

Optimalisasi Lean-Green Construction Untuk Minimasi Jejak Karbon pada Proyek Overpass Kota Medan

Mei Brilian Harefa^{1✉}, Jimmi Roy Tampubolon², Ferdinand Sinuhaji³
(1,2,3) Program Studi Arsitektur, Universitas Quality Berastagi, Karo, Indonesia

Abstrak: Proyek overpass perkotaan memerlukan volume beton, baja tulangan, komponen pracetak, alat berat, dan sistem logistik yang besar. Apabila aliran kerja tidak dikendalikan, aktivitas menunggu, pemindahan berulang, pekerjaan ulang, serta kelebihan material meningkatkan konsumsi sumber daya dan jejak karbon. Penelitian ini bertujuan mengukur baseline emisi sekaligus menentukan prioritas perbaikan proses melalui integrasi Lean Construction dan Green Construction. Penelitian menggunakan studi kasus campuran dengan data kuantitas MC-0, Life Cycle Assessment pada batas A1-A5, Value Stream Mapping, Waste Assessment Model, matriks waste-sumber emisi, dan konsensus pakar teknik. Inventori proyek terdiri atas 1.448,07 m³ beton, 171.713,30 kg baja tulangan, dan 18 unit girder. Emisi A1-A3 mencapai 324,35 ton CO₂e untuk beton dan 285,04 ton CO₂e untuk baja. Setelah emisi girder, transportasi A4, dan aktivitas konstruksi A5 diperhitungkan, baseline proyek menjadi 806,78 ton CO₂e. VSM menunjukkan lead time total 1.253,68 menit dengan process cycle efficiency 45,32%. Future state menurunkan lead time menjadi 1.068,55 menit dan meningkatkan efisiensi menjadi 53,17%. WAM menempatkan waiting sebagai waste utama, diikuti transportation dan defects/rework. Skenario konsensus pakar mengurangi rework 40%, idle alat 55%, transportasi tidak efisien 10%, dan waste material 45%, sehingga 19,25 ton CO₂e dapat dihindari. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pengendalian karbon pada proyek infrastruktur perlu menggabungkan keputusan material dengan stabilisasi aliran kerja, pencegahan rework, pengurangan idle, dan sinkronisasi logistik.

Abstract: Urban overpass projects require substantial volumes of concrete, reinforcing steel, precast components, heavy equipment, and logistics. When workflow is poorly controlled, waiting, repeated movement, rework, and excess material increase resource consumption and carbon emissions. This study quantifies the emission baseline and determines process-improvement priorities by integrating Lean Construction and Green Construction. A mixed case-study design was applied using MC-0 quantities, an A1-A5 Life Cycle Assessment boundary, Value Stream Mapping, the Waste Assessment Model, a waste-emission source matrix, and engineering expert consensus. The project inventory comprises 1,448.07 m³ of concrete, 171,713.30 kg of reinforcing steel, and 18 girders. A1-A3 emissions amount to 324.35 tCO₂e for concrete and 285.04 tCO₂e for reinforcing steel. Including girders, A4 transportation, and A5 construction activities raises the project baseline to 806.78 tCO₂e. The current-state VSM records a total lead time of 1,253.68 minutes and a process cycle efficiency of 45.32%. The future state reduces lead time to 1,068.55 minutes and increases efficiency to 53.17%. WAM ranks waiting as the dominant waste, followed by transportation and defects/rework. The expert-consensus scenario targets reductions of 40% in rework, 55% in equipment idle time, 10% in inefficient transportation, and 45% in material waste, avoiding 19.25 tCO₂e. The findings demonstrate that carbon management in infrastructure construction must combine low-carbon material decisions with workflow stabilisation, rework prevention, idle-time reduction, and logistics synchronisation.

Article history:

Received: 21 July 2026

Revised: 17 September 2026

Accepted: 19 September 2026

Published: 21 September 2026

Kata kunci:

efisiensi aliran kerja, jejak karbon, konstruksi ramah lingkungan

Keyword:

workflow efficiency, carbon footprint, green construction

This is an open-access article under the [CC-BY-SA License](#).



How to cite: Harefa, M. B., Tampubolon, J. R., & Sinuhaji, F. (2026). Optimalisasi Lean-Green Construction Untuk Minimasi Jejak Karbon pada Proyek Overpass Kota Medan. RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik, 4(4), 1315–1333. <https://doi.org/10.70716/reswara.v4i4.770>

PENDAHULUAN

Sektor konstruksi merupakan penggerak utama pembangunan wilayah, tetapi pada saat yang sama menjadi pengguna material, energi, dan bahan bakar dalam jumlah besar. Beton, baja, serta aktivitas alat berat menghasilkan emisi yang tersebar sejak tahap penyediaan bahan baku sampai pemasangan di lokasi proyek. Kajian mutakhir menempatkan pengurangan karbon konstruksi sebagai agenda yang tidak dapat dipisahkan dari keputusan desain, pengadaan, metode kerja, dan pengendalian operasi lapangan [1], [2]. Laporan mitigasi global juga menegaskan bahwa penurunan emisi membutuhkan perubahan pada sisi material sekaligus cara infrastruktur direncanakan dan dibangun [32].

Jejak karbon proyek infrastruktur tidak hanya ditentukan oleh jumlah material yang terpasang. Pemborosan selama pelaksanaan ikut membentuk emisi tambahan. Beton yang tersisa, tulangan yang dipotong tanpa optimasi, alat yang menyala ketika menunggu, kendaraan yang datang dengan muatan parsial, serta pekerjaan yang harus dibongkar dan dikerjakan kembali merupakan contoh mekanisme yang mengubah persoalan produktivitas menjadi persoalan lingkungan. Sarhan dan Pretlove [3] serta Tam et al. [9] menunjukkan bahwa construction waste memiliki konsekuensi karbon karena material terbangun telah membawa embodied carbon sejak diproduksi. Dengan demikian, pengendalian waste harus dilihat sebagai strategi mitigasi, bukan sekadar upaya penghematan biaya.

Pada proyek overpass perkotaan, hubungan antara pemborosan dan emisi menjadi lebih kompleks. Ruang kerja terbatas, pergerakan lalu lintas aktif, kebutuhan pengaturan akses, mobilisasi girder, serta ketergantungan antara pekerjaan pembesian, bekisting, pengecoran, dan erection menimbulkan variasi tinggi. Kondisi tersebut memperbesar potensi waiting, transportation, motion, dan rework. Goggins et al. [8] menunjukkan bahwa proses konstruksi mempunyai dampak lingkungan yang berbeda menurut jenis aktivitas dan pola penggunaan energi. Pham dan Tien [4] menambahkan bahwa infrastruktur memerlukan inventori material yang teliti karena embodied carbon sering menjadi komponen dominan.

Praktik pengelolaan proyek di Indonesia masih sering menempatkan biaya, mutu, waktu, dan keselamatan sebagai indikator utama. Aspek karbon mulai dibahas, tetapi belum selalu diterjemahkan menjadi indikator operasional pada tingkat paket pekerjaan. Pertumbuhan konstruksi yang cepat meningkatkan urgensi pengendalian dampak lingkungan [11]. Pada saat yang sama, persoalan pengelolaan limbah dan kesiapan organisasi masih menghambat pelaksanaan konstruksi hijau [12], [17], [18]. Pengalaman nasional juga menunjukkan bahwa pengendalian lingkungan, keselamatan, dan koordinasi lapangan perlu berjalan dalam satu sistem manajemen, bukan sebagai kegiatan yang terpisah [13], [15], [16].

Lean Construction menawarkan pendekatan yang relevan karena berfokus pada penciptaan nilai, stabilisasi aliran, pengurangan variasi, dan eliminasi aktivitas yang tidak menambah nilai. Teori produksi dalam konstruksi menempatkan transformasi, flow, dan value sebagai satu kesatuan [23]. Dalam praktik proyek, prinsip tersebut diterjemahkan melalui perencanaan kolaboratif, pengendalian hambatan, standardisasi kerja, serta pengukuran waktu proses. Ballard dan Tommelein [24] menegaskan bahwa sistem produksi yang andal mendukung kinerja keberlanjutan karena sumber daya digunakan pada saat dan tempat yang tepat.

