

Prioritas dan Penyebab Pemborosan Material Pada Proyek Gedung Menggunakan *Pareto* dan *Fault Tree Analysis* (FTA)

Eve Vialanna¹, Wachid Hasyim^{2*}, Nono Suhana³

¹²³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Wiralodra, Indramayu, Indonesia

vevialanna@gmail.com, wachidhasyim@unwir.ac.id, nono22322@yahoo.com

Artikel dimasukkan: 28-7-2026, Artikel direvisi: 19-8-2026, Artikel diterbitkan: 30-9-2026

Abstrak

Waste material merupakan salah satu penyebab utama pembengkakan biaya dan rendahnya efisiensi pada proyek konstruksi. Identifikasi material yang dominan mengalami pemborosan serta penyebab utamanya diperlukan agar upaya pengendalian dapat dilakukan secara tepat. Penelitian ini bertujuan menganalisis *waste material* pada Proyek Pembangunan Gedung Perpustakaan dan Laboratorium, menentukan material yang menjadi prioritas berdasarkan metode Pareto, serta mengidentifikasi akar penyebabnya menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA). Hasil penelitian diharapkan menjadi masukan bagi kontraktor dan pemilik proyek dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan material dan menekan kerugian biaya akibat pemborosan. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan membandingkan kebutuhan material teoritis dan penggunaan material aktual untuk menghitung *waste material*, *waste level*, *waste cost*, dan *waste index*. Selanjutnya dilakukan analisis Pareto untuk menentukan material prioritas dan FTA untuk mengidentifikasi akar penyebab *waste*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat beberapa material yang memiliki kontribusi paling besar terhadap *waste cost*, meliputi cat dinding eksterior, cat dinding interior, ACP cutting laser, ornamen besi *hollow*, ACP rangka *hollow*, pipa PVC Type AW 4 inci, handrail pipa 2 inci, frame kusen aluminium putih, beton *site mix K-250*, cat epoxy lantai dak, serta kaca *Rayben*. Berdasarkan hasil analisis *Fault Tree Analysis* (FTA), faktor utama yang menyebabkan terjadinya *waste* didominasi oleh kesalahan dalam proses pengukuran dan pemotongan material, kesalahan pencampuran, ketidaktepatan dalam mengestimasi volume pekerjaan, kondisi cuaca yang tidak mendukung, serta kurang optimalnya pengawasan selama pelaksanaan proyek.

Kata kunci: *waste material*, Pareto, *Fault Tree Analysis*, *waste cost*, proyek konstruksi.

Pendahuluan

Industri konstruksi memiliki peran strategis dalam mendukung pembangunan infrastruktur dan merupakan salah satu sektor yang menggunakan material dalam jumlah besar. Dalam pelaksanaan proyek, biaya material umumnya menyumbang sekitar 40–60% dari keseluruhan biaya proyek, sehingga pengelolaan material menjadi salah satu aspek penting dalam mencapai efisiensi biaya, mutu, dan waktu. Meskipun demikian, proses penggunaan material di lapangan masih

menghadapi berbagai permasalahan, salah satunya adalah *waste material*. *Waste material* dapat dipahami sebagai material yang jumlah penggunaannya melebihi kebutuhan yang telah direncanakan atau material yang tersisa dan tidak dapat dimanfaatkan secara optimal selama pelaksanaan pekerjaan. Kondisi tersebut tidak hanya meningkatkan jumlah limbah konstruksi, tetapi juga dapat menyebabkan kerugian finansial, menurunkan produktivitas, menimbulkan pekerjaan ulang

(*rework*), serta menghambat penerapan konstruksi yang berkelanjutan. Oleh sebab itu, pengukuran tingkat pemborosan material dan evaluasi biaya yang ditimbulkannya diperlukan sebagai bagian dari upaya meningkatkan efektivitas pengelolaan proyek konstruksi (Bossink & Brouwers, 1996; Formoso et al., 2002; Hadut, 2018).

Kajian mengenai *waste material* telah berkembang melalui berbagai pendekatan untuk mengukur besarnya pemborosan maupun memahami karakteristik penggunaannya dalam proyek. Bossink dan Brouwers (1996) mengembangkan konsep kuantifikasi *waste material* sebagai salah satu dasar untuk mengevaluasi efisiensi pemanfaatan material. Selanjutnya, Formoso et al. (2002) menjelaskan bahwa konsep *waste* dalam konstruksi memiliki cakupan yang lebih luas daripada sekadar limbah fisik, karena dapat mencakup penggunaan material yang tidak efisien atau melebihi kebutuhan akibat proses pelaksanaan yang kurang optimal. Dalam konteks Indonesia, sejumlah penelitian kemudian menerapkan pengukuran *waste material*, *waste level*, dan *waste cost* pada berbagai jenis proyek. Pertiwi et al. (2019), misalnya, mengkaji *waste material* pada proyek gedung di Badung dan menunjukkan bahwa pengukuran kuantitas material terbuang dapat digunakan untuk mengetahui tingkat pemborosan sekaligus menjadi dasar dalam upaya pengurangannya. (Pertiwi et al., 2025). Hasil tersebut diperkuat oleh Yuni et al. (2023) melalui analisis *waste material* besi yang menunjukkan bahwa pengukuran sisa material dapat mendukung proses pengendalian penggunaan material di lapangan. (Yuni et al., 2023).

