

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor bangunan dan konstruksi secara global menyumbang 35 - 40% total konsumsi energi dan emisi karbon dunia, menjadikannya salah satu titik intervensi paling krusial dalam mitigasi perubahan iklim. Berdasarkan laporan *World Energy Outlook 2025*, pertumbuhan ekonomi dan populasi global terus memacu kebutuhan energi untuk pendinginan, pemanasan, dan operasional bangunan komersial, yang berkontribusi terhadap lonjakan emisi global hingga mencapai rekor tertinggi 38,2 gigaton (*International Energy Agency [IEA], 2025*). Di tengah transisi menuju Era Listrik (*Age of Electricity*), sektor bangunan dituntut untuk tidak hanya mengandalkan pasokan energi terbarukan, melainkan wajib menurunkan intensitas energinya sejak fase perancangan melalui efisiensi selubung bangunan (IEA, 2025). Fenomena pemanasan global yang terus memburuk di mana temperatur bumi terus meningkat memaksa sektor *Architecture, Engineering, and Construction* (AEC) untuk mengevaluasi kembali bagaimana sebuah bangunan dirancang agar tidak semakin membebani sistem jaringan listrik (*World Meteorological Organization [WMO], 2025*). Fakta-fakta ini menegaskan bahwa pendekatan perancangan bangunan yang lebih cerdas dan berbasis kinerja energi bukan lagi sebuah pilihan, melainkan keharusan yang mendesak bagi keberlanjutan lingkungan global.

Di tingkat nasional, kondisi konsumsi energi bangunan di Indonesia menunjukkan trajektori yang serupa dengan tren global, namun dengan tantangan yang lebih kompleks akibat pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi yang pesat. Berdasarkan data nasional terbaru, sektor komersial menyumbang sekitar 4,34% dari total permintaan energi nasional, dengan konsumsi yang mencapai angka tertinggi dalam sepuluh tahun terakhir (Kementerian ESDM, 2023). Lebih spesifik, bangunan perkantoran dan komersial menyerap sekitar 23% dari total penggunaan listrik nasional, menjadikannya sektor dengan kontribusi yang sangat signifikan terhadap beban sistem kelistrikan

(Kementerian ESDM, 2023). Dalam merespons tekanan ini, Indonesia telah meningkatkan ambisi iklimnya melalui *Enhanced NDC* yang menetapkan target pengurangan emisi gas rumah kaca sebesar 31,89% secara mandiri pada tahun 2030 dibandingkan skenario *business-as-usual* (WRI Indonesia, 2025). Pertumbuhan konsumsi energi yang signifikan ini, dikombinasikan dengan komitmen iklim nasional yang semakin ambisius, menjadikan efisiensi energi pada bangunan komersial sebagai prioritas yang tidak dapat ditunda, di mana desain selubung bangunan bertindak sebagai titik intervensi yang paling strategis.

Tantangan konsumsi energi pada bangunan komersial di Indonesia diperparah secara signifikan oleh karakteristik iklim tropis lembap yang mendominasi hampir seluruh wilayah Nusantara, menciptakan kondisi di mana beban pendinginan menjadi kebutuhan yang tidak dapat dihindari sepanjang tahun. Di kawasan Asia Tenggara, sektor bangunan menyumbang sekitar 30% dari total permintaan energi primer, dan porsi tersebut didominasi oleh penggunaan sistem pendingin udara untuk menyediakan kenyamanan termal bagi penghuni (Gupta & Deb, 2023). Kondisi ini dikonfirmasi oleh kajian yang lebih spesifik pada tipologi perkantoran komersial, di mana sistem HVAC menjadi kontributor utama terhadap 40 hingga 50% konsumsi energi total pada bangunan perkantoran berskala besar di iklim tropis (Sekhar, 2015). Karakteristik iklim yang ekstrem ini menempatkan selubung bangunan sebagai elemen perancangan yang memiliki pengaruh terbesar terhadap efisiensi energi di iklim tropis, sehingga evaluasi kualitas termal selubung menjadi langkah yang krusial dalam proses perancangan bangunan komersial.

