

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Industri Konstruksi

Industri konstruksi di Indonesia merupakan salah satu industri yang telah mengalami perkembangan pesat (Punuindoong et al., 2023) dalam beberapa dekade terakhir. Hal ini tercermin dalam pertumbuhan ekonomi yang signifikan, urbanisasi yang terus berlanjut, serta pembangunan infrastruktur yang masif di seluruh negeri. Dari proyek-proyek skala besar seperti pembangunan jalan tol, bandara, pelabuhan, hingga proyek properti perumahan dan komersial, industri konstruksi menjadi salah satu pendorong utama pertumbuhan ekonomi nasional.

Perkembangan ini juga didorong oleh berbagai faktor, termasuk kebijakan pemerintah yang mendukung investasi dalam infrastruktur, pertumbuhan populasi yang memicu permintaan akan hunian dan fasilitas publik, serta investasi swasta dalam sektor properti dan infrastruktur. Perubahan digital dalam industri konstruksi menjadi kunci utama untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi, sekaligus mengurangi kesalahan yang sering terjadi dalam pengelolaan proyek konvensional (Ganindyatama et al., 2023). Selain itu, kemajuan teknologi dan inovasi dalam konstruksi juga turut berperan dalam mempercepat proses pembangunan dan meningkatkan efisiensi dalam penggunaan sumber daya.

Meskipun demikian, industri konstruksi di Indonesia juga dihadapkan pada sejumlah tantangan, termasuk regulasi yang kompleks, infrastruktur yang belum memadai, keterbatasan keterampilan tenaga kerja, serta isu-isu lingkungan dan keberlanjutan yang semakin mendesak. Kontribusi sektor konstruksi terhadap penggunaan energi dan emisi CO² sangat signifikan, mencapai lebih dari 30% untuk konsumsi energi global dan sekitar seperempat dari total emisi karbon dunia, sehingga penting dilakukan transformasi ke arah yang lebih berkelanjutan (AlJaber et al., 2023). Untuk menjawab tantangan ini, diperlukan kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, akademisi, dan masyarakat untuk mengembangkan strategi yang berkelanjutan dan inklusif dalam pengembangan industri konstruksi yang lebih baik di masa depan.

Building Information Modeling (BIM) adalah salah satu teknologi di bidang AEC (*Arsitektur, Engineering dan Construction*) yang mampu mensimulasikan seluruh informasi di dalam proyek pembangunan ke dalam bentuk model 3D (Punuindoong et al., 2023)

2.2 Bangunan Gedung

Gedung secara umum dapat didefinisikan sebagai struktur bangunan yang dirancang untuk tujuan khusus, seperti tempat tinggal, komersial, pemerintahan, pendidikan, atau industri. Dalam konteks arsitektur dan konstruksi, gedung sering kali merujuk pada struktur bangunan berlantai dengan dinding, lantai, atap, dan pintu serta jendela yang membentuk ruang-ruang tertentu di dalamnya.

Secara lebih khusus, gedung bisa berarti bangunan yang digunakan untuk kegiatan kantor, perumahan, pusat perbelanjaan, rumah sakit, sekolah, universitas, pabrik, dan sebagainya. Gedung-gedung ini dapat memiliki berbagai bentuk, ukuran, dan desain sesuai dengan kebutuhan fungsional dan estetika yang diinginkan. Setiap perencanaan gedung perlu mengakomodasi aspek-aspek penting seperti distribusi cahaya alami, ventilasi, dan tata ruang yang optimal demi menunjang fungsi dan efisiensi bangunan (Ma et al., 2023).

Gedung juga bisa memiliki berbagai fitur tambahan, seperti lift, tangga, sistem penyediaan listrik dan air, ventilasi, perlengkapan keamanan, dan fasilitas kenyamanan lainnya, tergantung pada tujuan penggunaannya. Dalam pengembangan gedung, pertimbangan tentang peraturan bangunan, keamanan struktural, efisiensi energi, keberlanjutan, dan kenyamanan penghuni sering kali menjadi faktor penting yang harus diperhatikan. Bangunan modern menuntut pendekatan desain yang tidak hanya memenuhi fungsi dasar, namun juga harus mempertimbangkan efisiensi energi, kenyamanan penghuni, serta keberlanjutan lingkungan sebagai prioritas (Anderson & Moncaster, 2022).

Bangunan gedung merujuk pada struktur bangunan yang memiliki beberapa lantai atau tingkat yang dirancang untuk digunakan sebagai tempat tinggal, komersial, industri, atau tujuan lainnya. Bangunan gedung sering kali memiliki karakteristik tertentu yang membedakannya dari bangunan lainnya, seperti:

- a. *Multi-Lantai*: Bangunan gedung biasanya memiliki beberapa lantai atau tingkat, yang dapat diakses melalui tangga, lift, atau kombinasi dari keduanya. Lantai-lantai ini dapat digunakan untuk berbagai keperluan, seperti kantor, ruang komersial, atau tempat tinggal.
- b. *Struktur Yang Kompleks*: Bangunan gedung sering memiliki struktur yang kompleks untuk mendukung beban yang lebih berat dari beberapa lantai. Struktur ini sering kali melibatkan kolom, balok, dan dinding yang dirancang untuk memberikan kestabilan dan kekuatan yang diperlukan.
- c. *Fasilitas Umum*: Bangunan gedung sering dilengkapi dengan fasilitas umum seperti tangga darurat, lift, toilet umum, dan area parkir. Fasilitas ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan penghuni atau pengunjung bangunan dengan memberikan aksesibilitas dan kenyamanan.
- d. *Penggunaan Yang Beragam*: Bangunan gedung dapat digunakan untuk berbagai tujuan, termasuk kantor, pusat perbelanjaan, hotel, apartemen, pusat pendidikan, rumah sakit, dan masih banyak lagi. Desain dan fungsi bangunan ini biasanya disesuaikan dengan kebutuhan pengguna akhir.
- e. *Arsitektur Menonjol*: Bangunan gedung sering kali memiliki arsitektur yang menarik dan menonjol, baik dalam bentuk eksterior maupun interior. Desainnya bisa mencerminkan gaya arsitektur tertentu, trend modern, atau karakteristik khusus yang unik.

Selain itu, dalam pengembangan bangunan gedung, berbagai pertimbangan teknis seperti regulasi bangunan, tata letak ruang, keamanan struktural, efisiensi energi, dan kenyamanan pengguna sering kali menjadi fokus utama. Dengan demikian, bangunan gedung menjadi salah satu elemen penting dalam perkembangan perkotaan dan peradaban manusia, mencerminkan kemajuan teknologi, budaya, dan kebutuhan masyarakat modern.

2.3 Konsep Dasar BIM

Teknologi BIM akan menjadi perubahan besar dalam manajemen perusahaan konstruksi (Li, 2020). BIM merupakan suatu sistem yang menggunakan model 3D secara digital untuk merepresentasikan karakteristik fisik dan fungsional dari sebuah bagian bangunan. Konsep awal BIM muncul sebagai respons terhadap

kebutuhan akan pendekatan yang lebih terstruktur dan terintegrasi dalam industri konstruksi. Pada awalnya, BIM digunakan untuk memfasilitasi pembuatan model virtual yang akurat dari struktur bangunan, yang tidak hanya mencakup dimensi fisiknya tetapi juga informasi terkait seperti sifat material, fungsi, dan perilaku. Building Information Modeling (BIM) bukan sekadar alat visualisasi, namun telah berkembang menjadi sistem manajemen informasi proyek berbasis digital yang mencakup seluruh siklus hidup bangunan (Li, 2020).