Pendekatan identifikasi material penyumbang *waste* juga telah diterapkan pada proyek dengan karakteristik yang berbeda. Faruki et al. (2023) mengidentifikasi material penyebab *waste* pada proyek apartemen di Jakarta dan menemukan 18 jenis material dari 92 jenis material yang digunakan. (Faruki & Wiyanto, 2023). Temuan tersebut menunjukkan bahwa tidak seluruh material memberikan kontribusi pemborosan dalam tingkat yang sama, sehingga diperlukan

penentuan material yang memiliki pengaruh paling signifikan sebagai dasar penetapan prioritas pengendalian. Di sisi lain, Silaban et al. (2023) menerapkan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk mengkaji penyebab *waste material* pada pekerjaan *concrete barrier*. (Silaban & Pamungkas, 2023). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa FTA dapat digunakan untuk menelusuri hubungan antara suatu kejadian *waste* dengan berbagai faktor penyebabnya secara sistematis, sehingga akar permasalahan dalam proses pelaksanaan dapat diidentifikasi dengan lebih terstruktur.

Aspek efisiensi material juga berkaitan erat dengan ketepatan perencanaan kebutuhan dan pemanfaatan material di lapangan. Wakano et al. (2025) membandingkan kebutuhan besi dan biaya antara metode *Bar Bending Schedule* (BBS) dengan kondisi aktual di lapangan. (Wakano & Sandjaya, 2025). Hasilnya menunjukkan bahwa perhitungan kebutuhan yang lebih akurat berpotensi menghasilkan penghematan biaya material hingga Rp3.953.330. Sejalan dengan hal tersebut, Dewi et al. (2025) menggunakan metode *Cutting Optimization Pro* (COP) untuk mengoptimalkan pemanfaatan sisa tulangan kolom. (Dewi & Suryamandala, 2025). Pendekatan tersebut diarahkan untuk meningkatkan efisiensi pemotongan material sekaligus meminimalkan material yang tidak termanfaatkan.

Selain faktor perencanaan dan penggunaan material, penyebab *waste* juga dapat berasal dari berbagai kondisi yang terjadi selama proses konstruksi. Noviani et al. (2025) mengkaji faktor penyebab *waste* dalam perspektif *Lean Construction* dan menunjukkan pentingnya identifikasi sumber pemborosan sebagai dasar penyusunan tindakan pengendalian. (Noviani & Rachma, 2025). Berbagai hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa pengendalian *waste* memerlukan pemahaman yang tidak hanya berorientasi pada jumlah material yang terbuang, tetapi juga pada faktor yang memicu terjadinya pemborosan.

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih ditemukan keterbatasan dalam

mengintegrasikan pengukuran kuantitatif *waste* dengan analisis penyebabnya dalam satu kerangka yang sistematis. Sejumlah penelitian berfokus pada perhitungan kuantitas atau biaya material yang terbuang, sedangkan penelitian lainnya lebih menitikberatkan pada identifikasi faktor penyebab tanpa mengaitkannya secara langsung dengan material yang memberikan kontribusi terbesar terhadap pemborosan. Di samping itu, kajian yang secara khusus membahas *waste material* pada Proyek Gedung Perpustakaan dan Laboratorium masih relatif terbatas. Kondisi tersebut menjadi dasar bagi penelitian ini untuk mengembangkan pendekatan yang menggabungkan pengukuran *waste material*, *waste level*, *waste cost*, dan *waste index* sebagai indikator kuantitatif pemborosan. Selanjutnya, metode Pareto digunakan untuk menentukan material yang menjadi prioritas pengendalian berdasarkan prinsip 80/20, sedangkan *Fault Tree Analysis* (FTA) diterapkan untuk menelusuri akar penyebab *waste* pada material yang telah diprioritaskan. Integrasi ketiga tahapan tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai tingkat pemborosan sekaligus faktor yang memengaruhinya.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menjawab tiga permasalahan utama, yaitu seberapa besar tingkat *waste material* yang terjadi pada Proyek Gedung Perpustakaan dan Laboratorium, material apa yang termasuk dalam kategori prioritas berdasarkan analisis Pareto, serta faktor apa saja yang menjadi penyebab utama pemborosan berdasarkan pendekatan FTA. Sejalan dengan permasalahan tersebut, penelitian bertujuan mengukur *waste material*, *waste level*, *waste cost*, dan *waste index*, menetapkan material prioritas melalui analisis Pareto, serta mengidentifikasi akar penyebab pemborosan menggunakan FTA. Hasil dari rangkaian analisis tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menyusun rekomendasi pengendalian *waste material* yang lebih terarah dan sesuai dengan kondisi proyek.

