

Minimalisasi *Waste Material* Pembesian Pada Pekerjaan Struktur Bawah Jembatan RC Slab Menggunakan *Building Information Modeling (BIM)*

Fefila Belva Gantari¹⁾, Anik Ratnaningsih²⁾

^{1, 2)} Universitas Jember, Jember, Jawa Timur

Email: 221910301033@mail.unej.ac.id¹⁾, anik.teknik@unej.ac.id^{2*)}

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v16i1.1349>

(Received: 21 January 2026 / Revised: 27 January 2025 / Accepted: 07 February 2026)

Abstrak

Proyek konstruksi sering menghasilkan *waste material*, yaitu material sisa yang tidak dapat langsung digunakan kembali tanpa perlakuan tambahan. Dari berbagai jenis material, besi tulangan sering menghasilkan sisa dalam jumlah yang cukup besar, hal ini disebabkan karena perubahan desain, kesalahan perencanaan, dan pemotongan yang tidak optimal. Untuk meminimalisasi *waste* tersebut, dilakukan optimasi penggunaan tulangan melalui pemodelan pada *Autodesk Revit* untuk menghasilkan *rebar schedule*, yang kemudian diolah menggunakan *Cutting Optimization Pro* untuk menentukan pola pemotongan paling efisien. Penelitian ini difokuskan pada pekerjaan struktur bawah Jembatan No.8 Proyek Jalan Tol Akses Patimban Paket 1. Hasil dari penelitian yaitu, *waste material* dapat ditekan hingga 3,55%, dengan rincian D13 sebesar 0%, D16 sebesar 0,46%, D19 sebesar 1,01%, dan D32 sebesar 2,08%. Total *waste cost* mencapai Rp138.364.599,96, dengan D32 sebagai penyumbang biaya terbesar. Pengelolaan sisa material dilakukan melalui strategi *recycle* dan *salvage* untuk mendukung efisiensi serta keberlanjutan konstruksi.

Kata kunci: *waste material, besi tulangan, minimalisasi, waste cost*

Abstract

Construction projects often generate waste material, which refers to leftover materials that cannot be reused without additional processing. Among various materials used, reinforcing steel (rebar) often produces a significant amount of waste due to design changes, planning errors, and suboptimal cutting processes. To minimize this waste, rebar usage is optimized through modeling in *Autodesk Revit* to produce a rebar schedule, which is then processed using *Cutting Optimization Pro* to determine the most efficient cutting pattern. This study focuses on the Substructure Work of Bridge No. 8 in the Patimban Access Toll Road Project Package 1. The results show that waste material can be reduced to 3.55%, with waste percentages of 0% for D13, 0.46% for D16, 1.01% for D19, and 2.08% for D32. The total waste cost reached Rp138,364,599.96, with D32 contributing the highest cost. Waste management was carried out through recycling and salvage strategies to support efficiency and construction sustainability.

Keywords: *waste material, reinforcing steel, minimization, waste cost*

1. Latar Belakang

Proyek konstruksi memiliki lima sumber daya yang harus terpenuhi yaitu pekerja, metode, alat, biaya, dan material (Korompot et al., 2024). Material merupakan bahan-bahan yang digunakan untuk membentuk struktural utama bangunan (Syarif et al., 2024) dan memiliki dampak signifikan terhadap biaya dan waktu pada sebuah proyek konstruksi, sehingga perlu adanya manajemen material yang optimal untuk meningkatkan efisiensi dan meminimalkan pemborosan (Bruantama & Pontan, 2023). Namun pada kenyataannya, proyek konstruksi sering menghasilkan *waste material* yaitu material yang sudah tidak dapat digunakan kembali yang dihasilkan dari proses konstruksi, perbaikan, atau perubahan serta suatu ketidaksengajaan yang tidak dapat langsung dipergunakan pada tempat tersebut tanpa adanya suatu perlakuan lagi (Korompot et al., 2024).

Waste material dalam proyek konstruksi dapat berdampak pada biaya proyek, karena material menyumbang 40%-60% dari total biaya proyek (Pratama et al., 2023). Besi tulangan merupakan salah satu material yang sering menghasilkan sisa dalam jumlah yang cukup besar. Hal ini terjadi karena beberapa faktor, seperti perubahan desain, kesalahan dalam perencanaan, dan pemotongan besi yang tidak optimal (Novita et al., 2022). Jika tidak dikelola dengan baik, *waste material* besi tulangan ini dapat memberikan kerugian bagi Perusahaan dan memengaruhi kinerja proyek (Beatrix, 2021; Alexandra & Susilowati, 2022)

