JURNAL TEKNIK INDONESIA - VOL. 07 NO. 02 (Oktober 2026)
P-ISSN 2987-2723
E-ISSN 1987-0933

Efisiensi Proyek Normalisasi Saluran Sekunder untuk Daerah Irigasi Waduk Gogor

Viola Esa Nursela, Rr Diah Nugraheni Setyowati, Fajar Setiawan
UIN Sunan Ampel Surabaya
E-mail Korespondensi: diahnugraheni@uinsa.ac.id

ABSTRACT

Irrigation infrastructure plays a vital role in maintaining national food security. However, irrigation channel normalization projects are often executed without adequate environmental impact assessments, leading to inefficient material and energy use and uncontrolled construction-phase emissions. This study aims to identify the life cycle and quantify the environmental impacts of the secondary channel normalization project at the Gogor Reservoir Irrigation Area (D.I. Waduk Gogor) in Tersebar Village, Balongpanggang District, Gresik Regency, while also assessing material and energy efficiency using the Life Cycle Assessment (LCA) approach. Eight key construction activities were evaluated using the cradle-to-gate LCA method, utilizing SimaPro software and the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method. The results show total Global Warming Potential (GWP) emissions of 111,584.80 kg CO_2-eq, a figure well below the 1.85 million threshold set by the Ministry of Environment and Forestry (KLHK). The primary hotspot was the installation of K350 U-Ditch units, which accounted for 54.44% of GWP and 90.6% of fossil energy consumption (109,373.23 MJ). Meanwhile, the demolition of existing stonework generated the highest particulate matter formation (PMF) emissions, at 32.70%. On a positive note, the reuse of 260.71 tons of demolished stone resulted in a saving of 48.07 kg CO_2-eq. Given that the project's energy efficiency is heavily influenced by the U-Ditch installation process, optimization of heavy equipment operation, improvements to the mortar mix design, and the partial replacement of cement with more eco-friendly materials—such as fly ash—are recommended.

Keywords: *Life Cycle Assessment, Normalization, Irrigation Channels, Carbon Emissions, Material Efficiency*

ABSTRAK

Infrastruktur irigasi berperan penting dalam menjaga ketahanan pangan nasional. Meski demikian, proyek normalisasi saluran irigasi kerap dijalankan tanpa kajian dampak lingkungan yang memadai, sehingga penggunaan material dan energi menjadi tidak efisien dan emisi selama konstruksi tidak terkendali. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi siklus hidup serta mengukur dampak lingkungan proyek normalisasi saluran sekunder D.I. Waduk Gogor di Desa Tersebar, Kecamatan Balongpanggang, Kabupaten Gresik, sekaligus menilai efisiensi penggunaan material dan energinya melalui pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA). Evaluasi terhadap 8 kegiatan konstruksi utama dilakukan dengan metode LCA *cradle-to-gate*, memakai perangkat lunak SimaPro dan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H). Hasilnya, total emisi GWP tercatat 111.584,80 kg CO_2-eq, angka yang masih di bawah ambang 1,85 juta menurut KLHK. Hotspot terbesar berasal dari pemasangan *U-Ditch* K350, yang menyumbang 54,44% GWP dan 90,6% konsumsi energi fosil (109.373,23 MJ). Adapun pembongkaran batu lama menghasilkan emisi partikulat (PMF) tertinggi, yakni 32,70%. Sisi positifnya, pemanfaatan kembali 260,71 ton batu bekas bongkaran berhasil menghemat 48,07 kg CO_2-eq. Karena efisiensi energi proyek sangat ditentukan oleh kegiatan pemasangan *U-Ditch*, diperlukan optimasi pengoperasian alat berat, perbaikan *mix design* mortar, serta penggantian sebagian semen dengan bahan yang lebih ramah lingkungan seperti *fly ash*.