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu maupun praktik manajemen konstruksi, khususnya dalam pengelolaan material proyek. Dari sisi akademis, penelitian ini memberikan perspektif mengenai penerapan pendekatan terintegrasi antara pengukuran pemborosan secara kuantitatif, penentuan prioritas material, dan penelusuran akar penyebab *waste*. Dari sisi praktis, hasil penelitian dapat dimanfaatkan oleh kontraktor, konsultan, maupun pemilik proyek sebagai bahan pertimbangan dalam menentukan strategi pengendalian material, meningkatkan efektivitas penggunaan sumber daya, dan menekan kerugian biaya yang timbul akibat pemborosan. Dengan semakin tingginya tuntutan terhadap efisiensi dan keberlanjutan dalam industri konstruksi, pendekatan berbasis data terhadap pengelolaan *waste material* diharapkan dapat mendukung peningkatan kinerja proyek sekaligus mendorong penerapan proses konstruksi yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif analitis dengan tujuan mendeskripsikan tingkat pemborosan (*waste material*) yang terjadi pada Proyek Pembangunan Gedung Perpustakaan dan Laboratorium, kemudian menganalisis material yang memberikan kontribusi pemborosan terbesar beserta akar penyebabnya. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual penggunaan material di lapangan berdasarkan data proyek, sedangkan pendekatan analitis digunakan untuk menghitung *waste material*, *waste level*, *waste cost*, dan *waste index*, selanjutnya menentukan material prioritas menggunakan Diagram Pareto serta mengidentifikasi penyebab pemborosan melalui *Fault Tree Analysis* (FTA). Data penelitian terdiri atas data primer berupa hasil observasi lapangan, dokumentasi, dan wawancara dengan pihak proyek, serta data sekunder berupa *Bill of Quantity* (BOQ), *shop drawing*, *Detail Engineering Design* (DED), Analisis Harga

Satuan Pekerjaan (AHSP), Rencana Anggaran Biaya (RAB), serta rekapitulasi penggunaan material proyek.

Analisis diawali dengan menghitung kebutuhan material teoritis berdasarkan volume pekerjaan dan koefisien kebutuhan material pada AHSP. Nilai ini menjadi acuan untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan material aktual di lapangan.

$$M_t = V \times K \quad (1)$$

dimana

M_t = kebutuhan material teoritis

V = volume pekerjaan

K = koefisien kebutuhan material (AHSP)

Selanjutnya, besarnya *waste material* dihitung sebagai selisih antara penggunaan material aktual dengan kebutuhan material teoritis (Bossink & Brouwers, 1996).

$$W = M_a - M_t \quad (2)$$

dimana

W = *waste material*

M_a = material aktual

M_t = material teoritis

Besarnya tingkat pemborosan setiap material dinyatakan dalam bentuk *waste level* yang menunjukkan persentase pemborosan terhadap kebutuhan material teoritis.

$$WL = \frac{W}{M_t} \times 100\% \quad (3)$$

dengan:

$$WL = \text{waste level (\%)}$$

Dampak ekonomi dari pemborosan dihitung melalui *waste cost*, yaitu hasil perkalian antara volume material yang terbuang dengan harga satuan material.

$$WC = W \times H_m \quad (4)$$

dimana

WC = *waste cost* (Rp)

H_m = harga satuan material

Untuk mengetahui besarnya *waste* terhadap luas bangunan digunakan parameter *Waste Index* (Bossink & Brouwers, 1996).

$$WI = \frac{\sum W}{GFA} \quad (5)$$

dengan:

$$WI = \text{Waste Index (m}^3/\text{m}^2)$$

$$\sum W = \text{total volume waste}$$

$$GFA = \text{Gross Floor Area bangunan}$$

Setelah seluruh indikator pemborosan diperoleh, dilakukan analisis Pareto berdasarkan prinsip 80/20 Rule, yaitu sebagian kecil jenis material umumnya memberikan kontribusi terbesar terhadap total pemborosan. Persentase kontribusi setiap material dihitung menggunakan Persamaan (6), kemudian diakumulasikan melalui Persamaan (7) untuk menentukan material prioritas yang termasuk dalam batas kumulatif sekitar 80%.

$$P_i = \frac{W_i}{\sum W} \times 100\% \quad (6)$$

$$PK_i = \sum_{j=1}^i P_j \quad (7)$$

Material yang termasuk kategori prioritas selanjutnya dianalisis menggunakan *Fault Tree Analysis (FTA)*. Metode FTA merupakan teknik analisis deduktif (*top-down approach*) yang dimulai dari *top event* berupa terjadinya *waste material*, kemudian diuraikan menjadi *intermediate event* hingga diperoleh *basic event* sebagai akar penyebab pemborosan. Hubungan antar kejadian direpresentasikan menggunakan gerbang logika (*AND* dan *OR*) sehingga hubungan sebab-akibat dapat diidentifikasi secara sistematis. (Ericson, 1999).

Analisis data dilakukan secara bertahap. Tahap pertama adalah menghitung kebutuhan material teoritis berdasarkan volume pekerjaan dan koefisien material. Tahap kedua membandingkan kebutuhan teoritis dengan penggunaan material aktual untuk memperoleh nilai *waste material*, *waste level*, *waste cost*, dan *waste index*. Tahap ketiga menyusun Diagram Pareto berdasarkan besarnya kontribusi *waste cost* sehingga diperoleh material yang menjadi prioritas pengendalian. Tahap terakhir menggunakan *Fault Tree Analysis (FTA)* untuk mengidentifikasi akar penyebab pemborosan pada material prioritas sehingga dapat dirumuskan strategi pengendalian yang lebih efektif.