Menggunakan teknologi digital canggih, BIM memungkinkan para profesional konstruksi untuk menghasilkan representasi yang lebih komprehensif dan terinci dari proyek bangunan, memungkinkan kolaborasi tim yang lebih baik dan pengambilan keputusan yang lebih tepat. Awalnya, fokus utama BIM adalah pada representasi visual dan dimensi fisik, dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam proses perencanaan, desain, dan konstruksi bangunan.

Konsep awal ini memberikan landasan bagi pengembangan lebih lanjut dari BIM sebagai alat yang lebih komprehensif dan berbasis data. Dengan waktu, BIM berkembang menjadi lebih dari sekadar model 3D (Celik et al., 2023), tetapi juga sebagai platform untuk mengintegrasikan informasi yang berkaitan dengan siklus hidup bangunan secara keseluruhan, mulai dari tahap perencanaan hingga pengelolaan fasilitas (Oreto et al., 2023). Ini memungkinkan para pemangku kepentingan untuk mengakses dan berbagi data yang konsisten dan terstruktur, serta memanfaatkannya untuk mengoptimalkan kinerja dan efisiensi bangunan selama seluruh siklus hidupnya. BIM menyediakan platform integratif yang menyatukan data geometrik dan non-geometrik proyek, sehingga mendukung kolaborasi antardisiplin sejak tahap perencanaan hingga operasional (Li, 2020).

BIM, atau Building Information Modeling, memiliki beberapa jenis yang dapat digunakan tergantung pada tahapan proyek dan kebutuhan spesifik. Berikut adalah beberapa jenis BIM yang umum digunakan:

- a. BIM Perancangan (*Design BIM*): BIM perancangan digunakan selama fase perencanaan dan desain proyek. Ini melibatkan pengembangan model 3D yang detail dari bangunan, yang memungkinkan para arsitek dan insinyur untuk memvisualisasikan dan merancang struktur bangunan dengan lebih baik. BIM

perancangan juga memungkinkan analisis awal terhadap kinerja bangunan, seperti analisis struktural dan analisis energi.

- b. BIM Konstruksi (*Construction BIM*): BIM konstruksi digunakan selama tahap konstruksi fisik proyek. Ini melibatkan penggunaan model 3D untuk mengkoordinasikan proses konstruksi, memvisualisasikan urutan kerja, dan mengidentifikasi konflik potensial di lapangan. BIM konstruksi juga dapat digunakan untuk menghasilkan gambar konstruksi, jadwal proyek, dan estimasi biaya yang lebih akurat.
- c. BIM Manajemen Fasilitas (*Facility Management BIM*): BIM manajemen fasilitas digunakan setelah selesainya konstruksi untuk mengelola dan memelihara bangunan selama siklus hidupnya. Ini melibatkan penggunaan model 3D yang telah ada untuk mengelola informasi terkait fasilitas, seperti pemeliharaan rutin, perbaikan, dan penjadwalan penggantian peralatan. BIM manajemen fasilitas juga dapat digunakan untuk mengintegrasikan data sensor dan informasi real-time untuk memantau dan mengelola kinerja bangunan.
- d. BIM Berkelanjutan (*Sustainable BIM*): BIM berkelanjutan digunakan untuk mempertimbangkan faktor-faktor keberlanjutan dalam perancangan dan konstruksi bangunan. Ini melibatkan analisis kinerja energi, penggunaan bahan ramah lingkungan, dan manajemen limbah untuk memastikan bahwa bangunan memenuhi standar keberlanjutan yang tinggi.
- e. BIM 7D (7D BIM): BIM 7D adalah evolusi dari BIM yang mencakup dimensi ketujuh, yaitu manajemen data proyek secara menyeluruh. Ini melibatkan penggunaan BIM untuk mengintegrasikan informasi keuangan, manajemen risiko, dan perencanaan proyek untuk memastikan keberhasilan proyek secara keseluruhan.

Setiap jenis BIM memiliki peran dan fungsi yang unik dalam siklus hidup proyek konstruksi, dan penggunaannya dapat membantu meningkatkan efisiensi, kualitas, dan keberlanjutan bangunan.

2.4 Penerapan BIM

2.4.1 Penerapan Teknologi BIM pada tahap desain

2.4.1.1 Metode Desain

BIM memberikan metode desain baru untuk visualisasi dalam keadaan 3D. Proses desain dan pemodelan di bawah teknologi BIM didasarkan pada keadaan 3D, yang berbeda dengan desain yang berbasis pada keadaan CAD 2D (Li, 2020). Dalam desain berbasis BIM, model 3D digunakan sebagai representasi digital yang komprehensif dari bangunan atau proyek konstruksi. Hal ini memungkinkan para profesional untuk melihat dan memanipulasi bangunan dalam dimensi tiga, sehingga memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antara berbagai elemen bangunan dan bagaimana mereka berinteraksi satu sama lain. Berbeda dengan pendekatan konvensional berbasis CAD 2D, metode desain dengan BIM memungkinkan representasi visual tiga dimensi yang lebih realistis dan mendalam, sehingga mempermudah pemahaman terhadap hubungan antar elemen bangunan (Liang, et al.,2022).

Dibandingkan dengan desain berbasis CAD 2D yang hanya memberikan pandangan datar dari bangunan, desain BIM memungkinkan visualisasi yang lebih realistis dan intuitif. Dengan melihat bangunan dalam keadaan 3D, para pemangku kepentingan dapat dengan mudah memahami kompleksitas desain, mengidentifikasi masalah potensial, dan membuat perubahan dengan lebih cepat dan efisien. Selain itu, model 3D dalam BIM juga memungkinkan untuk melakukan simulasi dan analisis yang lebih mendalam tentang kinerja bangunan (Primasetra & Larasati, 2022), seperti analisis struktural, analisis energi, dan analisis keberlanjutan. Dengan model 3D sebagai dasar perancangan, metode BIM memungkinkan simulasi visual dan teknis yang memberikan gambaran menyeluruh terhadap desain, termasuk dalam hal struktur, energi, dan keberlanjutan (Li, 2020). BIM tidak hanya memberikan cara baru untuk merancang dan memvisualisasikan bangunan, tetapi juga mengubah cara kita berinteraksi dengan desain dan memahami implikasinya secara lebih menyeluruh. Ini membantu meningkatkan kualitas, efisiensi, dan keberlanjutan proyek konstruksi secara keseluruhan. Penerapan BIM dalam tahap desain tidak hanya memfasilitasi visualisasi proyek,

tetapi juga meningkatkan interaktivitas dalam pengambilan keputusan antara para pemangku kepentingan (Primasetra & Larasati, 2022).

2.4.1.2 Optimalisasi Desain pada Fase Desain

Optimalisasi ekonomi dan teknologi program yang mudah dan cepat selama fase desain: Dirancang dengan teknologi BIM, setelah desain profesional selesai, data dasar dari setiap komponen proyek ditetapkan. Ketika perangkat lunak penghitungan kuantitas teknik khusus diperkenalkan, anggaran proyek dan indikator ekonomi dari bangunan yang diusulkan dapat dianalisis, dan desain optimalisasi ekonomi bangunan dapat segera dilakukan untuk mewujudkan rasionalitas pemilihan proyek. Selain itu, optimalisasi desain dengan BIM tidak hanya menasar efisiensi teknis, tetapi juga mengarahkan profesional untuk mempertimbangkan dampak ekonomi dari tiap keputusan desain secara langsung (Li, 2020).