Selubung bangunan berfungsi sebagai antarmuka termal antara kondisi lingkungan eksternal yang panas dan lembap dengan kondisi interior bangunan yang dikondisikan secara mekanis, sehingga kualitas termalnya secara langsung menentukan seberapa besar beban yang harus ditanggung oleh sistem pendingin. Kajian komprehensif tentang desain selubung bangunan tropis mengidentifikasi bahwa insulasi, tipe *glazing*, dan *Window-to-Wall Ratio* (WWR) merupakan variabel desain yang paling berpengaruh terhadap kinerja energi bangunan di

kawasan tropis, di mana kombinasi seluruh variabel selubung secara optimal dapat menghasilkan penghematan energi tahunan rata-rata hingga 35% (Gupta & Deb, 2023). Sebuah studi sensitivitas menggunakan kalkulator *Overall Thermal Transfer Value* (OTTV) terhadap ribuan variasi bukaan di Indonesia menemukan bahwa WWR memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap nilai OTTV dibandingkan *Shading Coefficient* (SC), dengan potensi reduksi beban panas hingga 46 W/m² ketika bukaan dioptimalkan (Fitria Syafutri et al., 2023). Kompleksitas interaksi antar variabel selubung ini menegaskan bahwa evaluasi termal tidak cukup dilakukan secara parsial, melainkan harus dianalisis secara menyeluruh dalam satu platform yang mampu merespons perubahan variabel secara aktual sejak awal masa perancangan.

Pemerintah Indonesia telah merespon urgensi efisiensi energi pada bangunan komersial dengan menetapkan kerangka regulasi yang mengikat secara hukum dan teknis melalui standarisasi nasional. Standar Nasional Indonesia (SNI) 6389:2020 tentang Konservasi Energi Selubung Bangunan pada Bangunan Gedung menetapkan nilai OTTV tidak boleh melebihi 35 W/m² sebagai persyaratan wajib, yang kemudian diperkuat oleh regulasi bangunan gedung hijau yang menjadikan pemenuhan nilai OTTV dan RTTV sebagai syarat mutlak perizinan bangunan komersial (Badan Standarisasi Indonesia, 2020). Namun, formula OTTV berdasarkan standar nasional melibatkan banyak persamaan utama dan tabel referensi yang harus digunakan secara simultan, menjadikan proses kalkulasi yang berulang pada tahap desain sangat memakan waktu dan rentan terhadap kesalahan manusia (Fitria Syafutri et al., 2023). Akibatnya, studi evaluasi pada beberapa bangunan komersial aktual di Indonesia menemukan nilai OTTV yang melampaui batas maksimum standar hingga dua kali lipat karena kegagalan deteksi dini pada fase perancangan (Priansyah & Zulbahri, 2026). Paradoks ini yakni adanya regulasi yang ketat namun tidak didukung oleh alat kalkulasi yang terintegrasi menjadi hambatan utama dalam mewujudkan bangunan hemat energi, sekaligus membuka pertanyaan besar mengenai implikasi finansial dari keputusan desain tersebut.

Di luar dimensi kinerja termal, selubung bangunan juga merupakan komponen dengan porsi biaya konstruksi yang sangat signifikan, khususnya pada tipologi bangunan kantor sewa yang umumnya menggunakan sistem fasad kaca dengan area *glazing* yang luas. Memilih alternatif desain selubung yang paling tepat dari sisi kinerja OTTV sekaligus mempertimbangkan opsi yang paling efisien secara biaya merupakan tugas yang sangat menantang, karena dua dimensi ini sering kali menunjukkan hubungan yang saling bertentangan (Wang et al., 2021). Sebuah studi yang mengintegrasikan pemodelan digital dan algoritma optimasi multiobjektif menemukan bahwa desain yang teroptimasi berhasil mencapai pengurangan OTTV hingga 44,78%, namun dengan konsekuensi peningkatan biaya konstruksi sebesar 19,64% dibandingkan desain konvensional (Lim et al., 2019). Penelitian tentang material transparan pada selubung bangunan kantor mengonfirmasi bahwa keputusan pemilihan material *glazing* memiliki implikasi ganda terhadap kinerja termal dan biaya sekaligus, sehingga evaluasi keduanya secara terpisah berpotensi menghasilkan keputusan investasi yang keliru (Chiradeja et al., 2023). Tanpa platform yang mampu menampilkan kedua dimensi ini secara bersamaan, pengembang kantor sewa terpaksa membuat kompromi desain tanpa basis data yang kuat, sebuah kondisi yang sangat merugikan bagi siklus investasi jangka panjang bangunan komersial.