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis sebagaimana ditunjukkan pada bagan alir berikut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Hasil dan pembahasan

Berikut ini disajikan beberapa perhitungan dari masing-masing variabel dalam penelitian ini.

Hasil Perhitungan Waste Material, Waste Level, Waste Cost, dan Waste Index

Analisis dilakukan terhadap 45 jenis material yang digunakan pada pekerjaan

plafon, kusen dan pintu, lantai, finishing, drainase, logam, struktur beton, dinding, atap, kusen dan kaca, kusen aluminium, plumbing, ornamen, serta pekerjaan arsitektur. Kebutuhan teoritis ditentukan berdasarkan volume pekerjaan dan koefisien material, sedangkan material aktual diperoleh dari data penggunaan material proyek. Selisih antara material aktual dan teoritis kemudian digunakan untuk menentukan volume *waste*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemborosan terjadi pada seluruh kelompok pekerjaan dengan tingkat yang berbeda-beda. Beberapa material memiliki *waste level* relatif kecil, sedangkan material tertentu menunjukkan tingkat pemborosan yang cukup tinggi, seperti cat *list plank* sebesar 30,07%, cat dinding eksterior 14,51%, cat dinding interior 8,07%, dan pipa *PVC Type AW 4"* 20,83%.

Besarnya *waste cost* dihitung dengan mengalikan volume material yang tersisa dengan harga satuan material. Hasil perhitungan terhadap 45 material menghasilkan total *waste cost* sebesar Rp26.442.378,10. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pemborosan material tidak hanya berkaitan dengan volume sisa, tetapi juga dipengaruhi oleh harga satuan material. Sebagai contoh, *cat dinding eksterior* menghasilkan *waste* sebesar 104,47 m² dengan *waste cost* Rp6.336.001,03, sedangkan *cat dinding interior* menghasilkan *waste* 101,72 m² dengan *waste cost* Rp5.030.664,32. Kedua material tersebut menjadi kontributor biaya terbesar dalam proyek.

Tabel 1. Rekapitulasi hasil *waste material* 45 material

No.	Material	Waste	Waste (%)	Level	Waste Index (m ³ /m ²)
1	Plafond gypsum	1,02	0,12		0,00123
2	Plafond PVC	0,80	2,90		0,00097
3	Plafond GRC	0,54	1,70		0,00065
4	Drop ceiling gypsum	2,28	3,30		0,00275

No.	Material	Waste	Waste (%)	Level	Waste Index (m ³ /m ²)
5	List gypsum	1,29	0,26		0,00156
6	List PVC	2,60	8,13		0,00314
7	ACP rangka hollow	1,5664	1,10		0,00189
8	Frame kusen aluminium putih	5,63	1,32		0,00680
9	Kaca polos	0,9424	0,74		0,00114
10	Karet silent	0,68	0,11		0,00082
11	Granit 60×60 polished	0,22	0,02		0,00027
12	Plint granit	0,05	0,03		0,00006
13	Granit 60×60 unpolish	0,34	0,45		0,00041
14	Cat dinding interior	101,72	8,07		0,12285
15	Cat dinding eksterior	104,47	14,51		0,12617
16	Cat plafond	7,32	0,85		0,00884
17	Coating batu andesit	8,65	17,30		0,01045
18	Saluran gravel beton	0,07	0,07		0,00008
19	Railing stainless 2" selasar	0,54	6,00		0,00065
20	Railing tangga stainless	0,38	1,90		0,00046
21	Handrail pipa 2"	1,00	4,17		0,00121
22	Beton site mix K-250	0,68	1,48		0,00082
23	Beton site mix K-175	0,38	1,00		0,00046
24	Pembesian	10,08	0,09		0,01217
25	Bekisting	0,3824	0,06		0,00046
26	Pas bata merah	0,0242	0,00		0,00003
27	Plesteran	0,33	0,04		0,00040
28	Acian	0,33	0,04		0,00040
29	Rangka atap zincalume	0,66	0,17		0,00080
30	Genteng bitumen selulosa Onduvilla	0,211	0,06		0,00025
31	Nok bitumen selulosa Onduline	0,174	0,67		0,00021
32	Listplank GRC	0,64	0,67		0,00077
33	Rangka hollow galvalume	0,21	0,04		0,00025
34	Pas sandblast kaca	2,4512	9,15		0,00296
35	Kusen aluminium horizontal	0,35	0,59		0,00042
36	Kusen aluminium vertical	0,50	2,00		0,00060
37	Kaca Rayben	1,6248	4,96		0,00196
38	Cat list plank	8,12	30,07		0,00981
39	Cat epoxy lantai dak	4,38	2,70		0,00529
40	Pipa PVC Type AW ½"	0,50	2,78		0,00060
41	Pipa PVC Type AW ¾"	0,50	2,78		0,00060
42	Pipa PVC Type AW 3"	0,50	0,32		0,00060
43	Pipa PVC Type AW 4"	5,00	20,83		0,00604
44	Ornament besi hollow	4,50	8,33		0,00543
45	ACP cutting laser	1,3388	2,81		0,00162

Sumber: hasil pengolahan data penelitian.

