

EVALUASI *QUANTITY TAKE-OFF* DAN ESTIMASI BIAYA BERBASIS *BUILDING INFORMATION MODELING* PADA STRUKTUR BAWAH JEMBATAN PULAU BALANG

¹⁾Muhammad Rifky Dimiko, ²⁾Reno Pratiwi, ³⁾Suheriah Mulia Devi
^{1,2,3)}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Balikpapan,
Balikpapan, Indonesia
¹⁾rdimiko@gmail.com, ²⁾reno.pratiwi@uniba-bpn.ac.id, ³⁾suheriah@uniba-bpn.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRAK
Riwayat Artikel : Diterima : 13 Juli 2026 Disetujui : 5 Agustus 2026 Kata Kunci : Autodesk Revit, Building Information Modeling, estimasi biaya, quantity take-off, struktur bawah jembatan.	Ketepatan quantity take-off menjadi bagian penting dalam penyusunan estimasi biaya proyek jembatan karena perbedaan kuantitas yang relatif kecil dapat menghasilkan selisih biaya yang besar. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi perbedaan volume beton, berat penulangan, dan estimasi biaya antara hasil perhitungan konsultan dan quantity take-off berbasis Building Information Modeling pada pekerjaan struktur bawah Proyek Pembangunan Duplikasi Jembatan Pulau Balang Bentang Pendek. Elemen yang dianalisis meliputi pile cap, abutmen, dan pier. Penelitian menggunakan metode deskriptif komparatif dengan pendekatan studi kasus. Model dikembangkan menggunakan Autodesk Revit 2025 berdasarkan Detail Engineering Design dan gambar penulangan. Model diklasifikasikan setara Level of Development 350 untuk tujuan quantity take-off desain dan divalidasi melalui pemeriksaan bentuk, dimensi, elevasi, material, serta konfigurasi tulangan terhadap dokumen proyek. Volume dan berat material dari model dikalikan dengan harga satuan pekerjaan yang sama dengan perhitungan konsultan. Persentase deviasi dihitung dengan menggunakan hasil konsultan sebagai nilai pembanding. Hasil penelitian menunjukkan volume beton berbasis BIM sebesar 7.856,61 m³ dan volume konsultan sebesar 7.980,50 m³, dengan deviasi 123,89 m³ atau 1,552%. Berat penulangan berbasis BIM sebesar 1.288.896,49 kg dan hasil konsultan sebesar 1.323.863,47 kg, dengan deviasi 34.966,98 kg atau 2,64%. Estimasi biaya berbasis BIM sebesar Rp106.501.240.602,40, sedangkan estimasi konsultan sebesar Rp108.425.279.653,20. Selisih estimasi mencapai Rp1.924.039.050,80 atau 1,775%. Nilai tersebut merupakan selisih estimasi dan belum menunjukkan penghematan aktual karena belum dibandingkan dengan as-built quantity serta biaya akhir proyek. Hasil quantity take-off BIM juga bergantung pada kelengkapan pemodelan kait, panjang penyaluran, sambungan lewatan, tulangan tambahan, dan elemen konstruktif lainnya. Penelitian menunjukkan bahwa BIM dapat digunakan sebagai alat verifikasi kuantitas dan estimasi biaya, tetapi hasilnya tetap memerlukan audit model dan pemeriksaan terhadap dokumen teknis.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History : Received : Jul 13, 2026 Accepted : Aug 5, 2026	<i>Quantity take-off accuracy is essential in bridge project cost estimation because relatively small quantity differences can generate substantial cost deviations. This study evaluates</i>

Keywords:

Autodesk Revit, Building Information Modeling, bridge substructure, cost estimation, quantity take-off

differences in concrete volume, reinforcement weight, and cost estimates between the consultant's calculations and Building Information Modeling-based quantity take-off for the substructure works of the Short-Span Pulau Balang Bridge Duplication Project. The analyzed elements comprise pile caps, abutments, and piers. A comparative descriptive method with a case study approach was employed. The model was developed using Autodesk Revit 2025 based on the Detail Engineering Design and reinforcement drawings. The model was classified as equivalent to Level of Development 350 for design quantity take-off and was validated by checking its geometry, dimensions, elevations, materials, and reinforcement configurations against the project documents. Model-derived quantities were multiplied by the same unit rates used in the consultant's estimate. Relative deviations were calculated using the consultant's quantities as the reference values. The BIM-based concrete volume was $7,856.61 \text{ m}^3$, compared with the consultant's volume of $7,980.50 \text{ m}^3$, resulting in a deviation of 123.89 m^3 or 1.552%. The BIM-based reinforcement weight was $1,288,896.49 \text{ kg}$, compared with $1,323,863.47 \text{ kg}$ in the consultant's calculation, resulting in a deviation of $34,966.98 \text{ kg}$ or 2.64%. The BIM-based cost estimate was IDR 106,501,240,602.40, whereas the consultant's estimate was IDR 108,425,279,653.20. The estimated difference was IDR 1,924,039,050.80 or 1.775%. This value represents an estimated difference rather than actual savings because it has not been verified against as-built quantities or final project costs. The reliability of BIM-based quantity take-off also depends on the completeness of hooks, development lengths, lap splices, additional reinforcement, and other construction details represented in the model. The findings indicate that BIM can support quantity and cost verification, although model auditing and technical document checking remain necessary.

1. PENDAHULUAN

Pembangunan jalan dan jembatan membutuhkan perencanaan biaya yang akurat karena kesalahan dalam menghitung kuantitas pekerjaan dapat memengaruhi kebutuhan material dan nilai anggaran proyek. Perhitungan kuantitas pada proyek konstruksi masih banyak dilakukan dengan membaca gambar dua dimensi dalam *Detail Engineering Design* (DED), menguraikan setiap elemen menjadi bentuk geometris, kemudian menghitungnya menggunakan lembar kerja digital. Proses tersebut sangat bergantung pada ketelitian pengguna serta berisiko menimbulkan kesalahan pembacaan dimensi, pengulangan perhitungan, pembulatan, dan ketidakkonsistenan ketika terjadi perubahan desain. Perbedaan metode pengambilan kuantitas juga dapat menghasilkan nilai estimasi biaya yang berbeda meskipun menggunakan dokumen desain dan harga satuan yang sama.

Building Information Modeling (BIM) menawarkan pendekatan berbasis model digital yang mengintegrasikan bentuk geometris dengan informasi teknis setiap elemen konstruksi. Pada BIM lima dimensi atau BIM 5D, model tiga dimensi dihubungkan dengan kuantitas pekerjaan dan informasi biaya sehingga perubahan geometri dapat diperbarui secara langsung pada *quantity take-off* dan estimasi biaya. Penerapan BIM 5D dapat meningkatkan keterlacakan perhitungan karena setiap nilai kuantitas dapat dihubungkan dengan objek yang dimodelkan. Namun, keberhasilan penerapannya tetap dipengaruhi oleh konsistensi klasifikasi objek, integrasi data biaya, kompetensi pengguna, dan kualitas informasi yang terkandung dalam model (Aragó et al., 2021). Perbandingan antara BIM dan metode dua dimensi juga menunjukkan bahwa produktivitas dan ketelitian *quantity take-off* tidak hanya ditentukan oleh perangkat lunak, tetapi juga oleh tingkat detail, kejelasan

informasi, dan prosedur pemeriksaan model (Wahab & Wang, 2022).