Fenomena tersebut mengungkap sebuah kesenjangan struktural yang nyata antara kebutuhan evaluasi terintegrasi dan praktik perancangan yang berjalan saat ini di industri konstruksi Indonesia. Dalam alur kerja konvensional, evaluasi OTTV dan RTTV dilakukan secara terpisah dari model desain, sementara estimasi biaya dikerjakan oleh konsultan *quantity surveyor* secara independen, sehingga kedua proses berjalan tanpa koneksi data yang sinkron. Kebutuhan akan input manual untuk menyelesaikan proses estimasi biaya konstruksi merupakan kelemahan signifikan dalam otomatisasi industri konstruksi, di mana sinkronisasi data kuantitas dalam satu alur kerja tunggal sangat dibutuhkan (Pishdad & Onungwa, 2024). Kondisi ini diperparah oleh fakta bahwa masih terdapat kesenjangan pengetahuan yang besar mengenai implementasi BIM tingkat lanjut (5D BIM) dalam manajemen biaya, yang mengindikasikan adanya

kebutuhan mendesak terhadap sistem lintas domain proyek (Safaa Eldin et al., 2024). Oleh karena itu, mengoptimalkan kinerja termal selubung bangunan pada tahap konseptual membutuhkan alat bantu baru yang mampu memberikan umpan balik secara cepat dan akurat terhadap berbagai skenario variasi desain (Enggarswi et al., 2024).

Building Information Modeling (BIM) dan *Visual Programming Language* (VPL) hadir sebagai dua teknologi yang secara bersama-sama berpotensi menjawab kesenjangan metodologis tersebut secara fundamental. BIM bukan sekadar perangkat pemodelan tiga dimensi, melainkan sebuah platform data terintegrasi yang menyimpan informasi geometri, material, kuantitas, dan biaya dalam satu model digital tunggal yang konsisten. Penggunaan antarmuka VPL seperti Dynamo yang tertanam di dalam perangkat lunak BIM memungkinkan ekstraksi database secara langsung untuk mengevaluasi kinerja termal selubung bangunan secara otomatis (Juaidi et al., 2018). Pendekatan komputasional ini terbukti mampu meningkatkan level otomatisasi dalam evaluasi nilai termal sekaligus mempercepat pencarian alternatif solusi desain yang ideal (Lim et al., 2019). Di sisi estimasi biaya, kemampuan integrasi parameter ekonomi dalam lingkungan BIM diakui sebagai fitur yang memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih baik pada fase awal proyek guna mencegah pembengkakan anggaran (Pham et al., 2023).

Meskipun potensi komputasi BIM dan VPL sangat besar, penelusuran terhadap penelitian terdahulu menunjukkan masih adanya celah (*research gap*) mendasar, terutama untuk konteks bangunan tropis di Indonesia yang mengacu pada standar nasional. Penelitian terdahulu yang mengembangkan alat berbasis BIM-VPL untuk penilaian selubung bangunan baru mencakup *visual scripting* kinerja termal tanpa menyertakan aspek estimasi biaya konstruksi dalam alur kerjanya (Seghier et al., 2017). Di sisi lain, sistem komputasi yang mengintegrasikan perhitungan OTTV dan RTTV berbasis pemrograman visual di wilayah regional terbukti mampu meminimalkan human error, namun masih mengabaikan kalkulasi estimasi finansial dan menggunakan standar negara lain yang tidak relevan dengan regulasi di Indonesia (Abass et al., 2020). Bahkan,

penelitian berbasis BIM-VPL yang telah dikembangkan di Indonesia sejauh ini fokusnya masih terbatas pada kalkulasi OTTV untuk dinding vertikal, tanpa mencakup RTTV untuk elemen atap dan tanpa mengintegrasikan estimasi biaya material selubung secara bersamaan (Fitria Syafutri et al., 2023).