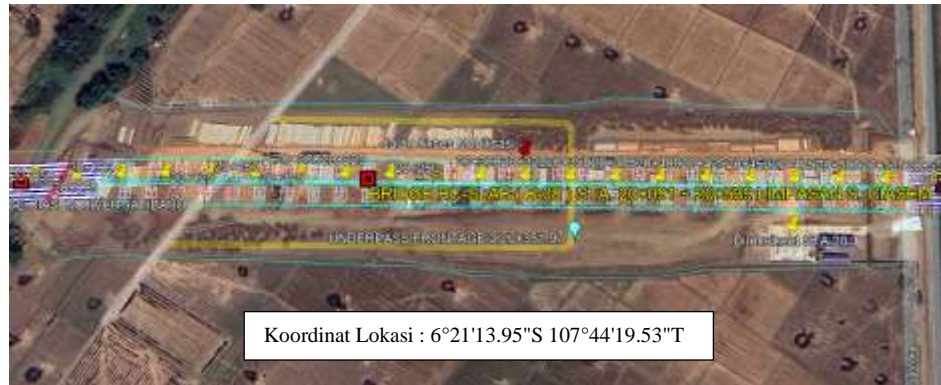
Salah satu cara efektif untuk meminimalisir dari terbentuknya *waste material* besi tersebut adalah dengan mengoptimalkan penggunaannya. Pengoptimalan dilakukan dengan memanfaatkan penggunaan *Building Information Modeling* (BIM) yaitu *Autodesk revit* untuk melakukan pemodelan penulangan yang nantinya akan memberikan sebuah *output* berupa *rebar schedule* (Zahro et al., 2021), akan tetapi volume yang ada pada *rebar schedule* akan memiliki perbedaan dengan volume yang ada pada DED karena perbedaan pengaturan tulangan bending dan *hook*, sehingga kesalahan akan lebih dari 0% (Muharani et al., 2020). Tahapan selanjutnya yaitu melakukan optimasi dengan menggunakan *software cutting optimization pro* yang memberikan hasil pola pemotongan yang optimal dan nilai dari *waste material* (Pratama et al., 2023). *Software* ini juga dapat menyediakan data mengenai material besi yang tersedia di lapangan sehingga untuk pengendalian material menjadi lebih mudah dan efisien (Astatiani et al., 2025). Hasil yang diberikan, dari proses optimasi ini akan menjadikan perencanaan dan pelaksanaan pemotongan tulangan menjadi lebih tepat sasaran dan mengurangi kesalahan pada saat proses fabrikasi (Kurniawan & Ujianto, 2023).

Pada pekerjaan struktur bawah Jembatan RC Slab No. 8 Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, khususnya pada *pier* jembatan, masih ditemukan *waste material pembesian* yang cukup signifikan akibat kesalahan pemotongan, pemotongan yang tidak optimal, dan sisa material yang masih dapat digunakan kembali untuk elemen struktur lainnya, dengan persentase waste awal mencapai 17% pada pekerjaan *pilecap*, sehingga dalam penelitian ini akan mengkaji stuktur bawah secara keseluruhan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa banyak *waste material* setelah dilakukannya minimalisasi dan kerugian akibat *waste* tersebut (*waste cost*) serta mengetahui pengelolaan *waste material* yang masih tersisa.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian berfokus pada Jembatan RC Slab No. 8 proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1. Objek penelitian ini berada di Desa Mandalawangi, Kecamatan Sukasari, Kabupaten Subang, Jawa Barat dan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Lokasi penelitian

2.2 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber seperti dokumen perusahaan dan jurnal atau literatur lainnya. Data sekunder yang diperlukan dalam penelitian ini adalah data *waste material* di lokasi, *shop drawing*, dan peraturan mengenai baja tulangan seperti Badan Standardisasi Nasional, 2017 serta data mengenai toleransi pabrikasi.

Pada Jembatan RC Slab No. 8 Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, terdapat pekerjaan struktur atas dan struktur bawah. Pekerjaan struktur bawah yaitu pada *pier* jembatan terbagi menjadi beberapa elemen struktural di antaranya terdapat pondasi, *pile cap*, *pier column*, dan *pierhead*. Pada setiap elemen tersebut terdapat beberapa item pekerjaan seperti pekerjaan bekisting, pengecoran beton, dan pembesian. Pondasi yang digunakan merupakan tiang pancang, sehingga pada penelitian ini pondasi dimasukkan sebagai batasan penelitian dan tidak dilakukan analisis.

Gambar kerja atau *shop drawing* merupakan gambar teknis yang disusun secara detail dan berfungsi sebagai acuan dalam pelaksanaan pekerjaan di lapangan (Immanuel & Yuwono, 2020). Gambar kerja yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. *Plan & Profile Main Road Bridge*, digunakan sebagai acuan penggambaran perletakkan setiap *pier* jembatan.
2. *Reinforcement Of Pilecap Main Road Bridge*, digunakan sebagai acuan pemodelan tulangan *pilecap* untuk setiap *pier* jembatan.
3. *Reinforcement Of Pier Column Main Road Bridge*, digunakan sebagai acuan pemodelan tulangan kolom untuk setiap *pier* jembatan.
4. *Plan & Detail Reinforcement Of Pier Head Main Road Bridge*, digunakan sebagai acuan pemodelan tulangan *pierhead* untuk setiap *pier* jembatan.