Keakuratan *quantity take-off* berbasis BIM tidak dapat diasumsikan secara otomatis hanya karena kuantitas dihasilkan oleh perangkat lunak. Hasil perhitungan sangat bergantung pada geometri, informasi semantik, aturan pengukuran, dan kelengkapan elemen yang dimodelkan. Model yang tidak mencakup seluruh komponen pekerjaan dapat menghasilkan kuantitas yang lebih rendah daripada kebutuhan sebenarnya. Liu et al. (2022) menunjukkan bahwa proses audit terhadap kelengkapan dan kebenaran informasi model diperlukan agar kuantitas yang dihasilkan sesuai dengan aturan pengukuran. Valinejadshoubi et al. (2024) juga menegaskan bahwa kualitas model merupakan faktor penting dalam ketepatan *quantity take-off*. Oleh karena itu, hasil BIM perlu divalidasi terhadap dokumen desain dan ditelusuri berdasarkan setiap elemen sebelum digunakan sebagai dasar evaluasi biaya.

Penerapan BIM pada infrastruktur jembatan dikenal sebagai *Bridge Information Modeling* atau BrIM. Pendekatan ini memungkinkan informasi geometri, material, biaya, pelaksanaan, dan pengelolaan jembatan ditempatkan dalam lingkungan digital yang terintegrasi. BrIM berpotensi mendukung pengambilan keputusan dan pengelolaan biaya sepanjang siklus hidup infrastruktur. Meskipun demikian, penelitian BrIM masih banyak diarahkan pada integrasi informasi, inspeksi, keberlanjutan, dan biaya siklus hidup, sedangkan kajian empiris mengenai validasi *quantity take-off* beton dan tulangan pada struktur bawah jembatan masih perlu dikembangkan (Jrade et al., 2023). Kompleksitas geometri serta susunan tulangan pada *pile cap*, abutmen, dan *pier* membuat ketepatan pemodelan menjadi lebih penting dibandingkan pada elemen yang memiliki bentuk sederhana. Kajian terbaru menunjukkan bahwa pemodelan parametrik dan forward design pada proyek jembatan dapat memperbaiki aliran informasi, integrasi analisis, dan pengendalian biaya. Manfaat tersebut tetap memerlukan standar pertukaran data dan struktur informasi yang sesuai dengan karakteristik infrastruktur jembatan (Wu et al., 2025).

Beberapa penelitian di Indonesia telah membandingkan kuantitas hasil BIM dengan

perhitungan konvensional. Sadad et al. (2022) menemukan perbedaan volume sebesar 3,335% pada pekerjaan *pile cap* dan 1,527% pada dinding abutmen. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa interpretasi gambar dua dimensi dan geometri model tiga dimensi dapat menghasilkan kuantitas yang berbeda. Namun, penelitian sebelumnya umumnya terbatas pada satu elemen, satu kelompok material, atau hanya membandingkan volume tanpa menelusuri pengaruhnya terhadap biaya secara terpadu. Kajian yang membandingkan volume beton, berat tulangan, dan estimasi biaya secara bersamaan pada tiga elemen utama struktur bawah jembatan masih terbatas. Selain itu, nilai BIM yang lebih rendah sering disebut sebagai penghematan tanpa terlebih dahulu diverifikasi menggunakan kuantitas terpasang, laporan pemakaian material, atau biaya akhir proyek.

Proyek Pembangunan Duplikasi Jembatan Pulau Balang Bentang Pendek dipilih sebagai studi kasus karena memiliki struktur bawah dengan geometri dan konfigurasi penulangan yang beragam. Jembatan sepanjang kurang lebih 511 meter tersebut mendukung konektivitas Balikpapan, Kabupaten Penajam Paser Utara, dan kawasan Ibu Kota Nusantara. Struktur bawah yang dianalisis meliputi *pile cap*, abutmen, dan *pier*. Ketiga elemen tersebut menggunakan beton dan tulangan dalam jumlah besar sehingga perbedaan kuantitas dalam persentase yang relatif kecil dapat menimbulkan selisih estimasi biaya yang besar. Hasil perhitungan konsultan digunakan sebagai pembandingan karena menjadi kuantitas dan estimasi biaya yang tercantum dalam dokumen perencanaan proyek, sedangkan model BIM dikembangkan berdasarkan DED dan gambar detail penulangan yang sama.

Research gap penelitian ini terletak pada belum banyaknya kajian yang mengintegrasikan perbandingan volume beton, berat tulangan, dan estimasi biaya pada beberapa jenis struktur bawah jembatan sekaligus serta menelusuri kontribusi perbedaan berdasarkan kelompok elemen. Kebaruan penelitian terletak pada penerapan Autodesk Revit 2025 untuk membentuk kerangka verifikasi *quantity take-off* pada *pile cap*, abutmen, dan *pier*, menghubungkan hasil kuantitas dengan harga satuan yang sama, serta menempatkan

perbedaan nilai sebagai selisih estimasi atau potensi efisiensi, bukan sebagai penghematan biaya aktual. Pendekatan tersebut memungkinkan BIM dinilai sebagai alat pemeriksaan terhadap kuantitas dan estimasi biaya konsultan tanpa mengabaikan ketergantungan hasil terhadap kelengkapan dan validitas model.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menjawab tiga pertanyaan. Pertama, bagaimana perbedaan volume beton dan berat tulangan antara perhitungan konsultan dan *quantity take-off* berbasis BIM? Kedua, berapa besar selisih estimasi biaya yang dihasilkan oleh kedua metode ketika menggunakan harga satuan pekerjaan yang sama? Ketiga, elemen struktur bawah manakah yang memberikan kontribusi terbesar terhadap selisih estimasi biaya? Penelitian ini bertujuan membandingkan kuantitas dan estimasi biaya pekerjaan struktur bawah Jembatan Pulau Balang serta mengidentifikasi kontribusi selisih pada *pile cap*, abutmen, dan *pier*. Analisis dibatasi pada beton dan penulangan serta tidak mencakup waktu pengerjaan, kebutuhan tenaga kerja, realisasi pemakaian material, perubahan desain selama konstruksi, dan biaya akhir proyek. Oleh sebab itu, hasil penelitian digunakan untuk menilai potensi BIM sebagai alat verifikasi *quantity take-off*, bukan untuk menyatakan efektivitas biaya atau penghematan aktual di lapangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Struktur Bawah Jembatan

Struktur bawah jembatan berfungsi menerima beban dari struktur atas dan meneruskannya menuju fondasi serta tanah pendukung. Komponen yang menjadi fokus penelitian ini meliputi *pile cap*, abutmen, dan *pier*. Abutmen menopang ujung jembatan sekaligus menahan tekanan tanah, sedangkan *pier* menjadi tumpuan antara yang meneruskan beban struktur atas menuju fondasi. *Pile cap* mengikat kelompok tiang dan mendistribusikan beban dari abutmen atau *pier* menuju fondasi. Ketiga elemen tersebut memiliki geometri, dimensi, perpotongan, dan konfigurasi penulangan yang berbeda. Karakteristik tersebut memengaruhi tingkat kesulitan pemodelan dan

pengambilan kuantitas material (Nahla et al., 2022).

Pada struktur bawah jembatan, ketepatan *quantity take-off* tidak hanya ditentukan oleh ukuran utama elemen. Perhitungan beton juga dipengaruhi oleh perubahan penampang, kemiringan, bukaan, bagian yang saling berpotongan, dan batas antarelelemen. Perhitungan tulangan memiliki kompleksitas lebih tinggi karena mencakup diameter, jumlah, jarak, panjang batang, kait, tekukan, panjang penyaluran, sambungan lewatan, *rebar coupler*, serta tulangan tambahan. Oleh karena itu, perbedaan kuantitas antara model BIM dan perhitungan konsultan perlu ditelusuri berdasarkan elemen dan detail yang dimodelkan, bukan hanya melalui perbandingan nilai total.

