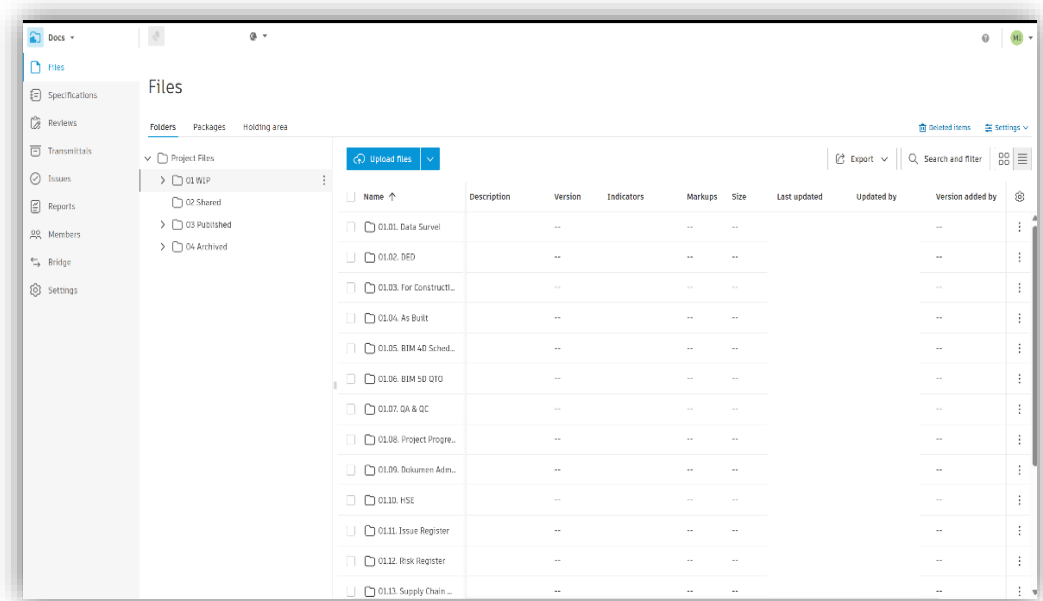
Penamaan file perlu diseragamkan yang disepakati oleh sebuah proyek. Standar yang umum diterapkan mengikuti standar ISO 19650. Pada umumnya nama file mengandung beberapa informasi berikut ini: Nama/kode proyek, pembuat file (institusi atau perusahaan), disiplin/bidang, jenis data, cakupan area, cakupan level, bagian dari model, dan nomor urut. Lebih baik penamaan ini diberlakukan pada semua format file, meliputi dokumen, data, 3D model, gambar kerja, spesifikasi, point cloud, data perhitungan, video dan lain sebagainya. Berikut ini adalah contoh penamaan file:

Project	Originator	Volume	Level/Location	Type	Role	Classification (Based on Uniclass_EF_2015)	Number
03-06	03	02	02	02	01	04	04
Alphanumeric	Alphabetic	Alphanumeric	Alphanumeric	Alphanumeric	Alphabetic	Numeric	Numeric
ABCDEF	IIS	XX	01	DR	A	3025	1001

Gambar 7. 17. Contoh Penamaan File

B. Pengaturan Folder

Pengaturan folder perlu disesuaikan dengan sistem administrasi file pada perusahaan atau proyek. Secara standar untuk penggunaan data digital dapat mengikuti standar pada BIM, dengan ISO 19650. Dalam standar ini yang diatur adalah pengaturan folder dalam sebuah proyek yang berbasis BIM atau digital. Pembagian secara umum dapat diperhatikan pada grafis berikut ini:



Gambar 7. 18. Pembagian dan Penamaan Folder

Dengan penjelasan sebagai berikut:

1. WIP (Work In Progress)

Merupakan file aktif yang dipergunakan untuk koordinasi proyek di internal tim proyek. Dalam folder ini personil teknis yang aktif dalam proyek, meletakkan file, membaca, dan memberikan komentar untuk koordinasi melalui folder yang telah disediakan. Dan semua anggota memiliki akses sesuai sub folder yang menjadi tanggung jawabnya.

2. Shared

Pada folder ini adalah file yang telah direview secara internal dan disepakati untuk mendapatkan persetujuan ke tim teknis pemilik. File di sini akan dikonsultasikan dan mendapatkan persetujuan dari tim teknis pemilik proyek.

3. Published

Setelah file mendapatkan approval, dari tim teknis pemilik proyek, akan di kirimkan ke folder ini. Hal ini diumumkan untuk diberikan ke pihak majemen puncak, atau seluruh pihak lain yang berhubungan, seperti pihak regulator.

4. Archived

Setelah proyek berakhir, dan dilakukan serah terima proyek, seluruh file pada folder 'published' akan dipindahkan ke folder ini. Kebutuhan dalam folder ini adalah untuk kebutuhan audit. File di sini akan dipertahankan sampai waktu retensi berakhir atau batas waktu yang disepakati. Dan pihak yang berkepentingan bisa mengunduh file yang tersedia.

Sedangkan penamaan sub folder disesuaikan dengan kebutuhan. Kebutuhan ini disesuaikan kebutuhan administrasi dan pelaporan dalam proyek. Serta meliputi tahapan yang akan dilakukan.

C. Format dan Pertukaran Data

Data yang dihasilkan memiliki format yang beragam, sesuai dengan perangkat lunak yang dipergunakan. Perlu adanya kesepakatan di awal format apa saja yang dipergunakan. Termasuk perangkat lunak dan versi yang dipergunakan. Hal ini untuk memudahkan manajemen dan koordinasi file yang dihasilkan. Selain format data yang dihasilkan sesuai dengan perangkat lunak, perlu ditetapkan juga pengaturan format pertukaran data, dan informasi yang diperlukan untuk dibagikan. Hal ini dibutuhkan agar seluruh pihak yang bekerja sama dapat mengakses data yang diperlukan sesuai kebutuhan. Serta diharapkan tidak ada data yang hilang dari file yang dibagikan. Pada umumnya data digital yang banyak dipakai adalah format Industry Foundation Classes (.ifc), merupakan format file terbuka, untuk pertukaran data proyek konstruksi, kolaborasi dan interoperabilitas antar perangkat lunak.

D. Metode Kolaborasi dan Peninjauan (Review)

Manajemen data diperlukan untuk kolaborasi dan peninjauan (review). Dalam menggunakan CDE, reviewer dapat memberikan catatan di dalam file disertai dengan link file yang dipakai sebagai acuan.



Gambar 7. 19. Contoh Review Terhadap Model

Dengan menggunakan metode review ini, akan meningkatkan keakuratan perbaikan yang dibutuhkan. Dan seluruh sejarah permintaan perbaikan dan hasil perbaikan akan tercatat.

7.4.2 Keamanan Data

Penggunaan data digital sangat diperlukan keamanan data. Dalam melakukan manajemen data, manajer akun perlu membagi kebutuhan akses. Tingkatan manajemen data meliputi: admin akun, admin proyek dan anggota proyek. Dimana setiap tingkatan memiliki akses untuk mengatur personal yang dapat dimasukkan dalam sistem atau proyek. Semua personel harus menggunakan akun masing-masing untuk mengakses data, dan semua aktifitas akan tercatat, sehingga bisa menjadi laporan yang terpercaya, dan terjaga keamanannya.

Dalam penggunaan CDE juga dilakukan pengaturan akses pada folder atau file. Ada beberapa tingkatan akses meliputi:

1. Tidak ada akses
2. Melihat
3. Melihat dan mengunduh
4. Melihat, mengunduh dan memberikan tanda
5. Melihat, mengunduh, memberikan tanda, dan mengunggah
6. Melihat, mengunduh, memberikan tanda, mengunggah, dan mengedit
7. Kontrol penuh administratif

Date	Product - Tool	Activity type	Member	Activity details
Mar 30, 2025 7...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded folder 01.03.02.01.02 Struktur.
Mar 30, 2025 7...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded folder 01.03.02.01.01 Arsitektur.
Mar 30, 2025 7...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded folder 01.03.02.01 .03 MEP.
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document ARS [Redacted] BASEMENT.rvt from folder ...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document ARS [Redacted] ALL.rvt from folder 01.03.0...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document PLM-RNW-ALL.rvt from folder 01.03.02.01 ...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document PLM-BGW-ALL.rvt from folder 01.03.02.01 ...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document PLM-HYD-SPR-ALL.rvt from folder 01.03.0...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document PLM-FW-ALL.rvt from folder 01.03.02.01.0...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document PLM-GAS-ALL.rvt from folder 01.03.02.01 ...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document MEC-VAC-ALL.rvt from folder 01.03.02.01 ...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document EN-LGT-ALL.rvt from folder 01.03.02.01.0...
Mar 28, 2025 4...	Docs	Folder or docu...	[Redacted]	[Redacted] downloaded the source file of document EL-LGT-ALL.rvt from folder 01.03.02.01.03...

Gambar 7. 20. Contoh Catatan Aktivitas Data

Selain akses file, manajemen data juga perlu diatur tingkatan terhadap peninjauan data dan permintaan persetujuan.

Pembahasan keamanan data menjadi lebih penting apabila dikaitkan dengan tempat penyimpanan data (server). Karena CDE yang tersedia sekarang semua data disimpan dalam server di luar negeri, dan di luar control dari negara Indonesia. Hal ini menjadi sangat penting saat digunakan untuk kebutuhan pengerjaan proyek yang merupakan proyek vital nasional dan yang berhubungan dengan rahasia negara.

Selain hal tersebut ada juga yang perlu dibenahi tentang perlindungan hak cipta terhadap desain atau model, yang memungkinkan untuk disalahgunakan untuk di proyek yang lain di luar pengetahuan dari perancang atau pembuat model.

Bab 8

Teknologi Prefabrikasi dan Modularisasi

Kristiana Bebhe

Prefabrikasi adalah metode konstruksi di mana komponen bangunan diproduksi di luar lokasi proyek (*off-site*) dalam lingkungan pabrik yang terkontrol, kemudian dikirim ke lokasi untuk dirakit menjadi struktur akhir bangunan.(Adeyemi, Ohakawa, and Okwandu 2024). Teknologi Prefabrikasi mulai berkembang sekitar awal abad ke 20 di amerika dan Eropa pada masa revolusi industry di Inggris dan setelah perang dunia ke 2 dan kini sudah berkembang pesat di berbagai negara, termasuk di Indonesia

Beberapa arsitek abad 20 yang memiliki beberapa karya yang menggunakan bahan prefab modular adalah Ernest J.Kump, Arsitek Amerika yang menggunakan konstruksi modular dan prefabrikasi untuk menghasilkan *Naval Optical and Ordnance Building* di Hunters Point, salah satu bangunan bertingkat transparan pertama di dunia (Stiles juga E.Laine 2013). Arsitek lainnya juga pernah menggunakannya, seperti; Le Corbusier, Arsitek Swiss-Perancis yang terkenal dengan konsep "*Maison Dom-Ino*" Walter Gropius, Arsitek Jerman-Amerika yang mendirikan Bauhaus dan menggunakan prefab modular dalam desainnya. Mies van der Rohe, Arsitek Jerman-Amerika dalam proyek *Farnsworth House*. dan Richard Neutra: Arsitek Austria-Amerika dalam proyek *VDL Research House* (Sani 2022).



Gambar 8. 1. Gedung UC Berkeley Collage (1967) salah satu bangunan Prefab karya Arsitek Ernest J. Kump

Di Indonesia, teknologi prefabrikasi sudah diterapkan pada fasilitas-fasilitas umum, termasuk hunian, seperti rumah susun, apartemen dan perumahan.(Marzuki and Purwanto 2024). Rumah instan sederhana sehat (RISHA) juga menggunakan konsep prefabrikasi dan modular, yang

dikembangkan Pusat Penelitian dan Pengembangan (Puslitbang) Bidang Perumahan dan Permukiman Kementerian Pekerjaan Umum Perumahan Rakyat (PUPR) sejak tahun 2015.(Raihan and Sulthan 2020)

Prefab bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, kualitas, dan kecepatan konstruksi. Teknologi prefabrikasi dan modularisasi telah membawa perubahan signifikan dalam industri konstruksi modern (Susanto, Budiman, and Widyadana 2020). Berikut adalah penjelasan mengenai prinsip dasar prefabrikasi, teknologi modular dalam konstruksi, dan studi kasus proyek prefabrikasi.

8.1 Prinsip-Prinsip Dasar Prefabrikasi

Beberapa prinsip dasar prefabrikasi, diantaranya;(Akhmad 2008)(Wallance 2021)

- A. **Produksi Off-Site:** Semua bagian konstruksi bangunan, seperti panel-panel dinding, plat lantai, dan bagian struktural lainnya, diproduksi dulu di pabrik dengan standar kualitas yang tinggi. Lingkungan pabrik yang terkontrol memungkinkan proses produksi yang tidak terganggu oleh kondisi cuaca atau faktor eksternal lainnya.(Susanto, Budiman, and Widyadana 2020)

Gambar 8. 2. Proses pembuatan komponen modular prefabrikasi beton



- B. **Standarisasi dan Modularisasi:** Penerapan modular dan komponen standar mempermudah dan mempercepat proses produksi massal dan perakitan di lokasi. Standarisasi ini juga memungkinkan fleksibilitas desain dan kemudahan dalam pengembangan di masa yang akan datang. (Akhmad 2008)

C. Perakitan *On-Site*: Setelah diproduksi, komponen prefabrikasi dikirim ke lokasi proyek untuk dirakit. Proses perakitan biasanya lebih cepat dibandingkan metode konstruksi konvensional, karena komponen telah dipersiapkan sebelumnya. (Susanto, Budiman, and Widyadana 2020)



Gambar 8. 3. Proses perakitan produk prefab di Lokasi

D. Kontrol Kualitas yang Ketat: Proses produksi di pabrik memungkinkan penerapan kontrol kualitas yang lebih ketat, sehingga mengurangi risiko kesalahan dan cacat pada komponen. Hal ini berdampak pada peningkatan kualitas keseluruhan bangunan. (Susanto, Budiman, and Widyadana 2020)

E. Efisiensi Waktu dan Biaya; Dengan memproduksi komponen secara paralel dengan persiapan lokasi, prefabrikasi dapat mengurangi waktu konstruksi secara signifikan. Selain itu, efisiensi produksi dan pengurangan limbah material dapat menurunkan biaya keseluruhan proyek. (Susanto, Budiman, and Widyadana 2020)

F. Pengurangan Limbah dan Ramah Lingkungan: Proses produksi yang terkontrol akan mengurangi limbah dan menghemat material, sehingga lebih ramah lingkungan. Selain itu, penggunaan material yang efisien mendukung praktik konstruksi berkelanjutan. (Sani 2022)

G. Fleksibilitas Desain: Walaupun menggunakan komponen standar, prefabrikasi masih memungkinkan variasi desain yang luas melalui kombinasi modul yang berbeda, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik proyek. (Putri and Purwantiasning 2021)

H. Keamanan dan Keselamatan Kerja: Pengurangan item pekerjaan di lokasi konstruksi, maka teknologi prefabrikasi dapat meningkatkan keselamatan kerja, karena sebagian besar pekerjaan sudah dilakukan di pabrik dan cukup merakitnya di lapangan. (Susanto, Budiman, and Widyadana 2020)

Dengan menerapkan prinsip-prinsip dasar prefabrikasi ini, menawarkan solusi paling efektif dalam upaya peningkatan efisiensi, kualitas, dan keberlanjutan dalam dunia konstruksi.