Berdasarkan gambar kerja tersebut dapat diketahui bahwa besi tulangan yang digunakan untuk setiap elemen struktural menggunakan diameter besi yang beragam dan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Ukuran besi pada pekerjaan pembesian struktur bawah

No.	Elemen Struktural	Jenis Baja Tulangan	Ukuran Tulangan
1	<i>Pile Cap</i>	Besi tulangan beton ulir	D19, D32
2	<i>Pier Column</i>	Besi tulangan beton ulir	D16, D32
3	<i>Pierhead</i>	Besi tulangan beton ulir	D13, D16, D19, D32

2.3 Prosedur Penelitian

Dalam penelitian ini diperlukan beberapa tahapan untuk memperoleh hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian. Adapun tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi masalah

Identifikasi masalah merupakan tahap awal penelitian untuk menentukan isu utama yang menjadi fokus pembahasan. Permasalahan yang diangkat pada penelitian ini adalah tingginya *waste material* pada pekerjaan pembesian struktur bawah Jembatan RC Slab No. 8 Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1. Identifikasi dilakukan melalui pengamatan lapangan, kajian dokumen proyek, serta diskusi dengan pihak terkait guna memperoleh gambaran awal permasalahan.

2. Studi pustaka

Setelah permasalahan teridentifikasi, dilakukan studi pustaka yaitu kegiatan menelaah berbagai sumber literatur yang sudah dipublikasikan oleh akademis maupun peneliti sebelumnya yang memiliki keterkaitan dengan topik penelitian (Juairiah, 2021). Hasil dari studi pustaka akan menjadi dasar dalam merumuskan metodologi penelitian dan memahami pendekatan-pendekatan yang dapat digunakan dalam penelitian ini.

3. Pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder berupa data *waste material* di lokasi dan *shop drawing* yang diperoleh dari proyek pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, serta peraturan mengenai toleransi fabrikasi besi tulangan.

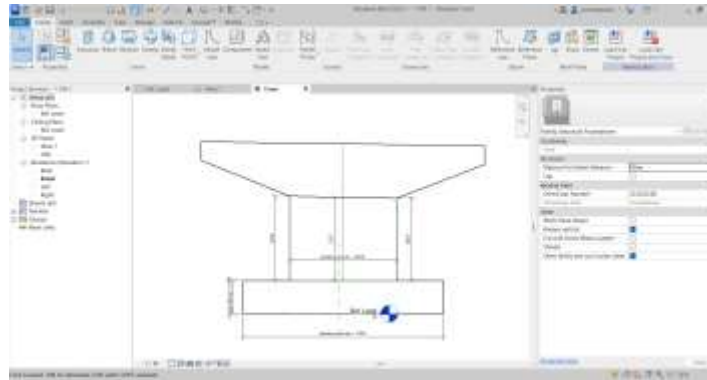
4. Pengolahan data

a. Pemodelan struktur

Setelah mendapatkan data yang diperlukan, tindakan selanjutnya yaitu pengolahan data dengan menggunakan BIM. BIM merupakan representasi digital dari karakter fisik maupun fungsional dari suatu bangunan (Umam et al., 2022). Penerapan BIM mampu mengurangi potensi kesalahan akibat faktor manusia serta mendorong kolaborasi yang lebih baik antar pemangku proyek untuk mencapai tujuan tertentu, serta dapat menekan waktu dan biaya pada pelaksanaan proyek konstruksi (Soetjipto et al., 2023; Khuluk & Hermawan, 2025; Anjani et al., 2022). BIM yang digunakan pada penelitian ini yaitu *software autodesk revit* yang memiliki kemampuan perancangan konstruksi dalam model 3D (Ratnaningsih et al., 2024), sehingga *software* ini digunakan untuk melakukan pemodelan tulangan struktur bawah jembatan. Selain memudahkan dalam pemodelan tulangan, *autodesk revit*

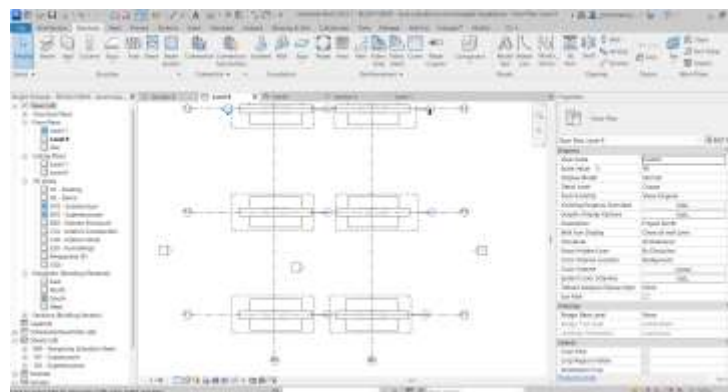
dapat memberikan *output* berupa *rebar schedule* yang berisikan diameter tulangan, panjang kebutuhan tulangan, jenis material, dan lainnya (Zahro et al., 2021).

Tahapan pemodelan struktur menggunakan *autodesk revit* dimulai dengan pembuatan *family* setiap *pier* jembatan sesuai dengan *shop drawing* seperti pada Gambar 2 berikut.

