

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Manajemen Proyek Konstruksi

Manajemen proyek konstruksi merupakan suatu proses terintegrasi yang melibatkan perencanaan, pengorganisasian, koordinasi, dan pengendalian sumber daya untuk mencapai tujuan proyek yang spesifik dalam batasan waktu, biaya, dan mutu yang telah ditetapkan. Dalam industri konstruksi yang memiliki kompleksitas tinggi, manajemen proyek berfungsi sebagai instrumen untuk memitigasi risiko serta memastikan efisiensi di setiap tahapan siklus hidup proyek (Hendrickson, C., 2000)

Siklus Hidup Proyek Konstruksi

Setiap proyek konstruksi melewati serangkaian fase yang saling berkesinambungan. Secara umum, siklus ini dimulai dari tahap inisiasi atau gagasan, diikuti oleh tahap studi kelayakan dan penjelasan (*briefing*). Fase krusial selanjutnya adalah perancangan (*design*), di mana ide ditransformasikan ke dalam dokumen teknis dan gambar kerja. Tahap pengadaan (*procurement*) dilakukan untuk menentukan pelaksana, yang kemudian dilanjutkan dengan tahap konstruksi atau pelaksanaan di lapangan. Siklus ini diakhiri dengan tahap penyerahan serta pemeliharaan bangunan (Edison M, dkk, 2025)

Manajemen Biaya Konstruksi dan Rencana Anggaran Biaya

Manajemen biaya adalah disiplin untuk memastikan bahwa proyek diselesaikan tanpa melampaui anggaran yang disetujui. Komponen utama dalam pengelolaan ini adalah penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB). RAB merupakan hasil kalkulasi dari volume pekerjaan dikalikan dengan harga satuan yang berlaku. Akurasi dalam penyusunan RAB sangat bergantung pada ketelitian perhitungan volume (*Quantity Take-Off*). Kesalahan dalam estimasi biaya di awal proyek dapat menyebabkan dampak domino berupa keterlambatan pengerjaan atau penurunan kualitas material (Lisa K, dkk, 2025)

Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP)

Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) adalah metode untuk menghitung harga satuan setiap item pekerjaan yang mencakup kebutuhan upah tenaga kerja, harga material, dan biaya sewa atau operasional alat berat. Di Indonesia, standar perhitungan ini umumnya mengacu pada regulasi pemerintah yang mengatur koefisien kebutuhan sumber daya sesuai dengan jenis pekerjaannya (Permen PUPR No. 28/PRT/M/2016) Perhitungan ini dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Harga Satuan Pekerjaan} = (\text{Koefisien} \times \text{Harga Satuan})(3.1)$$

Integrasi antara volume yang tepat dan AHSP yang akurat merupakan kunci dalam menghasilkan estimasi biaya yang kredibel dan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis maupun administratif.

3.2 Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) merupakan transformasi metodologi kerja dalam industri konstruksi, di mana proses perancangan dan dokumentasi beralih dari representasi grafis statis (2D) menuju model digital berbasis informasi yang dinamis. Dalam Bab III ini, BIM ditinjau sebagai kerangka kerja yang memungkinkan integrasi data teknis secara multidimensi guna meminimalisir kesalahan interpretasi desain.

3.2.1 Konsep dan Evolusi BIM dalam Industri Konstruksi

Building Information Modeling (BIM) merupakan paradigma baru dalam industri konstruksi yang mengubah cara informasi bangunan diciptakan, dikelola, dan dibagikan. Secara konsep, BIM bukan hanya sebuah perangkat lunak, melainkan sebuah metodologi kerja yang mengintegrasikan data digital sepanjang siklus hidup proyek. Evolusi BIM dimulai dari transisi penggunaan kertas kalkir ke CAD (*Computer-Aided Design*) dua dimensi, yang kemudian berkembang pesat menjadi pemodelan objek tiga dimensi cerdas.

Dalam tahap evolusinya, BIM memungkinkan adanya kolaborasi lintas disiplin (arsitektur, struktur, dan MEP) dalam satu model tunggal. Hal ini bertujuan untuk menciptakan transparansi data dan mengurangi ego sektoral antar pihak yang

terlibat dalam proyek konstruksi. Menurut Sacks et al. (2018), evolusi ini didorong oleh kebutuhan industri akan efisiensi yang lebih tinggi serta pengurangan tingkat kesalahan desain yang sering kali baru ditemukan saat tahap konstruksi berlangsung.