Nilai waste index dihitung berdasarkan GFA sebesar 828 m², yang berasal dari luas lantai pertama 414 m² dan lantai kedua 414

m². Berdasarkan data waste seluruh material, total volume waste mencapai sekitar 285,98 satuan volume, sehingga waste index agregat yang diperoleh dari pembagian total volume

waste terhadap GFA adalah sekitar 0,345 m³/m². Nilai ini menunjukkan besarnya timbunan waste relatif terhadap luas bangunan. Material dengan waste index individual terbesar adalah *cat dinding eksterior* sebesar 0,12617 m³/m² dan *cat dinding interior* sebesar 0,12285 m³/m².

Perlu dibedakan antara *waste level* dan *waste cost*. *Waste level* menunjukkan tingkat pemborosan relatif terhadap penggunaan material, sedangkan *waste cost* menunjukkan konsekuensi ekonominya. Oleh sebab itu, material dengan *waste level* tertinggi tidak selalu menjadi material dengan kerugian biaya terbesar. Contohnya, *cat list plank* mempunyai *waste level* tertinggi sebesar 30,07%, tetapi kontribusi *waste cost*-nya jauh lebih kecil daripada *cat dinding eksterior*. Kondisi tersebut menjadi alasan bahwa penentuan prioritas pengendalian dalam

penelitian ini menggunakan *waste cost*, karena tujuan pengendalian berkaitan langsung dengan pengurangan kerugian biaya proyek.

Analisis Pareto dan Penentuan Material Prioritas

Diagram Pareto disusun berdasarkan *waste cost* setiap material yang diurutkan dari nilai terbesar hingga terkecil. Persentase kontribusi dihitung terhadap total *waste cost* sebesar Rp26.442.378,10, kemudian dijumlahkan secara kumulatif. Berdasarkan prinsip Pareto, material yang diperlukan untuk mencapai sekitar 80% kontribusi total *waste cost* ditetapkan sebagai material prioritas untuk analisis FTA. Pendekatan ini menghindari permasalahan pada versi sebelumnya yang mencampurkan *waste level* dan *waste cost* sebagai dasar Pareto.

Tabel 2. Material prioritas berdasarkan *waste cost*

Peringkat	Material	Waste Cost (Rp)	Kontribusi (%)	Kumulatif (%)
1	Cat dinding eksterior	6.336.001,03	23,96	23,96
2	Cat dinding interior	5.030.664,32	19,03	42,99
3	ACP cutting laser	1.605.684,43	6,07	49,06
4	Ornament besi hollow	1.485.000,00	5,62	54,68
5	ACP rangka hollow	1.479.810,97	5,60	60,28
6	Pipa PVC Type AW 4"	1.377.855,00	5,21	65,49
7	Handrail pipa 2"	1.200.000,00	4,54	70,03
8	Frame kusen aluminium putih	886.893,90	3,35	73,37
9	Beton site mix K-250	843.100,04	3,19	76,56
10	Cat epoxy lantai dak	730.185,42	2,76	79,32
11	Kaca Rayben	661.285,48	2,50	81,83

Sumber: hasil pengolahan data penelitian.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa 11 dari 45 material telah memberikan kontribusi kumulatif sebesar 81,83% terhadap total *waste cost*. Dengan demikian, hanya sekitar 24,44% dari jenis material yang dianalisis telah menyumbang lebih dari 80% kerugian biaya *waste*. Temuan ini memperlihatkan konsentrasi pemborosan pada sejumlah material tertentu dan memberikan dasar yang

rasional untuk memfokuskan sumber daya pengendalian pada 11 material tersebut. Material dengan kontribusi terbesar adalah *cat dinding eksterior* sebesar Rp6.336.001,03 atau 23,96%, sedangkan material prioritas kesebelas adalah kaca Rayben dengan kontribusi 2,50%.

Hasil Pareto memperlihatkan bahwa dua pekerjaan pengecatan, yaitu *cat dinding*

eksterior dan *cat dinding interior*, sendiri telah memberikan kontribusi kumulatif 42,99%. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian pekerjaan finishing, khususnya pengendalian penggunaan cat dan kualitas pelaksanaan pengecatan, memiliki potensi besar untuk menurunkan kerugian material. Temuan ini juga menunjukkan bahwa prioritas pengendalian tidak semata-mata ditentukan oleh persentase *waste level*, tetapi harus mempertimbangkan kombinasi volume *waste* dan nilai ekonominya.

Analisis *Fault Tree Analysis* (FTA)

Sebelas material yang mencapai kontribusi kumulatif 81,83% selanjutnya dianalisis menggunakan FTA untuk mengidentifikasi penyebab dominan. Setiap *fault tree* menggunakan *waste material* sebagai *top event*, kemudian diuraikan menjadi *intermediate event* dan *basic event*. Dokumen penelitian menyediakan diagram FTA untuk masing-masing dari 11 material prioritas dan rekapitulasi persentase dominansi *basic event*.