Kata Kunci: *Life Cycle Assesment, Normalisasi, Saluran Irigasi, Emisi Karbon*

PENDAHULUAN

Di era pembangunan berkelanjutan, proyek normalisasi infrastruktur irigasi seperti saluran sekunder di Waduk Gogor, Desa Tersebar, Kecamatan Balongpanggang, Kabupaten Gresik menjadi krusial untuk

Jurnal Teknik Indonesia by Fakultas Teknik Undaris
is licensed under Creative Commons Attribution 4.0

mendukung ketahanan pangan dan pengelolaan sumber daya air. Saluran irigasi sekunder di daerah ini sering mengalami degradasi akibat sedimentasi, erosi, dan perubahan iklim, yang mengakibatkan penurunan efisiensi distribusi air pada lahan seluas 1.500 hektar di sekitar waduk[1]

Proyek normalisasi saluran sekunder yang meliputi pengerukan dan penguatan struktur sering kali dilakukan tanpa analisis mendalam terhadap dampak lingkungan jangka panjang, sehingga menimbulkan inefisiensi energi dan limbah yang signifikan[2]. Tanpa analisis yang komprehensif, proyek normalisasi berisiko menjadi tidak efisien secara lingkungan dan justru menambah beban ekologis, terutama di tengah isu perubahan iklim yang menjadikan pengelolaan air sebagai prioritas global[3]

Analisis Siklus Hidup (*Life Cycle Assessment*/LCA) merupakan metodologi yang tepat untuk melakukan evaluasi komprehensif terhadap dampak lingkungan dari suatu produk atau proses, mulai dari hulu ke hilir[4]. Dalam konteks proyek irigasi, LCA dapat mengkalkulasi secara ilmiah dampak yang selama ini luput dari perhatian, seperti jejak karbon dari operasional alat berat, serta potensi pencemaran dari limbah material konstruksi[5]

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi siklus hidup proyek normalisasi saluran sekunder D.I. Waduk Gogor; (2) mengukur dampak lingkungan dari proyek normalisasi menggunakan metode LCA; dan (3) menilai efisiensi penggunaan material dan energi dalam proyek berdasarkan hasil analisis LCA

LANDASAN TEORI

Normalisasi saluran irigasi merupakan kegiatan pemeliharaan untuk mengembalikan fungsi optimal saluran air agar alirannya lancar dan mendukung irigasi pertanian[6]. Normalisasi saluran sekunder merupakan proses pemulihan dan perbaikan saluran irigasi tingkat kedua yang bertujuan mengalirkan air dari saluran primer ke lahan pertanian[7]. Kinerja saluran irigasi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti desain saluran, pemeliharaan, hingga kondisi alam sekitar[9].

Kondisi fisik saluran yang buruk seperti penyempitan, sedimentasi, dan kerusakan struktur dapat menghambat aliran air dan menurunkan efisiensi distribusi air. Oleh karena itu, normalisasi jaringan irigasi menjadi kebutuhan mendesak guna menjaga fungsi dari jaringan tersebut [2].

Analisis Siklus Hidup (LCA) adalah evaluasi terhadap input, output, serta potensi dampak lingkungan suatu produk sepanjang seluruh

siklus hidupnya[4]. Tujuh prinsip dasar LCA mencakup perspektif siklus hidup, fokus pada aspek lingkungan, pendekatan relatif dan unit fungsional, pendekatan iteratif, transparansi, sifat komprehensif, serta prioritas pada pendekatan ilmiah [10].

Dalam penelitian ini digunakan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) yang mencakup enam kategori dampak utama yaitu: *Global Warming Potential* (GWP) dalam kg CO_2-eq; *Particulate Matter Formation* (PMF) dalam kg $PM_{2.5}$-eq; *Terrestrial Acidification Potential* (AP) dalam kg SO_2-eq; *Photochemical Oxidant Creation Potential* (POCP) dalam kg C_2H_4-eq; *Fossil Resource Depletion* (FRD) dalam kg oil-eq; dan *Human Toxicity Potential* (HTP)[11] (Hakim ., 2024). Kategori GWP mengukur kontribusi emisi gas rumah kaca terhadap pemanasan global dengan mengkonversi gas-gas seperti CO_2, CH_4, dan N_2O ke dalam satuan CO_2 ekuivalen[12].

Dengan menggunakan LCA, para perencana dan pengambil kebijakan dapat membandingkan berbagai alternatif teknologi konstruksi, memilih opsi yang paling efisien secara ekonomi dan ramah lingkungan, serta merancang strategi perbaikan infrastruktur yang berkelanjutan [13].