8.2 Teknologi modular dalam konstruksi modern

Teknologi modular dalam konstruksi modern adalah metode pembangunan di mana bangunan atau strukturnya dibagi menjadi bagian-bagian lebih kecil yang disebut modul. Modul-modul ini diproduksi secara terpisah di pabrik dengan sistem fabrikasi, kemudian dirakit di lokasi konstruksi. (Siregar 2024). Konstruksi modular prefabrikasi ini lebih mengacu pada volume ruangan daripada komponen ruangan seperti dinding, atap atau lantai, tetapi pada unit ruangan secara keseluruhan (Marzuki and Purwanto 2024). Struktur prefab modular sekitar 60% sampai 90% diproduksi di pabrik, dan kemudian diangkut dan dirakit di lokasi proyek. Komponen lain seperti pondasi kadang disediakan di Lokasi.

Teknologi digital *Building Information Modeling* (BIM) dan *Internet of Things* (IoT) berperan penting dalam konstruksi prefab modular. BIM membantu para profesional dapat membuat simulasi bangunan secara mendetail, sehingga potensi kesalahan pada konstruksi tidak terjadi. Sedangkan, IoT melakukan pengawasan perkembangan proses pembangunan secara *real-time* sehingga dipastikan bangunan yang dihasilkan sesuai dengan standar kualitas.

A. Keunggulan Teknologi Modular: (Prefab Architecture - Google Books n.d.) (Boafo, Kim, and Kim 2016)

- 1) **Efisiensi Waktu dan Biaya:** Proses produksi modul di pabrik dapat berjalan paralel dengan persiapan lokasi, sehingga mempercepat waktu konstruksi dan menekan biaya pembangunan.
- 2) **Kualitas Terjamin:** Lingkungan pabrik yang terkontrol memungkinkan standar kualitas yang konsisten pada setiap modul yang diproduksi.
- 3) **Ramah Lingkungan:** Dengan produksi terpusat, limbah konstruksi dapat diminimalkan, sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Tahapan Teknologi Konstruksi Modular (Wallance 2021):

- 1) **Desain dan Perencanaan:** Tahap awal melibatkan perencanaan detail dan desain modul yang akan diproduksi.
- 2) **Produksi Modul:** Modul diproduksi di pabrik dengan menggunakan material atau komponen fabrikasi yang dibuat di luar lokasi proyek atau di dalam lokasi proyek namun perlu disatukan dahulu antar komponennya (erection) di tempat yang seharusnya pada konstruksi.
- 3) **Transportasi dan Perakitan:** Modul yang telah selesai diproduksi kemudian dikirim ke lokasi konstruksi untuk dirakit menjadi bangunan utuh.

Penerapan Teknologi Modular (Marzuki and Purwanto 2024) (Adeyemi, Ohakawa, and Okwandu 2024):

Teknologi modular sudah banyak diterapkan dalam pembangunan perumahan, gedung bertingkat dan fasilitas komersial. Produk prefab yang modular merupakan produk bangunan jadi yang diproduksi di suatu pabrik yang kemudian dibawa dan dipasang langsung di lokasi konstruksi pembangunan. Dengan memahami prinsip dan tahapan teknologi modular, industri konstruksi dapat memanfaatkan metode ini untuk mencapai efisiensi, kualitas, dan keberlanjutan yang lebih baik dalam proyek-proyek pembangunan. Ada 3 bentuk modular yang dikenal, saat ini yaitu

- 1) **ModBox** atau ruang yang bisa dibongkar pasang/*knok down* dengan cepat, yang umumnya saat dirangkai berbentuk kotak . Jenis ini biasa digunakan untuk hunian/mess karyawan, rumah modular, hingga fasilitas pendukung proyek.



Gambar 8. 4. Contoh ModBox

- 2) **ModMulti** sama seperti modbox tetapi lebih kompleks dan lebih familiar disebut *K-house* atau *T-house*. Bentuk ini juga digunakan untuk berbagai fasilitas seperti rumah, kantor dan fasilitas lain yang lebih kompleks.



Gambar 8. 5. Contoh ModMulti

- 3) **ModSnap** adalah bentuk modular yang fleksibel karena bisa dilipat/ditekuk dan juga bisa dibongkar pasang. Digunakan untuk ruang pameran, pos keamanan, sampai hunian/rumah.



Gambar 8. 6. Contoh ModSnap

B. Material Untuk Teknologi Modular

Beberapa material yang umumnya dipakai untuk mendukung teknologi prefab modular, (Dharmawan and Alviano 2019) adalah

- 1) **Besi Hollow**: Bahan yang sering digunakan pada rangka atap serta dinding modular, akibat bobotnya yang ringan, mudah untuk dipasang, dan tahan lama. Besi hollow digunakan pada proyek perumahan massal serta sarana komersial pada skala besar.
- 2) **Baja Ringan**: Bahan yang juga dipakai sebagai rangka atap dan struktur lainnya. Bahan ini juga sangat ringan, awet, serta tidak korosi, sehingga cocok untuk proyek modular.
- 3) **Panel Beton Pracetak (Precast Concrete Panels)**: Bahan ini juga digunakan dalam proyek bangunan prefab modular, untuk komponen

dinding serta lantai. Bahan ini diproduksi di pabrik dan langsung dipasang di lokasi proyek.

- 4) **PVC (*Polyvinyl Chloride*)**: Bahan ini digunakan dalam sistem plambing modular karena memiliki sifat ringan, kuat, serta tahan terhadap bahan kimia. PVC digunakan pada saluran air serta limbah di proyek prefabrikasi modular.
- 5) **FRP (*Fiberglass Reinforced Plastics*)**: merupakan bahan komposit yang berasal dari campuran plastik dan serat kaca, bahan ini digunakan sebagai penutup atap dan dinding pada system modular karena ketahanannya terhadap korosi dan cuaca
- 6) **Aluminium**: Merupakan bahan modular untuk pembuatan pintu, jendela dan bagian lain bangunan. Aluminium memiliki sifat yang ringan, fleksibel, dan tahan korosi serta kuat. Bahan ini cocok untuk modular dengan desain yang minimalis dan modern.

8.3 Studi Kasus Proyek Prefabrikasi

Contoh penerapan teknologi prefabrikasi adalah proyek pembangunan Rumah Sakit saat pandemi Covid 19 dan perumahan modular di Indonesia. Dalam proyek ini, komponen-komponen bangunan diproduksi di pabrik dengan standarisasi tinggi, kemudian dirakit di lokasi proyek. Pendekatan modular prefabrikasi sangat mengurangi waktu konstruksi sehingga cepat digunakan, limbah material yang kurang, proses Pembangunan yang tidak dipengaruhi cuaca serta kualitas bangunan yang tetap terjaga. Pada studi kasus menunjukkan bahwa penerapan teknologi prefabrikasi dan modularisasi dapat memberikan solusi efektif untuk tantangan dalam industri konstruksi, seperti kebutuhan akan efisiensi waktu, pengendalian biaya, dan peningkatan kualitas bangunan.

Berikut adalah beberapa studi kasus proyek prefabrikasi yang berhasil dilakukan, baik di luar negeri maupun di Indonesia:

A. Proyek Rumah Sakit di Montreal-Canada

Saat terjadi pandemi Covid 19 dibutuhkan Rumah sakit sebagai tempat pengobatan pasien. Untuk cepat melayani kebutuhan akan ruang isolasi maka beberapa negara membangun fasilitas Rumah sakit yang hanya membutuhkan waktu sekitar 9 bulan dan 40% lebih cepat dibandingkan proses pembangunan secara konvensional. Komponen bangunan yang

modular dibuat dengan standar tinggi, yang selain memenuhi tuntutan kekuatan, juga memenuhi tuntutan rumah sakit yang menjamin kemudahan pembersihan dari kuman penyakit.(Study n.d.)

Proyek rumah sakit pertama yang menggunakan ruang pasien yang sudah dirakit sepenuhnya, dengan ruang tunggu dan kamar mandi dalam (dalam satu unit modul) ini berlokasi di Montreal-Kanada yang dibangun tahun 2020. Bila sebelumnya menggunakan solusi modular dalam proyek Rumah sakit hanya pada bagian bagian tertentu seperti WC atau ruang tunggal lainnya, tetapi pada proyek ini 1 unit modul terdiri dari 3 bagian ruangan sekaligus. Rumah sakit ini memiliki seluas 34.000 kaki² dengan jumlah 36 unit modular ruang pasien yang tersebar di dua lantai dan dilengkapi berbagai fasilitas rumah sakit lainnya. Ada dua jenis modular yang digunakan dalam konstruksi rumah sakit: modular permanen yaitu dirancang untuk jangka panjang dan mempunyai struktur yang kuat, dan modular sementara yang digunakan dalam situasi darurat atau proyek yang sifatnya sementara yang memungkinkan komponen mudah dibongkar dan dipindahkan.



Gambar 8. 7. Proyek Rumah sakit prefab modular di Montreal-Canada

B. Rumah Sakit Pusat Pertamina Jakarta

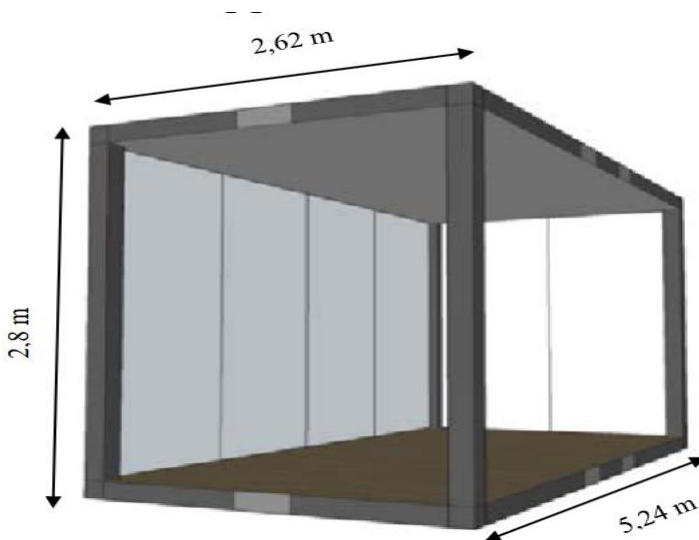
Proyek RS Pusat Pertamina di Simprug Jakarta Selatan, dibangun hanya dalam waktu 30 hari. Pada awalnya Lokasi ini adalah lapangan bola, dan dibangun Rumah sakit untuk kepentingan awal sebagai fasilitas kesehatan untuk penanganan Covid 19 seluas 10.200 meter². Ruang-ruang yang dibangun menggunakan metode *kit building* ini terdiri dari ruang dokter, ruang perawat, *nurse station*, laboratorium (PCR, Hematologi dan AGD) instalasi jenazah, instalasi sterilisasi, instalasi *screening*, ruang radiologi, ruang operasi instalasi farmasi, pusat gizi, serta ruang dekontaminasi. Ruang perawatannya memiliki 31 tempat tidur ICU, 240 tempat tidur bukan ICU, 10

tempat tidur IGD, ruang bersalin, 19 tempat tidur HCU dan fasilitas cuci darah untuk pasien covid19.



Gambar 8. 8. Proses pembangunan RS Pusat Pertamina Jakarta Selatan

Struktur utama untuk modular terbuat dari plat baja SS400, sedangkan panel-panelnya terbuat dari PPVC (*prefinished volumetrik construction*). Bahan plat baja menjamin kekuatan dan kekokohnya, dan PPVC menjamin kemudahan pembersihan sesuai tuntutan ruang medis. Modul ruangnya memiliki satu model saja dengan ukuran lebar 2,62 meter, panjang 5,24 meter serta tinggi 2,85 meter (Novita and Afgani 2024).



Gambar 8. 9. Modul ruangan RS Pertamina

C. Perumahan Dian Sukolilo Regency, Surabaya

Proyek perumahan Dian Sukolilo Surabaya merupakan perumahan massal yang juga menggunakan produk prefab modular yang berdiri di atas lahan seluas 12,3 Ha. Proyek mulai dibangun tahun 2011 dan menggunakan 3 macam konstruksi modular, yaitu metode konstruksi prefabrikasi panel modular Grand Elephant yang dipadu metode konvensional, metode konstruksi prefabrikasi menggunakan produk panel custom Calvary Abadi serta metode konstruksi prefabrikasi gabungan panel modular Grand Elephant dan panel custom Calvary Abadi. Proyek ini menerapkan masing-masing 3 metode konstruksi prefabrikasi untuk pembangunan perumahan tapak massal. Dengan menggunakan panel beton pracetak, proyek ini berhasil mengurangi waktu konstruksi dan meningkatkan kualitas bangunan. Sedangkan untuk biaya pengadaannya lebih mahal dibandingkan dengan beton konvensional untuk jumlah unit terbatas, dan semakin murah bila unit-unit rumahnya diperbanyak. Pada kasus perumahan ini, biaya lebih mahal 6,22%-11,2% pembangunan secara konvensional. (Susanto 2019)

Penggunaan prefab modular menunjukkan efisiensi waktu karena kecepatan perakitan bila dibandingkan dengan metode konvensional. Tentunya ada keuntungan tambahan lain seperti; proses pembangunan yang tidak dipengaruhi cuaca serta kekuatan bangunan yang terjamin karena pembuatannya mengikuti standar di pabrik.