2.2 BIM 5D dan Pengambilan Kuantitas Berbasis Model

BIM 5D menghubungkan model tiga dimensi dengan kuantitas pekerjaan dan informasi biaya. Hubungan tersebut memungkinkan volume, berat material, dan biaya ditelusuri kembali pada objek yang membentuknya. Berbeda dari perhitungan berbasis gambar dua dimensi, *quantity take-off* atau QTO berbasis BIM menggunakan geometri dan atribut objek sebagai sumber perhitungan.

Penerapan BIM 5D membutuhkan konsistensi antara klasifikasi elemen, parameter material, aturan pengukuran, kode pekerjaan, dan harga satuan. Aragó et al. (2021) dan Banihashemi et al. (2022) menunjukkan bahwa manfaat BIM 5D dipengaruhi oleh struktur data serta integrasi antara objek model, klasifikasi pekerjaan, dan basis data biaya. Pishdad & Onungwa (2024) menambahkan bahwa penggunaan kode klasifikasi yang konsisten diperlukan untuk mengintegrasikan estimasi, pemantauan, pengendalian biaya, arus kas, dan pembayaran proyek. Pendekatan tersebut berkembang menuju 5D BIM berbasis data yang mengintegrasikan objek, kuantitas, klasifikasi pekerjaan, informasi biaya, dan rantai pasok konstruksi dalam satu alur informasi yang dapat ditelusuri (Pishdad, 2026).

QTO berbasis BIM dapat meningkatkan keterlacakan dan mempercepat pembaruan kuantitas ketika terjadi perubahan desain. Namun, otomatisasi tidak menjamin ketepatan hasil apabila model belum lengkap atau tidak

mengikuti aturan pemodelan yang konsisten. Alathamneh et al. (2024) mengidentifikasi kualitas model, interoperabilitas, prosedur pemodelan, dan kompetensi pengguna sebagai faktor penting dalam penerapan BIM-QTO. Wahab & Wang (2022) juga menegaskan bahwa keunggulan BIM dibandingkan metode dua dimensi dipengaruhi oleh tingkat detail, kejelasan informasi, dan prosedur pemeriksaan. Tinjauan literatur terbaru juga menunjukkan bahwa standardisasi, interoperabilitas, integrasi perangkat biaya, dan kualitas data masih menjadi persoalan utama dalam penerapan 5D BIM untuk estimasi dan manajemen biaya (Cassandro et al., 2025).

Pada penelitian ini, Autodesk Revit 2025 digunakan untuk memodelkan *pile cap*, abutmen, pier, dan penulangannya. Geometri elemen dibentuk menggunakan objek parametrik dan *family*, sedangkan tulangan dimodelkan melalui fitur *rebar*. Volume beton dan berat tulangan diperoleh melalui fitur *schedule*. Ketepatan hasil tetap bergantung pada kesesuaian bentuk, dimensi, material, parameter, dan detail tulangan dengan DED. Dokumentasi teknis Revit 2025 menjelaskan bahwa fitur *schedule/quantities* dan *material takeoff* dapat digunakan untuk memilih parameter, memfilter, mengelompokkan, memformat, serta menjumlahkan kuantitas dan biaya material yang tersimpan dalam model (Autodesk, 2025).

2.3 Level of Development dan Level of Information Need

Level of Development atau LOD menunjukkan tingkat keandalan geometri dan informasi suatu elemen untuk penggunaan tertentu. LOD tidak hanya menggambarkan banyaknya detail visual, tetapi menentukan sejauh mana bentuk, ukuran, lokasi, orientasi, dan informasi elemen dapat dipercaya. Model yang memadai untuk visualisasi belum tentu memiliki informasi yang cukup untuk menghasilkan QTO.

LOD 300 menunjukkan bahwa bentuk, ukuran, lokasi, dan orientasi elemen telah ditentukan sehingga dapat digunakan untuk pengukuran berbasis model. LOD 350 menambahkan hubungan dan pertemuan antarelemen. Tingkat ini penting pada struktur bawah jembatan karena volume beton dapat dipengaruhi oleh perpotongan antara *pile cap*,

kolom *pier*, kepala *pier*, dan bagian abutmen. LOD 400 memuat detail yang lebih mendekati kebutuhan fabrikasi dan pemasangan. Tingkat tersebut diperlukan apabila model tulangan digunakan untuk menghitung kait, tekukan, panjang penyaluran, sambungan lewatan, *coupler*, dan tulangan tambahan.

LOD perlu dilengkapi dengan *Level of Information Need* atau LOIN. Kebutuhan informasi ditetapkan berdasarkan tujuan penggunaan model dan meliputi informasi geometris, alfanumerik, serta dokumentasi pendukung. Akanbi & Zhang (2021) menunjukkan bahwa informasi estimasi biaya tidak seluruhnya tersimpan dalam geometri model karena sebagian terdapat dalam spesifikasi teknis. Oleh karena itu, pemeriksaan QTO harus mencakup model, DED, gambar detail, dan spesifikasi pekerjaan.

Dalam penelitian ini, kebutuhan informasi beton mencakup bentuk, dimensi, lokasi, material, dan batas perpotongan elemen. Kebutuhan informasi tulangan meliputi diameter, bentuk batang, panjang, jumlah, jarak, selimut beton, kait, tekukan, panjang penyaluran, sambungan lewatan, *coupler*, dan tulangan tambahan. Apabila sebagian detail tersebut belum dimodelkan, berat tulangan yang dihasilkan harus dinyatakan sebagai kuantitas sesuai cakupan model, bukan kebutuhan material final.

2.4 Kualitas Model BIM

Kualitas model menunjukkan kesesuaian model dengan tujuan penggunaannya. Model yang terlihat lengkap secara visual belum tentu menghasilkan kuantitas yang akurat. Dalam konteks QTO, kualitas model mencakup:

1. kelengkapan seluruh elemen dan perubahan geometrinya;
2. kesesuaian bentuk, dimensi, lokasi, dan elevasi dengan DED;
3. kelengkapan material, kode, nama, diameter, dan parameter kuantitas;
4. tidak adanya objek ganda, tumpang tindih, celah, atau kesalahan perpotongan; dan
5. kesesuaian klasifikasi objek dengan item pekerjaan dan aturan pengukuran.

Valinejadshoubi et al. (2024) menunjukkan bahwa ketepatan QTO dipengaruhi oleh kualitas dan konsistensi data model. Pemeriksaan ketelitian perlu dilakukan sebelum kuantitas

diekstraksi dan digunakan untuk estimasi biaya. Liu et al. (2022) juga menempatkan audit integritas model sebagai tahap penting karena perbedaan gaya pemodelan dan informasi semantik dapat menghasilkan kuantitas yang berbeda.

Konsistensi klasifikasi juga menentukan ketepatan hubungan antara objek BIM dan item biaya. Chen et al. (2022) menunjukkan bahwa pemetaan kode antara elemen BIM dan daftar kuantitas dapat mengurangi kehilangan informasi serta mencegah objek ditempatkan pada item pekerjaan yang salah. Setiap elemen karena itu perlu memiliki identitas yang menghubungkan jenis, lokasi, material, kuantitas, dan harga satuan.

Kualitas model tulangan perlu diperiksa secara khusus karena batang yang tidak dimodelkan tidak akan terbaca dalam *schedule*. Selisih berat tulangan dapat berasal dari perbedaan panjang batang, pembulatan, kait, panjang penyaluran, sambungan lewatan, *coupler*, tulangan konstruktif, atau faktor sisa material. Nilai BIM yang lebih rendah karena itu tidak dapat langsung dinyatakan sebagai kelebihan perhitungan konsultan atau material yang dapat dihemat.