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode utama *Life Cycle Assessment* (LCA) sesuai standar ISO 14040. Metode LCA dipilih karena dapat menyajikan gambaran komprehensif mengenai keterkaitan antara aktivitas konstruksi dan kondisi lingkungan, yang mencakup tahap pemilihan material, proses pelaksanaan pekerjaan, hingga potensi emisi dan limbah yang ditimbulkan.

Objek penelitian adalah proyek normalisasi Saluran Sekunder D.I. Waduk Gogor yang dilaksanakan berdasarkan SPK Nomor 000.3.2/14211/104.6.05/2025 dengan nilai kontrak Rp687.990.000,- dan jangka waktu pelaksanaan 90 hari kalender Tahun Anggaran 2025. Lokasi proyek berada di Desa Tersebar, Kecamatan Balongpanggang, Kabupaten Gresik, Jawa Timur.

Pendekatan batasan sistem yang digunakan adalah *cradle-to-gate* dengan perluasan ke *gate-to-site*. Analisis mencakup 8 (delapan) kegiatan konstruksi utama yaitu:

1. Mobilisasi lapangan
2. Pembongkaran pasangan batu lama;
3. Pengadaan dan pemasangan *U-Ditch* k350
4. Pasangan batu bekas bongkaran (semi mekanis);
5. Pasangan batu belah baru, mortar tipe n

6. Siaran (*pointing*) mortar tipe M
7. Plesteran 1,5 cm mortar tipe S
8. Penyelenggaraan SMK3.

Data *Life Cycle Inventory* (LCI) dikumpulkan dari dokumen Rencana Anggaran Biaya (RAB), *Bill of Quantity* (BOQ), Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP), Rekap Harian, dan Time Schedule. Data mencakup kuantitas material konstruksi (batu, semen, pasir, air, U-Ditch), konsumsi energi (bahan bakar solar untuk alat berat), dan informasi transportasi (jarak dan volume muatan).

Perhitungan emisi menggunakan formula dasar: Emisi (kg CO_2-eq) = Data Aktivitas × Faktor Emisi. Faktor emisi material mengacu pada database SimaPro, sedangkan faktor emisi transportasi dan bahan bakar mengacu pada IPCC Guidelines 2006. Konversi satuan dilakukan secara sistematis dari volume ke massa menggunakan densitas material, kemudian ke satuan emisi kg CO_2-eq.

Penilaian Dampak Siklus Hidup (*Life Cycle Impact Assessment*/LCIA) dilakukan menggunakan software SimaPro dengan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H). Hasil LCIA kemudian diinterpretasikan untuk mengidentifikasi hotspot lingkungan yaitu kegiatan yang paling berkontribusi terhadap setiap kategori dampak, serta untuk menilai efisiensi penggunaan material dan energi secara keseluruhan.

Metode penelitian meliputi data dan teknik pengumpulannya, serta metode analisis data

Tabel 1.*Goal and Scope*

Komponen	Uraian
Goal	Mengidentifikasi beban lingkungan dari seluruh tahapan normalisasi saluran sekunder dan memberikan informasi ilmiah bagi pengambil keputusan proyek infrastruktur irigasi
Scope	Seluruh aktivitas konstruksi normalisasi saluran sekunder D.I. Waduk Gogor dengan pendekatan *cradle-to-gate*
Functional Unit	Satu paket pekerjaan normalisasi saluran sekunder D.I. Waduk Gogor (kontrak Rp687.990.000)
Software	SimaPro dengan database ReCiPe 2016 Midpoint (H)
Boundary	Mobilisasi material – transportasi ke lokasi – pelaksanaan konstruksi di lapangan

(Sumber : Analisis, 2026)

ANALISIS DAN PERHITUNGAN

Proyek normalisasi Saluran Sekunder D.I. Waduk Gogor dikelola dalam kerangka pengelolaan sumber daya air di bawah kewenangan Pemerintah Provinsi Jawa Timur melalui Dinas PU Sumber Daya Air. Secara administratif, lokasi pekerjaan tersebar di Desa Tersebar, Kecamatan Balongpanggang,

Kabupaten Gresik. Proyek ini merupakan bagian dari Program Pengelolaan Sumber Daya Air (kode 1.03.02) dengan kegiatan pengembangan dan pengelolaan sistem irigasi primer dan sekunder pada daerah irigasi 1.000–3.000 Ha (kode 1.03.02.1.02), bersumber dari Dana APBD Provinsi Jawa Timur TA 2025.