Green Construction, sebaliknya, menitikberatkan pada efisiensi energi, pemilihan material, pengurangan limbah, pengendalian emisi, serta perlindungan lingkungan. Pendekatan ini berkembang

dari agenda bangunan hijau menuju pengelolaan siklus hidup proyek secara lebih luas [25], [28]. Integrasi Lean dan Green memungkinkan pemborosan diperlakukan sebagai penghubung antara produktivitas dan lingkungan. Aslam et al. [5], El-Sawalhi et al. [19], dan Söylemez [6] menunjukkan bahwa sinergi keduanya menghasilkan keputusan yang lebih seimbang dibanding penerapan secara terpisah.

Kesenjangan penelitian terletak pada terbatasnya analisis yang secara kuantitatif menghubungkan waste proses dengan sumber emisi pada proyek overpass di Indonesia. Sejumlah penelitian Lean masih menekankan efisiensi biaya dan waktu, sedangkan kajian Green sering berfokus pada material atau teknologi. Penelitian berbasis proses menunjukkan bahwa hotspot karbon dapat dipetakan menurut aktivitas [27], [31], tetapi penerapannya pada pekerjaan beton, pembesian, dan girder dalam satu kerangka operasional masih terbatas. Studi ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menggabungkan inventori MC-O, LCA A1-A5, VSM, WAM, matriks waste-emisi, dan skenario konsensus pakar.

Kontribusi penelitian terdiri atas tiga bagian. Pertama, penelitian menghasilkan baseline karbon berbasis kuantitas material dan aktivitas konstruksi. Kedua, penelitian mengukur efisiensi aliran kerja dan mengidentifikasi waste dominan pada tiga paket pekerjaan struktur. Ketiga, penelitian menerjemahkan hasil analisis menjadi target pengurangan yang dapat dipantau melalui indikator rework, idle alat, transportasi, dan waste material. Kerangka tersebut membuat rekomendasi tidak berhenti pada pernyataan normatif, tetapi memiliki angka awal, sasaran, serta mekanisme evaluasi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, pertanyaan penelitian adalah: (1) bagaimana komposisi jejak karbon A1-A5 pada pekerjaan beton, pembesian, dan girder; (2) waste apa yang paling dominan berdasarkan VSM dan WAM; (3) bagaimana hubungan waste dengan sumber emisi; dan (4) strategi Lean-Green apa yang memberikan reduksi paling layak menurut konsensus pakar teknik. Tujuan penelitian adalah menghitung baseline emisi, mengukur kinerja aliran proses, memetakan waste-sumber emisi, dan menyusun skenario pengurangan yang dapat diterapkan pada pengelolaan proyek overpass.

METODE PENELITIAN

Desain dan Objek Penelitian

Penelitian menggunakan studi kasus campuran pada proyek pembangunan overpass di Kota Medan. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menghitung kuantitas material, emisi karbon, waktu proses, PCE, skor WAM, dan potensi reduksi. Pendekatan kualitatif digunakan untuk menafsirkan penyebab waste, hubungan antaraktivitas, serta kelayakan tindakan perbaikan. Unit analisis dibatasi pada pekerjaan beton, pembesian, dan girder karena ketiganya mewakili penggunaan material dan peralatan terbesar pada struktur overpass.

Dataset yang digunakan merupakan data final yang ditetapkan peneliti setelah pemeriksaan teknis. Pemeriksaan meliputi pencocokan item pekerjaan dan satuan pada MC-O, penjumlahan ulang volume, koreksi formula pembesian, pengecekan konsistensi faktor emisi, review klasifikasi VA-NNVA-NVA, serta konsensus terhadap target pengurangan. Dengan prosedur tersebut, data digunakan sebagai dasar analisis hasil tanpa status sementara.

Variabel dan Indikator

Tabel 1. Variabel dan indikator penelitian

Kelompok	Variabel	Indikator	Satuan/Skala	Sumber data
Inventori material	Beton	Volume per mutu dan elemen	m ³	MC-0
Inventori material	Baja tulangan	Berat per elemen	kg	MC-0 dan rekap koreksi
Inventori material	Girder	Jumlah komponen	unit	MC-0
LCA	Emisi A1-A3	Kuantitas × faktor emisi produk	kg atau ton CO ₂ e	EPD
LCA	Emisi A4	Jarak, muatan, perjalanan	ton-km/CO ₂ e	Data transportasi
LCA	Emisi A5	BBM, listrik, rework, waste	liter, kWh, CO ₂ e	Data pelaksanaan
VSM	Kinerja aliran	VA, NNVA, NVA, lead time, PCE	menit dan %	Time study
WAM	Prioritas waste	Skor WAQ dan WRM	skor indeks	Kuesioner dan matriks
Skenario	Reduksi emisi	Avoided emission dan baseline akhir	ton CO ₂ e	Konsensus pakar

Inventori Material dan Pemeriksaan Kuantitas

Data material diperoleh dari dokumen MC-0. Setiap item dikelompokkan menurut jenis material, mutu, dan elemen struktur. Volume beton dijumlahkan per mutu, sedangkan baja tulangan direkap per kelompok elemen. Pemeriksaan pembesian menemukan formula subtotal yang tumpang tindih pada rekap awal. Penjumlahan dilakukan ulang menggunakan nilai unik, sehingga total baja yang digunakan dalam analisis adalah 171.713,30 kg. Langkah ini mencegah double counting yang dapat memperbesar baseline karbon.

Girder dicatat sebanyak 18 unit tipe I dengan panjang 30 m. Inventori girder mencakup emisi produksi komponen, transportasi ke lokasi, dan aktivitas erection. Pemisahan tersebut dibutuhkan karena sumber emisinya berbeda: embodied carbon berasal dari material girder, A4 berasal dari trailer, dan A5 berasal dari crane, alat bantu, serta waktu idle.

Batas Sistem LCA dan Faktor Emisi

Tabel 2. Batas sistem LCA A1-A5

Modul	Tahap	Cakupan dalam penelitian	Contoh aktivitas
A1	Penyediaan bahan baku	Ekstraksi dan pengolahan bahan dasar	Semen, agregat, scrap/bijih baja
A2	Transportasi ke pabrik	Pengangkutan bahan baku	Material ke batching plant/pabrik baja
A3	Manufaktur	Produksi beton, baja, dan girder	Mixing, rolling, fabrikasi
A4	Transportasi ke proyek	Pengiriman produk jadi	Truk mixer, truk baja, trailer girder
A5	Konstruksi/pemasangan	Energi dan limbah di lokasi	Pompa, crane, genset, rework, waste

Emisi dihitung dengan mengalikan kuantitas aktivitas dan faktor emisi yang sesuai. Untuk material, kuantitas dinyatakan dalam m³ atau ton. Untuk bahan bakar dan listrik, kuantitas dinyatakan dalam liter dan kWh. Seluruh hasil dikonversi menjadi ton CO₂e agar dapat dijumlahkan.

$$E_i = Q_i \times EF_i$$

Pada persamaan tersebut, E_i adalah emisi aktivitas ke- i , Q_i adalah kuantitas aktivitas, dan EF_i adalah faktor emisi. Faktor beton mengacu pada EPD ready-mix, baja tulangan pada EPD reinforcing steel, listrik pada faktor emisi sistem Sumatera, dan bahan bakar pada faktor konversi yang dipakai dalam inventori [33]-[36].

Tabel 3. Faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan

Material/energi	Faktor emisi	Unit deklarasi	Modul	Penggunaan
Beton fc'10 MPa	100,2 kg CO ₂ e	per m ³	A1-A3	Lantai kerja/pondasi
Beton fc'25 MPa	171,0 kg CO ₂ e	per m ³	A1-A3	Capping beam/parapet
Beton fc'30 MPa	245,0 kg CO ₂ e	per m ³	A1-A3	Pier, abutment, slab
Beton fc'45 MPa	317,0 kg CO ₂ e	per m ³	A1-A3	Diafragma
Baja tulangan BjTS 420	1.660 kg CO ₂ e	per ton	A1-A3	Seluruh pembesian
Listrik Sumatera	0,77 kg CO ₂ e	per kWh	A5	Peralatan dan fasilitas
Bahan bakar diesel	2,512 kg CO ₂ e	per liter	A4-A5	Kendaraan dan alat

Prosedur Value Stream Mapping

VSM disusun untuk satu siklus pekerjaan pembesian, satu siklus pengecoran, dan satu unit erection girder. Urutan aktivitas dicatat dari persiapan sampai approval akhir. Waktu tiap aktivitas dirata-ratakan dari lima siklus dan dikelompokkan sebagai VA, NNVA, atau NVA. Current state menggambarkan kondisi dasar, sedangkan future state menerapkan target reduksi berdasarkan konsensus teknis.