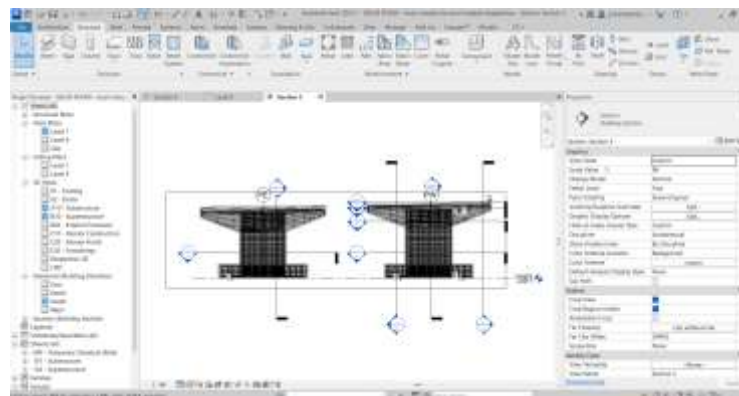


Gambar 2 Hasil pembuatan *family pier* jembatan

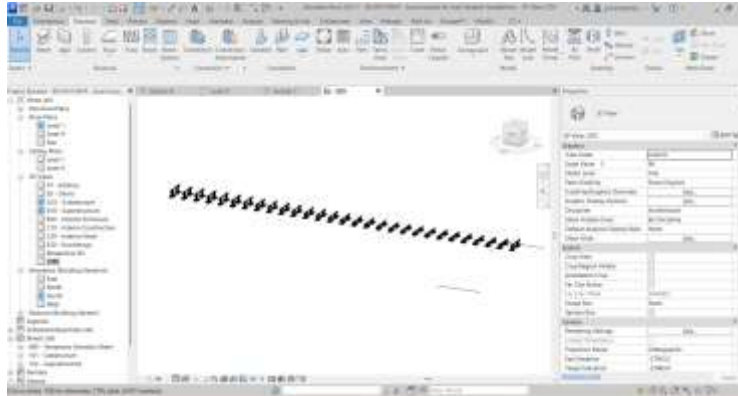
Setelah semua *family* tiap *pier* jembatan sudah selesai dibuat, kemudian memasukkan seluruh *family* pada proyek baru sesuai dengan perletakannya dengan bantuan *grid* dan *level* seperti pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Memasukkan seluruh *family pier* jembatan pada proyek

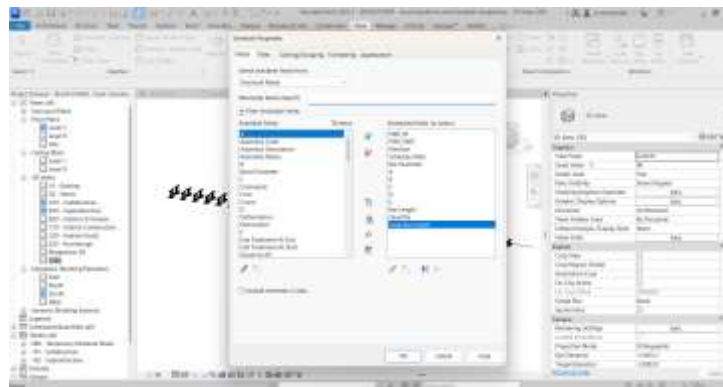


Gambar 4 Hasil pemodelan tulangan *pier*



Gambar 5 Hasil pemodelan tulangan seluruh *pier* jembatan

Kemudian mengatur tebal selimut beton dan melakukan pemodelan tulangan untuk setiap *pier* jembatan dengan *shop drawing* sebagai acuan. Penggunaan *section* akan memudahkan dalam proses pemodelan tulangan. Hasil pemodelan tulangan dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Setelah selesai membuat pemodelan tulangan, tahapan berikutnya yaitu pembuatan *rebar schedule* dengan memilih parameter yang ingin ditampilkan seperti pada Gambar 6 berikut. Dengan pembuatan *rebar schedule* tersebut, dapat diketahui berapa banyak kebutuhan tulangan yang diperlukan dalam pemodelan.

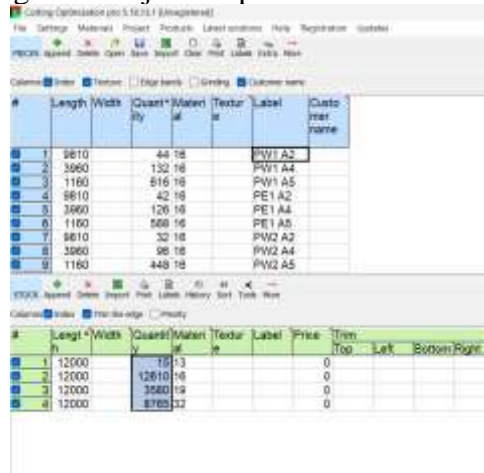


Gambar 6 Pengaturan parameter pada *rebar schedule*

Setelah mengetahui banyak kebutuhan tulangan yang diperlukan dalam pemodelan, kemudian melakukan perhitungan galat. Galat atau selisih perbedaan antara hasil pemodelan tulangan di *autodesk revit* dan data pada *shop drawing* dihitung untuk mengetahui tingkat akurasi model terhadap kondisi perencanaan aktual. Perhitungan ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah jumlah dan panjang tulangan yang dimodelkan sudah sesuai dengan spesifikasi pada *shop drawing*, sehingga dapat memastikan akurasi pemodelan sebelum melakukan analisis lebih lanjut. Galat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1 berikut (Zahrah et al., 2023).