Ruang lingkup pekerjaan terdiri dari empat divisi utama: pekerjaan tanah (penggalian 196,12 m^3); pekerjaan pasangan batu (pembongkaran 311,48 m^3, pasangan batu bekas 120,7 m^3, pasangan batu baru 120,7 m^3, siaran 296,45 m^2, dan plesteran 169,4 m^2); pekerjaan U-Ditch (pengadaan dan pemasangan 146 buah U-Ditch K350 senilai Rp324.946.506 atau 47,2% dari total kontrak); dan penyelenggaraan SMK3 senilai Rp10.484.622.

Tabel 2.Volume Kegiatan Konstruksi

No.	Kegiatan Konstruksi	Volume	Satuan
1	Mobilisasi Lapangan	-	-
2	Pembongkaran Pasangan Batu Lama	311,48	m^3
3	Pengadaan & Pemasangan U-Ditch K350	146	buah
4	Pasangan Batu Bekas Bongkaran (Semi Mekanis)	120,70	m^3
5	Pasangan Batu Belah Baru Mortar Tipe N	120,70	m^3
6	Siaran (Pointing) Mortar Tipe M	296,45	m^2
7	Plesteran 1,5 cm Mortar Tipe S	169,40	m^2
8	Penyelenggaraan SMK3	-	-

(Sumber: RAB dan MC 100% Proyek, 2025)

Tahap LCI mencakup kuantifikasi seluruh aliran input dan output dari 8 kegiatan konstruksi. Pada kegiatan mobilisasi, transportasi material dihitung berdasarkan massa material dikali jarak tempuh (ton.km) dengan faktor emisi 0,12 kg CO_2/ton.km. Total transportasi batu belah mencapai 15.042,5 ton.km, semen 2.438,3 ton.km, pasir 7.273,1 ton.km, dan U-Ditch 7.648,9 ton.km.

Emisi dari konsumsi bahan bakar solar dihitung menggunakan faktor emisi 2,68 kg CO_2/liter berdasarkan panduan IPCC 2006. Konversi satuan dilakukan melalui hierarki: volume (liter) → massa (kg) → kandungan energi (MJ) → emisi GRK (kg CO_2-eq). Khusus untuk kegiatan pemasangan U-Ditch K350, emisi embodied carbon dari material precast menjadi kontributor dominan, mengingat produksi beton K350 membutuhkan semen Portland dalam jumlah besar yang memiliki faktor emisi tertinggi di antara material konstruksi.

Inventori juga mencatat adanya praktik reuse batu bekas bongkaran sebesar 260,71 ton yang digunakan kembali sebagai material pasangan

batu. Penggunaan kembali material ini mengurangi kebutuhan pengadaan batu baru dari quarry, sehingga menghasilkan penghematan emisi sebesar 48,07 kg CO_2-eq dari peniadaan proses transportasi dan ekstraksi material baru.

Tabel 3.Rekapitulasi Emisi GWP per Kegiatan Konstruksi (kg CO_2-eq)

No.	Kegiatan	GWP (kg CO_2-eq)	% Total
1	Mobilisasi Lapangan	4.023,06	3,61%
2	Pembongkaran Pasangan Batu Lama	2.950,40	2,64%
3	Pengadaan & Pemasangan U-Ditch K350	60.724,80	54,44%
4	Pasangan Batu Bekas Bongkaran	7.820,10	7,01%
5	Pasangan Batu Belah Baru Mortar N	18.450,20	16,54%
6	Siaran Mortar Tipe M	9.330,50	8,36%
7	Plesteran Mortar Tipe S	8.285,74	7,43%
Total		**111.584,80**	100%

(Sumber : Perhitungan, 2026)

Hasil LCIA menggunakan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) menunjukkan bahwa proyek normalisasi saluran sekunder D.I. Waduk Gogor menghasilkan dampak lingkungan yang cukup signifikan pada seluruh enam kategori dampak yang dianalisis. Total emisi GWP mencapai 111.584,80 kg CO_2-eq. Dampak ini setara dengan emisi karbon yang dihasilkan oleh sekitar 24 rumah tangga Indonesia dalam satu tahun.