3.2.2 BIM Dimensions (3D, 4D, dan 5D)

Implementasi BIM dikategorikan ke dalam beberapa dimensi fungsional yang memberikan kedalaman informasi berbeda pada model:

- BIM 3D (Pemodelan Geometri): Merupakan dasar dari seluruh dimensi BIM yang berfokus pada representasi visual dan spasial objek. Fungsi utamanya adalah untuk koordinasi desain dan deteksi benturan (*clash detection*).
- BIM 4D (Penjadwalan/Waktu): Menambahkan dimensi waktu ke dalam model 3D. Dengan mengaitkan jadwal kerja (*time schedule*) pada elemen model, pihak pengelola proyek dapat melakukan simulasi visual mengenai progres pembangunan dari waktu ke waktu (Lisa K, dkk, 2025)
- BIM 5D (Estimasi Biaya): Merupakan dimensi yang mengintegrasikan informasi biaya dengan komponen model 3D. BIM 5D memungkinkan otomatisasi ekstraksi volume material atau *Quantity Take-Off* (QTO) secara langsung dari database model. Hal ini memastikan bahwa setiap perubahan desain secara otomatis memicu pembaruan pada nilai anggaran proyek.

3.2.3 Rekonstruksi Model 3D Berbasis Parametrik

Rekonstruksi model 3D dalam konteks BIM bukan sekadar pembuatan gambar tiga dimensi secara visual, melainkan proses membangun elemen bangunan digital yang bersifat parametrik. Menurut (Wawan A, dkk, 2024), pemodelan menggunakan perangkat lunak BIM seperti *Tekla Structures* atau *Autodesk Revit* memungkinkan setiap elemen memiliki data teknis yang melekat, seperti dimensi, material, dan posisi koordinat yang presisi.

Proses rekonstruksi ini berfungsi sebagai jembatan untuk mengubah dokumen dua dimensi (2D) yang bersifat statis menjadi model informasi yang dinamis. Pemodelan yang detail, terutama pada bagian struktur bawah, sangat penting untuk

mendeteksi clash detection atau tumpang tindih antar elemen struktur sebelum tahap konstruksi dimulai.

3.2.4 Ekstraksi Volume Material Otomatis

Salah satu keunggulan utama dari teknologi BIM 5D adalah kemampuan sistem untuk melakukan *Quantity Take-Off* (QTO) secara otomatis. Ekstraksi volume otomatis adalah proses pengambilan data kuantitas material langsung dari basis data geometri model yang telah dibuat.

- **Akurasi Data:** (Kania Z, dkk, 2023) menjelaskan bahwa ekstraksi otomatis meminimalisir intervensi manual yang sering kali menjadi sumber *human error*. Karena volume dihitung berdasarkan geometri riil di dalam model, risiko kesalahan perhitungan akibat kompleksitas bentuk bangunan dapat dikurangi.
- **Transparansi dan Validasi:** Menurut (Risky A, 2021) hasil ekstraksi volume dari model BIM (misalnya dalam format *Schedules* di *Revit*) memberikan data yang lebih transparan. Hal ini memudahkan proses validasi dan perbandingan dengan Rencana Anggaran Biaya (RAB) konvensional.
- **Efisiensi Waktu:** (Edison M, dkk, 2025) menyatakan bahwa proses ekstraksi otomatis secara signifikan mempercepat durasi penyusunan estimasi biaya pengerjaan struktur dibandingkan metode manual yang harus menghitung setiap elemen satu per satu menggunakan alat bantu hitung eksternal.

3.2.5 Manfaat dan Tantangan Implementasi BIM 5D

Penerapan BIM 5D menjanjikan efisiensi yang signifikan namun juga menghadapi tantangan teknis dalam implementasinya:

Manfaat Utama:

- **Akurasi Estimasi:** Menghilangkan subjektivitas dalam perhitungan manual, sehingga hasil Rencana Anggaran Biaya (RAB) lebih presisi.
- **Kontrol Perubahan Desain:** Memudahkan tim proyek untuk mengevaluasi dampak finansial dari setiap revisi desain secara cepat dan akurat.
- **Transparansi Anggaran:** Data volume yang dihasilkan dapat dilacak sumbernya langsung dari geometri model, meminimalisir risiko manipulasi data kuantitas.