Menggunakan BIM, data yang terkumpul selama proses desain dapat dimanfaatkan dengan lebih efisien untuk mengoptimalkan aspek ekonomi dari proyek. Perangkat lunak khusus yang terintegrasi dengan BIM memungkinkan para profesional untuk melakukan analisis kuantitatif yang mendalam terhadap berbagai komponen proyek, seperti material, tenaga kerja, dan peralatan. Model BIM mempermudah penghitungan kuantitatif material dan tenaga kerja, sehingga memungkinkan perbandingan berbagai opsi desain yang berdampak pada biaya proyek (Zhu, 2020). Dengan demikian, mereka dapat mengevaluasi anggaran proyek secara lebih akurat dan memahami dampak keputusan desain terhadap biaya secara lebih langsung.

Selain itu, dengan kemampuan BIM untuk menyajikan data dalam format yang terstruktur dan terpadu, para profesional dapat dengan cepat menganalisis berbagai skenario desain dan melakukan optimasi ekonomi bangunan dengan lebih efisien. Ini memungkinkan mereka untuk membuat keputusan yang lebih tepat dalam memilih material, metode konstruksi, dan strategi desain lainnya yang mempengaruhi biaya proyek secara keseluruhan. Dengan BIM, evaluasi terhadap strategi desain dilakukan secara real-time menggunakan data yang terstruktur,

memungkinkan tercapainya efisiensi biaya dan pemilihan desain yang paling optimal (Li, 2020).

Penggunaan BIM dalam fase desain memungkinkan para profesional untuk meningkatkan efisiensi dan rasionalitas dalam pemilihan proyek, serta memastikan bahwa keputusan desain yang diambil memiliki dampak positif terhadap anggaran dan kinerja ekonomi proyek secara keseluruhan.

2.4.2 Penerapan BIM Pada Seluruh Proses Manajemen Biaya

2.4.2.1 BIM pada estimasi biaya investasi dan perbandingan penerapan teknologi

Teknologi BIM dalam estimasi biaya investasi dan perbandingan program memiliki kemampuan yang sangat menguntungkan. Penerapan teknologi BIM kondusif untuk akumulasi data historis, dan berdasarkan data ini untuk mengekstraksi indikator biaya. Dengan cara ini, proyek dapat dengan cepat dipandu untuk memperkirakan harga dan membuat pilihan terbaik (Li, 2020). Selain itu, teknologi BIM memungkinkan integrasi yang lebih baik antara estimasi biaya dengan model 3D yang terperinci, memungkinkan para profesional konstruksi untuk secara visual melihat bagaimana keputusan desain dapat mempengaruhi biaya proyek secara keseluruhan. Visualisasi 3D yang terintegrasi dalam BIM memungkinkan estimasi biaya dilakukan secara komprehensif, sekaligus mempercepat proses pengambilan keputusan terhadap pengendalian anggaran (Primasetra & Larasati, 2022). Dengan memiliki akses terhadap data historis dan penggunaan model 3D yang terintegrasi, tim proyek dapat secara lebih efisien menilai dampak keputusan desain terhadap biaya, serta mengidentifikasi area-area yang memungkinkan untuk penghematan atau optimisasi biaya selama siklus proyek. Teknologi BIM memiliki keunggulan dalam integrasi antara estimasi biaya dan model visual proyek, yang membantu tim konstruksi memahami implikasi anggaran dari tiap perubahan desain secara lebih akurat (Li, 2020). Hal ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih informasional dan tepat waktu, membantu proyek untuk tetap berada dalam batas anggaran yang telah ditetapkan sambil mempertahankan kualitas dan keberlanjutan yang diinginkan. Dengan mengandalkan akumulasi data historis yang terkandung dalam sistem BIM,

profesional dapat mengekstrak indikator biaya sebagai dasar estimasi yang lebih informatif dan andal (Li, 2020).

2.4.2.2 Penerapan Teknologi BIM pada tahap desain anggaran

Tahap desain merupakan kunci pengendalian biaya. Sangat sulit untuk melakukan perancangan kuota dengan cara penghitungan dan penetapan harga manual tradisional. Menggunakan teknologi BIM, model BIM mengintegrasikan model 3D, kuantitas teknik, biaya, harga, dan informasi teknik lainnya serta informasi bisnis, yang secara efektif menyelesaikan desain perhitungan anggaran desain (Li, 2020). Dengan pendekatan ini, para profesional konstruksi dapat memiliki visibilitas yang lebih baik terhadap implikasi biaya dari setiap keputusan desain yang mereka buat. Mereka dapat dengan cepat mengevaluasi berbagai opsi desain dan melihat bagaimana perubahan dalam desain dapat mempengaruhi biaya proyek secara keseluruhan.

Hal ini memungkinkan mereka untuk mengambil keputusan yang lebih terinformasi, mengidentifikasi potensi overspending atau kesenjangan biaya, dan secara proaktif mengatasi masalah tersebut sebelum mereka menjadi masalah yang lebih serius dalam pelaksanaan proyek. Pendekatan anggaran berbasis BIM mendorong profesional untuk tidak hanya memperkirakan biaya secara numerik, tetapi juga menilai risiko, efisiensi, dan manfaat jangka panjang dari desain proyek (Primasetra & Larasati, 2022). Dengan demikian, teknologi BIM membantu meningkatkan akurasi estimasi biaya dan mengoptimalkan pengelolaan biaya sepanjang siklus proyek konstruksi.

2.5 Integrasi BIM Dengan Siklus Hidup Bangunan

BIM (Building Information Modeling) tidak hanya menjadi alat untuk digunakan dalam satu tahap atau aspek konstruksi, tetapi juga dapat diintegrasikan secara menyeluruh ke dalam seluruh siklus hidup bangunan. Mulai dari fase desain hingga pasca konstruksi (Primasetra & Larasati, 2022). BIM menyediakan kerangka kerja yang komprehensif untuk mengelola informasi bangunan yang terus berkembang.

BIM memberikan kontribusi besar dalam estimasi biaya proyek melalui model 3D yang dapat memproyeksikan pengaruh desain terhadap anggaran secara

langsung dan terukur (Li, 2020). Dalam proses desain, BIM memungkinkan para arsitek dan insinyur untuk membuat model digital yang sangat rinci dari bangunan, termasuk semua aspek dari struktur fisik hingga sistem mekanikal dan elektrikal. Model ini tidak hanya memberikan visualisasi yang jelas dari desain, tetapi juga memungkinkan untuk analisis yang mendalam tentang kinerja bangunan dalam berbagai kondisi. Sebagai contoh, BIM dapat digunakan untuk menguji efisiensi energi, daya tahan struktural, atau faktor kenyamanan dalam ruangan.

Selama fase konstruksi, BIM berfungsi sebagai pusat kolaborasi di mana semua pihak terlibat dalam proyek dapat berinteraksi dan berbagi informasi secara real-time. Kontraktor, subkontraktor, dan pemilik proyek dapat mengakses model digital untuk merencanakan jadwal konstruksi, mengoordinasikan pekerjaan, dan memantau kemajuan proyek. Selain itu, BIM juga memungkinkan untuk deteksi benturan atau konflik potensial di awal proyek, sehingga meminimalkan perubahan dan penundaan selama konstruksi.