Dari sisi *Particulate Matter Formation* (PMF), kegiatan pembongkaran pasangan batu lama menjadi kontributor terbesar sebesar 32,70%, diikuti oleh kegiatan pasangan batu baru (28,40%) dan pemasangan U-Ditch (19,80%). Emisi partikel dari proses pembongkaran batu terjadi akibat fragmentasi mekanis batuan yang menghasilkan debu $PM_{2.5}$ dalam konsentrasi tinggi, yang berpotensi mengganggu kesehatan pekerja dan warga sekitar proyek.

Untuk kategori *Fossil Resource Depletion* (FRD), total konsumsi energi fosil mencapai 109.373,23 MJ, dengan 90,6% terkonsentrasi pada kegiatan pemasangan U-Ditch K350. Konsentrasi konsumsi energi yang sangat tinggi pada satu kegiatan ini menunjukkan ketergantungan yang besar terhadap penggunaan alat berat bermesin diesel serta kandungan energi yang tinggi dalam proses produksi elemen precast beton.

Berdasarkan hasil interpretasi LCIA, kegiatan Pengadaan dan Pemasangan U-Ditch K350 teridentifikasi sebagai hotspot lingkungan utama

pada hampir seluruh kategori dampak. Dominasi kegiatan ini pada GWP (54,44%) disebabkan oleh dua faktor utama: (1) tingginya *embodied carbon* dari produksi beton precast mutu K350 yang membutuhkan semen Portland dalam jumlah besar; dan (2) konsumsi bahan bakar diesel yang intensif oleh alat berat selama proses pemasangan (excavator, vibrator beton 52mm)

Tabel 4.Hasil Penilaian Dampak Siklus Hidup (LCIA) per Kategori

Kategori Dampak	Satuan	Total Nilai	Hotspot Utama (%)
Global Warming Potential (GWP)	kg CO_2-eq	111.584,80	U-Ditch K350 (54,44%)
Particulate Matter Formation (PMF)	kg $PM_{2.5}$-eq	128,45	Bongkaran batu (32,70%)
Terrestrial Acidification (AP)	kg SO_2-eq	342,17	U-Ditch K350 (48,20%)
Photochem. Oxidant Creation (POCP)	kg C_2H_4-eq	89,32	Mobilisasi (35,60%)
Fossil Resource Depletion (FRD)	MJ	109.373,23	U-Ditch K350 (90,60%)
Human Toxicity Potential (HTP)	kg 1,4-DCB-eq	2.456,80	Pasangan batu baru (42,10%)

(Sumber: Hasil analisis SimaPro ReCiPe 2016 Midpoint (H), 2026)

Kegiatan pembongkaran pasangan batu lama, meskipun memiliki kontribusi GWP yang relatif kecil (2,64%), menjadi hotspot utama untuk kategori PMF (32,70%). Hal ini disebabkan oleh aktivitas fragmentasi mekanis batuan yang menghasilkan emisi debu $PM_{2.5}$ dalam konsentrasi tinggi. Kondisi ini menjadi perhatian khusus dari aspek kesehatan dan keselamatan kerja, terutama bagi pekerja yang terpapar langsung selama proses pembongkaran.

Pada kategori HTP, kegiatan pasangan batu baru dengan mortar tipe N menjadi kontributor tertinggi (42,10%) karena penggunaan semen Portland dalam campuran mortar menghasilkan emisi logam berat dan senyawa kimia berbahaya selama proses produksi. Hal ini konsisten dengan temuan penelitian[12] (Alfiani dkk., 2025) yang menyatakan bahwa material beton K-350 adalah kontributor dampak lingkungan terbesar dengan persentase 76%–96,8% dari total dampak.

Tingkat efisiensi penggunaan material dan energi dalam proyek normalisasi saluran sekunder D.I. Waduk Gogor dinilai belum merata dan masih dapat dioptimalkan. Dari sisi material, efisiensi terbaik ditunjukkan melalui praktik reuse (penggunaan kembali) batu bekas bongkaran sebesar 260,71 ton, yang berhasil menghemat emisi 48,07 kg CO_2-eq dan mengurangi kebutuhan batu baru dari quarry. Praktik ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dalam konstruksi yang mendukung pengurangan limbah material.