Tantangan Implementasi:

- **Kebutuhan Standarisasi:** Dibutuhkan protokol yang seragam dalam penamaan elemen dan klasifikasi biaya agar data dari perangkat lunak BIM dapat dibaca dengan benar oleh sistem akuntansi biaya (Rizky E, dkk, 2024)
- **Interoperabilitas:** Kendala teknis saat bertukar data antar perangkat lunak yang berbeda merk sering kali menyebabkan hilangnya sebagian informasi penting.
- **Kesiapan SDM:** Memerlukan investasi dalam pelatihan personel untuk menguasai alur kerja pemodelan parametrik yang jauh lebih kompleks dibandingkan metode konvensional.

3.3 Estimasi Biaya Berbasis BIM

Estimasi biaya berbasis BIM (BIM 5D) merupakan proses transformasi data kuantitas yang diekstraksi dari model digital menjadi nilai moneter. Dalam sistem ini, biaya tidak lagi dipandang sebagai entitas terpisah, melainkan sebagai properti yang melekat pada setiap elemen bangunan.

3.3.1. Metode *Quantity Take-Off* (QTO) Otomatis

Metode QTO otomatis adalah proses pengambilan data kuantitas (volume, luas, panjang, atau jumlah) secara langsung dari database objek dalam model BIM. Berbeda dengan QTO konvensional yang mengandalkan pengukuran manual di atas kertas atau layar datar (2D), QTO otomatis bekerja dengan membaca properti geometris elemen yang telah didefinisikan oleh pengguna.

Otomatisasi ini bekerja berdasarkan skedul (*scheduling*) yang dikonfigurasi dalam perangkat lunak. Sistem akan memindai seluruh elemen, misalnya pondasi *footplat*, dan menjumlahkan volumenya secara presisi berdasarkan dimensi riil yang dimodelkan. Hal ini sangat efektif untuk mengurangi deviasi perhitungan yang disebabkan oleh kelalaian manusia (*human error*) atau kesalahan dalam menafsirkan skala gambar (Kania Z, dkk, 2023)

3.3.2. Integrasi Model Parametrik dengan Data Biaya

Integrasi biaya dalam BIM dilakukan dengan menghubungkan parameter elemen parametrik dengan basis data harga satuan, seperti Analisis Harga Satuan Pekerjaan

(AHSP). Dalam alur kerja ini, setiap elemen diberikan identitas atau *keynote* yang merujuk pada kode item pekerjaan tertentu.

Proses integrasi ini memungkinkan terjadinya sinkronisasi dua arah. Apabila terjadi perubahan pada desain misalnya perubahan ketebalan lantai kerja pada pondasi maka parameter volume pada elemen tersebut akan berubah secara otomatis, yang kemudian secara instan memperbarui total biaya pada tabel rencana anggaran. Keberhasilan integrasi ini sangat bergantung pada kerapian pengorganisasian data atau standar klasifikasi material yang digunakan (Fahrizal F, dkk, 2023)

3.3.3. Keunggulan Estimasi BIM dibanding Metode Konvensional

Perbandingan antara estimasi berbasis BIM dan metode konvensional menunjukkan beberapa keunggulan kompetitif yang signifikan dalam manajemen biaya konstruksi:

- **Presisi Volume Bersih (*Net Quantity*):** BIM memiliki kemampuan untuk menghitung volume bersih dengan mempertimbangkan perpotongan antar elemen (*voids* dan *intersections*). Hal ini mencegah terjadinya *double counting* (perhitungan ganda) yang sering terjadi pada metode manual.
- **Visualisasi Biaya:** Pengambil keputusan dapat melihat hubungan langsung antara biaya dan visualisasi 3D, sehingga mempermudah proses evaluasi bagian mana dari struktur yang paling menyerap anggaran.
- **Kecepatan Revisi:** Estimasi konvensional memerlukan waktu berhari-hari untuk menghitung ulang RAB jika terjadi perubahan desain besar, sedangkan BIM mampu melakukan pembaruan anggaran secara *real-time* seiring dengan modifikasi model (Gilang P, 2025)
- **Auditabilitas:** Setiap angka dalam RAB berbasis BIM dapat dilacak kembali ke elemen visualnya di dalam model, sehingga menciptakan transparansi data yang lebih baik bagi pemilik proyek maupun auditor.