Setelah bangunan selesai dibangun, BIM masih memberikan nilai dengan menyediakan platform untuk manajemen bangunan yang efisien. Model digital yang terus diperbarui dapat digunakan untuk memantau dan mengelola aset bangunan, termasuk pemeliharaan rutin, perbaikan, dan pembaruan. Informasi yang tersedia dalam model BIM dapat membantu dalam pengambilan keputusan terkait dengan investasi jangka panjang dalam bangunan, serta meningkatkan efisiensi operasional dan penggunaan sumber daya.

Integrasi BIM ke dalam seluruh siklus hidup bangunan tidak hanya meningkatkan efisiensi dalam setiap tahapan, tetapi juga memungkinkan pemantauan dan pengelolaan yang lebih baik dari aset bangunan sepanjang masa pakainya. BIM bukan hanya alat untuk merancang dan membangun bangunan, tetapi juga merupakan fondasi untuk pengelolaan yang berkelanjutan dan berdaya guna dari bangunan tersebut.

Integrasi antara BIM (Building Information Modeling) dan siklus hidup bangunan merupakan pendekatan yang menyeluruh dalam manajemen proyek konstruksi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, dan nilai tambah dari suatu proyek. Model informasi bangunan yang terintegrasi dalam BIM

memungkinkan perhitungan volume material dan estimasi biaya dilakukan lebih akurat dan transparan (Zhu, 2020). Dalam konteks ini, BIM tidak hanya dianggap sebagai alat desain atau konstruksi semata, tetapi juga sebagai platform yang mengelola informasi bangunan sepanjang siklus hidupnya, mulai dari tahap perencanaan hingga pembongkaran.

Pada tahap perencanaan, BIM memungkinkan para profesional untuk membuat model digital yang sangat rinci dari bangunan, termasuk aspek-aspek seperti tata letak fisik, struktural, mekanikal, dan elektrikal. Model ini membantu dalam visualisasi desain, analisis kinerja, dan pengambilan keputusan yang lebih baik. Selama tahap konstruksi, BIM digunakan sebagai platform kolaborasi di mana semua pihak terlibat dapat berinteraksi secara real-time, memfasilitasi pengelolaan proyek yang lebih efisien dan koordinasi antar tim.

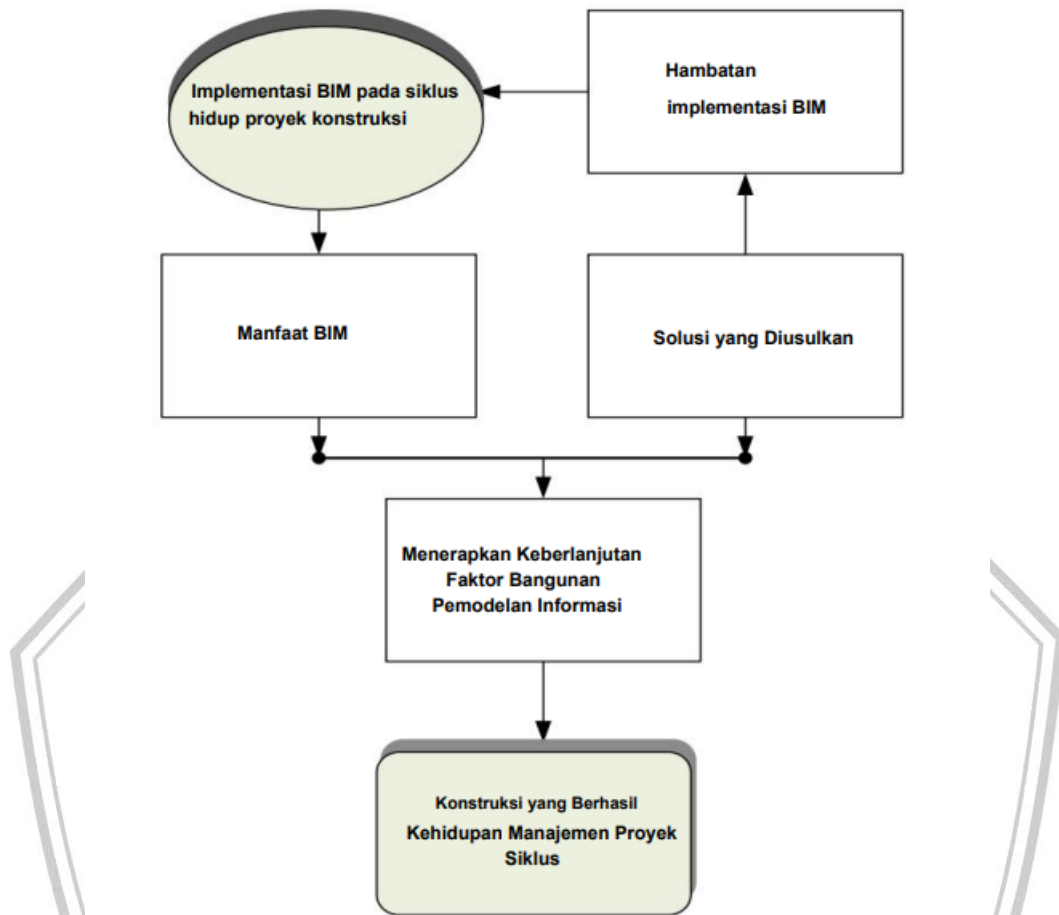
Setelah bangunan selesai dibangun, BIM masih memberikan manfaat dengan menyediakan platform untuk manajemen bangunan yang efisien. Model digital yang terus diperbarui membantu dalam pemantauan kinerja bangunan seiring waktu, identifikasi masalah potensial, dan perencanaan pemeliharaan yang tepat waktu. Selain itu, integrasi BIM dan siklus hidup bangunan juga memungkinkan untuk analisis kinerja yang terintegrasi, pengelolaan aset yang lebih efisien, optimasi proses pembongkaran, dan peningkatan transparansi serta akuntabilitas dalam proyek konstruksi.

Secara keseluruhan, integrasi antara BIM dan siklus hidup bangunan membawa dampak yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi operasional, keberlanjutan lingkungan, dan nilai tambah dari bangunan selama masa pakainya. Ini mengubah cara bangunan dirancang, dibangun, dan dikelola, membawa manfaat yang besar bagi pemilik bangunan, pemangku kepentingan, dan masyarakat secara keseluruhan.