Pemeriksaan juga dilakukan terhadap *family* yang digunakan. Pemeriksaan tersebut mencakup satuan, kategori objek, parameter dimensi, material, titik acuan, orientasi, dan perilaku objek dalam model utama. Kesalahan kategori atau parameter dapat menyebabkan elemen tidak terbaca, dihitung ganda, atau dikelompokkan ke dalam item pekerjaan yang tidak sesuai.

2.5 Validasi Quantity Take-Off dan Estimasi Biaya

Validasi QTO merupakan proses memastikan bahwa kuantitas berasal dari model yang lengkap, benar, dan sesuai dengan aturan pengukuran. Model BIM belum tentu memuat seluruh informasi yang diperlukan untuk menghitung pekerjaan. Liu et al. (2022) menunjukkan bahwa QTO dipengaruhi oleh geometri, informasi semantik, dan kesesuaiannya dengan standar pengukuran. Alathamneh et al. (2024) juga menegaskan bahwa prosedur audit diperlukan karena variasi cara pemodelan dapat menghasilkan keluaran kuantitas yang berbeda.

Validasi dalam penelitian ini dilakukan melalui tahapan berikut:

1. mencocokkan bentuk, dimensi, lokasi, dan elevasi model dengan DED;
2. membandingkan jumlah objek model dengan daftar elemen proyek;
3. memeriksa material, kode, dan parameter melalui model serta *schedule*;
4. memeriksa detail penulangan yang memengaruhi panjang dan berat;
5. menghitung kembali sampel elemen secara manual; dan
6. menelusuri selisih berdasarkan jenis dan lokasi elemen.

Pemeriksaan tidak cukup dilakukan terhadap nilai total karena kelebihan kuantitas pada satu elemen dapat tertutup oleh kekurangan pada elemen lainnya. Chen et al. (2022) merekomendasikan pengelompokan objek menggunakan kode yang konsisten agar kuantitas dapat ditelusuri berdasarkan elemen dan item pekerjaan. Valinejadshoubi et al. (2024) juga menunjukkan pentingnya visualisasi dan pemeriksaan hasil QTO pada tingkat objek sebelum kuantitas dijumlahkan.

Ketepatan estimasi ditentukan oleh kuantitas model dan data harga satuan. Data biaya perlu menjelaskan tahun dasar harga serta komponen bahan, tenaga kerja, peralatan, biaya umum, keuntungan, dan pajak yang diperhitungkan. Pishdad & Onungwa (2024) menegaskan bahwa integrasi BIM 5D memerlukan struktur klasifikasi dan basis data biaya yang konsisten sepanjang proses estimasi dan pengendalian biaya.

Dalam penelitian ini, hasil BIM dan perhitungan konsultan menggunakan harga satuan yang sama. Selisih biaya dengan demikian terutama berasal dari perbedaan kuantitas. Nilai BIM yang lebih rendah hanya menunjukkan selisih estimasi atau potensi efisiensi. Penghematan aktual baru dapat dinilai melalui perbandingan dengan kuantitas terpasang, penggunaan material, dan biaya akhir proyek.

2.6 Kerangka Konseptual Penelitian

Kerangka konseptual penelitian menempatkan kebutuhan informasi sebagai dasar penentuan tingkat pengembangan elemen. LOD memengaruhi kelengkapan geometri dan informasi semantik. Kelengkapan tersebut

menentukan kualitas model dan ketepatan QTO. Kuantitas yang telah divalidasi kemudian dihubungkan dengan harga satuan untuk menghasilkan estimasi biaya.

Hubungan antarkonsep dirumuskan sebagai berikut:

Kebutuhan informasi → LOD elemen → kualitas model → validasi QTO → kuantitas beton dan tulangan → harga satuan → estimasi biaya → analisis selisih per elemen

Kerangka tersebut menunjukkan bahwa perangkat lunak bukan satu-satunya faktor yang menentukan ketepatan estimasi. Hasil BIM juga dipengaruhi oleh kelengkapan detail, konsistensi parameter, aturan pemodelan, prosedur validasi, dan kesamaan dasar pengukuran.

Penelitian BIM-QTO telah berkembang dari perbandingan kuantitas menuju otomatisasi, audit kualitas model, integrasi klasifikasi, dan pengendalian biaya. Pada sektor infrastruktur, BIM juga mulai digunakan untuk mendukung pengelolaan informasi sepanjang siklus hidup. Wei et al. (2021) menunjukkan bahwa penerapan BIM pada proyek jembatan mencakup desain, konstruksi, inspeksi, dan pemeliharaan, tetapi masih menghadapi masalah standardisasi dan interoperabilitas data. Belcher & Abraham (2023) serta Castañeda et al. (2024) menemukan bahwa QTO dan estimasi biaya merupakan penggunaan penting BIM pada infrastruktur transportasi, tetapi integrasi informasi antartahap proyek masih perlu diperkuat.

2.7 State of the Art dan Posisi Penelitian

Tabel 1. State of the Art Penelitian BIM, Quantity Take-Off, dan Estimasi Biaya

Peneliti	Fokus penelitian	Kontribusi utama	Celah terhadap penelitian ini
Akanbi & Zhang (2021)	Ekstraksi informasi spesifikasi untuk estimasi biaya	Menghubungkan informasi spesifikasi dengan data biaya	Tidak membahas QTO struktur bawah jembatan
Wei et al. (2021)	BIM dan GIS pada proyek jembatan	Memetakan penerapan BIM sepanjang siklus hidup jembatan	Tidak berfokus pada validasi beton dan tulangan
Liu et al. (2022)	QTO berbasis model pengetahuan	Mengintegrasikan informasi semantik dan aturan pengukuran	Belum diterapkan pada detail tulangan jembatan
Chen et al. (2022)	Perhitungan kuantitas berbasis data BIM	Mengembangkan pemetaan kode elemen dan item kuantitas	Objek tidak dikhususkan pada struktur bawah jembatan
Belcher & Abraham (2023)	BIM pada infrastruktur transportasi	Memetakan penerapan BIM sepanjang siklus proyek	Belum menelusuri deviasi kuantitas per elemen
Hussain et al. (2023)	BIM 5D dan pembengkakan biaya infrastruktur rel	Menunjukkan perlunya integrasi BIM 5D sepanjang siklus proyek	Tidak melakukan QTO konkret pada elemen struktur
Alathamneh et al. (2024)	Perkembangan BIM-QTO	Mengidentifikasi faktor kualitas model, interoperabilitas, dan kompetensi	Bersifat tinjauan dan tidak menguji objek jembatan
Castañeda et al. (2024)	BIM pada proyek jalan	Mengidentifikasi QTO dan estimasi biaya sebagai penggunaan penting BIM	Tidak memvalidasi model terhadap DED
Pishdad & Onungwa (2024)	BIM 5D untuk estimasi dan pengendalian biaya	Mengintegrasikan klasifikasi, biaya, kontrol, dan pembayaran	Tidak membahas beton dan tulangan per elemen
Valinejadshoubi et al. (2024)	QTO otomatis berketelitian tinggi	Mengintegrasikan ekstraksi kuantitas dan	Belum diterapkan pada struktur bawah jembatan