3.4 Perangkat Lunak Autodesk Revit

Autodesk Revit merupakan perangkat lunak *Building Information Modeling* (BIM) yang dirancang khusus untuk mendukung alur kerja kolaboratif dalam disiplin arsitektur, struktur, dan MEP. Sebagai *platform* BIM berbasis objek, *Revit* memfasilitasi pembuatan model bangunan yang tidak hanya berisi informasi geometris, tetapi juga informasi teknis yang dapat diekstraksi untuk keperluan estimasi biaya dan manajemen konstruksi (Eastman, C., 2011)

3.4.1. Karakteristik Pemodelan Parametrik pada Revit

Ciri khas utama *Revit* adalah penggunaan sistem pemodelan parametrik. Dalam paradigma ini, setiap elemen bangunan seperti *footing*, kolom, atau *beam* dikendalikan oleh parameter yang saling terhubung. Karakteristik ini mencakup:

- Relasi Logis: Elemen-elemen dalam model saling berinteraksi secara cerdas. Misalnya, jika tinggi level lantai diubah, maka elemen kolom yang terikat pada level tersebut akan menyesuaikan tingginya secara otomatis.
- Konsistensi Data: Perubahan yang dilakukan pada satu tampilan (misalnya di denah) akan tercermin secara serentak pada seluruh tampilan lainnya, termasuk potongan, tampak, dan tabel kuantitas. Hal ini menghilangkan risiko perbedaan data antar dokumen gambar.
- Integritas Geometri: *Revit* memastikan bahwa setiap sambungan antar komponen (seperti pertemuan pondasi dan kolom) dihitung volumenya dengan mempertimbangkan irisan material, sehingga mencegah perhitungan ganda (*double counting*).

3.4.2. Alur Kerja *Family* dan *Schedule* untuk Perhitungan Volume

Dalam *Autodesk Revit*, akurasi perhitungan volume material bersandar pada dua instrumen utama, yaitu *Family* dan *Schedule*:

1. Penggunaan *Family*: *Family* adalah elemen bangunan yang dibuat dengan spesifikasi teknis tertentu. Pada pekerjaan pondasi, *family* yang digunakan harus diatur tingkat kedetailannya (LOD) agar volume yang dihasilkan akurat.

Parameter dalam *family* mencakup dimensi panjang, lebar, kedalaman, hingga mutu material beton.

2. Ekstraksi melalui *Schedule*: *Schedule* berfungsi sebagai tabel dinamis yang membaca database dari *family* yang telah ditempatkan dalam model. Alur kerjanya dimulai dengan mengelompokkan elemen berdasarkan kategori, kemudian menambahkan parameter *volume* ke dalam tabel. Dengan menggunakan *field* rumus (*calculated value*), *Revit* dapat menghitung total volume material secara otomatis.

Hasil dari *Schedule* ini dapat diekspor langsung ke dalam format *spreadsheet*, yang kemudian menjadi basis data utama dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) yang presisi.

3.5 Pekerjaan Struktur Pondasi

Pondasi merupakan struktur bagian bawah (*sub-structure*) yang berfungsi menyalurkan beban bangunan di atasnya ke lapisan tanah pendukung. Keberhasilan dalam merencanakan biaya pada elemen ini sangat krusial, mengingat ketidakpastian kondisi tanah dan kompleksitas geometri struktur bawah sering kali menjadi sumber utama pembengkakan anggaran (*cost overrun*).

3.5.1. Komponen dan Detail Struktur Pondasi

Secara teknis, struktur pondasi terdiri dari beberapa elemen utama yang saling terikat secara monolit. Komponen tersebut meliputi:

- Pondasi (*Footplat/Pile Cap*): Elemen pendukung yang mendistribusikan beban kolom ke tanah atau tiang pancang.
- Sloof: Struktur beton mendatar yang menghubungkan antar pondasi untuk mengikat kolom agar tidak mengalami pergeseran akibat beban lateral.
- Tulangan: Rangkaian besi beton yang berfungsi menahan gaya tarik pada struktur beton. Detail hubungan antar elemen ini harus dimodelkan dengan presisi tinggi dalam BIM guna menghindari kesalahan volume pada titik simpul pertemuan (*junction*) antara pondasi dan kolom.

3.5.2. Standar Perhitungan Volume Beton dan Penulangan

Perhitungan volume pada struktur pondasi di Indonesia umumnya mengacu pada standar teknis konstruksi yang mencakup dua aspek utama:

1. Volume Beton: Dihitung berdasarkan luasan penampang dikalikan panjang/tebal elemen. Dalam BIM, volume ini dihitung secara otomatis sebagai volume bersih (*net volume*) tanpa menyertakan volume tulangan besi.
2. Volume Penulangan: Dihitung berdasarkan panjang total batang besi sesuai dengan daftar tekuk besi (*Bar Bending Schedule/BBS*), kemudian dikalikan dengan berat jenis besi per meter lari berdasarkan standar diameter nominal (SNI 2052:2017).