Integrasi antara BIM (Building Information Modeling) dan siklus hidup bangunan (life cycle) memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, dan nilai tambah dari suatu proyek konstruksi. Berikut adalah beberapa cara integrasi BIM dan siklus hidup bangunan memberikan manfaat:

1. Perencanaan yang Lebih Baik: Dalam tahap perencanaan proyek, BIM memungkinkan para profesional untuk membuat model digital yang sangat rinci dari bangunan, termasuk semua komponen dan fitur yang akan ada. Model ini tidak hanya membantu dalam visualisasi desain, tetapi juga memungkinkan analisis yang mendalam tentang kinerja bangunan selama siklus hidupnya. Ini memungkinkan pemangku kepentingan untuk membuat keputusan yang lebih baik sejak awal, yang dapat menghasilkan bangunan yang lebih efisien dan berkelanjutan.
2. Konstruksi yang Lebih Efisien: Selama tahap konstruksi, BIM digunakan sebagai platform kolaborasi di mana semua pihak terlibat dapat berinteraksi dan berbagi informasi secara real-time. Ini membantu dalam mengoordinasikan pekerjaan, mengidentifikasi konflik atau benturan potensial, dan mengelola sumber daya dengan lebih efisien. Dengan menggunakan BIM selama konstruksi, proyek dapat diselesaikan dengan lebih cepat dan dengan biaya yang lebih rendah.
3. Pemeliharaan yang Lebih Efektif: Setelah bangunan selesai dibangun, BIM masih memberikan nilai dengan menyediakan platform untuk manajemen bangunan yang efisien. Model digital yang terus diperbarui dapat digunakan untuk memantau kinerja bangunan seiring waktu, mengidentifikasi masalah potensial, dan merencanakan pemeliharaan atau perbaikan yang diperlukan. Dengan memanfaatkan BIM untuk pemeliharaan, bangunan dapat tetap beroperasi dengan efisien dan mempertahankan nilai investasinya selama masa pakainya.
4. Analisis Kinerja Selama Siklus Hidup: Integrasi BIM dan siklus hidup bangunan memungkinkan untuk melakukan analisis kinerja yang terintegrasi dari bangunan selama masa pakainya. Ini termasuk analisis energi, analisis biaya sepanjang masa pakai, dan evaluasi dampak lingkungan. Dengan menggunakan BIM untuk analisis kinerja, pemangku kepentingan dapat mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi jejak lingkungan dari bangunan.

Penerapan BIM dan dampaknya terhadap keberhasilan siklus hidup proyek konstruksi melibatkan persepsi terhadap faktor keberlanjutan penerapan BIM dan dampaknya terhadap keberhasilan penerapan BIM. Sebagian besar dampak terhadap keberhasilan proyek konstruksi terjadi karena BIM memungkinkan integrasi yang lebih baik antara berbagai aspek proyek, mulai dari desain hingga konstruksi dan operasi. Dengan menggunakan BIM, para profesional dapat mengakses informasi yang terpusat dan terintegrasi tentang proyek, memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan tepat. Hal ini juga dapat memperbaiki koordinasi antara berbagai tim proyek, mengurangi potensi kesalahan dan konflik, dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Selain itu, BIM juga memungkinkan simulasi dan analisis yang lebih baik, memungkinkan untuk identifikasi potensi masalah atau tantangan yang mungkin muncul sebelum mereka menjadi masalah yang serius dalam pelaksanaan proyek. Dengan cara ini, penerapan BIM dapat mengurangi risiko, meningkatkan kualitas, dan mengoptimalkan kinerja proyek konstruksi selama siklus hidupnya.



Gambar 2. 1 Kerangka konseptual BIM

2.6 Emisi Karbon

Energi yang terkandung dalam material konstruksi dan proses konstruksi sendiri merupakan faktor penting dalam perhitungan emisi karbon di sektor konstruksi (Ayman Mohamed et al., 2023). Ketika material bangunan diproduksi, diangkut, dipasang, dan dibongkar, energi digunakan dalam berbagai bentuk, termasuk energi listrik, bahan bakar fosil, dan energi lainnya. Proses-proses ini menghasilkan emisi karbon dan gas rumah kaca lainnya, yang berkontribusi pada pemanasan global dan perubahan iklim.

Penghitungan emisi karbon dalam konstruksi melibatkan evaluasi semua aspek siklus hidup material dan bangunan tersebut, mulai dari ekstraksi bahan baku

hingga pembuangan akhir. Ini termasuk emisi yang dihasilkan selama produksi material, transportasi material ke lokasi proyek, penggunaan alat dan mesin konstruksi, energi yang digunakan dalam proses pembangunan, serta akhirnya pembongkaran atau penghancuran bangunan. Semua tahapan ini memerlukan penggunaan energi, yang seringkali berasal dari sumber-sumber non-terbarukan seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam.

Ketika energi fosil terbakar untuk menggerakkan mesin atau memanaskan kiln dalam pembuatan material, karbon dioksida (CO₂) dilepaskan ke atmosfer. Begitu pula ketika kendaraan transportasi menggunakan bahan bakar fosil untuk mengirimkan material ke lokasi proyek. Selain itu, material konstruksi tertentu, seperti beton dan baja, memerlukan energi yang besar dalam proses produksinya, yang menyebabkan emisi karbon yang signifikan.

Pemanasan global merupakan dampak langsung dari peningkatan emisi karbon dioksida dan gas rumah kaca lainnya ke atmosfer. Kontribusi dari sektor konstruksi terhadap emisi karbon menjadi semakin dipertimbangkan, dan penggunaan BIM dalam proses desain dan konstruksi dapat membantu dalam mengurangi jejak karbon bangunan. Dengan memanfaatkan BIM untuk mengoptimalkan desain bangunan, memilih material yang lebih ramah lingkungan, dan meningkatkan efisiensi konstruksi, kita dapat mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon yang terkait dengan proyek konstruksi. Dengan demikian, BIM dapat berperan dalam membantu meminimalkan dampak sektor konstruksi terhadap perubahan iklim global.

Integrasi antara BIM dan seluruh siklus hidup bangunan memungkinkan efisiensi dalam pengambilan keputusan dari perencanaan awal hingga pembongkaran akhir (Primasetra & Larasati, 2022). Selain itu, penggunaan BIM juga memungkinkan para profesional konstruksi untuk melakukan simulasi energi yang lebih akurat dan terperinci. Dengan memasukkan informasi tentang material, sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), pencahayaan, dan lainnya ke dalam model BIM, dapat dilakukan analisis energi yang mendalam untuk mengevaluasi kinerja bangunan dalam hal efisiensi energi. Hasil analisis ini memungkinkan untuk identifikasi potensi penghematan energi dan pengurangan

emisi karbon, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih berdasarkan data untuk meningkatkan keberlanjutan bangunan. Aktivitas konstruksi memberikan kontribusi besar terhadap emisi karbon, terutama dari konsumsi energi dalam produksi dan transportasi material bangunan (Ayman Mohamed et al., 2023). Dengan demikian, BIM tidak hanya membantu dalam desain dan konstruksi, tetapi juga dalam upaya mengurangi dampak lingkungan dari bangunan selama masa pakainya.

Pemanfaatan model digital dari BIM tidak hanya mendukung fase konstruksi, tetapi juga memainkan peran penting dalam pengelolaan aset dan perawatan bangunan secara berkelanjutan (Liang et al., 2023). Selain itu, BIM juga dapat digunakan untuk melakukan analisis berbagai skenario desain dalam konteks keberlanjutan, termasuk penggunaan bahan ramah lingkungan, pemanfaatan sumber energi terbarukan, dan strategi desain lainnya yang dapat meningkatkan performa lingkungan bangunan. Melalui simulasi dan analisis yang terintegrasi dalam BIM, para profesional dapat mengeksplorasi berbagai opsi desain dan memilih solusi yang paling efektif dari segi keberlanjutan.