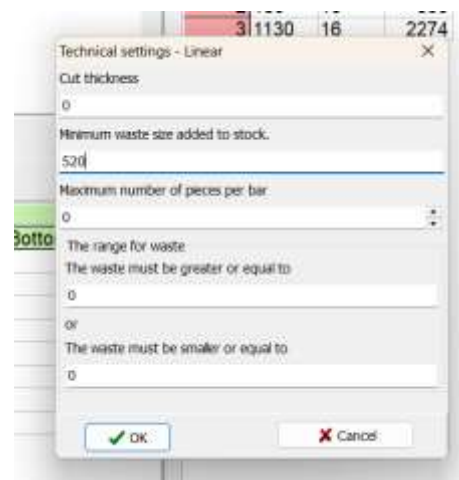
$$\text{Presentase galat} = \frac{(\text{Berat besi } \textit{shop drawing} - \text{Berat besi } \textit{revit})}{\text{Berat besi } \textit{shop drawing}} \times 100 \quad (1)$$

- b. Optimasi menggunakan *software cutting optimization pro*
Optimasi dilakukan menggunakan *software cutting optimization pro* (SCOP). *Software* ini memberikan *output* berupa pola pemotongan besi tulangan yang optimal, sehingga mampu meminimalkan sisa potongan besi yang sudah tidak dapat dipakai kembali (Kurniawan & Ujianto, 2023). Proses optimasi dilakukan secara terpisah untuk setiap elemen truktur serta untuk setiap diameter besi tulangan.
Pada tampilan awal *software* tersebut, terdapat dua bagian utama yaitu *pieces* dan *stock*. Pada bagian *pieces*, pengguna memasukkan data panjang, diameter, jumlah kebutuhan besi, serta label. Sedangkan pada bagian *stock* digunakan untuk mengisi data stok besi berdasarkan diameter. Hasil pengisian kedua bagian ditunjukkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7 Pengisian data pada SCOP

Tahap berikutnya adalah mengisi *minimum waste size added to stock*, yaitu batas minimum panjang *waste* yang masih dapat dimasukkan kembali sebagai stok (Riyanto & Solikin, 2023), seperti pada Gambar 8. Pengaturan ini memastikan potongan yang masih memenuhi panjang minimum tidak dianggap *waste*, tetapi digunakan kembali pada pemotongan berikutnya sehingga jumlah *waste* berkurang dan efisiensi penggunaan material besi meningkat.



Gambar 8 Pengisian *minimum waste size added to stock*

Setelah memastikan bahwa seluruh data input sudah benar, langkah berikutnya adalah klik start untuk menampilkan hasil pola pemotongan yang optimal, seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

Pieces
11310 (1A)A1
11310 (1B)A1
11310 (2)A1
11310 (3)A1
11040 (1A)A2
11040 (1B)A2
11040 (2)A2
11040 (3)A2

Gambar 9 Hasil pola pemotongan

Setelah hasil muncul, klik *Accept* untuk memasukkan sisa potongan yang telah diatur sebelumnya ke dalam stok. Data yang diperoleh seperti nilai *waste* besi dan parameter lainnya dapat dilihat pada Gambar 10 serta data selengkapnya dapat diekspor ke dalam format *excel* untuk analisis lebih lanjut.

Length	Width	Quant	Mass	Price	Unit
11310	11310	1	11310	11310	1
11310	11310	1	11310	11310	1
11310	11310	1	11310	11310	1
11310	11310	1	11310	11310	1
11040	11040	1	11040	11040	1
11040	11040	1	11040	11040	1
11040	11040	1	11040	11040	1
11040	11040	1	11040	11040	1

Gambar 10 Hasil data yang diperoleh

5. Analisa *waste material*

Setelah dilakukan optimasi, dilakukan perhitungan dan analisa *waste material* untuk mengetahui presentase terjadinya *waste* dan biaya yang diterima akibat *waste* tersebut, berikut perhitungan dari *waste material* yang digunakan dalam penelitian ini :

- a. *Waste level* dihitung untuk mengetahui volume *waste* dari masing-masing material yang dianalisis. *Waste level* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2 berikut (Alawyah & Syah, 2024).

$$Waste\ level = \frac{Volume\ waste}{Volume\ kebutuhan\ material} \times 100\% \quad (2)$$

- b. *Waste cost* atau biaya sisa dihitung untuk mengetahui kerugian yang dialami dari adanya *waste material*. *Waste cost* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3 berikut (Pratama et al., 2023).

$$Waste\ cost = Volume\ waste \times \text{harga material} \quad (3)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perhitungan Galat

Galat atau selisih perbedaan antara hasil pemodelan tulangan di *autodesk revit* dan data pada *shop drawing* dihitung dengan menggunakan persamaan 1 dan untuk rincian galat dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Perhitungan galat

Elemen struktural	Berat besi revit (Kg)	Berat besi shop drawing (Kg)	Presentase galat (%)
Pilecap	416101,90	422692,487	1,56%
Kolom	293578,00	300682,159	2,36%
Pierhead	188069,21	191442,539	1,76%

3.2 Kebutuhan Tulangan

Kebutuhan tulangan didapatkan dari *rebar schedule* setelah proses pemodelan tulangan menggunakan *Autodesk revit*. Rekapitulasi kebutuhan tulangan setiap elemen struktur dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3 Rekapitulasi kebutuhan tulangan

Elemen struktural	Diameter besi	Panjang besi (m)
Pilecap	19	22754,56
	32	57888,52
Kolom	16	85297,74
	32	25182,67
Pierhead	13	138,93
	16	59336,38
	19	16535,99
	32	9105,42