Target perbaikan VSM adalah pengurangan waiting 40%, transportation 15%, motion 20%, overprocessing 10%, dan defects/rework 40%. Waktu VA dipertahankan karena menghasilkan perubahan fisik yang diperlukan. Waktu NNVA dan NVA dikurangi sesuai waste terkait. Hasil dibandingkan melalui lead time dan PCE.

Waste Assessment Model dan Matriks Waste-Emisi

Instrumen Waste Assessment Model (WAM) dalam penelitian ini digunakan untuk mengidentifikasi dan memeringkat waste berdasarkan penilaian WAQ dan WRM. Penelitian ini tidak melakukan pengujian validitas dan reliabilitas instrumen secara statistik secara terpisah. Oleh karena itu, hasil WAM diposisikan sebagai hasil penilaian kondisi waste pada objek penelitian dan digunakan sebagai dasar pemetaan prioritas waste.

WAM menganalisis tujuh waste. WAQ memuat indikator frekuensi waste, sedangkan WRM menilai hubungan sebab-akibat. Skor akhir dinormalisasi sehingga waste dengan nilai tertinggi memperoleh indeks 100. Peringkat kemudian dibandingkan dengan durasi NVA pada VSM. Keselarasan antara skor dan waktu memperkuat keputusan prioritas.

Matriks waste-emisi memakai skala 1 sampai 3, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Kolom sumber emisi terdiri atas embodied carbon material, bahan bakar alat, bahan bakar transportasi, listrik, dan disposal. Nilai hubungan ditetapkan berdasarkan mekanisme yang teramati. Sebagai contoh, rework memperoleh hubungan tinggi terhadap material dan disposal karena menimbulkan pembongkaran serta penggantian.

Penyusunan Skenario dan Konsensus Pakar

Tiga skenario digunakan. Quick Wins berisi intervensi yang dapat diterapkan segera dengan perubahan organisasi terbatas. Konsensus Pakar menggunakan target yang dinilai paling layak berdasarkan dampak karbon, kemudahan, biaya, dan risiko. Skenario Agresif menggambarkan potensi maksimum apabila proyek menerapkan kontrol yang lebih ketat dan investasi lebih besar.

Penetapan skenario pengurangan emisi melibatkan sebanyak lima pakar yang dipilih secara purposive berdasarkan kompetensi dan pengalaman yang relevan dengan manajemen konstruksi, Lean Construction, Green Construction, pengendalian waste, serta pengelolaan emisi pada proyek konstruksi. Keterlibatan pakar ditujukan untuk memberikan penilaian terhadap kelayakan target pengurangan rework, idle alat, transportasi tidak efisien, dan waste material berdasarkan kondisi proyek serta potensi penerapannya.

Konsensus pakar dilakukan melalui proses penilaian terhadap target pengurangan pada empat kategori, yaitu rework, idle alat, transportasi tidak efisien, dan waste material. Setiap pakar diberikan indikator dan alternatif target pengurangan untuk dinilai berdasarkan kondisi proyek, potensi dampak karbon, kemudahan penerapan, kebutuhan biaya, dan risiko implementasi.

Penilaian dilakukan secara independen, kemudian seluruh hasil penilaian dikompilasi dan dibandingkan untuk mengidentifikasi tingkat kesesuaian antar-pakar. Target akhir ditetapkan setelah dilakukan pembahasan terhadap perbedaan penilaian dan diperoleh kesepakatan mengenai tingkat pengurangan yang dianggap layak diterapkan pada kondisi proyek.

Emisi yang dapat dihindari dikelompokkan menjadi rework, idle alat, transportasi tidak efisien, dan waste material. Avoided emission dihitung sebagai baseline kategori dikalikan target reduksi. Efektivitas skenario dibaca dalam dua ukuran: persentase terhadap emisi avoidable dan persentase terhadap baseline A1-A5.

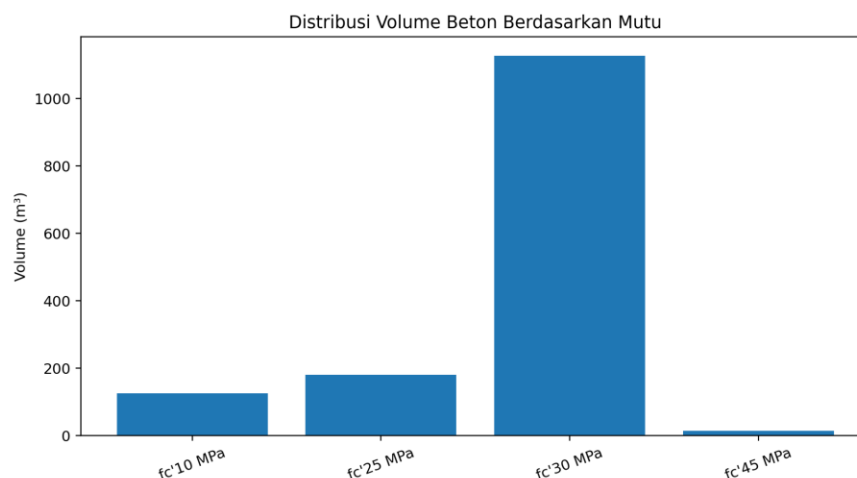
HASIL DAN PEMBAHASAN

Inventori Material Proyek

Rekap MC-0 menghasilkan total beton 1.448,07 m³, baja tulangan 171.713,30 kg, dan 18 unit girder. Beton fc'30 MPa mendominasi dengan volume 1.127,08 m³ atau 77,83% dari total beton. Dominasi tersebut sejalan dengan fungsi mutu fc'30 MPa pada pier, abutment, slab, dan leveling pad. Beton fc'25 MPa digunakan pada capping beam dan parapet, sedangkan fc'10 MPa digunakan untuk lantai kerja, geowall, dan pondasi ramp. Beton fc'45 MPa dialokasikan pada diafragma.

Tabel 4. Inventori material struktur berdasarkan MC-0

Komponen	Kuantitas	Proporsi/keterangan
Beton fc'30 MPa	1.127,08 m ³	77,83% dari total beton
Beton fc'25 MPa	181,03 m ³	12,50% dari total beton
Beton fc'10 MPa	125,06 m ³	8,64% dari total beton
Beton fc'45 MPa	14,90 m ³	1,03% dari total beton
Baja tulangan BJTS 420	171.713,30 kg	Nilai setelah koreksi formula
Girder tipe I, 30 m	18 unit	9 unit per arah



Gambar 1. Distribusi volume beton berdasarkan mutu

Distribusi Beton dan Baja Tulangan

Beton fc'30 MPa terkonsentrasi pada abutment/pile cap sebesar 494,08 m³ dan pier/pile cap sebesar 371,50 m³. Kedua elemen menyerap 76,80% volume fc'30 MPa. Slab jembatan menggunakan 194,06 m³, sedangkan leveling pad 67,44 m³. Konsentrasi volume pada abutment dan pier menjadikan kedua elemen sebagai sasaran utama pengendalian desain campuran, volume pesanan, dan sisa pengecoran.

Pada beton fc'25 MPa, capping beam dan parapet oprit menggunakan 133,29 m³, sedangkan capping beam dan parapet jembatan menggunakan 47,74 m³. Beton fc'10 MPa terutama digunakan pada pondasi ramp badan jalan sebesar 95,10 m³. Pola ini menunjukkan bahwa strategi pengurangan karbon tidak harus diterapkan merata. Prioritas ditentukan oleh kombinasi volume dan intensitas faktor emisi.

Distribusi baja tulangan menunjukkan abutment sebagai pengguna terbesar, yaitu 68.142,78 kg atau 39,68% dari total. Pier menggunakan 48.912,86 kg atau 28,49%. Parapet menggunakan 26.601,24 kg, leveling pad 14.627,06 kg, dan slab 13.429,36 kg. Abutment dan pier bersama-sama menyerap 68,17% baja, sehingga optimasi bar bending schedule dan cutting plan pada dua elemen tersebut memberikan pengaruh paling besar terhadap scrap.