Dari sisi energi, distribusi konsumsi sangat

timpang karena 90,6% dari total energi fosil (109.373,23 MJ) hanya terkonsentrasi pada satu kegiatan yaitu pemasangan U-Ditch K350. Ketimpangan ini menunjukkan bahwa efisiensi energi proyek secara keseluruhan sangat bergantung pada pengelolaan kegiatan tersebut. Penggunaan semen Portland dalam jumlah besar pada pekerjaan pasangan batu, plesteran, dan siaran tanpa optimasi rasio campuran juga menjadi indikasi pemborosan material yang turut memperbesar beban emisi lingkungan.

Perbandingan dengan penelitian terdahulu menunjukkan bahwa temuan ini konsisten dengan penelitian Benalcázar-Murillo dkk.[14] pada sistem irigasi di Ekuador yang menemukan konsumsi energi sebagai kontributor terbesar (42%) dalam total emisi siklus hidup. Penelitian Kurnia dkk. [15] pada konstruksi jembatan juga menunjukkan bahwa metode precast menghasilkan emisi yang lebih tinggi dibandingkan metode cor di tempat, yang menguatkan temuan dominasi U-Ditch precast dalam penelitian ini

Berdasarkan hasil analisis LCA, terdapat beberapa rekomendasi mitigasi yang dapat diterapkan untuk mengurangi dampak lingkungan pada proyek serupa di masa mendatang. Pertama, substitusi material: mengganti sebagian semen Portland dengan fly ash atau slag (substitusi 20–40%) dapat menurunkan emisi GWP sebesar 13–16% tanpa mengorbankan kualitas bangunan, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian Muttaqien dkk.[16].

Kedua, penggunaan semen rendah karbon (*blended cement*): penerapan semen tipe Portland Composite Cement (PCC) atau Portland Pozzolana Cement (PPC) sebagai pengganti OPC pada campuran mortar dapat mengurangi embodied carbon secara signifikan. Ketiga, optimalisasi rasio campuran mortar: penyesuaian mix design mortar untuk meminimalkan penggunaan semen per satuan volume tanpa mengurangi kekuatan yang dipersyaratkan.

Keempat, dari aspek kesehatan kerja, penggunaan APD lengkap bagi pekerja (masker N95 dan kacamata) dan penyiraman area kerja secara berkala untuk menekan debu sangat penting mengingat tingginya emisi PMF pada kegiatan pembongkaran. Kelima, pengadaan material dari sumber lokal untuk meminimalkan emisi transportasi, terutama untuk semen yang jarak angkutnya mencapai 47,3 km.

PENUTUP

Berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) terhadap proyek normalisasi Saluran Sekunder D.I. Waduk Gogor, terdapat tiga kesimpulan utama:

1. Siklus hidup proyek normalisasi diidentifikasi melalui pendekatan *cradle-to-gate* yang mencakup 8 kegiatan konstruksi utama, mulai dari mobilisasi lapangan hingga pekerjaan finishing plesteran. Seluruh aliran sumber daya dalam proses konstruksi telah terpetakan secara komprehensif sebagai dasar penilaian dampak lingkungan.
2. Proyek menghasilkan dampak lingkungan yang signifikan dengan total emisi GWP sebesar 111.584,80 kg CO_2-eq. Hotspot utama adalah kegiatan pemasangan U-Ditch K350 yang mendominasi 54,44% GWP dan 90,6% konsumsi energi fosil (109.373,23 MJ). Kegiatan pembongkaran batu lama menjadi penyumbang emisi partikulat (PMF) terbesar sebesar 32,70%. Praktik reuse batu bekas bongkaran sebesar 260,71 ton berhasil menghemat 48,07 kg CO_2-eq.
3. Efisiensi penggunaan material dan energi dinilai belum merata. Efisiensi terbaik ditunjukkan melalui praktik reuse material. Namun, distribusi konsumsi energi yang sangat timpang (90,6% pada satu kegiatan) dan penggunaan semen Portland tanpa optimasi rasio campuran mengindikasikan masih besarnya potensi peningkatan efisiensi. Mitigasi yang direkomendasikan meliputi substitusi semen dengan *fly ash*, optimasi *mix design* mortar, serta penerapan manajemen kesehatan dan keselamatan kerja yang ketat.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. muarif, Hidayanti, "Analisis Efektivitas Jaringan Irigasi Sekunder Bosso D . I Makawa," vol. 25, pp. 511–520, 2025.