Gambar 8. 10. Perumahan Dian Sukolilo Regency

D. Perumahan Arsifab V.02

Perumahan ini didesain oleh Atelier Riri di Bintaro, Tangerang Selatan. Rumah prefabrikasi ini dirancang dengan mempertimbangkan desain spasial yang efisien. Proyek ini menunjukkan bagaimana elemen prefabrikasi dapat digunakan untuk menciptakan hunian yang fleksibel, fungsional dan estetis. Hunian prefabrikasi yang biasanya agak kaku tetapi ditata sesuai ruang gerak dan kebutuhan ruang penghuni. Konsep *open floor plan* memungkinkan untuk mendapat spasial yang optimal untuk aktivitas manusia (Kusumah 2024). Dari kasus ini, teknologi modular fabrikasi tidak hanya menawarkan kecepatan membangun atau efisiensi tetapi juga penyediaan ruang yang lebih fleksibel untuk aktivitas manusia.



Gambar 8. 11. Perumahan Arsivab V.02

Bab 9

Manajemen Teknologi Konstruksi

L.M.F. Purwanto

9.1 Sistem Manajemen Konstruksi Berbasis Teknologi

Dalam era digital yang terus berkembang, manajemen konstruksi telah mengalami transformasi signifikan melalui integrasi teknologi. Sistem manajemen konstruksi berbasis teknologi menjadi tulang punggung dalam meningkatkan efisiensi, akurasi, dan keberlanjutan proyek-proyek arsitektur modern. Bagi para arsitek, pemahaman mendalam tentang sistem ini sangat penting karena tidak hanya memengaruhi proses perencanaan dan pelaksanaan, tetapi juga menentukan kesuksesan proyek dalam hal waktu, biaya, dan kualitas.

Salah satu aspek kunci dalam manajemen konstruksi berbasis teknologi adalah penggunaan **Building Information Modeling (BIM)**. BIM telah merevolusi cara arsitek, insinyur, dan kontraktor berkolaborasi dengan menyediakan platform terintegrasi untuk pemodelan 3D, analisis data, dan simulasi proyek (Azhar, 2011). Dengan BIM, seluruh pemangku kepentingan dapat mengakses informasi proyek secara real-time, mengurangi kesalahan desain, dan meminimalkan pemborosan material. Selain itu, BIM memungkinkan prediksi lebih akurat terkait dampak lingkungan, sehingga mendukung praktik konstruksi berkelanjutan (Eastman et al., 2011).

Selain BIM, Internet of Things (IoT) dan sensor cerdas telah memperkuat sistem manajemen konstruksi dengan memungkinkan pemantauan real-time terhadap kondisi lokasi proyek. Sensor yang terpasang pada peralatan dan struktur bangunan dapat mengumpulkan data tentang suhu, kelembapan, getaran, dan beban struktural, yang kemudian dianalisis untuk mengoptimalkan kinerja proyek (Zhou et al., 2015). Misalnya, data dari sensor dapat membantu mengidentifikasi potensi kegagalan struktural sebelum terjadi, sehingga mengurangi risiko kecelakaan dan keterlambatan proyek.

Teknologi kecerdasan buatan (AI) dan machine learning juga semakin banyak diterapkan dalam manajemen konstruksi. AI dapat menganalisis data historis proyek untuk memprediksi jadwal, biaya, dan risiko dengan akurasi

tinggi (Bock & Linner, 2016). Selain itu, algoritma machine learning dapat mengoptimalkan alokasi sumber daya, seperti tenaga kerja dan material, berdasarkan pola data yang dikumpulkan dari proyek-proyek sebelumnya. Hal ini membantu manajer proyek dalam pengambilan keputusan yang lebih cepat dan tepat.

Sementara itu, augmented reality (AR) dan virtual reality (VR) memberikan kontribusi besar dalam perencanaan dan pelatihan konstruksi. AR memungkinkan arsitek dan kontraktor untuk memvisualisasikan model 3D di atas lingkungan nyata, sehingga memudahkan identifikasi masalah desain sebelum konstruksi dimulai (Wang et al., 2013). Di sisi lain, VR dapat digunakan untuk pelatihan pekerja konstruksi dalam lingkungan simulasi yang aman, mengurangi risiko kecelakaan di lapangan.



Gambar 9. 1. VR digunakan untuk pelatihan pekerja konstruksi

Meskipun manfaatnya besar, penerapan teknologi dalam manajemen konstruksi juga menghadapi tantangan. Salah satunya adalah resistensi dari tenaga kerja yang kurang terampil dalam menggunakan alat digital. Selain itu, biaya awal implementasi teknologi seperti BIM dan IoT bisa sangat tinggi, terutama untuk proyek skala kecil (Bryde et al., 2013). Namun, dengan pelatihan yang memadai dan strategi adopsi bertahap, hambatan ini dapat diatasi.

Ke depan, perkembangan komputasi awan (cloud computing) dan blockchain diprediksi akan semakin memperkuat sistem manajemen konstruksi berbasis teknologi. Komputasi awan memungkinkan penyimpanan dan berbagi data proyek secara aman dan efisien, sementara blockchain dapat meningkatkan transparansi dalam rantai pasok material konstruksi (Turk & Klinc, 2017). Dengan demikian, integrasi teknologi terus mendorong inovasi dalam industri konstruksi, menciptakan peluang baru bagi para arsitek untuk

mengeksplorasi pendekatan manajemen yang lebih canggih dan berkelanjutan.

9.2 Manajemen Risiko dalam Penerapan Teknologi Konstruksi

Perkembangan teknologi konstruksi telah membawa banyak inovasi dalam industri arsitektur dan teknik sipil, namun di sisi lain juga menimbulkan berbagai risiko yang perlu dikelola secara sistematis. Bagi dunia arsitektur, pemahaman tentang manajemen risiko dalam penerapan teknologi konstruksi sangat penting untuk memastikan keberhasilan proyek, baik dari segi efisiensi, keamanan, maupun keberlanjutan. Risiko-risiko ini dapat muncul dari berbagai aspek, termasuk ketergantungan pada sistem digital, kesiapan sumber daya manusia, serta tantangan integrasi antara teknologi baru dengan metode konstruksi tradisional.

Salah satu risiko utama dalam penerapan teknologi konstruksi adalah ketergantungan berlebihan pada sistem digital, seperti Building Information Modeling (BIM) dan Internet of Things (IoT). Meskipun teknologi ini meningkatkan akurasi dan efisiensi, kegagalan sistem akibat kesalahan perangkat lunak, serangan siber, atau gangguan jaringan dapat mengakibatkan penundaan proyek dan kerugian finansial yang besar (Zou et al., 2017). Sebagai contoh, jika model BIM tidak diperbarui secara real-time karena masalah teknis, hal ini dapat menyebabkan ketidaksesuaian antara desain dan pelaksanaan di lapangan. Oleh karena itu, penting untuk menerapkan strategi cadangan data (backup) dan keamanan siber yang kuat guna mengurangi dampak gangguan teknologi.

Selain itu, kesenjangan kompetensi tenaga kerja menjadi tantangan signifikan dalam adopsi teknologi konstruksi. Tidak semua pekerja konstruksi atau bahkan manajer proyek memiliki keterampilan yang memadai untuk mengoperasikan alat-alat digital seperti BIM, drone, atau sistem otomatisasi (Oesterreich & Teuteberg, 2016). Jika pelatihan tidak dilakukan secara menyeluruh, kesalahan operasional dapat terjadi, yang berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja atau pemborosan material. Untuk mengatasi hal ini, perusahaan konstruksi perlu menginvestasikan program pelatihan berkelanjutan dan memastikan bahwa seluruh tim memahami prosedur penggunaan teknologi baru sebelum diterapkan di lapangan.

Risiko lain yang sering diabaikan adalah inkompatibilitas antara teknologi baru dan sistem yang sudah ada. Misalnya, perangkat lunak BIM dari vendor yang berbeda mungkin tidak sepenuhnya kompatibel, sehingga menghambat

pertukaran data antar-pemangku kepentingan (Volk et al., 2014). Hal ini dapat memperlambat proses koordinasi dan meningkatkan biaya akibat kebutuhan konversi data. Solusi yang dapat diambil adalah dengan menetapkan standar interoperabilitas sejak awal proyek dan memilih platform teknologi yang telah teruji integrasinya dalam proyek-proyek sebelumnya.

Di samping risiko teknis, faktor keberlanjutan dan dampak lingkungan juga perlu dipertimbangkan dalam penerapan teknologi konstruksi. Beberapa teknologi, seperti pencetakan 3D (3D printing) untuk komponen bangunan, dapat mengurangi limbah material, namun di sisi lain membutuhkan energi yang besar dalam proses produksinya (Ford & Despeisse, 2016). Jika tidak dikelola dengan baik, penggunaan teknologi baru justru dapat meningkatkan jejak karbon proyek. Oleh karena itu, analisis siklus hidup (life cycle assessment/LCA) harus dilakukan sebelum memutuskan untuk mengadopsi suatu teknologi konstruksi.



Gambar 9. 2. Manajemen Risiko di proyek konstruksi

Untuk memitigasi berbagai risiko tersebut, pendekatan manajemen risiko proaktif harus diterapkan. Langkah pertama adalah mengidentifikasi semua potensi risiko melalui analisis mendalam terhadap kebutuhan proyek dan

kapabilitas teknologi yang akan digunakan. Selanjutnya, evaluasi tingkat keparahan dan kemungkinan terjadinya risiko dengan menggunakan metode seperti Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) atau risk matrix (Project Management Institute, 2017). Setelah itu, strategi mitigasi dapat dirancang, seperti pengembangan protokol darurat, diversifikasi penyedia teknologi, atau penerapan sistem monitoring berbasis real-time.

Ke depan, kecerdasan buatan (AI) dan analitik big data diprediksi akan memainkan peran kunci dalam manajemen risiko konstruksi. AI dapat membantu memprediksi potensi kegagalan proyek berdasarkan data historis, sementara big data memungkinkan analisis risiko yang lebih komprehensif dengan memproses informasi dari berbagai sumber (Zheng et al., 2019). Dengan demikian, integrasi teknologi tidak hanya menciptakan risiko baru, tetapi juga memberikan alat yang lebih canggih untuk mengelolanya.

Secara keseluruhan, manajemen risiko dalam penerapan teknologi konstruksi memerlukan pendekatan holistik yang mencakup aspek teknis, manusia, dan lingkungan. Bagi para arsitek, pemahaman mendalam tentang dinamika ini akan menjadi bekal penting dalam merancang dan mengelola proyek-proyek konstruksi masa depan yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan.

9.3 Teknologi untuk Pengawasan dan Pengendalian Proyek

Selain teknologi yang sudah banyak dikenal seperti Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), realitas virtual (VR), realitas tertambah (AR), dan blockchain, terdapat berbagai teknologi inovatif lain yang mulai diterapkan dalam pengawasan dan pengendalian proyek konstruksi. Teknologi-teknologi ini menawarkan pendekatan baru yang dapat meningkatkan efisiensi, akurasi, dan keberlanjutan dalam manajemen proyek konstruksi.

Salah satu teknologi yang mulai banyak digunakan adalah Digital Twin. Digital twin adalah representasi virtual dari aset fisik yang terus diperbarui dengan data real-time dari sensor dan sumber lainnya. Dalam konteks konstruksi, digital twin memungkinkan manajer proyek untuk memantau kondisi aktual bangunan atau infrastruktur secara real-time dan memprediksi kinerjanya di masa depan (Tao et al., 2019). Misalnya, digital twin dapat digunakan untuk memantau deformasi struktur, perubahan suhu, atau getaran yang terjadi selama konstruksi, sehingga memungkinkan deteksi dini terhadap potensi masalah struktural. Teknologi ini sangat berguna untuk

proyek-proyek besar seperti jembatan atau gedung pencakar langit, di mana keselamatan dan stabilitas struktural menjadi prioritas utama.

Robotika dan sistem otonom juga mulai banyak diaplikasikan dalam pengawasan dan pengendalian proyek konstruksi. Robot-robot konstruksi dapat digunakan untuk berbagai tugas, mulai dari pemetaan lokasi, inspeksi kualitas, hingga pekerjaan fisik seperti batu bata atau pengecatan (Bock, 2015). Contohnya, robot pemetaan otonom dapat menjelajahi lokasi proyek dan menghasilkan model 3D yang akurat tanpa campur tangan manusia. Sementara itu, drone otonom yang dilengkapi dengan kamera dan sensor dapat melakukan patroli rutin di lokasi proyek untuk memantau kemajuan pekerjaan dan mendeteksi potensi bahaya keselamatan. Penggunaan robotika tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga mengurangi risiko kecelakaan kerja dengan mengambil alih tugas-tugas berbahaya yang biasanya dilakukan oleh manusia.

Komputasi awan (cloud computing) dan edge computing juga menjadi tulang punggung dalam sistem pengawasan proyek modern. Komputasi awan memungkinkan penyimpanan dan pemrosesan data proyek dalam skala besar, sementara edge computing memungkinkan analisis data secara real-time di lokasi proyek tanpa harus mengirim data ke pusat server (Zhou et al., 2020). Kombinasi kedua teknologi ini memungkinkan manajer proyek untuk mengakses informasi terbaru dari mana saja dan kapan saja, sekaligus memastikan bahwa keputusan dapat diambil dengan cepat berdasarkan data yang paling mutakhir. Selain itu, komputasi awan juga memfasilitasi kolaborasi antara berbagai pemangku kepentingan proyek, termasuk arsitek, insinyur, kontraktor, dan pemilik proyek, dengan menyediakan platform bersama untuk berbagi dokumen dan informasi.