		pemeriksaan kualitas model	
Cassandro et al. (2024)	Integrasi data biaya terstruktur dan validasi model BIM	Mengembangkan arsitektur data biaya berbasis IFC serta prosedur semiotomatis untuk memeriksa konsistensi, keunikan, dan hubungan antara objek geometris dengan item biaya menggunakan <i>Information Delivery Specification</i>	Berfokus pada struktur data IFC dan validasi hubungan objek–biaya, tetapi belum membandingkan QTO beton dan tulangan pada struktur bawah jembatan dengan perhitungan konsultan.
Hussain et al. (2024)	Kerangka tata kelola BIM 5D untuk mengurangi pembengkakan biaya proyek kereta api	Mengembangkan kerangka konseptual yang mengintegrasikan BIM 5D, standar, kebijakan, pembagian tanggung jawab, kolaborasi, dan tata kelola biaya pada proyek infrastruktur kereta api	Bersifat konseptual dan belum menguji ketepatan QTO maupun selisih estimasi biaya secara empiris pada setiap elemen struktur bawah jembatan.
Cassandro et al. (2025)	Tinjauan komprehensif 5D BIM untuk estimasi dan manajemen biaya	Mengidentifikasi tema integrasi perangkat biaya, standarisasi, interoperabilitas, tantangan implementasi, dan kebutuhan kompetensi melalui analisis literatur Scopus dan Web of Science	Bersifat kajian lintas sektor dan belum menguji QTO beton, tulangan, dan biaya struktur bawah jembatan secara empiris.
Wu et al. (2025)	Parametric BIM dan forward design pada rekayasa jembatan	Menunjukkan manfaat pemodelan parametrik bagi kolaborasi, integrasi analisis, optimasi desain, pertukaran informasi, dan pengendalian biaya jembatan	Belum membandingkan volume beton, berat tulangan, dan estimasi biaya dengan data konsultan pada struktur bawah jembatan.

Hussain et al. (2023) menunjukkan bahwa penerapan BIM 5D pada infrastruktur masih banyak digunakan pada tahap estimasi dan belum terintegrasi secara konsisten sepanjang siklus proyek. Kajian tersebut memperlihatkan perlunya hubungan yang jelas antara model, perubahan desain, klasifikasi biaya, dan pengendalian anggaran.

Penelitian terdahulu di Indonesia lebih banyak membandingkan volume BIM dan metode konvensional pada satu elemen atau kelompok pekerjaan. Penelitian internasional telah mengembangkan audit semantik,

pemeriksaan kualitas model, otomatisasi QTO, dan integrasi basis data biaya. Namun, penerapannya pada struktur bawah jembatan dengan geometri dan konfigurasi tulangan yang kompleks masih terbatas.

Posisi penelitian ini berada pada integrasi volume beton, berat tulangan, dan estimasi biaya untuk *pile cap*, abutmen, dan *pier*. Hasil QTO dikelompokkan berdasarkan jenis elemen dan dihubungkan dengan harga satuan yang sama. Kontribusi penelitian bukan membuktikan penghematan aktual, tetapi menempatkan BIM sebagai alat verifikasi kuantitas serta

mengidentifikasi elemen yang memberikan kontribusi terbesar terhadap selisih estimasi biaya.

3. METODE

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif komparatif dengan pendekatan studi kasus untuk membandingkan *quantity take-off* dan estimasi biaya antara dokumen konsultan dan model *Building Information Modeling* (BIM). Penelitian dilakukan pada Proyek Pembangunan Duplikasi Jembatan Pulau Balang Bentang Pendek di Pantai Lango, Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur. Objek penelitian dibatasi pada pekerjaan beton dan penulangan *pile cap*, abutmen, dan *pier*. Analisis tidak mencakup kekuatan struktur, jadwal pelaksanaan, kebutuhan tenaga kerja, kuantitas terpasang, dan biaya akhir proyek. Hasil penelitian karena itu digunakan untuk menunjukkan selisih estimasi, bukan penghematan biaya aktual.

Data primer berupa dokumentasi kondisi proyek, sedangkan data sekunder meliputi *Detail Engineering Design* (DED), gambar detail struktur dan penulangan, Rencana Anggaran Biaya (RAB), Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP), serta rekapitulasi kuantitas konsultan. DED digunakan sebagai acuan bentuk, dimensi, lokasi, elevasi, material, dan konfigurasi tulangan. Hasil konsultan digunakan sebagai pembandingan karena merupakan dasar kuantitas dan estimasi biaya dalam dokumen perencanaan proyek.

Pemodelan dilakukan menggunakan Autodesk Revit 2025 dengan mengacu pada prinsip pengelolaan informasi ISO 19650-1:2018, proses pertukaran informasi ISO 19650-4:2022, konsep Level of Information Need ISO 7817-1:2024, dan spesifikasi LOD BIMForum. Model beton ditetapkan setara LOD 350 karena mencakup bentuk, dimensi, lokasi, material, serta hubungan dan perpotongan antarelemen. Model tulangan dikembangkan sesuai informasi pada DED untuk mendukung QTO, tetapi tidak diklaim sebagai LOD 400 apabila detail fabrikasi belum tersedia secara lengkap. Tulangan dimodelkan berdasarkan diameter, bentuk, jumlah, jarak, panjang, posisi, dan selimut beton. Kait, tekukan, panjang penyaluran, sambungan lewatan, coupler, dan

tulangan tambahan hanya dimasukkan apabila dinyatakan dalam gambar desain. Faktor sisa material atau waste tidak ditambahkan pada kuantitas Revit, kecuali telah terkandung dalam AHSP proyek. ISO 19650-4:2022 digunakan untuk mendukung pemeriksaan kualitas informasi pada setiap pertukaran data sebelum model dan hasil QTO digunakan dalam analisis (International Organization for Standardization, 2022).

Validasi model dilakukan dengan mencocokkan bentuk, dimensi, lokasi, elevasi, jumlah elemen, material, dan detail tulangan terhadap DED. Pemeriksaan juga mencakup kategori *family*, parameter dimensi, objek ganda, tumpang tindih, perpotongan elemen, dan keluaran *schedule*. Beberapa elemen *pile cap*, abutmen, dan *pier* dihitung kembali secara manual sebagai pemeriksaan silang. Model terlebih dahulu diperiksa oleh peneliti, kemudian diverifikasi oleh pemeriksa model. Ketidaksesuaian yang ditemukan diperbaiki sebelum kuantitas akhir digunakan.

Volume beton dan berat tulangan diperoleh melalui fitur *schedule* Autodesk Revit. Volume beton dinyatakan dalam meter kubik, sedangkan berat tulangan dinyatakan dalam kilogram. Data dikelompokkan berdasarkan *pile cap*, abutmen, dan *pier* agar sumber perbedaan dapat ditelusuri. Estimasi biaya menggunakan harga satuan dalam RAB dan AHSP proyek dengan tahun dasar harga 2023. Harga satuan yang sama diterapkan pada kuantitas BIM dan konsultan. Komponen biaya mengikuti cakupan AHSP, yaitu bahan, tenaga kerja, dan peralatan. Biaya umum, keuntungan, pajak, dan faktor kehilangan material tidak ditambahkan kembali apabila telah tercakup dalam harga satuan.