3.3 Optimasi Besi Tulangan

Optimasi dengan menggunakan *software cutting optimization pro*, didapatkan nilai *reused waste* yaitu nilai potongan besi yang masih memenuhi ukuran *minimum waste size added to stock*. Rekapitulasi pemanfaatan kembali sisa besi tulangan (*reused waste*) dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 4 Rekapitulasi *reused waste* besi tulangan

Elemen struktural	Diameter besi	Banyak besi (batang)	Panjang besi (m)	Panjang <i>reused waste</i> (m)
Pilecap	19	2011	22754,56	1319,44
	32	5655	57888,52	9501,73
Kolom	16	7364	85297,74	2576,54
	32	2213	25182,67	563,88
Pierhead	13	14	138,93	29,07

16	4985	59336,38	304,86
19	1556	16535,99	1795,50
32	812	9105,42	0,00

3.4 Analisa Waste Material

Hasil optimasi menggunakan *software cutting optimization pro*, diperoleh nilai *waste material* besi yang sudah tidak dapat dimanfaatkan kembali sehingga tidak dapat dimasukkan ke dalam stok (*disposed waste*). Jumlah waste tersebut dihitung untuk setiap diameter besi tulangan yang digunakan pada pekerjaan pembesian pier jembatan. Rincian jumlah *waste material* untuk masing-masing diameter dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Jumlah *waste material* besi tulangan

Elemen struktural	Diameter besi	Panjang besi (m)	Panjang waste besi (m)	Berat besi (kg)	Berat waste besi (kg)
Pilecap	19	22754,56	58,00	50651,65	129,11
	32	57888,52	469,74	365450,25	2965,48
Kolom	16	85297,74	493,72	134599,83	779,09
	32	25182,67	809,46	158978,17	5110,10
Pierhead	13	138,93	0,00	144,77	0,00
	16	59336,38	173,68	93632,80	274,07
	19	16535,99	340,50	36809,12	757,96
	32	9105,42	638,58	57482,52	4031,36

Setelah mengetahui jumlah *waste material* yang tersisa, dilakukan Analisa lanjut terhadap *waste level* dan *waste cost* untuk mengetahui presentase *waste* yang dan biaya yang timbul akibat adanya sisa material antara lain :

1. Waste level

Waste level menunjukkan seberapa besar tingkat efisiensi penggunaan besi pada setiap elemen struktur. Dengan menggunakan Persamaan 2, perhitungan *waste level* dapat dilakukan dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6 Perhitungan *waste level*

Diameter besi	Panjang besi (m)	Panjang waste besi (m)	Berat besi (kg)	Berat waste besi (kg)	Waste level (%)
13	138,93	0,00	144,77	0,00	0,00%
16	144634,12	667,40	228232,64	1053,16	0,46%
19	39290,55	398,50	87460,77	887,07	1,01%
32	92176,61	1917,78	581910,94	12106,94	2,08%
Total					3,55%

2. Waste cost

Analisa *waste cost* dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya yang terjadi akibat adanya *waste material*. Melalui analisis ini, dapat dihitung nilai kerugian yang muncul dari sisa potongan besi yang tidak dapat dimanfaatkan kembali. Dengan menggunakan Persamaan 3, perhitungan *waste cost* dapat dilakukan dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7 Perhitungan *waste cost*

Diameter besi	Panjang besi (m)	Panjang <i>waste</i> besi (m)	Berat besi (kg)	Berat <i>waste</i> besi (kg)	<i>Waste level</i> (%)	Biaya akibat <i>waste</i>
13	138,93	0,00	144,77	0,00	0,00%	Rp -
16	144634,12	667,40	228232,64	1053,16	0,46%	Rp 10.373.614
19	39290,55	398,50	87460,77	887,07	1,01%	Rp 8.737.639
32	92176,61	1888,91	581910,94	11924,70	2,08%	Rp 119.253.347
Total					3,55%	Rp 138.364.599,96

3.5 Pengelolaan *Waste Material*

Dalam pelaksanaan proyek konstruksi, permasalahan yang sering muncul yaitu tingginya *waste material* yang tidak ditangani secara tepat mampu menimbulkan pembengkakan biaya dan *overtime* (Trisiana et al., 2023). Sebagai *waste material*, material ini masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali, di daur ulang, dan dikembalikan ke supplier. Namun, apabila tidak dikelola dengan baik, material tersebut akan berakhir sebagai limbah yang merugikan. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis mengenai penanganan *waste material* untuk mengetahui cara yang efektif jika masih terdapat sisa material yang terbuang (Lestari et al., 2022).

Salah satu cara efektif yaitu dengan menerapkan *waste* manajemen yang bertujuan untuk mengurangi pemanfaatan berbagai sumber material bangunan, memakai kembali, dan daur ulang, hal ini didasarkan pada nilai material konstruksi yang memungkinkan untuk digunakan kembali pada sebuah proyek (Putra, 2021). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Putra (2021) menunjukkan mengenai penerapan *waste* manajemen untuk pengelolaan sisa material yang ada pada sebuah proyek konstruksi yaitu dengan *reduce, reuse, recycle*, dan *salvage*. Faktor *reduce* dan *reuse* pada penelitian tersebut sesuai dengan yang dilakukan pada penelitian ini yaitu dengan mengoptimalkan penggunaan material dan memanfaatkan sisa material yang masih layak digunakan untuk elemen struktur lainnya. Sedangkan sisa potongan tulangan yang sudah tidak dapat dioptimasi diarahkan pada strategi *recycle* dan *salvage*. *Recycle* yaitu material dapat dimanfaatkan jika jumlah yang tersedia cukup dan adanya permintaan pasar, sedangkan *salvage* dapat dilakukan dengan pemindahan sisa material kepada *salvage company* yang dimaksudkan untuk pengolahan kembali sisa material menjadi barang yang bermanfaat.