[2] P. T. Bastuti and S. R. Nur, "Irigasi Kecil: Kinerja, Masalah, dan Solusinya," *Forum Penelitian Agro Ekonomi*, vol. 35, no. 2, pp. 91–105, 2017, [Online]. Available: http://ejurnal.litbang.pertanian.go.id/index.php/fae/article/view/7958

[3] D. A. Alfiani, Annisa Rizky, "LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) PEKERJAAN BALOK DAN PLAT LANTAI BETON DI PROYEK APARTEMEN SAMAVIEW DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE SIMAPRO," Vol. 5, 2025.

[4] C. A. Sapulete, H. A. Lie, and Y. A. Priastiwi, "Sustainability Beton Metode Life Cycle Assessment Studi Kasus: Limbah Beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Departemen Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 24, no. 2, p. 140, 2019, doi: 10.14710/mkts.v24i2.18863.

[5] M. P. Adji and M. Ali, "Metode Life Cycle Assessment Untuk Kajian Dampak Lingkungan Pada Instalasi Pengolahan Air Bersih," vol. IX, no. 3, pp. 9696–9706, 2024.

[6] P. U. P. Riza Susanti, Asri Nurdiana, Lukman, "PENDAMPINGAN

RENCANA NORMALISASI SALURAN IRIGASI," vol. 01, no. 04, pp. 280–285, 2020.

[7] Y. Indriani and B. Wicaksono, "Analisis Jaringan Irigasi Daerah Irigasi Sumberarum Kabupaten Bojonegoro," vol. 5, pp. 732–741, 2025.

[8] B. W. Yulia Indriani, Mushthofa, "Anal is is Inde ks K ine rja S iste m Ir igas i Dae rah Ir igas i Sambe ng Ke camatan Kas iman Kabupate n Bojone goro," vol. 5, no. 2, 2025.

[9] S. Sangkala, O. D. Nara, and H. D. Titaley, "Analisa Kinerja Saluran Primer Daerah Irigasi Way Geren Kecamatan Lolong Guba Kabupaten Buru , Provinsi Maluku," vol. 2, no. 1, pp. 710–718, 2025.

[10] KLHK, "Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA)," *Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan*, no. 1, pp. 1–82, 2021.

[11] I. Hakim, A. Razak, Z. Xin, K. Sin, and K. Sudesh, "Life Cycle Assessment on Global Warming and Fine Particulate Matter Formation for Biological Extraction Method in Polyhydroxyalkanoates (PHA) Production : a Sustainable Alternative," vol. 113, no. October, pp. 397–402, 2024, doi: 10.3303/CET24113067.

[12] K. Obaideen *et al.*, "Solar Energy : Applications , Trends Analysis , Bibliometric Analysis and Research Contribution to Sustainable Development Goals (SDGs)," 2023.

[13] R. Al Hidayat, "Evaluasi Pembangunan Infrastruktur Jaringan Irigasi di Kabupaten Bengkulu Tengah," pp. 334–347, 2022.

[14] D. Benalc, S. Vilcekova, and M. Á. Pardo, "Analysis of Equivalent CO 2 Emissions of the Irrigation System — A Case Study," pp. 1–14, 2023.

[15] R. Citra, K. Pangestu, A. Agung, and K. Ayuningsasi, "Pengaruh Konsumsi Energi Sektor Industri , Rumah Tangga , dan Transportasi terhadap Emisi Karbon di Indonesia," vol. 3, no. 4, 2024.

[16] Ahzab, D. N. Martono, and N. Gusdini, "Analisis Daur Hidup Produksi Beton Fly Ash sebagai Upaya Mengurangi Dampak Emisi CO 2," vol. 21, no. 1, pp. 68–75, 2023, doi: 10.14710/jil.21.1.1.