Merespon hal tersebut, berbagai studi arsitektur komputasional mutakhir telah berupaya mengeksplorasi adopsi teknologi BIM dan VPL untuk mengotomatisasi evaluasi termal bangunan, namun implementasinya seringkali masih bersifat parsial dan belum terintegrasi ke dalam ekosistem visualisasi data (Lim & Seghier, 2021). Tinjauan literatur menunjukkan masih minimnya kerangka kerja *Automated Code Compliance* (ACC) yang memvalidasi perhitungan termal secara utuh pada skala bangunan menyeluruh (*full building*) (Eid et al., 2022). Lebih jauh lagi, sistem otomasi yang ada umumnya masih mengunci keluaran data di dalam antarmuka perangkat lunak BIM itu sendiri, tanpa mengintegrasikannya secara hierarkis dengan kalkulasi biaya material secara interaktif (Changnawa & Baltazar, 2025). Keterbatasan interoperabilitas ini menghambat pemangku kepentingan dalam melakukan perbandingan mendalam, yang menegaskan perlunya sebuah jembatan format data terbuka untuk mengeluarkan matriks hasil simulasi dari lingkungan tertutup BIM menuju platform visualisasi web yang komunikatif.

Kesenjangan kapabilitas otomasi komputasional dan interoperabilitas data tersebut menjadi landasan utama yang memperkuat urgensi dilakukannya penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan memvalidasi alat otomasi evaluasi kinerja termal (OTTV dan RTTV) beserta kalkulasi BOQ selubung bangunan pada purwarupa (*prototipe*) *Rental Office Building* menggunakan perangkat komputasi *Autodesk Revit* dan *Dynamo* (Mahmoud et al., 2025). Secara spesifik, algoritma yang dikembangkan dirancang tidak hanya untuk menyelesaikan kalkulasi matematis, tetapi juga mengeksport dataset luaran tersebut ke dalam format *JavaScript Object Notation* (JSON) agar dapat dibaca lintas platform (Khanh Phuong et al., 2024). Dataset berbasis JSON tersebut kemudian ditransformasikan menuju aplikasi antarmuka web interaktif berbasis Streamlit untuk menghasilkan dasbor analitik *trade-off* termal-

biaya. Dengan demikian, luaran penelitian ini diharapkan menjadi sistem pendukung keputusan (*decision support tool*) yang presisi bagi praktisi arsitektur, menjembatani rasionalisasi regulasi energi SNI dengan transparansi kelayakan finansial proyek konstruksi dalam satu alur integrasi digital yang revolusioner.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengembangkan alur kerja integrasi perhitungan OTTV, RTTV beserta estimasi biaya (BOQ) selubung bangunan berbasis BIM-VPL menggunakan *Revit-Dynamo*?
2. Bagaimana memastikan hasil perhitungan mudah dipahami oleh pengguna akademik maupun praktisi melalui visualisasi data?
3. Bagaimana korelasi antara optimasi penurunan nilai beban termal dengan fluktuasi biaya konstruksi selubung luar pada objek kantor sewa?

1.3 Manfaat penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata secara teoretis maupun praktis di bidang arsitektur komputasi dan sains bangunan:

1. Manfaat Akademis (Teoretis) dari penelitian ini untuk memperkaya literatur arsitektur komputasional, khususnya terkait integrasi *Automated Code Compliance* (ACC) pada bangunan iklim tropis. Penelitian ini membuktikan kebaruan alur kerja yang menggabungkan parameter sains bangunan (termofisika), ekonomi konstruksi (RAB), dan ilmu data (*Data Science* melalui integrasi JSON dan *Streamlit*) dalam satu kerangka penelitian.