Estimasi biaya berbasis BIM dihitung dengan persamaan:

$$C_i = Q_i \times H_i$$

Keterangan:

C_i = estimasi biaya item pekerjaan ke-(i)

Q_i = kuantitas item pekerjaan ke-(i)

H_i = harga satuan item pekerjaan ke-(i)

Selisih absolut antara perhitungan konsultan dan BIM dihitung menggunakan persamaan:

$$S_i = K_i - B_i$$

Keterangan:

S_i = selisih absolut item pekerjaan ke-i

K_i = nilai hasil perhitungan konsultan

B_i = nilai hasil perhitungan BIM

Persentase selisih dihitung dengan menjadikan nilai konsultan sebagai dasar pembandingan:

$$P_i = \frac{(K_i - B_i)}{K_i} \times 100\%$$

Keterangan:

P_i = persentase selisih item pekerjaan ke-i

K_i = nilai hasil perhitungan konsultan

B_i = nilai hasil perhitungan BIM

Nilai persentase positif menunjukkan bahwa hasil konsultan lebih besar daripada BIM, sedangkan nilai negatif menunjukkan bahwa hasil BIM lebih besar. Seluruh perhitungan menggunakan angka penuh dan pembulatan hanya dilakukan pada penyajian akhir. Hasil selanjutnya dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi perbedaan volume beton, berat tulangan, dan estimasi biaya pada setiap kelompok elemen struktur bawah.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan dan Validasi Quantity Take-Off

Model struktur bawah Jembatan Pulau Balang dikembangkan menggunakan Autodesk Revit 2025 berdasarkan DED dan gambar detail

penulangan. Elemen yang dimodelkan meliputi *pile cap*, abutmen, dan *pier*. Geometri dibentuk melalui *family*, *reference plane*, *extrusion*, dan *blend*, sedangkan tulangan dimodelkan menggunakan fitur *rebar* berdasarkan diameter, bentuk, panjang, jumlah, jarak, dan selimut beton yang tercantum dalam gambar desain. Kuantitas beton dan tulangan dikeluarkan melalui fitur *schedule* setelah bentuk, dimensi, elevasi, dan susunan elemen diperiksa melalui tampilan denah, potongan, dan model tiga dimensi.

Validasi internal dilakukan melalui perhitungan ulang manual terhadap geometri beton dan detail tulangan yang digunakan dalam model. Hasil perhitungan ulang menunjukkan nilai yang sama dengan keluaran Autodesk Revit pada seluruh kelompok elemen. Dengan demikian, konsistensi antara keluaran Revit dan perhitungan ulang mencapai 100%. Validasi tersebut membuktikan bahwa rumus dan parameter yang digunakan pada model telah menghasilkan kuantitas yang konsisten dengan perhitungan ulang. Namun, validasi ini masih bersifat internal karena skripsi tidak mendokumentasikan audit model oleh ahli atau modeler independen.

Tabel 2. Validasi Internal Quantity Take-Off

Material	Elemen	Autodesk Revit	Perhitungan ulang	Selisih	Konsistensi
Beton	Pile cap	5.281,58 m ³	5.281,58 m ³	0,00 m ³	100%
Beton	Abutmen	365,11 m ³	365,11 m ³	0,00 m ³	100%
Beton	Pier	2.209,93 m ³	2.209,93 m ³	0,00 m ³	100%
Tulangan	Pile cap	567.132,10 kg	567.132,10 kg	0,00 kg	100%
Tulangan	Abutmen	87.335,08 kg	87.335,08 kg	0,00 kg	100%
Tulangan	Pier	634.429,31 kg	634.429,31 kg	0,00 kg	100%

Kesamaan tersebut tidak berarti bahwa model telah menggambarkan seluruh kebutuhan material aktual di lapangan. Keluaran Revit tetap terbatas pada elemen dan detail yang dimasukkan ke dalam model. Kait, sambungan lewatan, panjang penyaluran, rebar coupler, tulangan tambahan, toleransi konstruksi, dan faktor sisa material hanya akan terhitung apabila

telah dimodelkan atau tercakup dalam dasar perhitungan.

4.2 Perbandingan Volume Beton

Volume beton berdasarkan BIM sebesar 7.856,61 m³, sedangkan hasil konsultan sebesar 7.980,50 m³. Selisih total mencapai 123,89 m³ atau 1,552%. Perbandingan setiap kelompok elemen disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Volume Beton Berdasarkan Elemen

Elemen	Konsultan (m ³)	BIM (m ³)	Selisih (m ³)	Selisih (%)	Kesesuaian relatif (%)
Pile cap	5.364,55	5.281,58	82,97	1,547	98,453

Abutmen	371,01	365,11	5,90	1,590	98,410
Pier	2.244,94	2.209,93	35,01	1,560	98,440
Total	7.980,50	7.856,61	123,89	1,552	98,448

Abutmen menghasilkan persentase selisih tertinggi sebesar 1,590%, diikuti *pier* sebesar 1,560% dan *pile cap* sebesar 1,547%. Meskipun persentase *pile cap* lebih rendah, elemen tersebut menghasilkan selisih absolut terbesar, yaitu 82,97 m³, karena volume pekerjaannya paling besar. Hal ini menunjukkan bahwa prioritas pemeriksaan tidak cukup ditentukan oleh persentase deviasi, tetapi juga oleh besarnya kuantitas setiap elemen.

Perbedaan volume dapat berasal dari cara kedua metode merepresentasikan geometri. Perhitungan konsultan menguraikan elemen dari gambar dua dimensi menjadi beberapa bentuk geometris dan dapat melibatkan pembulatan dimensi. Revit menghitung volume berdasarkan objek tiga dimensi yang terbentuk dalam model, termasuk perubahan penampang dan pertemuan antarelemen. Meskipun demikian, nilai BIM yang lebih rendah tidak membuktikan bahwa hasil konsultan berlebihan karena belum dibandingkan dengan kuantitas terpasang.

Nilai *mean absolute percentage difference* volume beton dihitung dari rata-rata deviasi absolut ketiga elemen:

$$MAPD \text{ beton} = \frac{(1,547\% + 1,590\% + 1,560\%)}{3} = 1,565\%$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa rata-rata perbedaan volume beton pada tiga kelompok elemen sebesar 1,565%, dengan tingkat kesesuaian relatif rata-rata sebesar 98,435%.

4.3 Perbandingan Berat Penulangan

Berat tulangan berdasarkan BIM sebesar 1.288.896,49 kg, sedangkan hasil konsultan sebesar 1.323.863,47 kg. Selisih total mencapai 34.966,98 kg atau 2,641%. Pemeriksaan kembali terhadap data skripsi menunjukkan bahwa persentase selisih *pile cap* dan abutmen pada tabel analisis awal tertukar. Berdasarkan perhitungan menggunakan nilai konsultan sebagai penyebut, persentase yang benar disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Berat Tulangan Berdasarkan Elemen

Elemen	Konsultan (kg)	BIM (kg)	Selisih (kg)	Selisih (%)	Kesesuaian relatif (%)
Pile cap	587.752,76	567.132,10	20.620,66	3,508	96,492
Abutmen	89.106,89	87.335,08	1.771,81	1,988	98,012
Pier	647.033,81	634.429,31	12.604,50	1,948	98,052
Total	1.323.863,47	1.288.896,49	34.966,98	2,641	97,359

Pile cap menghasilkan selisih berat dan persentase deviasi terbesar. Selisih 20.620,66 kg pada elemen tersebut membentuk sekitar 58,97% dari total selisih berat tulangan. *Pier* berkontribusi sekitar 36,05%, sedangkan abutmen sekitar 5,07%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penelusuran detail penulangan perlu diprioritaskan pada *pile cap* dan *pier*.

Deviasi tulangan lebih tinggi daripada beton karena pemodelan tulangan melibatkan lebih banyak parameter. Berat batang dipengaruhi oleh diameter, jumlah, panjang, kait, tekukan, panjang penyaluran, dan sambungan. Revit hanya menghitung batang yang terdapat dalam model. Oleh karena itu, selisih 34.966,98 kg

tidak dapat dinyatakan sebagai kelebihan perhitungan konsultan atau material yang dapat dihilangkan. Perbedaan tersebut mungkin juga dipengaruhi oleh komponen penulangan yang belum dimodelkan, pembulatan panjang, serta faktor sisa material dalam perhitungan proyek.

MAPD berat tulangan dihitung sebagai berikut:

$$MAPD \text{ tulangan} = \frac{(3,508\% + 1,988\% + 1,948\%)}{3} = 2,482\%$$

MAPD tulangan yang lebih tinggi daripada MAPD beton menegaskan bahwa ketelitian QTO tulangan lebih sensitif terhadap kelengkapan dan tingkat detail model. Temuan

ini sejalan dengan Liu et al. (2022), Valinejadshoubi et al. (2024), dan Alathamneh et al. (2024), yang menempatkan kualitas geometri, informasi semantik, serta konsistensi pemodelan sebagai faktor utama dalam ketepatan QTO.