Penerapan BIM dalam analisis energi juga memungkinkan untuk melakukan evaluasi terhadap strategi efisiensi energi yang telah diimplementasikan dalam desain. Dengan membandingkan hasil simulasi dengan target kinerja energi yang diinginkan atau standar keberlanjutan yang berlaku, para profesional dapat menentukan apakah desain memenuhi persyaratan yang ditetapkan dan mengidentifikasi area-area di mana perbaikan mungkin diperlukan.

Penerapan teknologi seperti BIM dapat membantu menekan emisi karbon melalui pilihan desain yang lebih efisien energi dan penggunaan material ramah lingkungan (Celik et al., 2023).

BIM bukan hanya menjadi alat untuk memvisualisasikan dan mengelola proyek konstruksi, tetapi juga merupakan sarana yang kuat untuk mempromosikan praktik desain dan konstruksi yang berkelanjutan. Dengan menggunakan informasi yang terkandung dalam model BIM, para profesional dapat membuat keputusan yang lebih baik yang mengintegrasikan pertimbangan lingkungan, ekonomi, dan sosial dalam proses perancangan dan konstruksi bangunan. Ini memungkinkan

untuk pencapaian bangunan yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dalam jangka panjang. Dengan terus diperbarui sepanjang masa pakainya, model BIM memberikan visibilitas penuh atas performa bangunan, memungkinkan evaluasi dan pemeliharaan yang lebih tepat sasaran (Ma, 2023).

2.7 Circular Economy (CE)

Circular economy (CE) merupakan sebuah paradigma ekonomi yang tidak hanya mempertimbangkan keberlanjutan sumber daya, tetapi juga meredefinisikan ulang cara kita memandang proses produksi, distribusi, dan konsumsi (Rigamonti & Mancini, 2021). Lebih dari sekadar mengurangi limbah, CE mewakili transformasi mendasar dalam pola pikir kita tentang bagaimana ekonomi harus beroperasi di dalam sistem yang memiliki keterbatasan sumber daya alam. Ekonomi sirkular mengedepankan prinsip meminimalkan limbah dan memperpanjang umur guna material melalui daur ulang dan pemanfaatan ulang (Rigamonti & Mancini, 2021).

Dalam konsep ini, CE berupaya untuk menciptakan lingkaran tertutup di mana produk, bahan, dan sumber daya dapat berputar melalui siklus hidup yang berkelanjutan. Dalam praktiknya, ekonomi sirkular melibatkan kolaborasi lintas sektor untuk mengelola sumber daya secara bijak dan menciptakan sistem produksi yang lebih regeneratif (AlJaber et al., 2023). Hal ini dilakukan dengan meminimalkan pembuangan limbah, menggunakan kembali material, mendaur ulang produk yang sudah tidak terpakai, dan memulihkan sumber daya alam yang digunakan dalam proses produksi (AlJaber et al., 2023).

Sebagai sistem ekonomi alternatif, CE menantang prinsip ekonomi linear tradisional yang menganggap sumber daya sebagai sesuatu yang dapat digunakan tanpa batas dan limbah sebagai hasil akhir yang tidak dapat dihindari. Sebaliknya, CE memandang sumber daya alam sebagai aset yang berharga yang harus dikelola dengan bijaksana, dan limbah sebagai peluang untuk diubah menjadi sumber daya yang bernilai.

Dalam praktiknya, CE melibatkan desain produk yang lebih ramah lingkungan, proses produksi yang lebih efisien, pemanfaatan teknologi untuk melacak dan mengelola aliran material, serta pendidikan dan kesadaran konsumen tentang

dampak lingkungan dari pola konsumsi mereka. Ini melibatkan kerja sama antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, industri, akademisi, dan masyarakat umum, untuk menciptakan infrastruktur, kebijakan, dan budaya yang mendukung peralihan menuju CE.

Membangun sistem ekonomi yang berkelanjutan dan berpusat pada pemulihan sumber daya, CE menawarkan harapan untuk mengatasi tantangan lingkungan global seperti perubahan iklim, kerusakan lingkungan, dan degradasi sumber daya alam. Ini juga memiliki potensi untuk menciptakan peluang baru untuk pertumbuhan ekonomi yang inklusif dan berkelanjutan, yang memungkinkan bagi masyarakat untuk menikmati kehidupan yang lebih baik tanpa mengorbankan kesejahteraan generasi mendatang. Konsep circular economy tidak hanya memperbaiki efisiensi material, tetapi juga mendorong terciptanya inovasi dalam pengelolaan produk dan kebijakan keberlanjutan (Primasetra & Larasati, 2022). Dengan demikian, CE bukan hanya sebuah konsep, tetapi juga sebuah visi yang menginspirasi untuk membangun masa depan yang lebih berkelanjutan dan adil bagi semua.

2.8 Definisi Embodied Energy (EE)

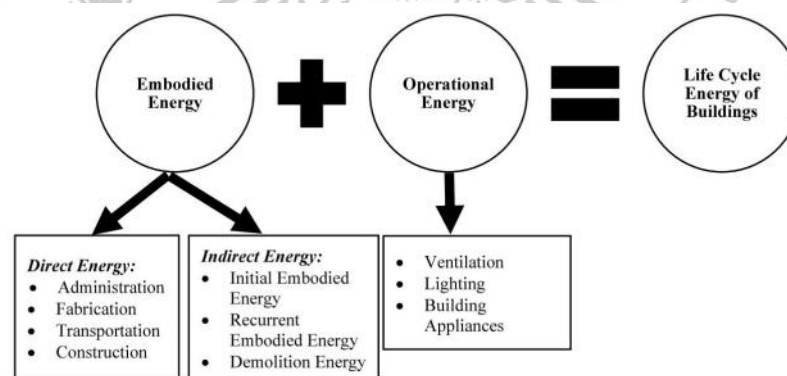
Embodied Energy pada bangunan adalah konsep yang mengacu pada total energi yang digunakan untuk memproduksi, mengolah, dan mengirimkan bahan bangunan (Primasetra & Larasati, 2022) dari tahap awal hingga menjadi bagian integral dari struktur bangunan. Ini mencakup semua tahapan dalam siklus hidup material, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga penggunaan akhir di lokasi konstruksi. Proses ekstraksi dan pengolahan bahan mentah, produksi material konstruksi, transportasi dari pabrik ke lokasi proyek, serta proses instalasi semuanya memerlukan energi dalam berbagai bentuk.

Embodied energy mencerminkan seluruh energi yang terkandung dalam material bangunan, mulai dari proses ekstraksi bahan mentah hingga pemasangan di lokasi proyek (G. P. Hammond & Jones, 2008). Proses produksi bahan bangunan membutuhkan energi dalam berbagai bentuk. Misalnya, untuk memproduksi beton, dibutuhkan energi untuk menggiling, mencampur, dan mengangkut bahan mentahnya. Demikian pula, pembuatan baja melibatkan proses yang memerlukan

pemrosesan tinggi dan konsumsi energi yang signifikan. Selain itu, energi juga digunakan dalam tahap pengolahan, manufaktur, dan transportasi material dari pabrik ke lokasi proyek.

Embodied Energy tidak hanya mencakup energi langsung yang digunakan dalam proses produksi, tetapi juga energi tak langsung yang dibutuhkan untuk mendukung operasi pabrik dan transportasi. Ini termasuk energi yang digunakan untuk memproduksi mesin dan peralatan, serta energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan kendaraan yang digunakan untuk mengirimkan material.