Tabel 3. Rekapitulasi *basic event* dominan hasil FTA

No.	Material Prioritas	<i>Basic Event</i> Dominan	Dominansi (%)
1	Kaca Rayben	Salah mengukur bukaan	35
2	Cat epoxy lantai dak	Perbandingan campuran tidak sesuai	25
3	Beton site mix K-250	Sisa beton setelah pengecoran	28
4	Frame kusen aluminium putih	Salah pengukuran bukaan	34
5	Handrail pipa 2"	Kesalahan pemotongan pipa	27
6	Pipa PVC Type AW 4"	Salah pemotongan pipa	34
7	ACP rangka hollow	Salah pengukuran	28
8	Ornament besi hollow	Salah pengukuran	27
9	ACP cutting laser	Gambar/pola salah	26
10	Cat dinding interior	Pembersihan permukaan kurang	24
11	Cat dinding eksterior	Hujan atau kelembaban tinggi	23

Sumber: hasil analisis FTA

Hasil FTA menunjukkan bahwa *basic event* paling dominan adalah salah mengukur bukaan pada kaca Rayben sebesar 35%, kemudian salah pengukuran bukaan pada frame kusen aluminium putih sebesar 34% dan salah pemotongan pipa pada PVC Type AW 4" sebesar 34%. Pada beton site mix K-250, penyebab dominan adalah sisa beton setelah pengecoran sebesar 28%, sedangkan pada ACP cutting laser penyebab terbesar adalah kesalahan gambar atau pola sebesar 26%. Untuk pekerjaan pengecatan, penyebab dominan berbeda: *cat epoxy lantai dak* dipengaruhi ketidaksesuaian perbandingan campuran sebesar 25%, *cat dinding interior* dipengaruhi pembersihan permukaan yang

kurang sebesar 24%, dan *cat dinding eksterior* dipengaruhi hujan atau kelembaban tinggi sebesar 23%.

Rentang dominansi *basic event* yang diperoleh berada pada 23–35%. Angka tersebut merupakan nilai dominansi yang tercantum dalam tabel hasil FTA masing-masing material, dengan jumlah kontribusi *basic event* pada setiap material dinormalisasi menjadi 100%. Sebagai contoh, pada kaca Rayben terdapat enam *basic event*, yaitu salah mengukur bukaan 35%, kesalahan pemotongan 22%, pecah saat pengangkutan 10%, pecah saat pemasangan 18%, penyimpanan tidak aman 7%, dan perubahan desain 8%, yang seluruhnya berjumlah 100%.

Pembahasan

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pemborosan material mempunyai dua dimensi yang perlu dibedakan, yaitu dimensi teknis dan ekonomi. Dari dimensi teknis, *waste level* menunjukkan bahwa beberapa material mempunyai tingkat pemborosan relatif tinggi, seperti *cat list plank* sebesar 30,07%, *pipa PVC Type AW 4"* sebesar 20,83%, dan *cat dinding eksterior* sebesar 14,51%. Namun, ketika dampak ekonomi diperhitungkan melalui *waste cost*, material yang menjadi prioritas berubah karena besarnya kerugian ditentukan oleh kombinasi volume *waste* dan harga satuan. *Cat dinding eksterior* menjadi material paling dominan dengan *waste cost* Rp.6.336.001,03, sedangkan *cat list plank* yang mempunyai *waste level* tertinggi tidak termasuk dalam 11 material prioritas. Perbedaan ini menunjukkan pentingnya menggunakan indikator ekonomi ketika tujuan analisis adalah menetapkan prioritas pengendalian biaya.

Temuan Pareto menunjukkan bahwa 11 dari 45 material menghasilkan 81,83% total *waste cost*. Pola konsentrasi tersebut memperkuat fungsi Pareto sebagai alat penyaringan masalah karena pengendalian dapat diarahkan pada kelompok material yang memberikan dampak terbesar, bukan dilakukan secara seragam terhadap seluruh material. Hasil ini konsisten dengan pembahasan penelitian terdahulu dalam dokumen yang menempatkan Pareto sebagai alat untuk mengidentifikasi material dominan sehingga sumber daya pengendalian dapat difokuskan pada penyebab atau material dengan kontribusi terbesar.

Pada tahap FTA, penyebab pemborosan memperlihatkan karakteristik yang berbeda menurut jenis material. Kesalahan pengukuran menjadi pola yang berulang pada kaca Rayben, frame kusen aluminium putih, ACP rangka hollow, dan ornament besi

hollow. Kesalahan pemotongan muncul pada handrail pipa dan pipa PVC Type AW 4", sedangkan kesalahan desain atau pola menjadi penyebab utama pada ACP cutting laser. Pola tersebut memperlihatkan bahwa sebagian besar penyebab dominan berkaitan dengan ketelitian pekerjaan, proses fabrikasi, dan pengendalian pelaksanaan. Pada pekerjaan tertentu, faktor eksternal juga berperan, seperti hujan atau kelembaban tinggi pada cat dinding eksterior.