Gambar 9. 3. Komputasi awan (cloud computing) menjadi tulang punggung dalam sistem pengawasan proyek

Kecerdasan buatan generatif (Generative AI) mulai menunjukkan potensinya dalam pengendalian proyek konstruksi. Berbeda dengan AI tradisional yang hanya menganalisis data, generative AI mampu menghasilkan solusi desain atau rencana konstruksi baru berdasarkan parameter yang diberikan (Newton, 2019). Misalnya, generative AI dapat digunakan untuk mengoptimalkan tata letak lokasi konstruksi dengan mempertimbangkan alur material, pergerakan pekerja, dan penempatan peralatan. Teknologi ini juga dapat membantu dalam pembuatan jadwal konstruksi yang lebih efisien dengan mempertimbangkan berbagai variabel seperti ketersediaan sumber daya, cuaca, dan ketergantungan antar tugas.

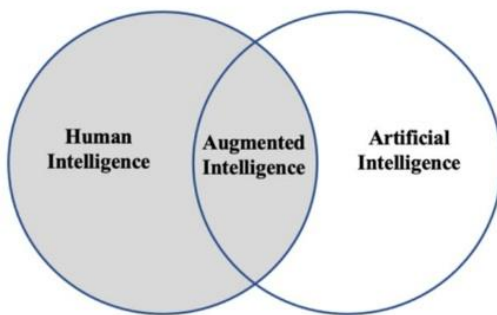
Material cerdas (smart materials) juga mulai digunakan untuk memantau kesehatan struktur bangunan. Material-material ini memiliki sifat yang dapat berubah sebagai respons terhadap rangsangan lingkungan, seperti suhu, kelembapan, atau tekanan (Addington & Schodek, 2005). Contohnya, beton yang dilengkapi dengan serat optik dapat mendeteksi retakan mikroskopis sebelum menjadi masalah besar. Demikian pula, cat khusus yang berubah warna ketika mendeteksi korosi dapat membantu tim pemeliharaan mengidentifikasi area yang memerlukan perhatian. Teknologi ini memungkinkan pemantauan kesehatan struktur yang berkelanjutan dan proaktif, mengurangi kebutuhan akan inspeksi manual yang memakan waktu.

5G dan jaringan komunikasi berkecepatan tinggi lainnya memungkinkan penerapan berbagai teknologi pengawasan proyek secara lebih efektif. Dengan latensi yang sangat rendah dan bandwidth yang besar, 5G memungkinkan transmisi data dari ratusan sensor secara real-time, streaming video berkualitas tinggi dari drone inspeksi, dan operasi peralatan berat secara teleoperasi (Zhang et al., 2021). Hal ini sangat berguna untuk proyek-proyek di lokasi terpencil di mana konektivitas sebelumnya menjadi tantangan besar.

Sistem manajemen proyek berbasis AI yang terintegrasi mulai menggantikan sistem tradisional. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat pencatatan, tetapi juga mampu memberikan rekomendasi proaktif berdasarkan analisis data proyek (Dallasega et al., 2020). Misalnya, sistem dapat mengidentifikasi pola keterlambatan yang berulang dan menyarankan penyesuaian jadwal, atau mendeteksi pembengkakan biaya yang potensial dan merekomendasikan langkah penghematan. Beberapa sistem bahkan dilengkapi dengan antarmuka percakapan alami yang memungkinkan pengguna bertanya tentang status proyek dan mendapatkan jawaban secara instan.

Teknologi pencetakan 3D skala besar juga mulai digunakan tidak hanya untuk pembuatan komponen bangunan, tetapi juga untuk pengawasan kualitas. Scanner 3D dapat memverifikasi akurasi komponen yang dicetak dibandingkan dengan model digital, sementara sistem vision komputer dapat mendeteksi cacat produksi secara otomatis (Wu et al., 2016). Teknologi ini sangat mengurangi ketergantungan pada inspeksi manual yang subjektif dan rentan terhadap kesalahan.

Augmented Intelligence, kombinasi antara kecerdasan manusia dan buatan, juga mulai diaplikasikan dalam pengendalian proyek. Berbeda dengan AI sepenuhnya otonom, augmented intelligence dirancang untuk memperkuat kemampuan pengambilan keputusan manusia dengan menyediakan analisis data yang mendalam dan rekomendasi berbasis bukti (Shrestha et al., 2019). Pendekatan ini sangat berguna dalam situasi kompleks di mana faktor manusia dan teknis saling terkait erat.



Gambar 9. 4. Augmented Intelligence

9.4 Inovasi dalam Pengelolaan Sumber Daya Konstruksi

Industri konstruksi saat ini menghadapi tantangan besar dalam hal pengelolaan sumber daya, termasuk material, tenaga kerja, peralatan, dan waktu. Meskipun teknologi seperti BIM, IoT, dan AI telah banyak dibahas, terdapat berbagai inovasi lain yang tidak kalah transformatif dalam mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya konstruksi. Inovasi-inovasi ini mencakup pendekatan sistemik, material alternatif, teknik manajemen baru, dan paradigma berkelanjutan yang secara kolektif merevolusi cara sumber daya dikelola dalam proyek konstruksi modern.

A. Sistem Manajemen Sumber Daya Berbasis Lean Construction

Konsep *Lean Construction* telah berkembang sebagai pendekatan sistematis untuk meminimalkan pemborosan dan memaksimalkan nilai dalam proyek konstruksi. Berbeda dengan metode tradisional yang berfokus pada efisiensi individu, *Lean Construction* mengadopsi prinsip-prinsip manajemen aliran (*flow management*) untuk mengoptimalkan keseluruhan proses konstruksi (Koskela, 1992). Salah satu alat utamanya adalah *Last Planner System* (LPS), yang meningkatkan koordinasi antara berbagai pihak dengan menetapkan komitmen kerja mingguan yang realistis. LPS telah terbukti mengurangi keterlambatan hingga 30% dan meningkatkan produktivitas tenaga kerja sebesar 15-20% (Ballard & Howell, 2003).



Gambar 9. 5. Lean Construction

Selain itu, pendekatan *Target Value Design* (TVD) memungkinkan tim proyek untuk merancang solusi konstruksi yang memenuhi anggaran tanpa mengorbankan kualitas. TVD menggunakan prinsip *set-based design*, di mana berbagai alternatif desain dievaluasi secara paralel sebelum dipilih yang paling optimal (Zimina et al., 2012). Teknik ini sangat berguna dalam proyek dengan keterbatasan sumber daya, karena memastikan bahwa setiap keputusan desain didasarkan pada pertimbangan biaya dan ketersediaan material.

B. Material Konstruksi Alternatif dan Berkelanjutan

Inovasi material konstruksi telah membuka peluang baru untuk pengelolaan sumber daya yang lebih efisien dan berkelanjutan. Salah satu perkembangan terbaru adalah penggunaan **beton geopolimer** sebagai pengganti beton konvensional. Beton geopolimer dibuat dari limbah industri seperti *fly ash* dan *slag*, mengurangi emisi CO₂ hingga 80% dibandingkan beton Portland biasa (Davidovits, 2013). Selain ramah lingkungan, material ini juga memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap sulfat dan panas, sehingga cocok untuk proyek infrastruktur di lingkungan ekstrem.

Material inovatif lain adalah **kayu rekayasa (*engineered timber*)** seperti *cross-laminated timber* (CLT) dan *glulam*. CLT memungkinkan pembangunan struktur tinggi dengan jejak karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan baja atau beton (Ramage et al., 2017). Keunggulan utama kayu rekayasa adalah kemudahan prefabrikasi, yang mengurangi limbah material di lokasi konstruksi hingga 20%. Selain itu, penggunaan kayu sebagai penyimpan karbon alami (*carbon sink*) menjadikannya pilihan ideal untuk proyek-proyek yang menargetkan sertifikasi bangunan hijau.

C. Manajemen Tenaga Kerja Berbasis Data dan Psikologi Industri

Pengelolaan tenaga kerja konstruksi sering kali menjadi tantangan karena tingginya tingkat turnover dan ketergantungan pada keterampilan manual. Inovasi terbaru dalam bidang ini mencakup pendekatan **analisis gerak dan waktu (*motion and time study*)** yang diperbarui dengan teknologi *wearable sensors*. Sensor yang dipasang pada peralatan kerja atau pakaian pekerja dapat melacak efisiensi gerakan, tingkat kelelahan, dan risiko ergonomis (Umer et al., 2018). Data ini kemudian dianalisis untuk merancang ulang proses kerja, mengurangi gerakan yang tidak perlu, dan meningkatkan produktivitas tanpa meningkatkan beban fisik pekerja.

Selain itu, pendekatan **psikologi industri** mulai diterapkan untuk meningkatkan keterlibatan (*engagement*) tenaga kerja. Studi menunjukkan bahwa faktor seperti pengakuan (*recognition*), pelatihan lintas keterampilan (*cross-training*), dan sistem umpan balik real-time dapat meningkatkan produktivitas hingga 25% (Loosemore & Malouf, 2019). Contoh konkret adalah penerapan *gamification* dalam pelatihan keselamatan, di mana pekerja mendapatkan poin atau penghargaan virtual untuk mengikuti protokol dengan benar, sehingga mengurangi kecelakaan kerja.

D. Sistem Logistik dan Rantai Pasok Berbasis Lokalisasi

Manajemen logistik konstruksi tradisional sering kali mengandalkan pasokan material dari pusat distribusi yang jauh, menyebabkan biaya transportasi tinggi dan risiko keterlambatan. Inovasi terkini dalam bidang ini adalah pendekatan **logistik berbasis lokal (*localized supply chain*)**. Konsep ini memanfaatkan sumber daya material yang tersedia di sekitar lokasi proyek, seperti menggunakan agregat daur ulang dari bangunan yang dibongkar di wilayah setempat (Akbarnezhad & Xiao, 2017). Selain mengurangi biaya transportasi, pendekatan ini juga menurunkan emisi karbon dari pengiriman material.

Selain itu, **micro-factories** atau pusat produksi skala kecil mulai digunakan untuk memproduksi komponen konstruksi di dekat lokasi proyek. Misalnya, pabrik mini untuk produksi bata ramah lingkungan atau elemen beton pracetak dapat didirikan sementara di sekitar lokasi pembangunan (Winch, 2019). Strategi ini tidak hanya mempersingkat waktu pengiriman tetapi juga memungkinkan penyesuaian (*customization*) material berdasarkan kebutuhan spesifik proyek.

E. Teknik Perencanaan Sumber Daya Berbasis Ketahanan (*Resilience-Based Planning*)

Perencanaan tradisional sering kali gagal mengantisipasi gangguan seperti bencana alam atau kelangkaan material. Inovasi terbaru adalah pendekatan **manajemen sumber daya berbasis ketahanan (*resilience-based resource management*)**. Teknik ini menggunakan skenario *stress-testing* untuk mengevaluasi bagaimana proyek akan bertahan di bawah berbagai kondisi disruptif (Sheffer & Levitt, 2010). Contohnya, dengan mensimulasikan skenario kenaikan harga baja 30%, tim proyek dapat mengidentifikasi alternatif material atau strategi mitigasi sejak dini.

Selain itu, konsep **modularitas dan desain adaptif** memungkinkan proyek konstruksi lebih fleksibel dalam merespons perubahan. Misalnya, penggunaan sistem struktur yang dapat dibongkar-pasang (*demountable*) memungkinkan material digunakan kembali di proyek lain, mengurangi pemborosan (Brand, 2016). Pendekatan ini sangat relevan dalam konteks ekonomi sirkular, di mana sumber daya harus dipakai berulang kali.

F. Inovasi Kontraktual dan Pembiayaan untuk Optimalisasi Sumber Daya

Model kontrak tradisional seperti *lump-sum* atau *cost-plus* sering kali tidak mendorong efisiensi sumber daya. Inovasi terbaru dalam hal ini adalah **kontrak berbasis kinerja (*performance-based contracting*)**. Dalam model ini, kontraktor diberi insentif finansial jika berhasil menghemat material atau mempersingkat durasi proyek tanpa mengorbankan kualitas (Lahdenperä, 2012). Contohnya, dalam proyek jalan tol, kontraktor bisa mendapatkan bonus jika menggunakan aspal daur ulang dengan performa setara material baru.

Selain itu, **skema pembiayaan hijau (*green financing*)** seperti *sustainability-linked loans* mulai digunakan untuk mendorong pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan. Dalam skema ini, suku bunga pinjaman proyek dikaitkan dengan pencapaian target pengurangan limbah atau emisi (Zhang et al., 2021). Hal ini memotivasi kontraktor untuk mengadopsi praktik konstruksi ramah lingkungan.

G. Kolaborasi Lintas Disiplin melalui Integrated Project Delivery (IPD)

Integrated Project Delivery (IPD) adalah pendekatan kolaboratif di mana semua pemangku kepentingan (pemilik, arsitek, kontraktor) bekerja bersama sejak awal proyek dengan berbagi risiko dan reward (Kent & Becerik-Gerber, 2010). Berbeda dengan metode tradisional yang bersifat hierarkis, IPD memungkinkan pengambilan keputusan kolektif tentang alokasi sumber daya. Misalnya, diskusi awal antara arsitek dan kontraktor dapat menghasilkan desain yang lebih mudah dikonstruksi (*constructability*), sehingga menghemat waktu dan material.