Pada penelitian ini, rekomendasi pengelolaan *waste material* diarahkan pada strategi *recycle* dan *salvage*. Potongan besi berukuran kecil dikumpulkan sebagai scrap metal, ditimbang, dan selanjutnya disalurkan kepada pihak ketiga untuk proses daur ulang (*recycle*). Selain itu, penjualan scrap kepada vendor termasuk dalam kategori *salvage*, karena material yang tidak dapat dimanfaatkan kembali tetap memiliki nilai ekonomi. Dengan demikian, pengelolaan *waste material* pembesian yang sudah tidak dapat dimanfaatkan kembali dalam penelitian ini dilakukan melalui pemilahan dan pendataan sisa material, serta penyaluran sisa material kepada pihak pengolah, sehingga dapat mengurangi dampak lingkungan, mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan, serta sejalan dengan konsep *zero waste dalam* pengelolaan material konstruksi.

3 Kesimpulan dan Saran

3.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan dan perhitungan pada pekerjaan pembesian struktur bawah Jembatan RC Slab No. 8 Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, diperoleh bahwa presentase *waste material* setelah dilakukan minimalisasi adalah sebesar 3,55%, dengan rincian D13 sebesar 0%, D16 sebesar 0,46%, D19 sebesar 1,01%, dan D32 sebesar 2,08%. Nilai *waste cost* setelah proses minimalisasi mencapai Rp138.364.599,96, dengan rincian D13 tidak menghasilkan *waste cost*, D16 sebesar Rp10.373.614, D19 sebesar Rp8.737.639, dan D32 sebesar Rp119.253.347. Rekomendasi pengelolaan sisa material besi yang masih ada, dapat dilakukan melalui strategi *recycle* dan *salvage*. Potongan besi berukuran kecil yang tidak dapat dimanfaatkan kembali dikumpulkan sebagai scrap metal untuk didaur ulang oleh pihak ketiga (*recycle*), sedangkan penjualan scrap kepada vendor dikategorikan sebagai *salvage* karena material tersebut masih memiliki nilai ekonomi.

3.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, terdapat beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi acuan bagi pihak terkait maupun peneliti selanjutnya. Salah satu saran adalah perlunya pencatatan dan monitoring *waste material* secara berkala di lapangan untuk membandingkan hasil optimasi dengan kondisi realisasi. Data tersebut dapat dimanfaatkan sebagai dasar evaluasi dan pengembangan metode optimasi berikutnya. Saran lainnya mencakup pengujian metode optimasi yang berbeda atau pemanfaatan perangkat lunak tambahan guna menghasilkan pola pemotongan material yang lebih optimal dan efisien. Dengan demikian, efektivitas pengelolaan *waste material* dapat terus ditingkatkan.

Daftar Kepustakaan

- Alawayah, K., & Syah, N. (2024). Analisis Perbandingan Waste Besi Tulangan Kolom Lantai 5 Metode Konvensional Dengan Software Cutting Optimization Pro (SCOP) Pada Proyek Pembangunan Menara BRI Medan. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 11(2).
- Alexandra, S. P., & Susilowati, W. (2022). Analisis Penanganan Waste Material dengan Pendekatan Green Construction Pada Tahap Konstruksi. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil*, 19(2). <http://ejournal2.pnp.ac.id/index.php/jirs/TerakreditasiSINTAPERINGKAT5>
- Anjani, A., Bayzoni, Husni, H. R., & Niken, C. (2022). Penerapan Building Information Modeling (BIM) Menggunakan Software Autodesk Revit Pada Gedung 4 Rumah Sakit Pendidikan Peguruan Tinggi Negeri (RSPTN) Universitas Lampung. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 10(1), 87–098.
- Astatiani, N. K., Pratama, I. G. N. E., & Kamasan, A. A. N. M. P. P. (2025). Optimizing Reinforcement Requirements for Inspection Road Works Using Cutting Optimization Pro Software on the Sanur Port Project. *Astonjadro*, 14(1), 281–0289. <https://doi.org/10.32832/astonjadro.v14i1>