2. Manfaat Praktis dari penelitian ini untuk menghasilkan purwarupa instrumen/alat bantu digital (*decision support tool*) yang konkret bagi para praktisi industri *Architecture, Engineering, and Construction* (AEC). Instrumen ini memfasilitasi arsitek dan pengembang untuk mengambil keputusan desain fasad yang optimal secara cepat di fase konseptual, memastikan kepatuhan terhadap SNI 6389:2020 tanpa memicu pembengkakan anggaran (*cost overrun*).

1.4 Tujuan penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah di atas, penelitian ini memiliki tujuan spesifik sebagai berikut:

1. Mengembangkan dan memvalidasi skrip algoritma VPL pada antarmuka *Dynamo-Revit* yang mampu mengekstraksi data material arsitektural untuk menghitung nilai OTTV, RTTV, dan estimasi biaya (BOQ) selubung bangunan secara serentak dan otomatis.
2. Membangun jalur interoperabilitas (*data pipeline*) yang mampu mengeksport parameter luaran BIM berformat JSON ke dalam aplikasi web guna menghasilkan visualisasi sistem pendukung keputusan bagi arsitek.
3. Mengevaluasi performa sistem otomasi yang dibangun berdasarkan metrik tingkat akurasi data (deviasi hasil) dan efisiensi waktu komputasi dibandingkan dengan praktik perhitungan manual menggunakan *spreadsheet*

1.5 Ruang Lingkup dan batasan penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini adalah mengembangkan alurkerja (*workflow*) otomasi perhitungan OTTV dan estimasi biaya selubung bangunan berbasis BIM-VPL pada bangunan kantor sewa. Tujuan khusus penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek studi dalam penelitian ini menggunakan model digital berbasis BIM (3D) berupa purwarupa gedung perkantoran dengan lantai tipikal, di mana lantai ke-25 dipilih sebagai sampel untuk keperluan simulasi dan validasi algoritma. Bangunan tersebut diasumsikan berlokasi di wilayah beriklim tropis, sesuai dengan konteks geografis Indonesia.
2. Analisis kinerja termal dibatasi murni pada perhitungan nilai OTTV (untuk dinding luar dan kaca) serta RTTV (untuk atap) sesuai dengan rumusan matematis pada SNI 6389:2020. Penelitian ini tidak mencakup simulasi energi dinamis (seperti *Cooling Load* spesifik seperti *EnergyPlus*).
3. Estimasi biaya (*Costing*) difokuskan secara eksklusif pada *Bill of Quantities* (BOQ) elemen arsitektural selubung bangunan (material fasad, kaca, peneduh/ shading, dan insulasi atap). Tidak mencakup biaya struktural maupun sistem mekanikal/elektrikal (MEP).
4. Untuk Perangkat Lunak yang digunakan dibatasi pada *Autodesk Revit* (sebagai platform BIM), *Dynamo* (sebagai mesin VPL), format JSON (sebagai basis data pertukaran), dan bahasa pemrograman *Python* melalui *library Streamlit* (untuk pengembangan dasbor web analitik)

1.6 Sistematika penulisan

Penulisan skripsi ini disusun secara runut menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Menguraikan latar belakang isu energi bangunan dan efisiensi termal, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Memaparkan landasan teori yang mencakup sains bangunan tropis (OTTV dan RTTV), standar efisiensi energi nasional (SNI 6389:2020), estimasi biaya selubung bangunan, arsitektur komputasional (BIM dan VPL), serta dasar-dasar interoperabilitas data (JSON dan Streamlit). Bab ini juga memuat ulasan penelitian terdahulu (*state of the art*).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan pendekatan penelitian eksperimental/simulasi kuantitatif yang digunakan, tahapan perancangan algoritma VPL, penyiapan model purwarupa *Office Building*, hingga skema validasi dan komparasi data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