Penilaian terhadap nilai EE sangat penting dalam menilai efisiensi energi total bangunan dan menentukan pilihan material yang lebih berkelanjutan (Agustiningtyas et al., 2023). Pemahaman tentang *Embodied Energy* penting karena konstruksi dan penggunaan bangunan merupakan salah satu penyebab utama emisi karbon dan dampak lingkungan global. Dengan mengetahui jumlah energi yang diperlukan untuk memproduksi material bangunan, kita dapat mengevaluasi opsi material yang berbeda dari perspektif keberlanjutan. Hal ini memungkinkan kita untuk membuat pilihan yang lebih bijaksana dalam desain dan konstruksi bangunan, dengan memperhitungkan aspek-aspek keberlanjutan seperti efisiensi energi, penggunaan sumber daya alam, dan emisi karbon.



Gambar 2. 2 Konsumsi energi bangunan sepanjang periode siklus hidupnya.

Memperhitungkan *embodied energy* dalam proses pengambilan keputusan, kita dapat mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi dan membangun bangunan yang lebih berkelanjutan secara keseluruhan. Sebagai hasilnya, pengetahuan tentang *embodied energy* menjadi kunci dalam upaya kita untuk

mencapai tujuan pembangunan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Material non-struktural terbukti menyumbang porsi terbesar dari total *embodied energy* bangunan, sehingga pemilihan bahan dalam kategori ini perlu mendapat perhatian khusus (Primasetra & Larasati, 2022).

Perhitungan energi yang terkandung dalam BIM sering kali merupakan bagian dari metode analisis yang disebut Analisis Siklus Hidup (Life Cycle Assessment/LCA) (Gunawan, 2020). LCA adalah suatu pendekatan sistematis untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau sistem dari "lendutan ke kubur", yaitu dari tahap awal produksi bahan baku hingga tahap pemakaian, perawatan, dan pembuangan. Dalam konteks BIM, LCA diterapkan untuk mengukur dan mengevaluasi dampak energi dari sebuah bangunan atau proyek konstruksi selama siklus hidupnya.

Dasar perhitungan energi yang terkandung dalam BIM sering kali melibatkan penggunaan model satuan material tunggal yang memerlukan kesamaan satuan perhitungan sesuai dengan satuan Energy Embodied (EE) yang biasanya diukur dalam satuan energi per massa (misalnya megajoule per kilogram, MJ/kg). Dalam model ini, setiap material atau komponen yang digunakan dalam konstruksi bangunan memiliki nilai EE yang mewakili jumlah energi yang diperlukan untuk memproduksi, mengangkut, dan menginstal material tersebut.

Untuk menghitung total energi yang terkandung dalam bangunan, nilai EE dari semua material dan komponen yang digunakan akan dijumlahkan berdasarkan jumlah dan jenisnya. Ini memungkinkan para profesional konstruksi untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang seberapa banyak energi yang diperlukan untuk membangun bangunan tersebut, serta untuk membandingkan opsi desain dan bahan yang berbeda dalam hal efisiensi energi.

Menggunakan model satuan material tunggal dan mengintegrasikannya ke dalam model BIM, para profesional dapat secara efisien melakukan analisis energi dan LCA, memperhitungkan berbagai faktor seperti jenis material, proses produksi, jarak pengiriman, dan lainnya. Ini membantu dalam mengoptimalkan desain bangunan untuk meminimalkan dampak lingkungan sepanjang siklus hidupnya,

sambil tetap mempertimbangkan aspek-aspek keuangan dan fungsional bangunan. Perhitungan nilai EE didapat dari perhitungan dengan rumus dibawah ini:

$$EE (MJ) = \text{Volume Bahan (m}^3\text{)} \times \text{Satuan Berat Bahan (Kg/M}^3\text{)} \times \text{EE Coef.}$$

2.9 Definisi Life Cycle Assessment (LCA)

LCA adalah metodologi yang dikembangkan untuk menilai dan mengukur potensi dampak lingkungan yang terkait dengan keseluruhan siklus hidup produk, mulai dari ekstraksi bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, hingga pembuangan akhir. Life Cycle Assessment merupakan alat penting untuk menilai dampak lingkungan suatu produk dari tahap produksi awal hingga akhir daur hidupnya (Oreto et al., 2023). Metode ini memungkinkan para peneliti dan praktisi untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi dampak lingkungan dari berbagai aspek kegiatan manusia terhadap lingkungan, termasuk penggunaan sumber daya alam, emisi gas rumah kaca, polusi air dan udara, serta kerusakan habitat dan biodiversitas (Oreto et al., 2023).

Dalam konteks circular economy (CE), LCA menjadi alat penting dalam mendukung peralihan ke sistem ekonomi yang lebih berkelanjutan. Dengan melakukan analisis terperinci terhadap jejak lingkungan dari produk-produk dan sistem-sistem yang digunakan dalam ekonomi, LCA dapat membantu dalam mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi emisi, dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

LCA yang terintegrasi dengan BIM memberikan pendekatan yang lebih realistis dalam mengidentifikasi dampak energi dan lingkungan dari sebuah bangunan (Ma et al., 2024). Selain itu, LCA juga memungkinkan perbandingan antara produk-produk alternatif dan solusi-solusi berbeda untuk memastikan bahwa keputusan yang diambil berdasarkan informasi yang akurat dan holistik. Dengan mempertimbangkan keseluruhan siklus hidup produk, dari produksi hingga pembuangan, LCA membantu menghindari "penyelesaian yang berpindah" di mana pemecahan satu masalah menghasilkan dampak negatif yang tidak diinginkan pada aspek lain dari lingkungan.

LCA bukan hanya merupakan alat evaluasi, tetapi juga merupakan pendekatan sistematis untuk pengambilan keputusan yang berbasis bukti dalam mendukung transisi menuju circular economy yang berkelanjutan. Melalui penggunaan LCA, kita dapat lebih memahami konsekuensi dari pilihan ekonomi kita dan bergerak menuju sistem yang lebih seimbang antara kebutuhan manusia dan kelestarian lingkungan.

LCA juga memungkinkan untuk mengidentifikasi titik-titik lemah dalam siklus hidup produk dan menyoroti area-area di mana perbaikan atau inovasi diperlukan untuk mengurangi dampak lingkungan. Misalnya, analisis LCA dapat mengungkapkan bahwa sebagian besar jejak karbon suatu produk terjadi selama tahap produksi bahan bakunya. Dengan mengetahui ini, produsen dapat memprioritaskan upaya untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca selama proses produksi.

Selain memberikan wawasan tentang dampak lingkungan, LCA juga dapat mempertimbangkan aspek-aspek sosial dan ekonomi dari suatu produk atau sistem. Ini termasuk evaluasi terhadap kondisi kerja di pabrik, dampak ekonomi lokal dari produksi, dan kesejahteraan masyarakat yang terlibat dalam siklus hidup produk. Dengan memperhitungkan dimensi ini, LCA membantu dalam memastikan bahwa solusi-solusi yang diusulkan dalam rangka mendukung circular economy tidak hanya berkelanjutan secara lingkungan, tetapi juga berkontribusi pada keadilan sosial dan pembangunan ekonomi yang inklusif.

Selain aplikasinya dalam konteks produk individual, LCA juga dapat digunakan untuk menganalisis sistem ekonomi secara lebih luas, seperti sektor industri atau bahkan kebijakan publik. Dengan memahami dampak lingkungan dari berbagai keputusan ekonomi, pembuat kebijakan dapat mengarahkan sumber daya dan investasi ke arah yang mendukung transisi menuju circular economy yang berkelanjutan.