Tabel 5. Distribusi baja tulangan berdasarkan elemen

Elemen pembesian	Berat (kg)	Proporsi
Abutment	68.142,78	39,68%
Pier	48.912,86	28,49%
Parapet	26.601,24	15,49%
Leveling pad	14.627,06	8,52%
Slab	13.429,36	7,82%
Total	171.713,30	100,00%

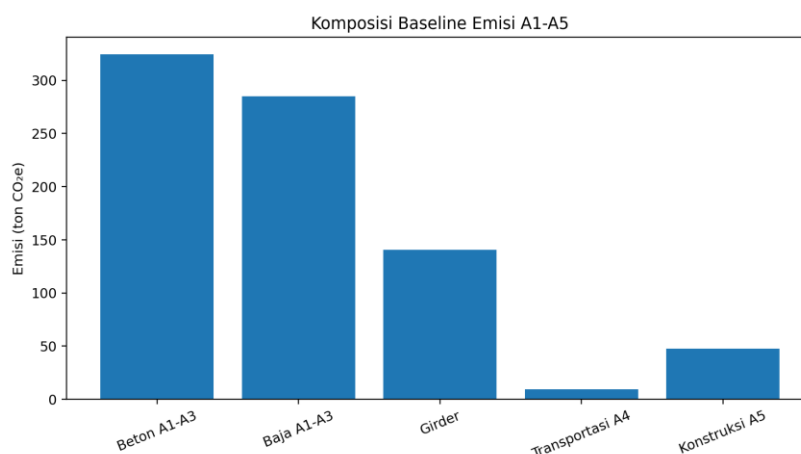
Baseline Jejak Karbon A1-A5

Perhitungan A1-A3 menghasilkan emisi beton 324,35 ton CO₂e dan baja tulangan 285,04 ton CO₂e. Total material beton dan baja mencapai 609,39 ton CO₂e. Setelah emisi girder 140,52 ton CO₂e, transportasi A4 9,26 ton CO₂e, dan konstruksi A5 47,61 ton CO₂e ditambahkan, baseline menjadi 806,78 ton CO₂e.

Beton menyumbang 40,20% baseline, sedangkan baja 35,33%. Kontribusi gabungan 75,53% menegaskan bahwa embodied carbon merupakan hotspot utama. Girder menyumbang 17,42%, sedangkan A4 dan A5 masing-masing 1,15% dan 5,90%. Meskipun proporsi A4-A5 lebih kecil, keduanya lebih mudah dipengaruhi oleh pengendalian operasional dalam jangka pendek.

Tabel 6. Baseline emisi A1-A5

Sumber emisi	Emisi (ton CO ₂ e)	Proporsi
Beton A1-A3	324,35	40,20%
Baja tulangan A1-A3	285,04	35,33%
Girder	140,52	17,42%
Transportasi A4	9,26	1,15%
Konstruksi A5	47,61	5,90%
Total	806,78	100,00%



Gambar 2. Komposisi baseline emisi A1-A5

Hasil Value Stream Mapping

Pekerjaan pembesian memiliki lead time 523,60 menit. Waktu VA sebesar 315,96 menit, NNVA 81,26 menit, dan NVA 126,38 menit. PCE current state mencapai 60,34%, tertinggi di antara tiga pekerjaan. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivitas pemotongan, pembengkokan, dan pemasangan

telah mengambil porsi dominan, tetapi waiting area siap dan koreksi susunan tulangan masih mengurangi efisiensi.

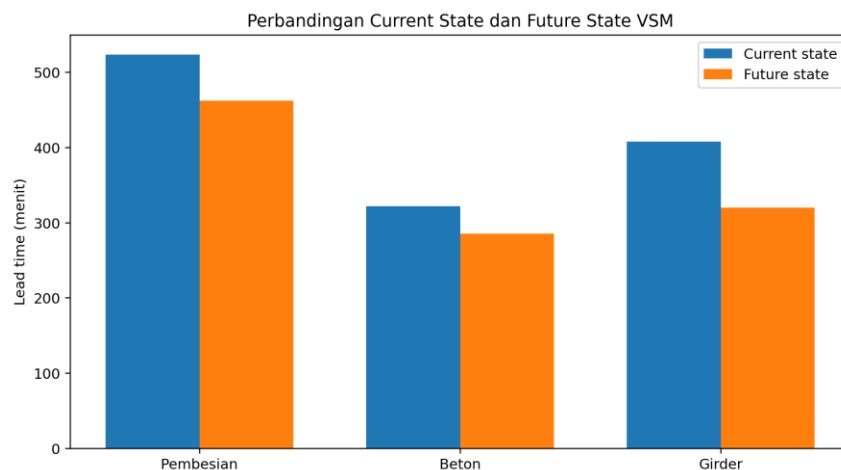
Pekerjaan beton memiliki lead time 322,04 menit dengan VA 153,76 menit, NNVA 102,58 menit, dan NVA 65,70 menit. PCE sebesar 47,75%. Antrean truk mixer, setup pompa, relokasi selang, dan pembersihan sisa beton menjadi titik perbaikan. Future state menurunkan lead time menjadi 285,49 menit dan meningkatkan PCE menjadi 53,86%.

Pekerjaan girder menunjukkan lead time 408,04 menit, tetapi waktu VA hanya 98,42 menit. PCE sebesar 24,12%, terendah pada seluruh paket. Setup crane, rigging, pengaturan lalu lintas, koordinasi lifting, dan idle setelah erection mengambil porsi besar. Future state menurunkan lead time menjadi 320,35 menit, sehingga PCE meningkat menjadi 30,72%. Reduksi lead time 21,49% pada pekerjaan girder merupakan yang terbesar.

Secara agregat, lead time berkurang dari 1.253,68 menit menjadi 1.068,55 menit. Penghematan 185,14 menit atau 14,77% meningkatkan PCE dari 45,32% menjadi 53,17%. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan produktivitas dapat dicapai tanpa mengurangi waktu transformasi utama; perbaikan diarahkan pada waiting, motion, transportation, overprocessing, dan rework.

Tabel 7. Ringkasan current state dan future state VSM

Pekerjaan	VA	NNVA	NVA	Lead time current	PCE current	Lead time future	PCE future	Reduksi
Pembesian	315,96	81,26	126,38	523,60	60,34%	462,71	68,29%	11,63%
Beton	153,76	102,58	65,70	322,04	47,75%	285,49	53,86%	11,35%
Girder	98,42	164,00	145,62	408,04	24,12%	320,35	30,72%	21,49%
Total	568,14	347,84	337,70	1.253,68	45,32%	1.068,55	53,17%	14,77%



Gambar 3. Perbandingan lead time current state dan future state

Hasil Waste Assessment Model

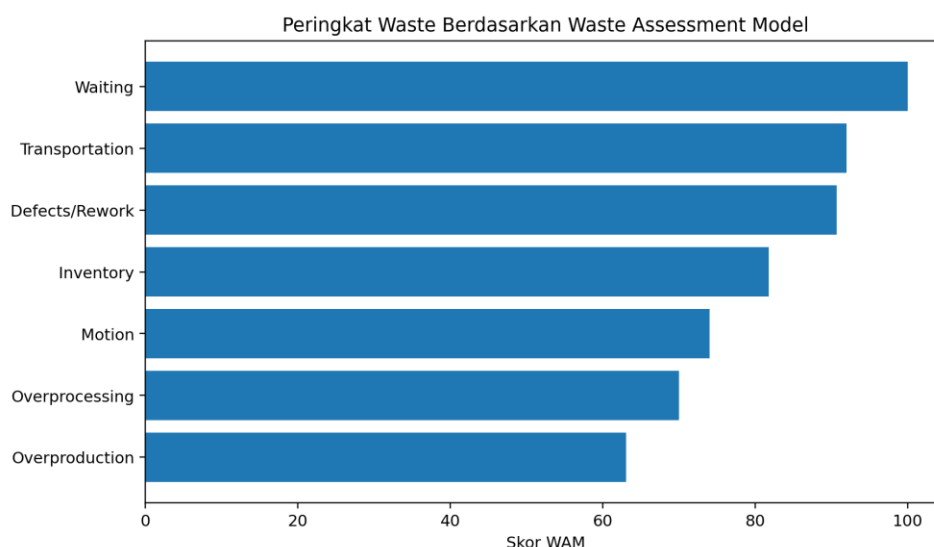
WAM menempatkan waiting pada peringkat pertama dengan skor 100. Waste ini muncul pada approval material, kesiapan area pembesian, antrean truk mixer, pengaturan lalu lintas, dan koordinasi lifting. Transportation menempati peringkat kedua dengan skor 91,98, sedangkan defects/rework memperoleh 90,69. Kedekatan skor menunjukkan bahwa ketiga waste tersebut saling memperkuat.