4.4 Perbandingan Estimasi Biaya

Harga satuan yang digunakan pada hasil BIM dan konsultan berasal dari AHSP 2023 yang sama, yaitu Rp10.814.300,00 per m³ untuk pekerjaan beton dan Rp16.710,00 per kg untuk pekerjaan penulangan. Karena harga satuannya

sama, perbedaan biaya terutama berasal dari perbedaan kuantitas.

Biaya beton berdasarkan BIM sebesar Rp84.963.780.208,00, sedangkan hasil konsultan sebesar Rp86.303.521.150,00. Selisih biaya beton mencapai Rp1.339.740.942,00 atau 1,552%. Biaya penulangan berdasarkan BIM sebesar Rp21.537.460.394,03, sedangkan hasil konsultan sebesar Rp22.121.758.503,28. Berdasarkan pengurangan kedua total tersebut, selisih biaya penulangan yang benar adalah Rp584.298.109,25 atau 2,641%.

Tabel 5. Rekapitulasi Estimasi Biaya Berdasarkan Elemen

Elemen	Biaya BIM	Biaya konsultan	Selisih biaya	Selisih (%)	Kesesuaian relatif (%)
Pile cap	Rp66.593.355.968,78	Rp67.835.201.732,61	Rp1.241.845.763,83	1,831	98,169
Abutmen	Rp5.407.765.565,26	Rp5.501.189.536,24	Rp93.423.970,98	1,698	98,302
Pier	Rp34.500.119.068,37	Rp35.088.888.384,43	Rp588.769.316,06	1,678	98,322
Total	Rp106.501.240.602,40	Rp108.425.279.653,20	Rp1.924.039.050,80	1,775	98,225

Catatan: penjumlahan selisih berdasarkan angka setiap elemen menghasilkan Rp1.924.039.050,87, sedangkan pengurangan dua nilai total menghasilkan Rp1.924.039.050,80. Perbedaan Rp0,07 berasal dari pembulatan angka pada rekapitulasi per elemen. Nilai total yang digunakan adalah hasil pengurangan langsung dua total biaya.

Pile cap memberikan kontribusi terbesar terhadap selisih estimasi biaya, yaitu sekitar 64,54%. *Pier* memberikan kontribusi sekitar 30,60%, sedangkan abutmen sekitar 4,86%. Dominasi *pile cap* berasal dari volume beton yang besar sekaligus deviasi tulangan yang lebih tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa audit QTO perlu memprioritaskan elemen dengan nilai pekerjaan besar karena perbedaan persentase yang kecil dapat menghasilkan selisih biaya yang signifikan.

MAPD biaya berdasarkan tiga kelompok elemen dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{MAPD biaya} &= \frac{(1,831\% + 1,698\% + 1,678\%)}{3} \\ &= 1,736\% \end{aligned}$$

MAPD sebesar 1,736% menunjukkan kedekatan antara estimasi BIM dan konsultan. Namun, ukuran ini hanya menggambarkan perbedaan antara dua hasil estimasi, bukan akurasi terhadap kondisi aktual. Hasil konsultan digunakan sebagai nilai pembanding karena menjadi dasar kuantitas dan biaya dalam dokumen proyek, bukan karena telah dibuktikan sebagai nilai aktual.

4.5 Pembahasan Kinerja BIM

Hasil penelitian menunjukkan bahwa QTO berbasis BIM memiliki tingkat kesesuaian relatif total sebesar 98,448% untuk beton, 97,359% untuk tulangan, dan 98,225% untuk biaya. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil kedua metode berdekatan, tetapi terdapat deviasi yang perlu ditelusuri menurut karakteristik elemennya. Deviasi beton relatif merata pada kisaran 1,547–1,590%, sedangkan deviasi tulangan lebih bervariasi pada kisaran 1,948–3,508%. Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa geometri beton lebih stabil dibandingkan pemodelan tulangan yang dipengaruhi oleh detail batang.

BIM memberikan manfaat sebagai alat verifikasi karena kuantitas dalam *schedule* dapat dihubungkan kembali dengan objek yang menghasilkan nilai tersebut. Kesalahan geometri atau parameter dapat diperbaiki pada model, kemudian kuantitas diperbarui secara otomatis. Perhitungan ulang manual yang menghasilkan nilai sama dengan Revit memperkuat konsistensi proses QTO dalam penelitian ini. Temuan tersebut mendukung konsep BIM 5D sebagai sistem yang menghubungkan objek, kuantitas, klasifikasi pekerjaan, dan harga satuan secara terstruktur.

Nilai biaya BIM yang lebih rendah sebesar Rp1.924.039.050,80 hanya menunjukkan selisih estimasi atau potensi efisiensi. Nilai tersebut belum dapat disebut penghematan aktual karena penelitian tidak menggunakan *as-built quantity*, laporan penggunaan material, perubahan desain selama konstruksi, maupun biaya akhir proyek. Selain itu, faktor sisa material, sambungan penulangan, dan kebutuhan tambahan di lapangan dapat meningkatkan kuantitas aktual.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Sadad et al. (2022), yang menemukan perbedaan antara QTO berbasis BIM dan perhitungan konvensional pada elemen struktur jembatan. Perbedaannya terletak pada ruang lingkup penelitian. Penelitian ini mengintegrasikan beton, tulangan, dan biaya pada tiga kelompok struktur bawah serta menambahkan pengukuran MAPD dan tingkat kesesuaian relatif per elemen. Hasil juga mendukung Pishdad & Onungwa (2024), yang menegaskan bahwa manfaat BIM 5D bergantung pada konsistensi hubungan antara elemen model, kuantitas, klasifikasi pekerjaan, dan data biaya.

4.6 Keterbatasan Analisis

Data skripsi hanya menyediakan rekapitulasi berdasarkan kelompok *pile cap*, abutmen, dan *pier*. Data kuantitas untuk setiap kode atau lokasi individual tidak disajikan secara terpisah sehingga sumber deviasi belum dapat ditelusuri sampai tingkat setiap lokasi elemen. Skripsi juga tidak mencatat waktu penyelesaian QTO untuk metode BIM dan konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini tidak menyimpulkan bahwa BIM lebih cepat atau membutuhkan tenaga kerja yang lebih sedikit.

Analisis sensitivitas terhadap perubahan LOD dan asumsi penulangan juga belum dilakukan karena skripsi hanya menggunakan satu model dan satu cakupan detail. Pengaruh penambahan kait, sambungan lewatan, *coupler*, tulangan tambahan, atau faktor sisa material belum dapat dihitung secara kuantitatif. Pemeriksaan silang yang tersedia berupa perhitungan ulang manual oleh peneliti dan belum merupakan audit oleh ahli atau modeler independen. Keterbatasan tersebut harus dipertimbangkan ketika hasil digunakan sebagai dasar evaluasi biaya.

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penerapan *Building Information Modeling* menggunakan Autodesk Revit 2025 menghasilkan *quantity take-off* yang berbeda dari perhitungan konsultan pada pekerjaan beton dan penulangan struktur bawah Jembatan Pulau Balang. Hasil BIM menunjukkan selisih volume beton sebesar 1,552%, berat tulangan sebesar 2,641%, dan estimasi biaya sebesar Rp1.924.039.050,80 atau 1,775%. *Pile cap* memberikan kontribusi terbesar terhadap selisih biaya karena memiliki kuantitas beton dan tulangan yang lebih besar dibandingkan abutmen dan *pier*.