Gambar 9. 6. Integrated Project Delivery (IPD)

9.5 Teknologi dalam Peningkatan Efisiensi dan Produktivitas Proyek

Industri konstruksi saat ini sedang mengalami transformasi besar-besaran dengan hadirnya berbagai teknologi baru yang tidak hanya meningkatkan efisiensi dan produktivitas, tetapi juga mengubah cara pandang tradisional dalam pelaksanaan proyek. Jika selama ini pembahasan banyak terfokus pada teknologi seperti BIM, IoT, AI, dan robotika, masih terdapat banyak inovasi lain yang belum banyak dieksplorasi namun memiliki dampak signifikan terhadap kemajuan industri konstruksi. Beberapa di antaranya termasuk komputasi kuantum untuk optimasi proyek, material nano-enhanced, sistem manajemen energi real-time berbasis edge AI, konstruksi swakelola berbasis crowdsourcing, dan teknologi bio-inspirasi dalam desain struktur.

Komputasi kuantum, meskipun masih dalam tahap pengembangan awal, mulai menunjukkan potensi besar dalam menyelesaikan masalah kompleks di industri konstruksi. Berbeda dengan komputer klasik yang menggunakan bit biner, komputer kuantum menggunakan qubit yang mampu berada dalam

superposisi, memungkinkan perhitungan paralel dalam skala masif. Dalam konteks konstruksi, teknologi ini dapat diaplikasikan untuk optimasi alokasi sumber daya seperti tenaga kerja, material, dan peralatan dengan memproses miliaran kemungkinan kombinasi dalam hitungan detik. Selain itu, komputasi kuantum juga mampu memodelkan berbagai skenario risiko proyek secara simultan, termasuk prediksi dampak cuaca ekstrem dan keterlambatan pasokan material. Beberapa perusahaan teknologi seperti D-Wave telah mulai berkolaborasi dengan pelaku industri konstruksi untuk menguji algoritma kuantum dalam penjadwalan proyek, dengan hasil awal menunjukkan pengurangan waktu perencanaan hingga 40% dibandingkan metode konvensional.

Di bidang material konstruksi, nanoteknologi telah membuka peluang pengembangan material dengan sifat-sifat unggul yang sebelumnya tidak terbayangkan. Salah satu terobosan penting adalah pengembangan beton dengan nanopartikel silika dan graphene yang mampu menyembuhkan retakan secara mandiri melalui aktivasi reaksi kimia saat terjadi kerusakan. Material ini tidak hanya meningkatkan daya tahan struktur tetapi juga mengurangi kebutuhan perawatan secara signifikan. Inovasi lain adalah beton konduktif yang diperkaya dengan graphene, memungkinkan pemanasan jalan secara elektrik untuk mencegah pembekuan di daerah beriklim dingin. Di sisi lain, perkembangan cat nano dengan sifat termokromik yang mampu berubah warna berdasarkan suhu lingkungan memberikan solusi baru untuk efisiensi energi bangunan, sementara pelapis anti-biofouling menjadi jawaban untuk masalah pertumbuhan organisme pengganggu pada struktur bawah air.

Sistem manajemen energi real-time berbasis edge AI merupakan terobosan lain yang membawa analisis data ke tingkat lebih canggih. Berbeda dengan IoT konvensional yang mengandalkan pengolahan data di cloud, edge AI memproses informasi langsung di perangkat, menghasilkan respon yang lebih cepat dan menghemat bandwidth. Aplikasinya dalam konstruksi termasuk smart helmet yang dilengkapi sensor dan chip AI untuk mendeteksi kelelahan pekerja melalui analisis gerakan mata dan postur tubuh, memberikan peringatan real-time tanpa perlu mengirim data ke server pusat. Pada alat berat seperti excavator dan crane, teknologi ini memungkinkan optimasi gerakan untuk mengurangi pemborosan bahan bakar secara signifikan. Keunggulan utama edge AI terletak pada latensi ultra-rendah dan keamanan data yang lebih baik, karena informasi sensitif tidak perlu dikirimkan melalui jaringan.

Konsep konstruksi swakelola berbasis crowdsourcing mulai mendapatkan tempat sebagai alternatif model pelaksanaan proyek. Platform semacam ini memungkinkan partisipasi masyarakat dalam proyek-proyek konstruksi skala kecil hingga menengah, baik melalui pendanaan maupun keterlibatan langsung dalam pelaksanaan. Di Belanda, model civic crowdfunding telah berhasil diaplikasikan untuk pembangunan jembatan pejalan kaki dan fasilitas publik lainnya. Sistem reputasi digital untuk tenaga kerja lepas juga berkembang mirip platform ride-hailing, di mana kontraktor dapat merekrut tukang bangunan terlatih berdasarkan rating dan portofolio online. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada kontraktor besar tetapi juga mempercepat penyelesaian proyek-proyek skala komunitas.

Inspirasi dari alam atau bio-inspirasi menjadi pendekatan baru dalam desain struktur konstruksi. Para insinyur mulai mempelajari struktur biologis yang telah berevolusi selama jutaan tahun untuk menciptakan solusi efisien. Desain hexagonal lattice yang terinspirasi dari sarang lebah terbukti mampu mengurangi penggunaan material hingga 30% tanpa mengorbankan kekuatan struktur. Contoh nyata lain adalah Eastgate Centre di Zimbabwe yang mengadopsi sistem ventilasi alami terinspirasi sarang rayap, berhasil mengurangi kebutuhan AC hingga 90% sekaligus memangkas konsumsi energi secara dramatis.

Augmented workforce dengan exoskeleton robotic mulai diaplikasikan untuk meningkatkan kapasitas fisik pekerja tanpa meningkatkan risiko cedera. Teknologi wearable robotics ini mampu meningkatkan kekuatan angkat pekerja sekaligus mengurangi kelelahan selama bekerja dengan beban berat. Perusahaan seperti Sarcos Robotics telah mengembangkan exoskeleton khusus konstruksi yang terbukti mampu meningkatkan produktivitas pekerja hingga 25%.

Konsep digital material passport menjadi solusi inovatif untuk mendukung ekonomi sirkular di industri konstruksi. Sistem ini mencatat secara digital komposisi dan sejarah setiap material yang digunakan dalam bangunan, memungkinkan proses daur ulang yang lebih efisien saat bangunan tersebut mencapai akhir masa pakainya. Platform Madaster di Belanda telah berhasil mendigitalisasi lebih dari satu juta material bangunan, sekaligus menyediakan data jejak karbon yang akurat untuk keperluan sertifikasi bangunan hijau.

Dari semua perkembangan ini, terlihat jelas bahwa inovasi teknologi dalam konstruksi tidak hanya terbatas pada aspek digital semata, tetapi juga mencakup terobosan material, pendekatan kolaboratif baru, dan inspirasi dari alam. Komputasi kuantum menawarkan solusi untuk masalah optimasi kompleks, nanomaterial membuka era baru ketahanan struktur, edge AI meningkatkan kecepatan respon sistem monitoring, sementara crowdsourcing dan bio-inspirasi memberikan perspektif segar dalam pelaksanaan dan desain proyek. Exoskeleton dan digital material passport masing-masing berkontribusi pada peningkatan produktivitas manusia dan keberlanjutan lingkungan.

Transformasi ini tidak hanya berdampak pada peningkatan efisiensi dan produktivitas proyek konstruksi, tetapi juga membawa perubahan mendasar dalam cara industri ini beroperasi. Kolaborasi antara disiplin ilmu yang berbeda - dari fisika kuantum hingga biologi, dari ilmu material hingga sosiologi - menjadi kunci dalam menciptakan solusi konstruksi masa depan. Bagi para pelaku industri, adaptasi terhadap berbagai inovasi ini bukan lagi pilihan melainkan keharusan untuk tetap kompetitif di era dimana efisiensi, keberlanjutan, dan kolaborasi menjadi penentu utama kesuksesan proyek konstruksi.

Bab 10

Penutup

10.1. Rangkuman dan Kesimpulan

Buku *Sistem Teknologi Bangunan* ini telah membahas secara komprehensif perkembangan terkini dan masa depan teknologi dalam industri konstruksi. Melalui pembahasan berbagai aspek mulai dari material hingga manajemen proyek, beberapa temuan kunci dapat disarikan sebagai berikut.

Perkembangan teknologi konstruksi telah mengalami percepatan signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Inovasi tidak hanya terjadi pada material bangunan, tetapi juga dalam metode desain, sistem struktur, dan pendekatan konstruksi. Material cerdas seperti beton self-healing dan komposit berkinerja tinggi telah membuka kemungkinan baru dalam perancangan struktur yang lebih tahan lama dan ramah lingkungan. Di saat yang sama, material tradisional seperti kayu dan bambu mengalami pembaruan melalui rekayasa teknologi, menawarkan solusi berkelanjutan dengan jejak karbon yang rendah.

Sistem struktur bangunan modern telah bergeser dari pendekatan konvensional menuju konsep yang lebih adaptif. Struktur bangunan kini dirancang tidak hanya untuk menahan beban, tetapi juga mampu merespons perubahan lingkungan dan bahkan bencana alam. Penggunaan sensor dan teknologi monitoring real-time memungkinkan bangunan "belajar" dari kondisi aktual dan menyesuaikan perilakunya untuk mempertahankan stabilitas dan keamanan.

Aspek keberlanjutan dalam konstruksi telah menjadi pusat perhatian, melampaui sekadar efisiensi energi menuju konsep bangunan yang benar-benar regeneratif. Standar bangunan hijau terkini menekankan pada prinsip-prinsip seperti sirkularitas material, net-positive energy, dan integrasi dengan ekosistem alami. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi justru menciptakan nilai tambah bagi ekosistem sekitarnya.

Revolusi digital telah mentransformasi sistem Mechanical, Electrical, and Plumbing (MEP) menjadi jaringan cerdas yang terintegrasi penuh. Bangunan modern kini mampu berfungsi sebagai pembangkit energi mandiri melalui kombinasi teknologi fotovoltaik terintegrasi, sistem penyimpanan energi canggih, dan manajemen beban berbasis kecerdasan buatan. Integrasi ini

tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga menciptakan ketahanan terhadap fluktuasi pasokan energi.

Teknologi informasi seperti Building Information Modeling (BIM) telah berkembang jauh melampaui fungsi awalnya sebagai alat visualisasi. BIM kini menjadi platform kolaboratif yang mencakup seluruh siklus hidup bangunan, dari desain hingga operasi dan pemeliharaan. Kombinasi BIM dengan augmented reality dan kecerdasan buatan telah secara signifikan mengurangi kesalahan konstruksi dan meningkatkan akurasi pelaksanaan proyek.

Prefabrikasi dan modularisasi telah mengubah wajah industri konstruksi, membawa pendekatan manufaktur yang lebih terstandarisasi dan terkontrol ke lapangan. Metode ini tidak hanya mempercepat waktu konstruksi tetapi juga meningkatkan kualitas, mengurangi limbah, dan memungkinkan presisi yang lebih tinggi dalam eksekusi proyek.

Manajemen proyek konstruksi telah mengalami transformasi mendalam melalui adopsi teknologi digital. Pendekatan berbasis data memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat waktu dan akurat, sementara alat-alat digital baru meningkatkan efisiensi pengawasan dan pengendalian proyek. Inovasi dalam manajemen sumber daya telah membuka peluang untuk meningkatkan produktivitas secara signifikan.

Secara keseluruhan, industri konstruksi sedang berada di tengah transformasi besar yang didorong oleh tiga tren utama: otomatisasi canggih yang menggabungkan robotika dan pencetakan 3D, material hibrida yang memadukan sifat-sifat unggul berbagai bahan, serta lingkungan binaan kognitif yang mampu beradaptasi secara cerdas dengan kebutuhan pengguna dan perubahan lingkungan.

Temuan-temuan dalam buku ini tidak hanya memberikan pemahaman menyeluruh tentang keadaan terkini teknologi bangunan, tetapi juga menyajikan kerangka strategis untuk menghadapi tantangan dan peluang di masa depan. Transformasi digital dan tuntutan keberlanjutan akan terus membentuk wajah industri konstruksi dalam tahun-tahun mendatang, menciptakan peluang baru bagi para profesional yang mampu beradaptasi dengan perubahan ini.

10.2. Tantangan dan Peluang Masa Depan

Industri konstruksi dan teknologi bangunan saat ini berada di persimpangan jalan yang menarik, di mana tantangan kompleks berpadu dengan peluang transformatif yang belum pernah ada sebelumnya. Di satu sisi, sektor ini menghadapi tekanan besar untuk beradaptasi dengan perubahan iklim, keterbatasan sumber daya, dan tuntutan masyarakat yang semakin tinggi. Di sisi lain, kemajuan teknologi yang pesat membuka kemungkinan baru untuk menciptakan lingkungan binaan yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan.

Salah satu tantangan paling kritis adalah **adaptasi terhadap perubahan iklim**. Bangunan masa depan tidak hanya harus mengurangi emisi karbon, tetapi juga dirancang untuk bertahan dari cuaca ekstrem yang semakin sering terjadi. Kenaikan permukaan air laut, badai yang lebih intens, dan gelombang panas yang lebih panjang memaksa para profesional konstruksi untuk memikirkan kembali material, desain, dan metode pembangunan. Namun, tantangan ini sekaligus membuka peluang besar untuk pengembangan material adaptif yang dapat merespons perubahan lingkungan, sistem energi yang lebih tangguh, dan pendekatan konstruksi yang lebih fleksibel.

Transformasi digital juga menyajikan tantangan sekaligus peluang yang unik. Adopsi teknologi seperti Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), dan kecerdasan buatan dalam konstruksi membutuhkan investasi besar dan perubahan mendasar dalam cara kerja tradisional. Keterampilan baru harus dipelajari, proses bisnis perlu ditata ulang, dan budaya kerja harus beradaptasi. Namun, transformasi ini menjanjikan efisiensi yang belum pernah terjadi sebelumnya, pengurangan kesalahan konstruksi, dan kemampuan untuk membuat bangunan yang benar-benar "hidup" dan responsif terhadap kebutuhan penghuninya.