Inventory, motion, overprocessing, dan overproduction memperoleh skor lebih rendah, tetapi tetap relevan. Inventory berkaitan dengan material yang menumpuk dan harus dipindahkan ulang. Motion muncul pada relokasi selang pompa dan setup crane. Overprocessing terjadi pada pemeriksaan berulang yang tidak didukung kesiapan dokumen. Overproduction berkaitan dengan material atau pekerjaan yang disiapkan lebih awal daripada kebutuhan.

Urutan WAM konsisten dengan VSM. Total durasi waiting mencapai 273,50 menit, lebih besar daripada motion 156,66 menit, transportation 113,66 menit, overprocessing 97,78 menit, dan defects/rework 43,94 menit. Konsistensi tersebut memperkuat penetapan waiting sebagai prioritas pertama.

Tabel 8. Peringkat waste berdasarkan WAM

Peringkat	Waste	Skor WAM	Manifestasi utama
1	Waiting	100,00	Approval, antrean, area belum siap, koordinasi lifting
2	Transportation	91,98	Pemindahan internal, trip, rute, muatan parsial
3	Defects/Rework	90,69	Koreksi tulangan, pekerjaan ulang, sisa pengecoran
4	Inventory	81,74	Stok menumpuk dan berpindah ulang
5	Motion	74,02	Relokasi alat, selang, dan rigging
6	Overprocessing	69,98	Pemeriksaan dan proses berulang
7	Overproduction	63,07	Material/pekerjaan lebih awal atau berlebih



Gambar 4. Peringkat waste berdasarkan Waste Assessment Model

Matriks Waste-Sumber Emisi

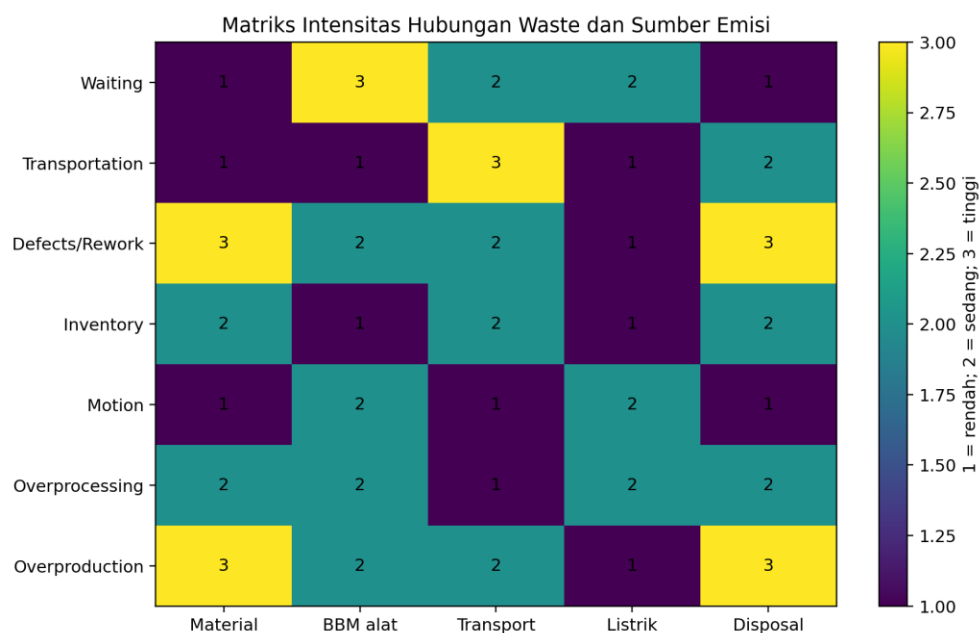
Matriks menunjukkan bahwa waste yang dominan menurut waktu belum tentu menghasilkan emisi material terbesar. Waiting memiliki hubungan tinggi terhadap bahan bakar alat karena mesin tetap menyala atau tidak produktif. Transportation memiliki hubungan tinggi terhadap bahan bakar kendaraan. Defects/rework dan overproduction mempunyai hubungan tinggi terhadap material dan disposal karena keduanya menambah kebutuhan produksi, pengangkutan, serta pembuangan.

Inventory mempunyai hubungan sedang terhadap material, transportasi, dan disposal. Material yang terlalu lama tersimpan berisiko rusak, berpindah berulang, atau tidak digunakan. Motion terutama memengaruhi penggunaan alat dan listrik. Overprocessing dapat meningkatkan konsumsi energi serta keterlambatan, terutama ketika pemeriksaan atau pemrosesan dokumen dilakukan berulang.

Matriks tersebut mengubah hasil Lean menjadi bahasa karbon. Tim proyek dapat menelusuri satu masalah proses menuju sumber emisi yang relevan. Pendekatan ini mencegah intervensi yang tidak tepat, misalnya menangani waiting hanya dengan menambah tenaga kerja padahal akar masalahnya adalah koordinasi material dan kesiapan area.

Tabel 9. Matriks hubungan waste dan sumber emisi

Waste	Material	BBM alat	Transport	Listrik	Disposal	Mekanisme emisi
Waiting	Rendah	Tinggi	Sedang	Sedang	Rendah	Idle alat dan antrean
Transportation	Rendah	Rendah	Tinggi	Rendah	Sedang	Trip kosong/rute memutar
Defects/Rework	Tinggi	Sedang	Sedang	Rendah	Tinggi	Material pengganti dan pembongkaran
Inventory	Sedang	Rendah	Sedang	Rendah	Sedang	Kerusakan dan pemindahan stok
Motion	Rendah	Sedang	Rendah	Sedang	Rendah	Relokasi alat/pekerja
Overprocessing	Sedang	Sedang	Rendah	Sedang	Sedang	Proses dan pemeriksaan berulang
Overproduction	Tinggi	Sedang	Sedang	Rendah	Tinggi	Kelebihan material/pekerjaan



Gambar 5. Intensitas hubungan waste dan sumber emisi

Skenario Pengurangan Emisi

Baseline emisi yang dapat dihindari berjumlah 44,69 ton CO₂e. Waste material menyumbang 20,36 ton CO₂e, idle alat 11,24 ton CO₂e, rework 8,66 ton CO₂e, dan transportasi tidak efisien 4,43 ton CO₂e. Nilai tersebut menjadi ruang intervensi Lean-Green pada tahap pelaksanaan.

Skenario Quick Wins menargetkan pengurangan rework 30%, idle 25%, transportasi 15%, dan waste material 20%. Emisi yang dihindari sebesar 10,14 ton CO₂e atau 22,70% dari emisi avoidable. Skenario ini sesuai untuk tahap awal karena mengutamakan checklist, penjadwalan, kontrol order, dan pencatatan tanpa investasi besar.