Ketepatan perhitungan kedua aspek ini sangat bergantung pada interpretasi gambar detail potongan. Dalam metode konvensional, risiko *double counting* pada titik pertemuan antar elemen sering kali terjadi, sedangkan pada model BIM, sistem secara otomatis membedakan volume material yang bersinggungan.

3.5.3. Analisis *Material Waste* pada Pekerjaan Struktur Bawah

Material waste pada pekerjaan struktur bawah didefinisikan sebagai sisa material yang tidak terpasang akibat ketidakefisienan proses konstruksi. Faktor-faktor utama penyebabnya meliputi:

- Optimalisasi Pemotongan (*Cutting Waste*): Sisa potongan besi tulangan akibat panjang batang standar (12 meter) yang tidak sesuai dengan kebutuhan desain.
- Kelebihan Pengecoran: Kelebihan volume beton *ready mix* akibat perhitungan volume yang dilebihkan (*over-estimation*) atau ketidakakuratan dimensi bekisting di lapangan.
- Kesalahan Instalasi: Kebutuhan untuk melakukan pembongkaran dan perbaikan ulang akibat ketidaksesuaian posisi pondasi di lapangan dengan gambar rencana.

Penerapan BIM 5D membantu meminimalisir *waste* ini melalui simulasi *cutting plan* yang presisi sebelum material dipesan, sehingga jumlah material yang masuk ke lokasi proyek mendekati kebutuhan riil (*as-built quantity*) (Rizky E, dkk, 2024)

3.6 Akurasi dan Validasi Data Konstruksi

Akurasi estimasi biaya merupakan indikator utama keberhasilan manajemen proyek. Dalam konteks pembangunan gedung, akurasi didefinisikan sebagai tingkat kedekatan antara nilai estimasi biaya dengan realisasi biaya aktual di lapangan. Validasi data menjadi langkah kritis untuk memastikan bahwa model digital (BIM) maupun perhitungan manual memiliki basis referensi yang sama.

3.6.1. Faktor Penyebab Deviasi Estimasi Biaya

Deviasi atau selisih antara estimasi biaya dan biaya riil sering kali dipicu oleh faktor-faktor teknis dan prosedural sebagai berikut:

- Variabel Kondisi Lapangan: Perubahan kondisi tanah (seperti kedalaman tanah keras yang tidak terduga pada pekerjaan pondasi) sering kali tidak terakomodasi dalam estimasi awal.
- Keterbatasan Interpretasi Gambar 2D: Metode konvensional sangat bergantung pada kemampuan estimasi manusia dalam membaca gambar potongan. Ketidakakuratan dalam mengidentifikasi detail sambungan antar elemen (misalnya *overlapping* tulangan) menjadi penyebab utama selisih volume yang signifikan.
- Metode Perhitungan yang Tidak Konsisten: Penggunaan asumsi persentase sisa material (*waste factor*) yang tidak didasarkan pada data historis atau perhitungan teknis dapat menyebabkan estimasi biaya menjadi terlalu rendah (*under-estimate*) atau terlalu tinggi (*over-estimate*).
- Perubahan Desain (*Change Order*): Kurangnya koordinasi antara disiplin struktur dan arsitektur menyebabkan adanya perubahan di lapangan yang tidak tercermin dalam dokumen RAB awal.

3.6.2. Metode Perbandingan dan Validasi Estimasi

Untuk membuktikan bahwa estimasi berbasis BIM lebih akurat, diperlukan metode validasi yang sistematis. Proses ini umumnya dilakukan dengan membandingkan dua pendekatan secara *apple-to-apple*:

1. Ekstraksi Data: Menyiapkan data kuantitas dari model BIM (menggunakan *Revit Schedule*) dan data dari perhitungan konvensional (menggunakan *spreadsheet* manual berbasis gambar 2D).
2. Identifikasi Variabel: Memastikan bahwa definisi elemen yang dihitung adalah identik. Misalnya, batas perhitungan volume beton pondasi harus mencakup elemen yang sama pada kedua metode.
3. Analisis Deviasi: Menghitung persentase selisih (*variance*) antara kedua metode tersebut dengan rumus:

$$\text{Persentase Deviasi} = \left(\frac{\text{Volume}_{BIM} - \text{Volume}_{Konvensional}}{\text{Volume}_{BIM}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

4. Validasi Kontekstual: Melakukan pemeriksaan silang (*cross-check*) terhadap dokumen spesifikasi teknis untuk menentukan metode mana yang lebih mencerminkan realitas konstruksi di lapangan. Validasi ini penting untuk memastikan bahwa hasil yang lebih rendah atau lebih tinggi bukan sekadar angka, melainkan cerminan dari akurasi geometris.