LCA menjadi alat yang sangat penting dalam mendukung pengembangan strategi dan kebijakan untuk mencapai tujuan keberlanjutan dalam konteks circular economy. Dengan memperhatikan semua aspek dari siklus hidup produk, dari sumber daya alam yang digunakan hingga dampak lingkungan dan sosial yang

dihasilkan, LCA memainkan peran kunci dalam memandu kita menuju pilihan ekonomi yang lebih cerdas, inklusif, dan berkelanjutan.

Penggunaan LCA dalam proyek berbasis BIM mendukung pemilihan desain dan material yang tidak hanya efisien secara teknis tetapi juga ramah lingkungan dalam jangka panjang (Jafari et al., 2024). Namun, metodologi LCA tidak sepenuhnya mampu mengukur secara akurat tingkat sirkularitas sistem yang sedang dipelajari di bawahnya. Ada dua alasan utama yang menjelaskan keterbatasan ini.

Pertama, cara LCA memodelkan pertimbangan bahan mentah dan sumber daya sering kali mengadopsi ekonomi linier sebagai landasan utama. LCA awalnya dikembangkan untuk menganalisis siklus hidup produk secara menyeluruh, dari tahap perolehan bahan mentah hingga tahap pembuangan produk setelah digunakan. Namun, aturan yang memungkinkan evaluasi dampak dan manfaat penggunaan kembali dan daur ulang kemudian diperkenalkan, sehingga meluaskan cakupan penelitian dari tahap awal hingga akhir. Meskipun demikian, masih ada beberapa kendala, seperti keterbatasan dalam pemodelan siklus daur ulang terbuka yang konsisten, serta kekurangan pedoman yang jelas untuk memperhitungkan berbagai penggunaan material dengan berbagai kualitas material.

Kedua, metode karakterisasi yang paling umum digunakan dalam LCA untuk menghitung penyusunan indikator dampak terkait konsumsi sumber daya tidak memperhitungkan ketersediaan sumber daya antropogenik. Pendekatan baru yang masih dalam tahap pengembangan, berdasarkan pada konsep disipasi dan bukan konsumsi.

2.10 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Metode	Pembahasan	Kekurangan
1	Primasetra % Larasati, 2021	BIM	Penelitian tentang <i>Embodied Energy (EE)</i> dengan integrasi BIM	Menggunakan sifat material internasional sehingga bisa mendapatkan perbedaan hasil dari sifat material lokal.

Tabel 2. 2 Lanjutan Tabel Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Metode	Pembahasan	Kekurangan
2	Rigamonti & Mancini, 2021	Life Cycle Assessment	Penilaian life Cycle Assasment dan circularity indicators	Indikator- indikator baru akan membuat interpretasi hasil menjadi lebih sulit karena banyaknya indikator yang sudah dimasukan. meskipun nilai tertinggi dalam LCA umumnya berarti kinerja lingkungan lebih buruk dan sebaliknya, nilai tertinggi dalam metrik sirkularitas menunjukkan strategi yang lebih baik
3	Punuindoong et al., n.d.	BIM menggunakan aplikasi Tekla struktur	BIM	Terdapat perbandingan antara perhitungan BIM dan konvensional
4	Gilang Pradana S et al., n.d.	BIM 5D	Mengerjakan struktur Gedung menggunakan BIM dengan <i>software</i> Cubicost TAS, Cubicost TRB, AutoCAD	Efisiensi penggunaan <i>Software</i> Cubicost dalam penentuan biaya pada pekerjaan arsitektur adalah 11,550%
5	Latupeirissa et al., 2023	BIM	Melakukan analisis kualitatif dan kuantitatif terhadap beberapa proyek konstruksi nyata dengan meminta pendapat peserta konstruksi mengenai faktor- faktor untuk menganalisis hubungan antara faktor keberlanjutan penerapan BIM dan keberhasilan pengelolaan suatu proyek konstruksi dalam siklus hidup	Keterbatasan yang dimiliki sehingga kurang atau kecilnya keberhasilan proyek BIM ini di Indonesia menurut penulis
6	Li, 2020c	BIM	Menerapkan teknologi BIM pada tahap desain, seluruh proses manajemen biaya, kualitas konstruksi, manajemen jadwal proyek	-

Tabel 2. 3 Lanjutan Tabel Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Metode	Pembahasan	Kekurangan
7	Celik et al., 2023	BIM dan Blockchain	Mengintegrasikan BIM dan Blockchain untuk pendekatan siklus hidup dan rantai pasokan untuk mengatasi keterbatasan dan hambatan industri konstruksi	Terbatasnya ketersediaan ahli, pengumpulan sumber daya primer melalui wawancara, survey kuesioner dan cara lain yang dianggap sulit
8	Ibrahim et al., 2019	BIM	Mengetahui potensi BIM dalam industri konstruksi menggunakan survei	Kurangnya terlihat potensi BIM untuk menjadi alat atau cara yang baik untuk industri konstruksi
9	(Zhu, 2020)	BIM	Penerapan BIM pada tahap pelaksanaan konstruksi, metode desain struktur perakitannya berdasarkan teknologi BIM, penelitian manajemen konstruksi berbasis BIM.	-
10	Jafari et al., 2023	LCA	Menilai dampak lingkungan dari pemasangan dinding eksterior pada umumnya dan menyajikan pilihan terbaik.	Tidak adanya siklus hidup dan dampak sosial
11	(Arenas & Shafique, 2024)	BIM-LCA	Membandingkan penggunaan material berkelanjutan dengan material tradisional	Tidak adanya cakupan yang komprehensif bahan dan opsi berkelanjutan dalam perangkat lunak yang banyak digunakan seperti revit. Ketidacukupan ini bisa menghalangi para arsitek dan insinyur untuk dengan mudah memasukkan pilihan ramah lingkungan kedalam desain mereka

Tabel 2. 4 Lanjutan Tabel Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Metode	Pembahasan	Kekurangan
12	Ma, 2023	LCA-BIM	mengembangkan kerangka kerja untuk pengambil keputusan dan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai dampak energi dan lingkungan dari bangunan bertingkat tinggi	LCA dan BIM masih memerlukan identifikasi berbagai material secara manual yang memerlukan waktu yang lama.
13	Ma et al., 2024	LCA-BIM-Tally	Menganalisis nilai karbon dalam material menggunakan LCA dan BIM kemudian mendapatkan hasil dampak lingkungan menggunakan Tally	Penelitian hanya terfokus pada struktur dan tidak memasukan elemen bangunan lainnya seperti enclosure bangunan.
14	(Forth et al., n.d.)	BIM-NLP	Menghitung emisi gas rumah kaca (GRK) yang terkandung dalam bangunan secara otomatis dalam model BIM	Menurut penulis BIM model awal kurang memiliki spesifikasi yang tepat mengenai jenis objek dan sifat sehingga hamper tidak mungkin menemukan informasi LCA yang benar dari masing-masing database
15	(Liang et al., 2023)	LCA-BIM	Menilai potensi pengurangan emisi karbon yang dapat terjadi dari penggunaan energi dan proses operasional dalam sebuah bangunan.	Kurang maksimalnya ECE dalam membaun skema karena pertukaran ECE dan OCE yang sangat signifikan