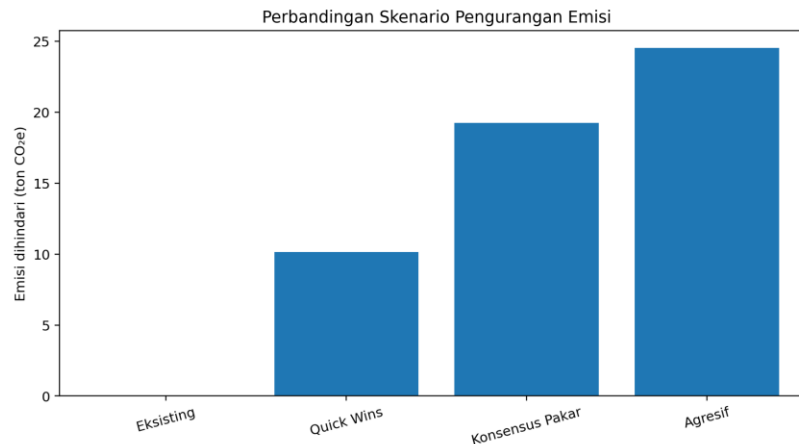
Dasar penetapan target pada Skenario Konsensus Pakar tidak hanya didasarkan pada kesepakatan pakar, tetapi juga mempertimbangkan besarnya baseline emisi yang dapat dihindari, hasil WAM dan VSM, karakteristik waste pada proyek, serta kelayakan intervensi di lapangan. Target rework sebesar 40% ditetapkan sebagai tingkat pengurangan yang realistis melalui penerapan hold point, checklist pra-pekerjaan, pengendalian shop drawing, dan approval sebelum pekerjaan dilaksanakan, mengingat defects/rework memiliki hubungan yang tinggi terhadap penggunaan material dan disposal. Target idle alat sebesar 55% ditetapkan lebih tinggi karena waiting merupakan waste dengan skor WAM tertinggi dan idle alat secara langsung berkaitan dengan waktu tunggu serta konsumsi bahan bakar selama alat tidak produktif. Target transportasi tidak efisien sebesar 10% ditetapkan secara lebih konservatif karena baseline emisinya relatif kecil, yaitu 4,43 ton CO₂e, sehingga intervensi diarahkan pada konsolidasi muatan, pengurangan perjalanan kosong, dan pengaturan slot delivery. Sementara itu, target waste material sebesar 45% ditetapkan karena waste material merupakan komponen emisi yang dapat dihindari terbesar, yaitu 20,36 ton CO₂e, sehingga pengendalian order, sisa beton, dan scrap baja memiliki ruang reduksi yang relatif besar.

Skenario Konsensus Pakar menargetkan pengurangan rework 40%, idle 55%, transportasi 10%, dan waste material 45%. Berdasarkan perhitungan skenario, potensi avoided emission diproyeksikan sebesar 19,25 ton CO₂e atau 43,08% dari emisi avoidable. Baseline berkurang menjadi 787,53 ton CO₂e. Target idle yang tinggi dipilih karena waiting merupakan waste dominan dan penggunaan alat selama menunggu dapat dikendalikan melalui koordinasi.

Skenario Agresif menghasilkan avoided emission 24,54 ton CO₂e atau 54,90% emisi avoidable. Meskipun hasilnya tertinggi, skenario ini memerlukan kontrol produksi yang lebih ketat, ketersediaan data real time, komitmen pemasok, serta perubahan kontraktual. Oleh sebab itu, skenario Konsensus Pakar dipilih sebagai rekomendasi utama karena keseimbangan antara dampak dan kelayakan.

Tabel 10. Perbandingan skenario pengurangan emisi

Skenario	Target rework	Target idle	Target transport	Target waste material	Emisi dihindari	Reduksi avoidable	Baseline akhir
Eksisting	0%	0%	0%	0%	0,00	0,00%	806,78
Quick Wins	30%	25%	15%	20%	10,14	22,70%	796,64
Konsensus Pakar	40%	55%	10%	45%	19,25	43,08%	787,53
Agresif	70%	60%	35%	50%	24,54	54,90%	782,24



Gambar 6. Emisi yang dapat dihindari pada setiap scenario

PEMBAHASAN

Dominasi Embodied Carbon dan Implikasi Material

Hasil memperlihatkan bahwa keputusan material membentuk sebagian besar baseline. Beton dan baja menyumbang 609,39 ton CO₂e atau 75,53% dari A1-A5. Temuan tersebut sejalan dengan literatur yang menempatkan embodied carbon sebagai hotspot proyek infrastruktur [4], [9], [31]. Artinya, pengurangan konsumsi bahan bakar di lokasi tetap penting, tetapi tidak cukup untuk menghasilkan penurunan besar apabila kuantitas dan intensitas karbon material tidak dikendalikan.

Beton fc'30 MPa menjadi prioritas karena volume sangat besar. Intervensi yang relevan meliputi pengendalian variasi volume pesanan, penerapan trial mix yang stabil, optimasi dimensi berdasarkan desain yang disetujui, penggunaan bahan substitusi semen yang memenuhi spesifikasi, serta pengelolaan concrete return. Setiap pengurangan 1% volume fc'30 MPa setara dengan sekitar 11,27 m³. Dengan faktor 245 kg CO₂e/m³, potensi pengurangan A1-A3 mencapai sekitar 2,76 ton CO₂e.

Pada baja, pengendalian tidak hanya melalui penurunan berat desain, tetapi juga optimasi pemotongan. Abutment dan pier menggunakan lebih dari dua pertiga total tulangan. Bar bending schedule perlu dipadukan dengan cutting plan lintas diameter sehingga sisa batang dapat digunakan pada elemen lain. Strategi tersebut relevan dengan konsep circular material flow dan pengurangan waste [14], [28].

Faktor emisi berbasis EPD memberikan dasar yang lebih transparan daripada nilai generik. EPD memungkinkan manajer membandingkan pemasok berdasarkan intensitas produksi. Dalam pengadaan, indikator kg CO₂e per m³ atau per ton dapat ditempatkan bersama harga, mutu, dan waktu pengiriman. Pendekatan ini mengubah pengendalian karbon dari laporan pascaprojek menjadi kriteria keputusan.

Waiting sebagai Hotspot Proses

Waiting memperoleh skor WAM tertinggi dan durasi terbesar pada VSM. Temuan ini logis untuk proyek perkotaan yang memiliki banyak ketergantungan eksternal. Pada pembesian, pekerja menunggu area atau approval. Pada beton, truk menunggu akses dan pompa. Pada erection, crane dan trailer menunggu pengaturan lalu lintas serta koordinasi lifting. Waiting bukan kondisi pasif; selama periode tersebut, alat, pekerja, dan kendaraan tetap mengonsumsi sumber daya.

Pekerjaan girder memperlihatkan konsekuensi paling jelas. PCE 24,12% berarti kurang dari seperempat lead time digunakan untuk lifting, positioning, dan seating. Sisanya merupakan setup,

pemeriksaan, pengaturan, dan tunggu. Future state menghasilkan reduksi lead time 21,49%, lebih besar daripada paket lain. Perbaikan harus dimulai sebelum hari erection melalui crane positioning plan, konfirmasi ground bearing, pre-assembly rigging, izin lalu lintas, briefing, dan kesiapan bearing.

Pada pekerjaan beton, sinkronisasi batching plant dan site merupakan kunci. Slot delivery perlu disusun berdasarkan kapasitas pompa, akses, dan urutan titik cor. Data waktu tiba, mulai bongkar, selesai bongkar, dan keluar lokasi digunakan untuk mengendalikan cycle time. Apabila antrean meningkat, frekuensi pengiriman disesuaikan, bukan membiarkan truk menganggur. Pendekatan tersebut menurunkan waiting sekaligus risiko penurunan workability.

Pada pembesian, look-ahead planning digunakan untuk menghilangkan hambatan sebelum shift. Kesiapan shop drawing, material, alat potong, spacer, bekisting, dan area kerja diperiksa dengan constraint log. Prinsip ini sesuai dengan Lean project delivery yang menekankan keandalan rencana dan kesiapan prasyarat [24], [26].

Rework dan Waste Material sebagai Penghubung Lean-Green

Rework memiliki skor WAM tinggi dan hubungan kuat terhadap embodied carbon. Ketika tulangan harus diubah atau beton harus dibongkar, proyek tidak hanya kehilangan waktu. Material pengganti membawa emisi A1-A3 baru, kendaraan menambah A4, dan alat pembongkaran menambah A5. Rework juga menghasilkan disposal. Oleh sebab itu, pencegahan rework memberikan manfaat berlapis.

Checklist pra-pengecoran perlu mencakup dimensi, elevasi, kebersihan, cover, sambungan, embedded item, akses pompa, dan rencana sampling. Pemeriksaan dilakukan pada hold point yang jelas. Foto dan approval disimpan dalam satu paket dokumentasi. Pada girder, checklist pra-lifting mencakup crane capacity, radius, sling, bearing, alignment, komunikasi, dan exclusion zone. Proses yang disiplin mengurangi variasi dan kebutuhan koreksi.