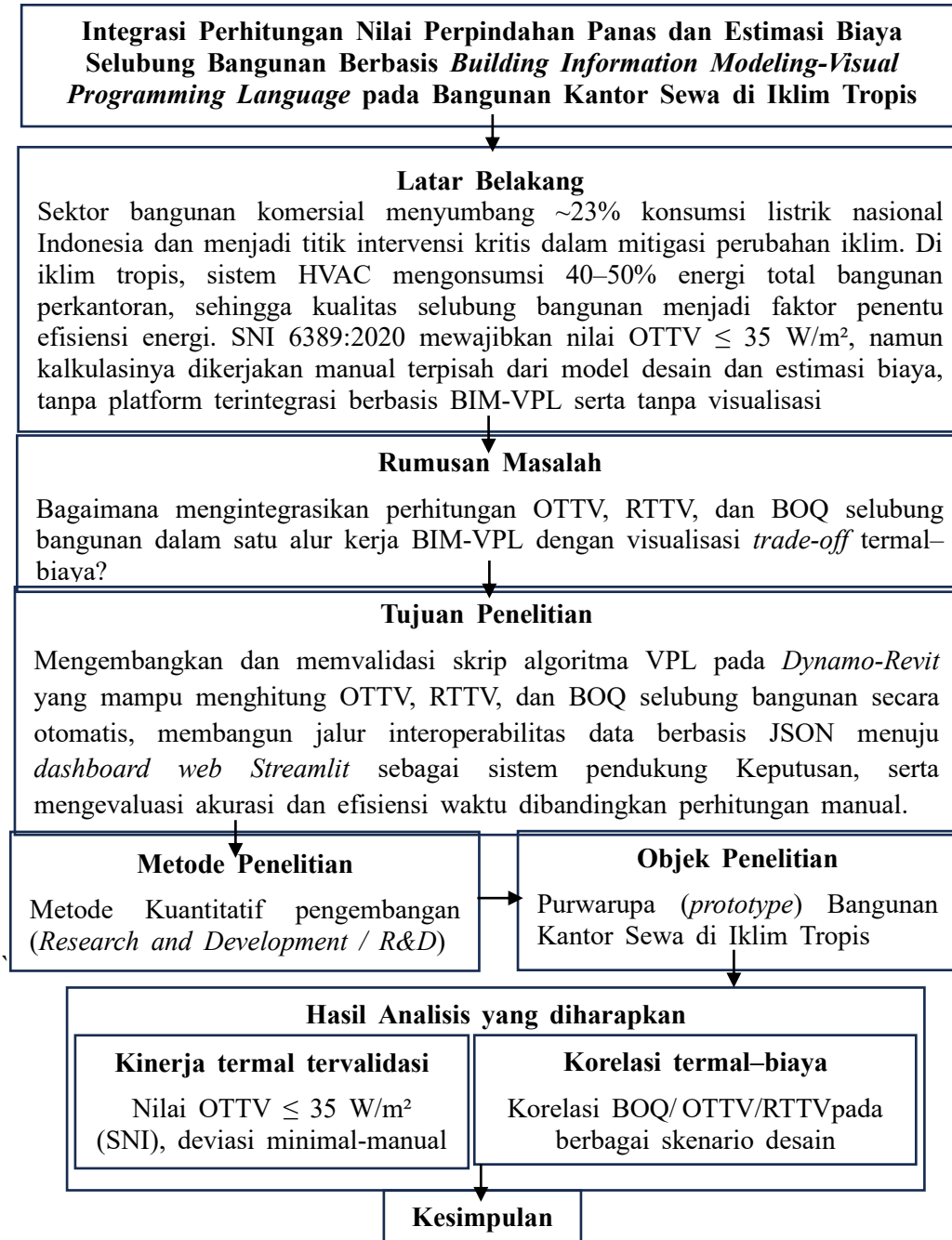
Menyajikan proses ekstraksi data, pemaparan logika *Node Group* pada skrip visual, simulasi perhitungan nilai termal dan biaya, proses transisi data menuju *Streamlit*, serta analisis mendalam terkait *trade-off* antara efisiensi energi dan kelayakan ekonomi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Menyimpulkan hasil penelitian yang menjawab perumusan masalah serta memberikan rekomendasi praktis bagi industri konstruksi maupun saran pengembangan bagi penelitian akademis di masa mendatang.

1.7 Kerangka Berpikir

Berikut adalah kerangka berpikir dari penelitian ini.



Gambar 1.1 Bagan kerangka pemikiran