Keterbatasan sumber daya menjadi tantangan lain yang mendesak. Pasokan material konstruksi tradisional semakin terbatas, sementara limbah konstruksi terus menumpuk. Situasi ini memacu inovasi dalam material daur ulang dan pendekatan ekonomi sirkular dalam konstruksi. Peluang besar terbuka untuk pengembangan material baru dari sumber terbarukan, sistem daur ulang on-site yang lebih efisien, dan metode konstruksi yang meminimalkan pemborosan.

Di bidang **tenaga kerja**, industri menghadapi tantangan kekurangan pekerja terampil yang memahami teknologi baru, sementara di saat yang sama harus menarik generasi muda yang lebih tertarik pada pekerjaan berbasis teknologi. Ini menciptakan peluang untuk revolusi dalam pelatihan konstruksi melalui realitas virtual dan augmented, serta pengembangan peran-peran baru di persimpangan antara konstruksi dan teknologi digital.

Regulasi dan standar yang terus berkembang juga menjadi tantangan kompleks. Bangunan masa depan harus memenuhi persyaratan baru yang semakin ketat terkait energi, emisi, dan aksesibilitas. Namun, ini juga mendorong inovasi dalam desain dan teknologi bangunan, menciptakan pasar baru untuk solusi-solusi hijau dan cerdas.

Peluang terbesar mungkin terletak pada **konvergensi teknologi**. Penyatuan antara teknologi konstruksi, energi terbarukan, sistem digital, dan bioteknologi membuka kemungkinan untuk menciptakan bangunan yang tidak hanya pasif, tetapi aktif berkontribusi pada lingkungan sekitarnya. Bangunan di masa depan bisa menjadi organisme hidup yang menghasilkan energi, membersihkan udara, mengelola air, dan beradaptasi dengan kebutuhan pengguna.

Tantangan dan peluang ini menggambarkan masa depan di mana bangunan tidak lagi sekadar struktur statis, tetapi menjadi sistem dinamis yang terintegrasi dengan lingkungan dan masyarakat. Mereka yang mampu mengantisipasi perubahan ini dan berinovasi akan memimpin transformasi industri konstruksi di dekade-dekade mendatang.

10.3. Arah Pengembangan Teknologi Bangunan

Perkembangan teknologi bangunan masa depan akan didorong oleh tiga poros utama yang saling terkait: keberlanjutan ekologis, transformasi digital, dan humanisasi ruang hidup. Industri konstruksi sedang bergerak menuju era di mana bangunan tidak lagi sekadar struktur fisik, tetapi ekosistem hidup yang dinamis dan responsif.

Pada aspek material, penelitian sedang gencar mengembangkan **generasi baru material konstruksi** yang menggabungkan kekuatan struktural dengan kemampuan regeneratif. Material bio-hybrid yang terinspirasi sistem biologis, seperti beton dengan mikroorganisme penyembuh retak atau panel fasad yang mampu berfotosintesis, akan menjadi standar baru. Material cerdas dengan sifat adaptif - yang bisa mengubah karakteristik isolasi, transparansi, atau kekuatan berdasarkan kondisi lingkungan - akan mentransformasi cara kita memandang elemen bangunan.

Revolusi **konstruksi digital** akan mencapai tahap matang dengan adopsi massal konstruksi 4.0. Robot swakarya otonom yang bekerja sama dalam koloni, pencetakan 3D skala besar dengan presisi sub-milimeter, dan sistem fabrikasi modular berbasis AI akan mengubah lapangan konstruksi menjadi semacam pabrik cerdas. Digital twin tidak hanya akan digunakan selama fase konstruksi, tetapi menjadi bagian permanen dari bangunan untuk pemantauan dan optimasi sepanjang siklus hidupnya.

Sistem **energi terintegrasi** akan berkembang melampaui konsep net-zero menjadi bangunan positif energi yang berfungsi sebagai pembangkit listrik mikro. Integrasi panel fotovoltaik transparan, sistem pemanen energi kinetik dari aktivitas manusia, dan jaringan penyimpanan energi termal akan menciptakan ekosistem energi yang sepenuhnya mandiri. Bangunan akan menjadi simpul aktif dalam jaringan energi terdistribusi, mampu berdagang energi dengan bangunan lain secara peer-to-peer.

Konsep **kecerdasan lingkungan binaan** akan berevolusi dari otomasi sederhana menuju sistem kognitif yang benar-benar memahami dan mengantisipasi kebutuhan penghuni. Jaringan sensor biomimetik yang meniru sistem saraf biologis akan memungkinkan bangunan merespons tidak hanya parameter fisik tetapi juga keadaan emosional pengguna. Ruang-ruang akan beradaptasi secara organik terhadap perubahan pola penggunaan, musim, bahkan suasana hati penghuninya.

Pada skala perkotaan, teknologi **konstruksi vertikal dan bawah tanah** akan mendapatkan momentum seiring dengan keterbatasan lahan. Pertanian vertikal terintegrasi, ruang hidup bawah tanah dengan kualitas udara terkontrol, dan struktur modular terapung akan menjadi solusi untuk kepadatan perkotaan yang semakin meningkat. Konsep bangunan sebagai organisme hidup yang bernapas, bermetabolisme, dan beregenerasi akan mengaburkan batas antara alam dan lingkungan binaan.

Pengembangan **antarmuka manusia-bangunan** akan menciptakan pengalaman hidup yang lebih intuitif dan personal. Teknologi haptik, kontrol

neural, dan augmented reality akan memungkinkan interaksi yang lebih alami dengan lingkungan binaan. Bangunan akan menjadi ekstensi dari tubuh dan pikiran manusia, merespons kebutuhan kita bahkan sebelum kita menyadarinya.

Di balik semua kemajuan teknis ini, filosofi dasar teknologi bangunan masa depan akan bergeser dari pendekatan mekanistik menuju paradigma ekologis yang melihat bangunan sebagai bagian dari jaringan kehidupan yang lebih besar. Inovasi akan diarahkan bukan hanya untuk meningkatkan efisiensi, tetapi untuk menciptakan simbiosis antara manusia, bangunan, dan alam.

- A. Ghaffarianhoseini et al., "Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 1046–1053, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.083.
- A. Peckiene and L. Ustinovičius, "Possibilities for Building Spatial Planning using BIM Methodology," *Procedia Eng*, vol. 172, pp. 851–858, 2017, doi: 10.1016/J.PROENG.2017.02.085.
- Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2005). *Smart materials and technologies in architecture*. Architectural Press.
- Addis, B. (2007). *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*. Phaidon Press.
- Adeyemi, Abiodun Benedict, Tochi Chimaobi Ohakawa, and Azubuike Chukwudi Okwandu. 2024. "Integrating Modular and Prefabricated Construction Techniques in Affordable Housing: Architectural Design Considerations and Benefits Integrating Modular and Prefabricated Construction Techniques in Affordable Housing: Architectural Design Consideration." (September).
- Aelenei, L., et al. (2023). *Structural Photovoltaic Facades: Design and Performance*. Renewable Energy Press.
- Afram, A., et al. (2023). *Artificial Intelligence for Smart Building Energy Management*. Elsevier.
- Afzal, M., Mehdi, F. dan Siddiqui, Z., 2004. Effect of Relative Humidity and Temperature on Airborne Fungal Allergens of Karachi City. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7(2), pp.159-162. <https://scialert.net/fulltext/?doi=pjbs.2004.159.162>. Diakses pada 2 Juli 2021.
- Akbarnezhad, A., & Xiao, J. (2017). Estimation and minimization of embodied carbon of buildings. *Energy and Buildings*, 142, 120-132.
- Akhmad, Abd. Gani & Pudji Astutiek Fachruddin. 2008. "Disain Rumah Tinggal Konstruksi 'Knock Down.'" *Jurnal SMARTek* Vol. 6, No: 18–28.
- Ali, M. M., & Moon, K. S. (2023). *Structural developments in tall buildings: Current trends*. Elsevier.

Al-Kodmany, K (2023). Elevator Technology Improvements: A Snapshot. Encyclopedia, 3, 530-548.

Ansari, F. (2023). Structural Health Monitoring with Fiber Optic Sensors. Wiley.

Arnold, D. (1999). Iron Bridge to Crystal Palace: The Industrial Revolution and Architectural Innovation. MIT Press.

Awan, H. H., Andresen, M., & Schmidt, A. (2021). Advanced stone cutting technologies in modern architecture. Journal of Architectural Engineering, 27(3), 45-58.

Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. Leadership and Management in Engineering, 11(3), 241-252.

Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. Leadership and Management in Engineering, 11(3), 241-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)

B. Dave, A. Buda, A. Nurminen, and K. Främling, "A framework for integrating BIM and IoT through open standards," Autom Constr, vol. 95, pp. 35–45, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.AUTCON.2018.07.022.

B. Succar, "Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders," Autom Constr, vol. 18, no. 3, pp. 357–375, May 2009, doi: 10.1016/j.autcon.2008.10.003.

Bachmann, H., Ammann, W., Deischl, F., Eisenmann, J., Floegl, I., Hirsch, G., ... & Klein, G. (2021). Rational design of structural systems. International Association for Bridge and Structural Engineering.

Ballard, G., & Howell, G. (2003). Lean project management. Building Research & Information, 31(2), 119-133.

Bangash, M.Y.H. dan Bangas, T. (2007). Lift, Elevators, Escalators and Moving Walkways/Travelator. Taylor & Francis.London

Bank, L. C. (2023). Composites for construction: Structural design with FRP materials (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Belmonte, M & Trabucco, D (2021). The Ropeless Elevator: New Transportation System for High-Rise Building (and Beyond). International Journal of High-Rise Building, 10 (1), 55-62.

- Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2023). *Topology optimization: Theory, methods, and applications* (3rd ed.). Springer.
- Bentz, E. C., & Thomas, M. D. A. (2023). *Advances in High-Performance Lightweight Concrete*. Springer.
- Berger, H. (2020). *Light structures: Structures of light*. Birkhäuser.
- Bergés, M., et al. (2023). *Interoperability in Building Automation Systems*. IEEE Transactions on Industrial Informatics.
- Bibri, S. E. (2018). *Smart Sustainable Cities of the Future: The Untapped Potential of Big Data Analytics and Context-Aware Computing for Advancing Sustainability*. Springer.
- Billington, D. P. (2021). *Reinforced Concrete Structures: Historical Development and Modern Innovations*. Princeton University Press.
- Birenboim, M., et al. (2020). "Graphene-Enhanced Concrete for Smart Infrastructure." *Nature Materials*.
- Blaabjerg, F., et al. (2023). *Grid-Forming Inverters for Renewable Integration*. IEEE Press.
- Boafo, Fred Edmond, Jin Hee Kim, and Jun Tae Kim. 2016. "Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways." *Sustainability (Switzerland)* 8(6): 1–16.
- Bock, T. (2015). *The Future of Construction Automation: Technological Disruption and the Upcoming Ubiquity of Robotics*. Automation in Construction, 59, 113-121.
- Bock, T., & Linner, T. (2016). *Robot-oriented design: Design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction*. Cambridge University Press.
- Bos, F. P., Wolfs, R. J. M., Ahmed, Z. Y., & Salet, T. A. M. (2016). *Additive Manufacturing of Concrete in Construction: Potentials and Challenges of 3D Concrete Printing*. Virtual and Physical Prototyping, 11(3), 209-225.
- Brand, S. (2016). *How buildings learn: What happens after they're built*. Penguin.
- BRE Global Limited. (2016). *BREEAM International New Construction 2016*. BREAM Publication.
- Brous, P., Janssen, M., & Herder, P. (2018). *The Role of IoT in Transforming the Construction Industry*. Automation in Construction, 93, 50-59.

Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modeling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971-980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>

Bunsell, A. R., & Renard, J. (2021). *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429290118>

Buswell, R., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2023). *3D concrete printing technology: Construction and building applications*. Butterworth-Heinemann.

C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston, "BIM Handbook," *BIM Handbook*, Feb. 2008, doi: 10.1002/9780470261309.

C. M. Eastman and S. Rafael, "Relative Productivity in the AEC Industries in the United States for On-Site and Off-Site Activities," *J Constr Eng Manag*, vol. 134, no. 7, p. 517-526, Jan. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:7(517).

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2023). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications* (7th ed.). McGraw-Hill.

Chandra Kirana, K. (2021). Pengelolaan Sumber Daya Air Berdasarkan Perspektif Hukum Indonesia. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*. <https://doi.org/10.36418/jist.v2i11.275>

Chen, L., et al. (2023). *AI-Based Wastewater Separation Systems*. Water Research.

Chen, W. F., & Lui, E. M. (2021). *Structural stability: Theory and implementation*. Elsevier.

Chilton, J. (2021). *Heinz Isler: The engineer's contribution to contemporary architecture*. Routledge.

Chopra, A. K. (2023). *Dynamics of structures: Theory and applications* (6th ed.). Pearson.

Chou, C. C., & Chen, Y. C. (2021). *Seismic Design and Performance of Steel Eccentrically Braced Frames*. Springer.

Collins, M. P., & Mitchell, D. (2021). *Prestressed Concrete Structures* (2nd ed.). Prentice Hall.

Correia, J. R., Branco, F. A., & Ferreira, J. G. (2022). *Advanced composites in construction: Materials, design and applications*. Springer Nature.

Crowther, P. (2022). Design for disassembly in the built environment. Routledge.

D. Bryde, M. Broquetas, and J. M. Volm, "The project benefits of Building Information Modelling (BIM)," *International Journal of Project Management*, vol. 31, no. 7, pp. 971–980, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.IJPROMAN.2012.12.001.

D. Zettler and D. Pleyer, "BIM dimensions in practice: 3D to 10D." Accessed: Mar. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dfindit.com/en/engiclopedia/bim-dimensions>

Dallasega, P., Revolti, A., Sauer, P. C., & Schulze, F. (2020). Building construction supply chain through BIM: Lean and green strategies. *Sustainability*, 12(10), 1-22.

Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement to minimize carbon-dioxide greenhouse-warming. *Ceramic Transactions*, 37, 165-182.

Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement: A review. *Geopolymer Institute Library*, 21, 1-11.

Dharmawan, C., and M. Alviano. 2019. "Pre-Fabricated Material for Modular House." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 662(4).