Temuan pada cat dinding interior memperlihatkan bahwa pembersihan permukaan yang kurang menjadi *basic event* dominan sebesar 24%. Kondisi permukaan yang tidak bersih dapat menurunkan daya lekat cat dan meningkatkan kemungkinan pekerjaan ulang. Temuan ini sejalan dengan penelitian Faruki et al. (2023) yang dicantumkan dalam dokumen, bahwa kesalahan pelaksanaan dan *rework* merupakan faktor penting dalam terjadinya *waste material*. (Faruki & Wiyanto, 2023). Temuan tersebut juga mendukung Formoso et al. (2002) bahwa pemborosan material pada proyek konstruksi dapat ditekan melalui peningkatan kualitas manajemen proyek dan pengendalian proses pelaksanaan. (Formoso et al., 2002).

Secara praktis, hasil FTA menunjukkan bahwa strategi pengendalian tidak cukup hanya berupa pengurangan material sisa setelah pekerjaan selesai. Pengendalian perlu diarahkan ke tahap sebelum dan selama pelaksanaan, terutama melalui verifikasi ukuran bukaan sebelum fabrikasi, pemeriksaan ulang dimensi sebelum pemotongan, pengendalian pola dan gambar kerja sebelum proses *cutting*, pengawasan pencampuran material, pengendalian volume pengecoran, serta pemeriksaan kondisi permukaan sebelum pengecatan. Untuk pekerjaan eksterior, pengaturan waktu pelaksanaan berdasarkan kondisi cuaca juga diperlukan. Dengan demikian, hasil Pareto

memberikan jawaban mengenai material mana yang harus diprioritaskan, sedangkan FTA memberikan jawaban mengenai apa yang harus diperbaiki.

Secara keseluruhan, integrasi Pareto dan FTA menghasilkan alur pengendalian yang lebih operasional. Pareto menyaring 45 material menjadi 11 material prioritas yang berkontribusi 81,83% terhadap *waste cost*, sedangkan FTA mengidentifikasi penyebab dominan pada setiap material dengan rentang 23–35%. Kontribusi utama penelitian terletak pada penghubungan dimensi dampak ekonomi melalui *waste cost* dengan dimensi akar penyebab melalui FTA. Pendekatan tersebut memungkinkan pengendalian diarahkan secara lebih spesifik, terutama pada kesalahan pengukuran, pemotongan, fabrikasi, persiapan permukaan, pencampuran material, pengendalian sisa pengecoran, dan kondisi lingkungan.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemborosan material pada Proyek Pembangunan Gedung Perpustakaan dan Laboratorium memberikan dampak nyata terhadap efisiensi penggunaan material dan biaya proyek. Berdasarkan analisis terhadap 45 jenis material, pemborosan material menghasilkan total *waste cost* sebesar Rp26.442.378,10. Material dengan kerugian biaya terbesar adalah cat dinding eksterior sebesar Rp6.336.001,03 dengan kontribusi 23,96%, diikuti cat dinding interior sebesar Rp5.030.664,32 atau 19,03%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa material dengan tingkat *waste* relatif tinggi belum tentu menjadi penyumbang kerugian biaya terbesar sehingga penetapan prioritas perlu mempertimbangkan dampak ekonominya. Nilai *waste index* digunakan sebagai indikator timbulan *waste* terhadap luas bangunan, dengan luas *Gross Floor Area* sebesar 828 m².

Analisis Diagram Pareto menunjukkan bahwa 11 jenis material prioritas memberikan kontribusi kumulatif sebesar 81,83% terhadap

total *waste cost*. Material prioritas tersebut meliputi cat dinding eksterior, cat dinding interior, ACP *cutting laser*, ornamen besi *hollow*, ACP rangka *hollow*, pipa PVC Type AW 4", *handrail* pipa 2", *frame* kusen aluminium putih, beton *site mix* K-250, cat epoxy lantai dak, dan kaca Rayben. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian tidak perlu dilakukan secara seragam terhadap seluruh material, tetapi dapat difokuskan terlebih dahulu pada kelompok material yang memberikan kontribusi terbesar terhadap kerugian biaya. Pendekatan tersebut menjadikan hasil Pareto sebagai dasar yang lebih operasional dalam menentukan prioritas pengendalian material.

Analisis *Fault Tree Analysis* terhadap 11 material prioritas menunjukkan bahwa setiap material memiliki *basic event* dominan yang berbeda, dengan tingkat dominansi berada pada rentang 23–35%. Penyebab dengan dominansi tertinggi adalah salah mengukur bukaan pada pekerjaan kaca Rayben sebesar 35%, diikuti salah pengukuran bukaan pada *frame* kusen aluminium putih dan salah pemotongan pipa pada pipa PVC Type AW 4" yang masing-masing sebesar 34%. Penyebab dominan lainnya meliputi sisa beton setelah pengecoran sebesar 28%, salah pengukuran pada ACP rangka *hollow* sebesar 28%, kesalahan pemotongan *handrail* pipa 2" sebesar 27%, salah pengukuran ornamen besi *hollow* sebesar 27%, kesalahan gambar/pola pada ACP *cutting laser* sebesar 26%, ketidaksesuaian perbandingan campuran cat epoxy sebesar 25%, kurangnya pembersihan permukaan pada cat dinding interior sebesar 24%, serta hujan atau kelembaban tinggi pada cat dinding eksterior sebesar 23%.