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 2052:2017-Baja Tulangan Beton*.
www.bsn.go.id
- Beatrix, M. (2021). Faktor Penyebab Terjadinya Direct Dan Indirect Waste Pada Proyek Bangunan Bertingkat di Surabaya. *Jurnal Media Informasi Teknik Sipil UNIJA*, 9(2), 117–126.
- Bruantama, D. M., & Pontan, D. (2023). Identifikasi Waste Material Dan Faktor Penyebab Timbulnya Pada Proyek Konstruksi. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Terbangun Berkelanjutan*, 1(2), 396–401.
<https://doi.org/10.25105/jrltb.v1i2.17993>
- Immanuel, R., & Yuwono, B. E. (2020). Kematangan Shop Drawing Sebagai Penentu Pekerjaan Ulang (Rework) Proyek Konstruksi. *Indonesian Journal on Construction Engineering and Sustainable Development (CESD)*, 03(1), 42–48.
- Juairiah. (2021). Tinjauan Pustakan Dalam Penelitian. *ALARCITY Journal of Education*, 1(2), 8.
- Khuluk, N., & Hermawan. (2025). Manfaat Building Information System (BIM) Dalam Sistem Teknologi Bangunan. *Jurnal Forum Mekanika*, 13(2), 69–73.
<https://doi.org/10.33322/forummekanika.v13i2.2329>
- Korompot, S. F., Tjakra, J., & Mangare, J. B. (2024). Analisis Perbandingan Waste Pada Penulangan Balok Dengan Menggunakan Metode Konvensional Dan Software Cutting Optimization Pro. *Tekno*, 22(87), 515–525.
- Kurniawan, D., & Ujianto, M. (2023). Optimasi Perhitungan Kebutuhan Tulangan Dan Tulangan Sisa (Waste) Shear Wall Menggunakan Software Cutting Oprimization Pro Pada Proyek Pembangunan Gedung MRT Jakarta. *Seminar Nasional Teknik Sipil 2023*.
- Lestari, P. O., Uda, S. A. K. A., & Nuswantoro, W. (2022). Identifikasi Penanganan Waste Material berdasarkan Pandangan Kontraktor dan Konsultan di Kota Palangka Raya. *Serambi Engineering*, VII (3).
- Muharani, M. D., Ratnaningsih, A., & Putra, P. P. (2020). Modeling and scheduling engineering biotechnology building using bim and microsoft project. *AIP Conference Proceedings*, 2278.
<https://doi.org/10.1063/5.0026150>
- Novita, W. A., Ulfiiyati, Y., & Hardiyanti, S. A. (2022). Optimasi Waste Besi Pada Pier Median Jalan Tol Jakarta – Cikampek 2 Elevated Dengan Program Linear. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Lingkungan*, 5(1), 58–66.
<https://doi.org/10.19184/jrsl.v5i1.13704>
- Pratama, I. G. N. E., Sudika, I. G. M., & Saputra, E. L. B. (2023). Analisis Sisa Besi Tulangan Menggunakan Software Cutting Optimization Pro Pada Konstruksi Gedung (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Villa Stilo, Tibubeneng, Kec. Kuta Utara, Kab. Badung-Bali). *Jurnal Teknik Gradien*, 15(02), 30–38. <http://www.ojs.unr.ac.id/index.php/teknikgradien>
- Putra, I. G. P. A. S. (2021). Penerapan Waste Management pada Proyek Konstruksi. *Jurnal Civronlit Unbari*, 6(1), 1–4.
<https://doi.org/10.33087/civronlit.v6i1.76>
- Ratnaningsih, A., Sudargo, R., & Nurtjahyaningtyas, I. (2024). Aplikasi Building Information Modelling (BIM) 5D pada Pembangunan Gedung Bali

- Inernational Hospital (Gedung B). *Journal of Ikatan Ahli Manajemen Proyek Indonesia*, 2(2).
- Riyanto, M. S. D., & Solikin, M. (2023). Analisis Perbandingan Waste Metode Distribusi Dengan Software Cutting Optimization Pro Pada Pekerjaan Penulangan Pilecap (Studi Kasus: Proyek XYZ Semarang). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2023*, 74–81.
- Soetjipto, J. W., Zarkasi, I. K., & Trisiana, A. (2023). Model Perancangan Pemeliharaan Bangunan Gedung Menggunakan Building Information Modeling (BIM). *Jurnal Permukiman*, 18(1), 1–15.
- Syarif, M., Ahmad, S. N., Utomo, P. K., Purnama, H., Sari, D. P., Bachtiar, E., Isdyanto, A., Londongsalu, J., Aryadi, A., Mansyur, Herlambang, A. R., Syukuriah, Prasetyo, B. E., & Rachman, R. M. (2024). *Material Konstruksi* (S. Gusty, Ed.). CV. Tohar Media.
- Trisiana, A., Arifin, S., & Audio, B. I. (2023). Pengendalian Waste Material dengan Prinsip Eliminate Waste Guna Mengendalikan Waste of Material. *Journal of Ikatan Ahli Manajemen Proyek Indonesia*, 1(2).
- Umam, F. N., Erizal, E., & Putra, H. (2022). Peningkatan Efisiensi Biaya Pembangunan Gedung Bertingkat Dengan Aplikasi Building Information Modeling (BIM) 5D. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), 245–256. <https://doi.org/10.29103/tj.v12i1.704>
- Zahrah, K., Lenggogeni, & Berliana, R. (2023). Implementasi BIM Dalam Perhitungan Quantity Take-Off Pekerjaan Struktur Dan Arsitektur Proyek RTCT Pertamina. *Jurnal Deformasi*, 8(2).
- Zahro, P. K., Ratnaningsih, A., & Hasanuddin, A. (2021). Evaluasi Perancangan Anggaran Biaya Dan Waktu Menggunakan Metode BIM. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 507–518. <https://doi.org/10.29103/tj.v11i2.529>