Ding, L., et al. (2022). "AI-Powered Smart Helmets for Construction Safety." *Automation in Construction*.

Dittenber, D. B., & Gangarao, H. V. S. (2021). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part B: Engineering*, 204, 108491. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108491>

Doshi, A., George, J. M., & Prakash, C. (2020). The Role of AI in Revolutionizing Design and Construction. *Journal of Building Design and Construction*, 5(1), 102-114.

Doulos, L., et al. (2023). Advanced Lighting Control Systems. *Lighting Research & Technology*.

Dyke, S. J., et al. (2022). Real-Time Hybrid Simulation of Smart Structures. Springer.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM handbook: A guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470261309>

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.

Elkhapery, B., Kianmehr, P., & Doczy, R. (2021). Benefits of retrofitting school buildings in accordance to LEED v4. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101798>

Elliott, K. S. (2021). *Precast concrete structures* (2nd ed.). CRC Press.

Fardis, M. N. (2021). *Performance-based seismic design of concrete structures and infrastructure*. Springer.

Fernandes, J., Peixoto, M., & Mateus, R. (2019). Traditional building materials and their evolution in the modern age. *Construction and Building Materials*, 215, 779-791.

Figueiro, M., et al. (2023). *Human-Centric Lighting: Science and Applications*. Springer.

Fitchen, J. (1986). *Building Construction Before Mechanization*. MIT Press.

Fleming, S. (2010). *Construction Technology: An Illustrated Introduction*. Wiley-Blackwell.

FM Global. (2023). *Advanced Fire Suppression Technology Report*. FM Global Research.

Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>

Gellings, C., & Taylor, P. (2023). *The Future of Electricity Distribution*. Routledge.

Gibb, A. G. (1999). *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*. John Wiley & Sons.

Gibb, A. G., & Isack, F. (2003). Re-engineering through Pre-assembly: Client Expectations and Drivers. *Building Research & Information*, 31(2), 146-160.

Gimpel, J. (1992). *The Medieval Machine: The Industrial Revolution of the Middle Ages*. Penguin Books.

Gleick, P., et al. (2023). *Atmospheric Water Harvesting*. Nature Water.

Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., & Savarese, S. (2015). D4AR-4-D Augmented Reality-Modeling and Visualization of Construction Activities

Using Photographs and Building Information Modeling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(8), 878-890.

Gray, L. E. (2002). From Ascending Rooms to Express Elevator. A History of the Passenger Elevator in the 19th Century. Elevator World Inc.

Graybeal, B. A. (2020). Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. FHWA.

Green, M., & Karsh, J. (2022). The case for tall wood buildings. Council on Tall Buildings and Urban Habitat.

Gruber, P. (2021). *Biomimetics in architecture*. Springer.

Güney, T. (2019). Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*. <https://doi.org/10.1080/13504509.2019.1595214>

Guo, Y., et al. (2023). Digital Twin for Electrical Systems. NIST Special Publication.

Gurley, K., et al. (2023). Bio-Inspired Adaptive Foundations for Hurricane Zones. *Journal of Structural Engineering*.

Halliday, S. (2008). *Sustainable Construction*. Butterworth-Heinemann.

Hensen, J. L. M., & Lamberts, R. (2023). *Building Performance Simulation for Design and Operation* (2nd ed.). Routledge.

Herwandi. (2021). Implementasi grid tie inverter pada pembangkit listrik tenaga surya on grid untuk golongan pelanggan rumah tangga masyarakat perkotaan. *JURNAL ELTEK*. <https://doi.org/10.33795/eltek.v19i1.292>

Hill, C. (2020). *Wood modification: Chemical, thermal, and other processes*. Wiley.

Hollaway, L. C. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2419-2445.

Hollaway, L. C. (2020). *Polymer composites for civil and structural engineering*. Springer Science & Business Media.

Honic, M., et al. (2023). "Digital Material Passports for Circular Construction." *Journal of Cleaner Production*.

Huang, R., et al. (2023). VR-Based Training for Electrical Technicians. *Journal of Construction Education*.

Huscio, T & Trochimczuk, R. (2016) Rope-Free Multi-Cabin Elevator System for Vertical and Horizontal Transport and Simultaneous Integration of Movement in Two Directions. *Tecnical Transcation Mechanics*, 5 (M), 45-52.

Hutchinson, T. C., et al. (2023). AI-Powered Structural Control Systems. *Nature Civil Engineering*.

I. Corredor Pérez and A. M. Bernardos Barbolla, "Exploring major architectural aspects of the web of things," *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, vol. 9, pp. 19–53, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-04223-7_2.

Isyumov, N., & Kilpatrick, J. (2022). *Wind effects on tall buildings: A practical guide*. CRC Press.

J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.

J. Wiley et al., "BIM Handbook: A Guide," *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 1981.

Jaillon, L., & Poon, C. S. (2014). Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong. *Automation in Construction*, 39, 195-202.

Jiang, S., et al. (2023). Self-Healing Pipe Materials. *Advanced Materials*.

Johnson Controls. (2023). Case Study: Salesforce Tower Optimization. Technical Report.

Jonkers, H. (2019). "Self-Healing Concrete: A Review." *Cement and Concrete Research*.

Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36(2), 230-235.

JR East. (2023). Kinetic Energy Harvesting in Transit Hubs. Technical Report.

Kamarul Aini, M., Wan Noor Hanani, W., Mohd Arif, R., Nor Haslina, H., Nur Aini, M. and Haris Fadzillah, H., 2019. Thermal comfort study at Dewan Sultan Ibrahim, UTHM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 373(1), p.012012.

Karacabeyli, E., & Douglas, B. (2021). *CLT handbook: Cross-laminated timber*. FPIinnovations.

Karbhari, V. M. (2023). *Durability of composites for civil structural applications*. Woodhead Publishing.

Kawasaki, K., Aoki, T., Sudo, M. and Mizutani, A., 2020. Thermal influence caused by the vertical distribution of reflected solar radiation and re-radiation on the building in various climate areas and its solar shading method. *Japan Architectural Review*, 4(1), pp.192-201.

Kent, D. C., & Becerik-Gerber, B. (2010). Understanding construction industry experience and attitudes toward integrated project delivery. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(8), 815-825.

Khasreen, M. M., Banfill, P. F., & Menzies, G. F. (2020). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*, 12(1), 1-12.

Khatib, J. M. (2009). *Sustainability of Construction Materials*. Woodhead Publishing.

Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (4th ed.). Wiley.

Kim, D., & Braun, J. E. (2023). Advanced Refrigerant Distribution Technologies. *International Journal of Refrigeration*.

Knippers, J., Schmid, U., & Speck, T. (2022). *Biomimetic research for architecture and building construction*. Springer.

Kodur, V., & Naser, M. Z. (2021). *Structural Fire Engineering*. McGraw-Hill.

Koop, S., et al. (2023). Smart Water Fixtures Performance. *Journal of Water Conservation*.

Koskela, L. (1992). Application of the new production philosophy to construction. CIFE Technical Report No. 72.

Kostof, S. (1995). *A History of Architecture: Settings and Rituals*. Oxford University Press.

Kretzer, M., et al. (2023). *Shape Memory Alloys in Adaptive Architecture*. Detail Business Media.

Künzel, H., Holm, A., Zirkelbach, D. and Karagiozis, A., 2005. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Solar Energy*, 78(4), pp.554-561.

Kusumah, Anita Febrianti. 2024. "Analisis Desain Spasial Pada Bangunan Prefabrikasi: Residensial." *Waca Cipta Ruang* 10(1): 52–59.

- Lahdenperä, P. (2012). Making sense of the multi-party contractual arrangements of project partnering, project alliancing and integrated project delivery. *Construction Management and Economics*, 30(1), 57-79.
- Lancaster, L. (2005). *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome: Innovations in Context*. Cambridge University Press.
- Le Dréau, J., & Heiselberg, P. (2023). *Thermally Active Building Systems: Principles and Applications*. Elsevier.
- Lee, H., & Cheng, Y. (2023). IoT for Predictive Maintenance in MEP Systems. *Building Automation Journal*.
- Leung, M., et al. (2023). High-Rise Water Distribution. *Building Services Engineering*.
- Li, H., et al. (2023). Building-Integrated PV Systems. *Renewable Energy Press*.
- Li, Z. (2011). *Advanced Concrete Technology*. Butterworth-Heinemann.
- Liu, Y., et al. (2023). Antimicrobial Pipe Technology. *Materials Science Reports*.
- Liu, Y., et al. (2023). Robotic Assembly of Modular High-Rise Buildings. *Automation in Construction*.
- Loosemore, M., & Malouf, N. (2019). Safety training and positive safety attitude formation in the Australian construction industry. *Safety Science*, 113, 233-243.
- Lu, W., Chen, X., Peng, Y., & Shen, L. (2020). The effects of IoT-enabled construction waste management on construction project performance. *International Journal of Construction Management*, 20(5), 521-532.
- Lu, X., et al. (2022). Performance of Tuned Mass Damper in Shanghai Tower Under Typhoon Conditions. *Journal of Structural Engineering*.
- MacGregor, J. G., & White, J. K. (2023). *Reinforced concrete: Mechanics and design (8th ed.)*. Pearson.
- MacGregor, J. G., & Wight, J. K. (2022). *Reinforced concrete: Mechanics and design (8th ed.)*. Pearson.
- Mahmoud, S., et al. (2023). PoE Lighting Technology. *IEEE IoT Journal*.
- Makowski, Z. S. (2020). *Analysis, design and construction of braced space frames*. Elsevier.

Marzuki, Zulkarnain, and L.M.F. Purwanto. 2024. "Kajian Implementasi Konsep Rumah Tumbuh Menggunakan Sistem Prefabrikasi Di Dunia Konstruksi." *Jurnal Latar* 2(1): 20–36.

McCulloch, D. (2007). *The Path Between the Seas: The Creation of the Panama Canal, 1870-1914*. Simon and Schuster.

McKinsey. (2023). *The Future of Smart Facility Management*. Industry Report.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill.

Memarzadeh, F. dan Xu, W., 2011. Role of air changes per hour (ACH) in possible transmission of airborne infections. *Building Simulation*, 5(1), pp.15-28.

<https://orf.od.nih.gov/TechnicalResources/Bioenvironmental/Documents/RoleofACHinTransmissionofAirborneInfections508.pdf>. Diakses pada 9 November 2021.

Menges, A., et al. (2023). *Swarm Robotics in Architectural Construction*. Robotic Fabrication Press.

Mishnaevsky, L., Brøndsted, P., Nijssen, R. P. L., Lekou, D. J., & Philippidis, T. P. (2021). Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*, 14(11), 3249. <https://doi.org/10.3390/ma14113249>

Moehle, J. P., et al. (2023). *Next-Generation Earthquake Resilient Structures*. ASCE Press.

Muntohar, A. S., Rahman, M. E., & Pakrashi, V. (2018). *Stabilized earth blocks: A sustainable alternative for modern construction*. Elsevier.

Murray, S. (2004). *Notre-Dame of Paris and the Cult of the Virgin Mary*. Cambridge University Press.

N. Gu and K. London, "Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry," *Autom Constr*, vol. 19, no. 8, pp. 988–999, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.AUTCON.2010.09.002.

N. Malik, R. Ahmad, and M. Al-Hussein, "Generation of safe tool-paths for automatic manufacturing of light gauge steel panels in residential construction," *Autom Constr*, vol. 98, pp. 46–60, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.AUTCON.2018.11.023.

Naaman, A. E. (2022). *Prestressed Concrete Analysis and Design (4th ed.)*. Techno Press.

- Nakamura, Y., et al. (2022). *Self-Sensing Concrete Structures with Embedded Actuators*. Elsevier.
- Nawy, E. G. (2023). *Prestressed concrete: A fundamental approach* (7th ed.). Pearson.
- Nawy, E. G. (2023). *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach* (8th ed.). Pearson.
- Neukart, F., et al. (2019). "Quantum Computing for Construction Optimization." *Quantum Engineering*.
- Newton, R. S. (2019). Generative design in architecture: A literature review. *Architectural Science Review*, 62(1), 26-45.
- Novita, Cindy, and Jundi Jundullah Afgani. 2024. "Kajian Konsep Arsitektur Modular Pada Rumah Sakit Pusat Pertamina Simprug, Jakarta Selatan." *PURWARUPA Jurnal Arsitektur* 8(2): 153.
- Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2023). *Reliability of structures* (3rd ed.). CRC Press.
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the Implications of Digitization and Automation in the Context of Industry 4.0: A Research Agenda for the Construction Industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139.
- Oxman, N. (2023). *Material ecology: Architectures of the Anthropocene*. MIT Press.
- Oxman, N., et al. (2023). *Bio-Structural Design: Principles and Applications*. MIT Press.
- Ozbulut, O. E., et al. (2021). *Shape Memory Alloy Applications in Seismic Engineering*. CRC Press.
- P. Smith, "BIM & the 5D Project Cost Manager," *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 119, pp. 475–484, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.SBSPRO.2014.03.053.
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., & Labrincha, J. (2023). *Eco-efficient construction and building materials*. Woodhead Publishing.
- Palo Alto Networks. (2023). *Cybersecurity for Building Automation*. Security Whitepaper.
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (2022). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Wiley.
- Persily, A., & de Jonge, L. (2023). *Ventilation and Indoor Air Quality in Modern Buildings*. Springer.

Platt, G., et al. (2023). IoT for Water Management. Smart Buildings International.

Pradana, C. H., & Hariyani, D. S. (2021). Penerapan Material yang Ramah Lingkungan pada Bangunan di Indonesia. <https://doi.org/10.32315/ti.9.c015>

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2023). Displacement-based seismic design of structures (2nd ed.). IUSS Press.

Putri, Shely Pratiwi Sanjaya, and Ari Widyati Purwantiasning. 2021. "Kajian Konsep Arsitektur Modular Pada Rumah Susun Itb Jatinangor." *Nature: National Academic Journal of Architecture* 8(1): 88.