Waste material merupakan komponen avoidable terbesar, yaitu 20,36 ton CO₂e. Pengurangan 45% pada skenario konsensus pakar menghasilkan avoided emission sekitar 9,16 ton CO₂e. Angka ini lebih besar daripada kontribusi pengurangan kategori lain. Karena itu, pengendalian order dan sisa material harus ditempatkan sebagai agenda utama rapat produksi. Indikator yang digunakan adalah persentase sisa beton terhadap volume datang, persentase scrap baja terhadap berat terpasang, dan material rusak terhadap penerimaan.

Konsistensi Hasil VSM, WAM, dan LCA

Keunggulan pendekatan terpadu terletak pada triangulasi hasil. VSM menunjukkan besarnya waktu tidak bernilai tambah. WAM menunjukkan prioritas dan hubungan waste. LCA menunjukkan besarnya konsekuensi karbon. Jika ketiganya mengarah pada masalah yang sama, intervensi mempunyai dasar yang kuat. Waiting merupakan contoh: durasinya tertinggi, skor WAM tertinggi, dan hubungannya tinggi terhadap idle alat.

Defects/rework memperlihatkan pola berbeda. Durasi waktunya tidak sebesar waiting, tetapi intensitas hubungannya terhadap material dan disposal lebih tinggi. Tanpa matriks waste-emisi, rework dapat ditempatkan di bawah waiting berdasarkan waktu. Dengan integrasi LCA, rework tetap menjadi prioritas karena satu kejadian dapat menghasilkan karbon yang besar. Ini menunjukkan bahwa Lean-Green memerlukan pembobotan multidimensi.

Transportation memperoleh skor WAM kedua, tetapi baseline emisi tidak efisiennya 4,43 ton CO₂e, lebih kecil daripada waste material dan idle. Target pengurangan konsensus pakar ditetapkan 10%. Keputusan tersebut tidak mengabaikan transportasi, tetapi menyesuaikan tingkat intervensi dengan potensi karbon yang tersedia. Konsolidasi muatan, pengurangan trip kosong, dan slot delivery tetap diterapkan sebagai quick control.

Kelayakan Skenario Konsensus Pakar

Skenario agresif memberikan reduksi terbesar, tetapi selisihnya dengan konsensus pakar hanya 5,29 ton CO₂e. Untuk mencapai tambahan tersebut, proyek harus menaikkan target rework menjadi 70%, transportasi 35%, dan waste material 50%. Kenaikan target memerlukan sistem data, kontrak pemasok, insentif, dan pengawasan yang lebih kuat. Pada proyek dengan durasi terbatas, biaya marginal dapat melebihi manfaat operasional.

Skenario konsensus pakar dipilih karena memusatkan upaya pada idle dan waste material. Kedua kategori tersebut memiliki baseline avoidable terbesar dan dapat dikendalikan melalui manajemen. Pengurangan 19,25 ton CO₂e memang hanya 2,39% dari baseline A1-A5, tetapi mewakili 43,08% emisi yang secara teknis dapat dihindari pada tahap pelaksanaan. Perbedaan ini perlu dijelaskan agar kinerja proyek dinilai secara adil.

Reduksi total yang relatif kecil terhadap baseline tidak menunjukkan bahwa Lean tidak efektif. Sebagian besar emisi melekat pada material yang diperlukan untuk fungsi struktur. Lean terutama mengurangi emisi tambahan akibat proses yang tidak efisien. Agar penurunan total lebih besar, strategi proses harus dikombinasikan dengan material rendah karbon, optimasi desain, dan pengadaan berbasis EPD.

Implikasi Manajerial dan Kebijakan

Pada tingkat proyek, hasil penelitian dapat diterjemahkan menjadi carbon control plan. Setiap paket pekerjaan memiliki baseline, sumber waste, indikator, target, penanggung jawab, dan frekuensi evaluasi. Carbon control plan disandingkan dengan quality plan dan safety plan. Dengan demikian, pengurangan emisi menjadi bagian dari rutinitas manajemen, bukan laporan tambahan.

Pada tingkat kontraktor, data karbon dapat diintegrasikan ke daily report. Laporan memuat volume material, jam alat, jam idle, jumlah trip, rework, dan waste. Rekap mingguan mengonversi data menjadi CO₂e. Apabila indikator melampaui batas, tim melakukan root cause analysis. Sistem ini membangun hubungan antara keputusan harian dan target lingkungan.

Pada tingkat pemilik proyek, dokumen tender dapat meminta EPD, rencana logistik, target waste, dan metode pencatatan bahan bakar. Penilaian penyedia tidak hanya berbasis harga terendah, tetapi total value. Pendekatan tersebut sejalan dengan agenda pembangunan rendah karbon dan praktik infrastruktur berkelanjutan [22], [25], [32].

Dalam konteks pendidikan dan penelitian, model ini dapat digunakan sebagai kerangka praktikum manajemen konstruksi. Mahasiswa mempelajari bahwa produktivitas, mutu, biaya, dan lingkungan saling berhubungan. Dataset proyek dapat menjadi bahan untuk analisis LCA, VSM, WAM, dan optimasi keputusan.

Rencana Implementasi

Tabel 11. Rencana implementasi Lean-Green Construction

Prioritas	Tindakan	Indikator	Frekuensi	Penanggung jawab
Pengurangan rework	Hold point, checklist, approval shop drawing	NCR, volume bongkar/cor ulang	Setiap pekerjaan kritis	QA/QC dan site engineer
Pengurangan idle	Look-ahead, kesiapan area, sinkronisasi material-alat	Idle ratio, liter BBM idle	Per shift dan mingguan	Site manager/equipment engineer
Efisiensi transport	Slot delivery, konsolidasi muatan, rute	Load factor, trip kosong, waktu antre	Setiap pengiriman	Logistik
Pengurangan waste beton	Kontrol order, monitoring return, urutan cor	Sisa beton/volume datang	Setiap pengecoran	Site engineer/QS
Pengurangan scrap baja	BBS, cutting plan lintas elemen, segregasi	Scrap/berat terpasang	Mingguan	Quantity engineer
Pengendalian karbon	Rekap kuantitas × faktor emisi	Ton CO ₂ e/paket	Bulanan	Tim lingkungan/proyek

Analisis Sensitivitas dan Ketahanan Hasil

Analisis sensitivitas dilakukan untuk melihat perubahan baseline ketika faktor emisi utama berubah. Pengujian difokuskan pada beton dan baja karena keduanya menyumbang lebih dari tiga perempat baseline. Perubahan faktor beton sebesar $\pm 10\%$ menggeser baseline antara 774,35 dan 839,21 ton CO₂e. Perubahan faktor baja sebesar $\pm 10\%$ menghasilkan rentang 778,28 sampai 835,28 ton CO₂e. Meskipun nilai absolut berubah, urutan hotspot tetap sama: beton, baja, kemudian girder.

Emisi A4 diuji dengan perubahan $\pm 20\%$ karena jarak dan pola perjalanan lebih mudah berubah. Dampaknya terhadap baseline hanya sekitar $\pm 1,85$ ton CO₂e. Emisi A5 dengan perubahan $\pm 20\%$ menggeser baseline sekitar $\pm 9,52$ ton CO₂e. Hasil ini menegaskan bahwa ketelitian faktor material lebih menentukan baseline total, sedangkan data A4-A5 lebih menentukan keberhasilan tindakan operasional.

Skenario konsensus pakar juga diuji dengan menurunkan dan menaikkan efektivitas target sebesar 10% relatif. Avoided emission berada pada rentang sekitar 17,33 sampai 21,18 ton CO₂e. Pada seluruh kondisi, pengendalian waste material dan idle tetap memberikan kontribusi terbesar. Dengan demikian, rekomendasi penelitian tidak berubah oleh variasi moderat pada faktor emisi atau target pelaksanaan.