Berdasarkan temuan tersebut, implikasi praktis penelitian adalah bahwa strategi pengendalian *waste material* perlu diarahkan pada pencegahan sebelum material menjadi limbah, terutama melalui pengukuran ulang dan verifikasi dimensi sebelum fabrikasi, pemeriksaan gambar dan pola sebelum *cutting*, pengendalian proses pemotongan, pengawasan pencampuran material sesuai spesifikasi, pengendalian volume pengecoran, pemeriksaan kondisi permukaan

sebelum pengecatan, serta penyesuaian pekerjaan pengecatan eksterior terhadap kondisi cuaca. Dengan demikian, hasil integrasi Pareto dan FTA memberikan dasar pengendalian yang lebih spesifik: Pareto menentukan material yang harus diprioritaskan, sedangkan FTA menentukan penyebab yang harus dikendalikan.

Penelitian selanjutnya disarankan memperluas objek pada beberapa proyek gedung dengan karakteristik dan metode pelaksanaan yang berbeda agar hasil dapat dibandingkan dan menghasilkan *benchmark waste material* yang lebih representatif. Selain itu, penelitian berikutnya perlu mengembangkan metode kuantifikasi *basic event* FTA secara lebih terukur, misalnya dengan menggunakan frekuensi kejadian, probabilitas, atau pembobotan pakar yang tervalidasi, sehingga nilai dominansi penyebab dapat dipertanggungjawabkan secara statistik. Integrasi Pareto–FTA juga dapat dikembangkan dengan pendekatan *Lean Construction*, *Building Information Modeling* (BIM), atau metode analisis risiko sehingga identifikasi pemborosan tidak hanya bersifat diagnostik, tetapi dapat digunakan untuk memprediksi dan mencegah *waste* sejak tahap perencanaan.

Referensi

- Bossink, B. A. G., & Brouwers, H. J. H. (1996). Construction Waste: Quantification and Source Evaluation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(1), 55–60. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1996\)122:1\(55\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1996)122:1(55))
- Dewi, S. U., & Suryamandala, E. (2025). Studi Perhitungan Kebutuhan Dan Pemanfaatan Sisa Tulangan Kolom Dalam Konstruksi Gedung Dengan Cutting Optimization Pro (COP). *TEKNIKA SAINS: JURNAL ILMU TEKNIK*. <https://doi.org/10.24967/teksis.v10i1.3940>
- Ericson, C. A. (1999). *Fault Tree Analysis – A History BT - Proceedings of the 17th International System Safety Conference*.
- Faruki, R. R., & Wiyanto, H. (2023). ANALISIS WASTE MATERIAL DAN FAKTOR PENYEBAB PADA PROYEK APARTEMEN X. *JMTS: JURNAL MITRA TEKNIK SIPIL*. https://doi.org/10.24912_jmts.v6i4.24888
- Formoso, C. T., Soibelman, L., De Cesare, C., & Isatto, E. L. (2002). Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4), 316–325. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:4\(316\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:4(316))
- Hadut, A. M. (2018). *Kajian Identifikasi Penyebab Construction Waste pada Kontraktor di Daerah Yogyakarta dan Kupang*.
- Noviani, S. A., & Rachma, I. N. (2025). Analisis Faktor Penyebab Waste Dalam Pendekatan Lean Construction Pada Beberapa Kontraktor. *AKSELERASI: JURNAL ILMIAH TEKNIK SIPIL*. <https://doi.org/10.37058/aks.v6i2.14239>
- Pertiwi, I. M., Herlambang, F. S., & Kristinayanti, W. S. (2025). Analisis Waste Material Konstruksi pada Proyek Gedung (Studi Kasus pada Proyek Gedung di Kabupaten Badung). *JURNAL SIMETRIK*. https://doi.org/10.31959_js.v9i1.204
- Silaban, M. E., & Pamungkas, A. H. (2023). Analisis Waste Material Menggunakan Fault Tree Analysis Pada Pekerjaan Concrete Barrier. *TECHNOLOGIC*. https://doi.org/10.52453_t.v14i2.363
- Wakano, V. Y., & Sandjaya, A. (2025). Perbandingan Kebutuhan Besi Dan Biaya Menggunakan Metode Bar Bending Schedule (BBS) Pada Proyek Renovasi Rumah Tinggal. *JMTS: JURNAL MITRA TEKNIK SIPIL*. https://doi.org/10.24912_jmts.v8i1.33134
- Yuni, N. K. S. E., Yuliana, N., & Sudiarta, I. K. (2023). Analisa Waste Material Besi Dalam Upaya Pengendalian Sisa Material Konstruksi. *JURNAL TEKNIK*

SIPIL *TERAPAN.*
https://doi.org/10.47600_jtst.v5i1.561