Raihan, M, and F Sulthan. 2020. "Penerapan Konsep Rumah Tumbuh Pada Teknologi Struktur Risha (Rumah Instan Sederhana Sehat)." *Applicable Innovation of Engineering and Science Research (AVoER)* (November): 355–62.

Ramage, M. H., et al. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333-359.

Reichert, S., et al. (2023). Mangrove-Inspired Coastal Structures. *Coastal Engineering*.

Rezaie, B., & Rosen, M. A. (2023). District Energy Systems: Design and Operation. Wiley.

Ricciardi, P., et al. (2023). Energy Harvesting Floor Systems. *Sustainable Energy Technologies*.

Richardson, D., et al. (2023). V2B Integration Strategies. *eTransportation Journal*.

Rijal, H., Humphreys, M. and Nicol, J., 2019. Adaptive model and the adaptive mechanisms for thermal comfort in Japanese dwellings. *Energy and Buildings*, 202, p.109371

S. & L. Eastman, Teicholz, "A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Architects, Engineers, Contractors, and Fabricators," *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1–506, 2008.

S. Azhar, M. Khalfan, and T. Maqsood, "Building information modeling (BIM): Now and beyond," *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, vol. 12, no. 4, pp. 15–28, 2012, doi: 10.5130/AJCEB.V12I4.3032.

S. Russell and P. Norvig, "Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th US ed." Accessed: Mar. 14, 2025. [Online]. Available: <https://aima.cs.berkeley.edu/>

Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2022). Steel structures: Design and behavior (6th ed.). Pearson.

Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060-2071.

Sani, Andi asrul. 2022. "The Evolution of Prefabrication Based Modular Housing: Expectation and Challenge." *Jurnal Arsitektur* 12(2): 105.

Schiavon, S., et al. (2023). Energy-Efficient HVAC Systems for Commercial Buildings. *Energy and Buildings*.

Schlaich, M., Schafer, K., & Sobek, W. (1996). Concrete Structures: Designing with Efficiency. Birkhauser.

Schlüter, M., et al. (2023). Graphene-Reinforced UHPC Composites. *Materials Science Reports*.

Schock, H. J. (2021). Tensile structures: Design, analysis, and construction (Vol. 1-2). MIT Press.

Schodek, D. L., & Bechthold, M. (2023). Structures (8th ed.). Pearson.

Sharma, B., Gatóo, A., & Ramage, M. H. (2020). Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, 247, 118577.

Sheffer, D. A., & Levitt, R. E. (2010). How industry structure retards diffusion of innovations in construction. CIFE Working Paper.

Shrestha, A., Mahmood, A., & Benidris, M. (2019). Augmented intelligence for power system resilience. *IEEE Access*, 7, 150514-150533.

Siregar, N. 2024. "Menggali Potensi Arsitektur Modular: Membangun Dengan Fleksibilitas Dan Efisiensi." *WriteBox*: 1–14. <https://writebox.cloud/index.php/wb/article/view/148%0Ahttps://writebox.cloud/index.php/wb/article/download/148/148>.

Skidmore, Owings & Merrill. (2023). Integrated Wind Energy in High-Rise Design. *Architectural Review*.

Smith, J., et al. (2023). Digital As-Built for Facility Management. *Journal of Building Engineering*.

Smith, R., Frangi, A., & Fontana, M. (2023). Hybrid structures: Design strategies. Routledge.

- Sobek, W. (2023). Ultralightweight transformable structures. Detail Business Information GmbH.
- Soutis, C., & Turkmen, D. (2022). Multifunctional composite materials for energy applications. Royal Society of Chemistry.
- Sritharan, S., et al. (2023). Hybrid Precast Concrete Systems for Seismic Regions. ASCE Press.
- Strakosch, George R (2010). The Vertical Transportation Handbook. John Wiley & Sons. New Jersey.
- Strausser, K., & Swift, T. (2021). "Exoskeletons in Construction." Wearable Technologies.
- Susanto, Stefanie, Januar Budiman, and I Gede Agus Widyadana. 2020. "Studi Metode Konstruksi Prefabrikasi Untuk Pembangunan Perumahan Tapak Massal." *Dimensi Utama Teknik Sipil* 7(2): 18–32.
- Susanto, Stefanie. 2019. "Study of Prefabricated Construction Methods for Mass Tread Housing Construction. Case Study: Dian Sukolilo Regency Housing, Surabaya." *Dimensi Utama Teknik Sipil* 6(2): 49–63.
- T. Bock, "The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics," *Autom Constr*, vol. 59, pp. 113–121, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.AUTCON.2015.07.022.
- Takewaki, I., et al. (2023). Adaptive Buildings: Design and Performance. Wiley.
- Tam, V. W., Kotrayothar, D., & Loo, Y. C. (2018). On the prevailing construction waste recycling practices: A South East Queensland study. *Waste Management & Research*, 27(3), 215-224.
- Tani, A., et al. (2023). Bidirectional Charging Standards. IEC White Paper.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2019). Digital twins-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), 3563-3576.
- Tibbits, S., et al. (2023). 4D Printing in Construction. MIT Media Lab Publications.
- Todorovska, M. I., et al. (2022). Tsunami-Resilient Coastal Structures. *Coastal Engineering Journal*.

Trahair, N. S., Bradford, M. A., Nethercot, D. A., & Gardner, L. (2022). *The behavior and design of steel structures* (5th ed.). CRC Press.

Turk, Ž., & Klinc, R. (2017). Potentials of blockchain technology for construction management. *Procedia Engineering*, 196, 638-645. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.052>

Turner, J.S., & Soar, R. (2022). "Bio-Inspired Architecture." *Frontiers in Built Environment*.

Uddin, N. (Ed.). (2020). *Developments in fiber-reinforced polymer (FRP) composites for civil engineering*. Woodhead Publishing.

Umer, W., et al. (2018). Motion-capture-based biomechanical risk assessment of construction workers. *Automation in Construction*, 94, 1-11.

Van de Kuilen, J. W., Ceccotti, A., Xia, Z., & He, M. (2011). Very tall wooden buildings with cross laminated timber. *Procedia Engineering*, 14, 1621-1628.

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109-127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>

Wallace, J. W., & Moehle, J. P. (2023). *Ductility and Detailing Requirements of Reinforced Concrete Structural Walls*. Earthquake Engineering Research Institute.

Wallance, David. 2021. *The Future of Modular Architecture The Future of Modular Architecture*.

Wang, C., Senatore, G., & Teuffel, P. (2022). *Adaptive structures: Engineering applications*. Wiley.

Wang, L., et al. (2023). AI-Enhanced Fire Detection Systems. *Fire Safety Journal*.

Wang, X., Truijens, M., Hou, L., Wang, Y., & Zhou, Y. (2013). Integrating augmented reality with Building Information Modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry. *Automation in Construction*, 40, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.003>

Water Research Foundation. (2023). *Smart Water Management in Buildings*. Technical Report.

Weaver, J.C., et al. (2020). "Bio-Inspired Structural Design." *Advanced Materials*.

Winch, G. (2019). *Managing construction projects*. Wiley-Blackwell.

- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21-31.
- Xie, Y. M., et al. (2023). *AI-Optimized Structural Design*. Computational Engineering Press.
- Y. Pan and L. Zhang, "A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management," *Autom Constr*, vol. 124, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103564.
- Yamane, K., et al. (2023). *Advanced Earthing Materials*. IEEE Transactions on Power Delivery.
- Yuan, Feng, Runming Yao, Sasan Sadrizadeh, Baiyi Li, Guangyu Cao, Shaoxing Zhang, Shan Zhou, Hong Liu, Anna Bogdan, Cristiana Croitoru, Arsen Melikov, C. Alan Short, and Baizhan Li. 2022. "Thermal Comfort in Hospital Buildings – A Literature Review." *Journal of Building Engineering* 45.
- Z. Xu, M. Qi, Y. Wu, X. Hao, and Y. Yang, "City Information Modeling: State of the Art," *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 9333, vol. 11, no. 19, p. 9333, Oct. 2021, doi: 10.3390/APP11199333.
- Zhang, H., et al. (2023). *Pressure-Optimized Plumbing Design*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Zhang, L., & Mai, Y.-W. (2021). *Engineered cementitious composites (ECC): Bendable concrete for sustainable infrastructure*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5>
- Zhang, L., et al. (2023). *High-Entropy Alloys for Structural Applications*. Advanced Materials Press.
- Zhang, L., et al. (2023). *Next-Generation Air Filtration Technologies*. Building and Environment.
- Zhang, L., Liang, Y. C., & Niyato, D. (2021). 6G Visions: Mobile ultra-broadband, super internet-of-things, and artificial intelligence. *China Communications*, 16(8), 1-14.
- Zhang, S., et al. (2021). Green finance and sustainability: Evidence from the construction sector. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125725.
- Zhang, X., Skitmore, M., & Peng, Y. (2019). Exploring the Challenges to Industrialized Construction in China. *International Journal of Project Management*, 37(4), 578-592. **Referensi**

- Zhang, Y., et al. (2023). "Edge AI for Construction Equipment Optimization." *IEEE IoT Journal*.
- Zhang, Y., Luo, Y., & Liu, J. (2021). Advances in high-performance construction materials: A review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(4), 04021001.
- Zhao, J., et al. (2023). AI for Energy Optimization in Buildings. *Energy and AI Journal*.
- Zheng, L., et al. (2021). "Nano-Enhanced Smart Coatings." *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2019). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International Journal of Web and Grid Services*, 15(4), 352-375. <https://doi.org/10.1504/IJWGS.2019.10019305>
- Zhou, J., Zhou, Y., Wang, B., & Zang, J. (2020). Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. *Engineering*, 6(3), 247-251.
- Zhou, P., et al. (2023). *Cybersecurity in Building Automation*. Springer Cybersecurity Series.
- Zhou, Y., et al. (2023). *Corrosion Protection Systems for Prestressed Concrete*. Elsevier.
- Zhou, Z., Goh, Y. M., & Li, Q. (2015). Overview and analysis of safety management studies in the construction industry. *Safety Science*, 72, 337-350. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.10.006>
- Zhu, Y., et al. (2023). CFRP-Reinforced Connections in Moment Frames: Experimental and Numerical Studies. *Engineering Structures*.
- Zimina, D., et al. (2012). Target value design: Using collaboration and a lean approach to reduce construction cost. *Construction Management and Economics*, 30(5), 383-398.
- Zou, P. X. W., Xu, X., Jin, R., & Painting, N. (2017). Comparisons of initial construction and long-term renovation energy consumption between modular and traditional buildings. *Energy and Buildings*, 156, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.051>

Tentang Penulis

Prof. Dr.-Ing. L.M.F. Purwanto



Dosen Program Studi Doktor Arsitektur konsentrasi Arsitektur Digital, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang yang aktif menulis buku di dalam dan luar negeri. Penulisan jurnal di dalam dan luar negeri dilakukannya sebagai hasil dari penelitiannya terkait dengan bidang Arsitektur Digital, Fisika Bangunan, Struktur dan Konstruksi.

Ahmad Saifudin Mutaqi



Mahasiswa Program Studi Doktor Arsitektur konsentrasi Arsitektur Digital, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Angkatan III tahun 2022-2023, juga merupakan dosen Jurusan Arsitektur Universitas Islam Indonesia (UII) Yogyakarta. Aktif dalam organisasi profesi Ikatan Arsitek Indonesia sebagai pengurus (Provinsi DIY dan Nasional) dan penggiat Forum Kelompok Kerja Pengembangan Kawasan Permukiman (Pokja PKP Sleman DIY) dan mengelola Pusat Studi Real Estat Berkelanjutan.

Ridha Wahyutomo



Dokter Spesialis Mikrobiologi Klinik dengan spesialisasi di bidang pencegahan dan pengendalian infeksi, pengendalian resistensi antimikroba, dan arsitektur rumah sakit dengan konsentrasi tata udara dan desain ruang perawatan pasien. Saat ini menjadi Mahasiswa Program Studi Doktor Arsitektur konsentrasi Arsitektur Digital, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Angkatan III tahun 2022-2023.

Kristiana Bebhe



Sehari-hari sebagai Dosen dan Peneliti di Universitas Katolik Widya Mandira Kupang, Nusa Tenggara Timur. Memiliki keminatan pada kajian Bahan Bangunan sebagai obyek penelitiannya. Saat ini menjadi Mahasiswa Program Studi Doktor Arsitektur konsentrasi Arsitektur Digital, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Angkatan III tahun 2022-2023, yang meneliti tentang Batu Bata Tanah Putih dengan Campuran Sampah Plastik sebagai penelitian Disertasinya.

Ary Dwi Jatmiko



Sebagai Dosen Universitas Widya Kartika, yang saat ini sedang studi S3 di Program Studi Doktor Arsitektur konsentrasi Arsitektur Digital, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Angkatan III tahun 2022-2023, memiliki keminatan di bidang Green Building dan BIM. Aktif dalam seminar terkait dengan kedua bidang tersebut. Pada penelitian Disertasi juga mengarah pada penelitian Green Building.

Firmansyah Bachtiar



Saat ini sebagai Mahasiswa Program Studi Doktor Arsitektur konsentrasi Arsitektur Digital, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Angkatan III tahun 2022-2023. Aktifitas sehari-hari sebagai Dosen dan Peneliti di Universitas Tanri Abeng Jakarta. Sebagai seorang Arsitek memiliki minat dibidang Utilitas, terutama pada system transportasi vertical.

Yanuarius Benny Kristiawan



Mahasiswa Program Studi Doktor Arsitektur konsentrasi Arsitektur Digital, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Angkatan III tahun 2022-2023, Saat mengambil Sarjana juga ditempat yang sama yaitu Universitas Katolik Soegijapranata Semarang. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Atma Jaya Yogyakarta dan senang meneliti terkait denga Arsitektur Digital, terutama BIM. Saat ini penelitian Disertasi juga mengarah pada Arsitektur Digital yang dipraktekkan oleh para Arsitek di Yogyakarta, Jakarta dan Surabaya.



IKAPI
IKATAN PENERBIT INDONESIA