BIM dapat digunakan sebagai alat verifikasi *quantity take-off* karena setiap kuantitas dapat ditelusuri berdasarkan geometri, material, dan elemen yang dimodelkan. Namun, nilai BIM yang lebih rendah hanya menunjukkan selisih estimasi atau potensi efisiensi, bukan penghematan aktual di lapangan. Ketepatan hasil tetap bergantung pada kesesuaian model dengan *Detail Engineering Design*, tingkat perkembangan model, kelengkapan detail penulangan, konsistensi parameter, dan proses validasi model.

5.2 Saran

Penelitian berikutnya perlu menetapkan dan memvalidasi *Level of Development* atau *Level of Information Need* secara lebih terperinci untuk setiap kelompok elemen beton dan tulangan. Pemeriksaan model sebaiknya melibatkan ahli struktur atau modeler BIM independen serta dilengkapi dokumentasi audit geometri, parameter, *family*, dan keluaran *schedule*.

Pemodelan tulangan perlu mencakup kait, tekukan, panjang penyaluran, sambungan lewatan, *rebar coupler*, tulangan tambahan, tulangan konstruktif, toleransi pemasangan, dan faktor sisa material. Analisis juga perlu disajikan sampai tingkat kode atau lokasi setiap *pile cap*, abutmen, dan *pier* agar sumber deviasi kuantitas dapat ditelusuri secara lebih tepat.

Penelitian lanjutan perlu membandingkan waktu pengerjaan, tingkat kesalahan, kebutuhan tenaga kerja, dan kemampuan pembaruan kuantitas antara BIM dan metode konvensional. Hasil estimasi juga perlu diverifikasi menggunakan *as-built quantity*, laporan

penggunaan material, perubahan desain selama konstruksi, serta biaya akhir proyek untuk mengetahui apakah selisih estimasi benar-benar menghasilkan efisiensi biaya aktual.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Akanbi, T., & Zhang, J. (2021). Design information extraction from construction specifications to support cost estimation. *Automation in Construction*, *131*, 103835. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103835>
- Alathamneh, S., Collins, W., & Azhar, S. (2024). BIM-based quantity takeoff: Current state and future opportunities. *Automation in Construction*, *165*, 105549. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105549>
- Aragó, A. B., Hernando, J. R., Saez, F. J. L., & Bertran, J. C. (2021). Quantity surveying and BIM 5D. Its implementation and analysis based on a case study approach in Spain. *Journal of Building Engineering*, *44*, 103234. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103234>
- Autodesk. (2025). *Create a Material Takeoff Schedule*. <https://help.autodesk.com/cloudhelp/2025/ENU/Revit-DocumentsPresent/files/GUID-9165A53A-C6B8-48EB-8F22-38DFDCD6496B.htm>
- Banihashemi, S., Khalili, S., Sheikhhoshkar, M., & Fazeli, A. (2022). Machine learning-integrated 5D BIM informatics: building materials costs data classification and prototype development. *Innovative Infrastructure Solutions*, *7*(3), 215. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00822-y>
- Belcher, E. J., & Abraham, Y. S. (2023). Lifecycle applications of building information modeling for transportation infrastructure projects. *Buildings*, *13*(9), 2300. <https://doi.org/10.3390/buildings13092300>
- Cassandro, J., Mirarchi, C., & Pavan, A. (2025). A Comprehensive Literature Review of 5D Building Information Modelling Using Latent Dirichlet Allocation Analysis. *Construction Innovation: Information, Process, Management*, *25*(7), 331–357. <https://doi.org/10.1108/CI-07-2024-0209>
- Cassandro, J., Mirarchi, C., Zanchetta, C., Pavan, A., & others. (2024). Enhancing accuracy in cost estimation: structured cost data integration and model validation. *Journal of Information Technology in Construction*, *29*, 1293–1325. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.058>
- Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R. F., Gómez-Cabrera, A., & Mejía, G. (2024). Building information modeling uses and complementary technologies in road projects: A systematic review. *Buildings*, *14*(3), 563. <https://doi.org/10.3390/buildings14030563>
- Chen, B., Jiang, S., Qi, L., Su, Y., Mao, Y., Wang, M., & Cha, H. S. (2022). Design and implementation of quantity calculation method based on BIM data. *Sustainability*, *14*(13), 7797. <https://doi.org/10.3390/su14137797>
- Hussain, O. A. I., Moehler, R. C., Walsh, S. D. C., & Ahiaga-Dagbui, D. D. (2023). Minimizing cost overrun in rail projects through 5D-BIM: a systematic literature review. *Infrastructures*, *8*(5), 93. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8050093>
- Hussain, O. A. I., Moehler, R. C., Walsh, S. D. C., & Ahiaga-Dagbui, D. D. (2024). Minimizing cost overrun in rail projects through 5D-BIM: a conceptual governance framework. *Buildings*, *14*(2), 478. <https://doi.org/10.3390/buildings14020478>
- International Organization for Standardization. (2022). *ISO 19650-4:2022 Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling (BIM)—Information Management Using Building Information Modelling—Part 4: Information Exchange* (Issue ISO 19650-4:2022). <https://www.iso.org/standard/78246.html>
- Jrade, A., Jalaei, F., Zhang, J. J., Jalilzadeh Eirdmoussa, S., & Jalaei, F. (2023). Potential integration of bridge information modeling and life cycle assessment/life cycle costing tools for infrastructure projects within construction 4.0: a review. *Sustainability*, *15*(20), 15049. <https://doi.org/10.3390/su152015049>

- <https://doi.org/10.3390/su152015049>
- Liu, H., Cheng, J. C. P., Gan, V. J. L., & Zhou, S. (2022). A knowledge model-based BIM framework for automatic code-compliant quantity take-off. *Automation in Construction*, 133, 104024. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104024>
- Nahla, A., Zainuddin, Z., & Suji'at, S. (2022). Perencanaan Abutment Jembatan Glendeng Kabupaten Tuban: Abutment Planning On Glendeng Bridge In Tuban Regency. *Jurnal Teknik Sipil*, 7(1), 71–89. <https://doi.org/10.56071/deteksi.v7i1.402>
- Pishdad, P. (2026). *5D Building Information Modeling: A Data-Driven Approach to Construction Supply Chain Integration*. John Wiley & Sons.
- Pishdad, P., & Onungwa, I. O. (2024). Analysis of 5D BIM for cost estimation, cost control and payments. *Journal of Information Technology in Construction*, 29, 525–548. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.024>
- Sadad, I., Jaya, F. H., & Januar, I. W. (2022). Implementasi BIM Take Off Quantity Material Struktur Abutment Jembatan terhadap Volume Rencana. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 7(2), 91–97. <https://doi.org/10.24967/teksis.v7i2.1960>
- Valinejadshoubi, M., Moselhi, O., Iordanova, I., Valdivieso, F., & Bagchi, A. (2024). Automated system for high-accuracy quantity takeoff using BIM. *Automation in Construction*, 157, 105155. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105155>
- Wahab, A., & Wang, J. (2022). Factors-driven comparison between BIM-based and traditional 2D quantity takeoff in construction cost estimation. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(2), 702–715. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2020-0823>
- Wei, J., Chen, G., Huang, J., Xu, L., Yang, Y., Wang, J., & Sadick, A.-M. (2021). BIM and GIS applications in bridge projects: A critical review. *Applied Sciences*, 11(13), 6207. <https://doi.org/10.3390/app11136207>
- Wu, S., Ramli, M. Z., Ngian, S. P., Qiao, G., & Jiang, B. (2025). Review on Parametric Building Information Modelling and Forward Design Approaches for Sustainable Bridge Engineering. *Discover Applied Sciences*, 7, 127. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06543-y>