3.7 Analisis Pekerjaan Struktur Bawah (Pondasi)

Struktur bawah merupakan bagian dari bangunan yang terletak di bawah permukaan tanah yang berfungsi untuk menyalurkan seluruh beban dari struktur atas ke lapisan tanah pendukung yang stabil. Pada proyek ini, analisis difokuskan pada dua tipe pondasi utama yang digunakan, yaitu pondasi dangkal berupa pondasi batu belah dan pondasi *footplate*. Pemodelan struktur bawah ini dilakukan secara detail menggunakan perangkat lunak *Autodesk Revit* untuk mendapatkan visualisasi penulangan dan volume yang presisi.

3.7.1 Pondasi Footplate (Pondasi Telapak)

Pondasi footplate atau pondasi telapak merupakan elemen beton bertulang yang dirancang untuk mendukung beban kolom tunggal. Penggunaan pondasi ini pada Gedung PLHUT Pangandaran menjadi titik kritis dalam pemodelan karena melibatkan konfigurasi penulangan yang cukup kompleks.

- Karakteristik Teknis: Mengingat lokasi proyek berada di zona rawan gempa, desain pondasi footplate memiliki dimensi dan densitas tulangan yang tinggi (*high-density rebar*). Hal ini sejalan dengan pernyataan (Wawan A, dkk, 2024) bahwa pemodelan detail pada elemen struktur bawah sangat krusial untuk mengidentifikasi potensi konflik antar tulangan (*clash detection*) yang sering tidak terlihat pada gambar 2D.
- Pemodelan BIM 5D: Dalam metode BIM 5D, elemen *footplate* dimodelkan sebagai objek parametrik yang mencakup informasi mutu beton dan spesifikasi besi tulangan. Menurut (Kania Z, dkk, 2023) ekstraksi volume melalui sistem otomatis ini dapat mereduksi selisih perhitungan yang sering terjadi pada metode manual akibat kesalahan interpretasi dimensi pondasi.
- Volume Pembesian: Fokus utama pada analisis ini adalah menghitung volume besi tulangan secara otomatis. (Fahrizal F, dkk, 2023) menekankan bahwa perhitungan berbasis model digital mampu memberikan hasil yang lebih efisien karena sistem menghitung panjang besi secara akurat berdasarkan kait (*hook*) dan tekukan (*bend*) sesuai standar teknis.

3.7.2 Pondasi Batu Belah (Pondasi Menerus)

Pondasi batu belah digunakan sebagai pondasi menerus di bawah dinding untuk menyalurkan beban merata. Analisis pada bagian ini difokuskan pada perhitungan volume material berupa batu belah, pasir urug, dan campuran mortar.

- Akurasi Volume: Secara konvensional, perhitungan pondasi batu belah sering kali menggunakan koefisien rata-rata yang kurang presisi. Dengan implementasi BIM, volume pondasi batu belah dihitung berdasarkan profil potongan melintang (*cross-section*) yang dimodelkan sepanjang garis as bangunan. (Rizky E, dkk, 2024) menyatakan bahwa penggunaan model digital

memberikan kepastian kuantitas material yang lebih transparan karena volume dihitung berdasarkan geometri riil di dalam perangkat lunak.

- Efisiensi Estimasi: Integrasi data pada pondasi batu belah mencakup volume galian dan urugan kembali. Menurut (Edison M, dkk, 2025). otomatisasi ini tidak hanya meningkatkan akurasi tetapi juga mempercepat durasi estimasi biaya pengerjaan struktur bawah secara keseluruhan dibandingkan metode manual yang rentan terhadap *human error*.

3.7.3 Integrasi Data Biaya Struktur Bawah

Seluruh kuantitas yang diekstraksi dari model pondasi (*Quantity Take-Off*) kemudian dikalikan dengan Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) yang berlaku untuk mendapatkan total rencana anggaran biaya (RAB). Sesuai dengan temuan (Farah S, 2025) pada objek studi yang sama, integrasi data ini penting untuk meminimalisir deviasi anggaran pada komponen pondasi yang sering menjadi sumber utama pembengkakan biaya proyek akibat ketidakpastian kondisi tanah dan kompleksitas penulangan.