Tabel 12. Analisis sensitivitas faktor emisi dan efektivitas scenario

Parameter yang diuji	Perubahan	Baseline/hasil rendah	Nilai dasar	Baseline/hasil tinggi	Interpretasi
Faktor emisi beton	$\pm 10\%$	774,35	806,78	839,21	Hotspot beton tetap dominan
Faktor emisi baja	$\pm 10\%$	778,28	806,78	835,28	Baja tetap hotspot kedua
Emisi transportasi A4	$\pm 20\%$	804,93	806,78	808,63	Pengaruh terhadap total relatif kecil
Emisi konstruksi A5	$\pm 20\%$	797,26	806,78	816,30	Penting untuk kontrol operasional

Efektivitas skenario pakar	±10%	17,33	19,25	21,18	Prioritas intervensi tidak berubah
----------------------------	------	-------	-------	-------	------------------------------------

Batasan Lingkup Penelitian

Penelitian berfokus pada tahap produk dan konstruksi A1-A5. Emisi operasi, pemeliharaan, rehabilitasi, pembongkaran, dan manfaat di luar batas sistem tidak dihitung. Oleh karena itu, hasil menggambarkan jejak karbon sampai komponen terpasang, bukan keseluruhan umur layanan overpass.

Objek penelitian merupakan satu proyek overpass dan tiga paket pekerjaan struktur. Karakter lalu lintas, lokasi batching plant, teknologi pemasok, serta metode erection dapat berbeda pada proyek lain. Generalisasi harus mempertimbangkan karakteristik proyek, tetapi kerangka analisis dapat diterapkan dengan mengganti inventori dan faktor emisi.

KESIMPULAN

Model integrasi Lean-Green dalam penelitian ini berhasil mengidentifikasi emisi baseline (A1-A5) sebesar 806,78 ton CO₂e, dengan material beton dan baja sebagai penyumbang embodied carbon terbesar mencapai 75,53%. Penerapan pemetaan future state VSM terbukti mampu menurunkan lead time sekaligus meningkatkan Process Cycle Efficiency (PCE) dari 45,32% menjadi 53,17%, di mana pemborosan berupa waiting, transportation, dan defects/rework menjadi penyebab utama munculnya emisi tambahan. Skenario Konsensus Pakar terpilih sebagai strategi paling optimal karena mampu mereduksi 19,25 ton CO₂e (43,08% emisi avoidable) melalui penghematan material dan efisiensi operasional. Implementasinya direkomendasikan melalui penerapan carbon budget, penggunaan EPD, look-ahead planning, serta evaluasi berkala berbasis indikator kunci seperti CO₂e, PCE, rework rate, dan idle ratio.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk memperluas cakupan Life Cycle Assessment (LCA) hingga mencakup fase operasional (use stage) dan akhir masa pakai (end-of-life), tidak terbatas pada fase A1-A5 saja. Selain itu, model integrasi Lean-Green ini juga perlu diuji dan diterapkan pada jenis proyek konstruksi lain, seperti gedung bertingkat tinggi atau infrastruktur jalan, guna memvalidasi efektivitas serta keandalan model pada skala dan konteks yang lebih luas. Penelitian selanjutnya juga perlu melakukan implementasi dan pengukuran aktual setelah penerapan strategi Lean-Green untuk memvalidasi estimasi avoided emission yang diperoleh melalui skenario penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Kemdiktisaintek sebagai pemberi dana pada penelitian ini. Juga kepada pengelola proyek, tenaga ahli, dan seluruh pihak yang mendukung penyediaan data teknis, penelaahan metode, serta penyusunan rekomendasi Lean-Green Construction pada proyek overpass Kota Medan.

DAFTAR PUSTAKA

Adebayo, S., Aigbavboa, C., & Thwala, W. (2023). Carbon-efficient construction strategies. *Buildings*, 13(6), 1452. <https://doi.org/10.3390/buildings13061452>

- Ahn, Y. H., & Pearce, A. R. (2021). Lean practices for sustainable construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(9), 04021091. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002146](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002146)
- Amalia, R., Prasetyo, Y., & Kurniawan, D. (2024). Lean waste analysis in urban infrastructure projects. *Journal of Construction Engineering*, 2024, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2024/8892314>
- Arogundade, A., Aigbavboa, C., & Thwala, W. (2023). Carbon reduction strategies in construction projects. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135246>
- Aslam, M., Gao, Z., & Smith, G. (2021). Exploring integrated lean and green construction. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102561. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102561>
- Ballard, G., & Tommelein, I. (2021). Lean project delivery and sustainability. *Lean Construction Journal*, 1–12.
- Department for Energy Security and Net Zero. (2025). *Greenhouse gas reporting: Conversion factors 2025*. UK Government.
- Ding, G. (2021). Life cycle assessment (LCA) in construction: Recent developments. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124409>
- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2019). *Faktor emisi gas rumah kaca sistem ketenagalistrikan tahun 2019*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- El-Sawalhi, N., Greenwood, D., & Sassi, P. (2021). Lean and green construction: An integrated framework. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128552. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128552>
- Goggins, J., Keane, T., & Kelly, A. (2021). Environmental impacts of construction processes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(3), 04020169. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002003](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002003)
- Harefa, M. B. (2020). Implementasi pengolahan limbah konstruksi dalam mewujudkan green construction. *JUITECH: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Quality*, 4(1), 20–30.
- Harefa, M. B., Surbakti, A. A., & Efendi, I. (2022). Kajian penerapan K3 pada proyek jalan nasional Parapat–Ajibata. *Jurnal Multidisiplin Madani (MUDIMA)*, 2(8), 3380–3383.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
- Irfandi, M., & Rachmawati, E. (2023). Human resource readiness for lean construction implementation. *Built Environment Project and Asset Management*, 13(4), 512–526. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-01-2023-0011>
- Koskela, L., Tezel, A., & Patel, V. (2021). Theory of production in construction: Recent advances. *Construction Management and Economics*, 39(6), 475–489. <https://doi.org/10.1080/01446193.2021.1907399>
- Li, X., Zhu, Y., & Zhang, Z. (2022). Process-based carbon reduction in construction projects. *Sustainability*, 14(3), 1564. <https://doi.org/10.3390/su14031564>
- Machfudiyanto, R., & Wijaya, K. (2024). Recycled materials and energy efficiency in construction. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2211–2217. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.154>
- Marcell, A., & Anondho, B. (2023). Perbandingan fokus K3 dan lingkungan pada proyek konstruksi. *Jurnal Manajemen Konstruksi*, 9(2), 77–89.

- Mardiansyah, D., Yusuf, M., & Lestari, S. (2024). Green construction practices in infrastructure projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1234, 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1234/1/012045>
- Mutmainah, S., Nugroho, A., & Putri, R. (2024). Pertumbuhan sektor konstruksi dan dampak lingkungan di Indonesia. *Jurnal Infrastruktur*, 10(1), 45–58.
- Neumann Steel. (2025). *Environmental Product Declaration: Reinforcing steel*. EPD Australasia.
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2021). Sustainability in construction: A review. *Construction and Building Materials*, 286, 122812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122812>
- Pheng, L. S., & Gao, S. (2023). Integrating lean and sustainability in construction management. *International Journal of Project Management*, 41(2), 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2022.11.003>
- Prayuda, A., Hidayat, R., & Saputra, D. (2021). Barriers to lean construction adoption in Indonesia. *International Journal of Construction Management*, 21(6), 612–624. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1707856>
- Rita, M. (2023). Global construction emissions and climate risks. *Energy Policy*, 178, 113567. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113567>
- Sarhan, S., & Pretlove, S. (2021). Carbon implications of construction waste. *Construction Management and Economics*, 39(5), 417–433. <https://doi.org/10.1080/01446193.2021.1887934>
- Söylemez, C. (2025). Lean-green synergy in infrastructure projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 32(1), 1–18. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2023-0674>
- Sutantio, B. (2022). Implementasi lean construction pada proyek infrastruktur Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 29(3), 211–223.
- Tam, V. W. Y., Le, K. N., & Zeng, S. X. (2021). Waste reduction and embodied carbon in construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105215. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105215>
- The International EPD System. (2025). Environmental Product Declarations for ready-mix concrete and construction products. <https://www.environdec.com/>
- Wang, Y., Li, X., & Tam, V. W. Y. (2022). Green construction technologies and carbon mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129841. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129841>
- Zhou, Y., Chen, J., & Xu, X. (2024). Construction carbon hotspots and mitigation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 102, 105213. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105213>
- Zuo, J., & Zhao, Z. (2021). Green building research: Current status and future agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111086. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111086>