

Pendekatan *Life Cycle Assessment* dalam Menurunkan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada Struktur Beton Gedung (Studi Kasus Proyek Pembangunan *Toll Corridor Development* Fase 2 dan 3 Taman Mini)

Malika Kaylani^{1*}, Dewi Handayani²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Kota Surakarta, Indonesia 57125

²Pusat Penelitian Lingkungan Hidup (PPLH) - Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia, 57126

Received: 20/04/2025 Accepted: 05/02/2026

Abstract

The construction sector contributes significantly to greenhouse gas (GHG) emissions, mainly through concrete use. This study applies Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate and reduce GHG emissions in concrete structures, using a case study of the Toll Corridor Development (TCD) Phase 2 and 3 at TMII. Emissions were calculated based on material volume and emission factors, including cement, aggregates, steel, water, and admixtures. The study explores four supplementary cementitious materials (SCMs)—fly ash, metakaolin, silica fume, and zeolite—as partial cement substitutes. Results show that SCMs effectively reduce GHG emissions, with metakaolin achieving the highest reduction at 76.14%. This study recommends broader use of LCA in material selection to support Sustainable Development Goals (SDGs) in construction.

Keywords: Concrete Additives; Eco-Friendly Concrete; Greenhouse Gas Emissions; Life Cycle Assessment; Sustainable Construction.

Abstrak

Sektor konstruksi berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), terutama dari penggunaan beton. Produksi beton cair menghasilkan emisi CO₂ yang cukup signifikan, yaitu sekitar 6-8% dari total emisi CO₂ yang disebabkan oleh aktivitas manusia (antropogenik). Penelitian ini menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment (LCA)* untuk mengevaluasi dan mengurangi emisi GRK pada struktur beton, dengan studi kasus proyek *Toll Corridor Development (TCD)* fase 2 dan 3 di TMII. Perhitungan emisi didasarkan pada volume material dan faktor emisi seperti semen, agregat, baja, air, dan bahan kimia tambahan. Empat bahan tambahan (*additive*)—*fly ash*, metakaolin, silika fume, dan zeolit—dikaji sebagai substitusi sebagian semen. Hasil menunjukkan bahwa *additive* secara signifikan mengurangi emisi GRK, di mana metakaolin memberikan pengurangan tertinggi sebesar 76,14%. Studi ini merekomendasikan penerapan LCA secara luas untuk mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) di sektor konstruksi.

Kata kunci: Aditif Beton; Beton Ramah Lingkungan; Emisi GRK; Konstruksi Berkelanjutan; *Life Cycle Assessment*.

* **Corresponding Author:** malikakaylani@student.uns.ac.id

PENDAHULUAN

Beton merupakan komponen pembangunan utama yang saat ini umum digunakan dalam industri konstruksi. Dengan semen sebagai komponen utama dalam campuran beton cair, produksi beton cair menghasilkan emisi CO₂ yang cukup signifikan, yaitu sekitar 6-8% dari total emisi CO₂ yang disebabkan oleh aktivitas manusia (antropogenik) (Wang dkk, 2017; Mindess, 2019; Sivakrishna dkk, 2020 dalam Muttaqien dkk.,2023)). Proses produksi beton cair melibatkan beberapa tahapan, mulai dari pendaratan material, pencampuran material beton cair, penuangan beton cair ke dalam *Truck Mixer*, pengiriman beton cair ke lokasi proyek konstruksi, hingga penuangan beton di lokasi proyek. Setiap tahapan dalam produksi beton cair ini dapat menimbulkan dampak lingkungan yang cukup signifikan, yang memberikan tekanan pada industri beton untuk mengurangi dampak tersebut (Muttaqien et al., 2023). Beberapa strategi dapat diterapkan untuk menghasilkan produk beton yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Berdasarkan *European Commission* (2010), industri semen memerlukan energi panas dan listrik dalam jumlah besar, sehingga sekitar 40% dari total biaya operasional digunakan untuk energi (Vito dkk., 2011 dalam Pahlevi, M. R., & Nisa, S. Q. Z., 2023). Industri ini menjadi salah satu penyumbang terbesar polusi udara akibat tingginya konsumsi energi dan emisi debu. Emisi yang dihasilkan mengandung zat kimia berbahaya, seperti CO, NO, SO, partikel, dan mikropolutan lain, yang berdampak pada kesehatan dan lingkungan (Anand dkk., 2006 dalam Pahlevi, M. R., & Nisa, S. Q. Z., 2023). Selain gas rumah kaca, emisi lain yang dihasilkan meliputi NO_x, SO₂, PM, dan CO, yang berpotensi menyebabkan asidifikasi dan dampak lingkungan lainnya (Kuenen dkk., 2016; Li dkk., 2014 dalam Pahlevi, M. R., & Nisa, S. Q. Z., 2023). Proses produksi semen meliputi beberapa tahap, dimulai dari penyiapan bahan baku, dilanjutkan dengan pembuatan klinker, dan akhirnya pembuatan semen (Panjaitan dkk., 2018).

Proses yang paling boros energi adalah pembuatan klinker, yang dimulai dengan pemanasan awal untuk menghilangkan kandungan air, memanfaatkan gas panas dari kiln. Selanjutnya, produk tersebut melalui tahap kalsinasi yang intensif dalam tanur berputar untuk menghasilkan klinker. Setelah itu, klinker didinginkan dengan cepat melalui proses pertukaran udara. Klinker yang dihasilkan kemudian dicampur dengan bahan aditif untuk menghasilkan semen (WBCSD-IEA, 2009; Panjaitan dkk., 2018). Scrivener dkk., (2018) menyebutkan, terdapat produksi semen dan jenis semen yang umum digunakan dalam campuran beton, yaitu *Semen Portland* (semen yang biasa digunakan pada proyek, termasuk proyek TCD TMII fase 2 dan 3) dan semen campuran (*blended cement*), ini adalah jenis semen yang dihasilkan dengan mencampurkan *semen portland* dengan bahan tambahan, seperti *fly ash*, slag (limbah dari industri baja), zeolit, metakaolin, atau *silica fume* (hasil sampingan dari produksi silikon).

Semen campuran dapat mengurangi emisi CO₂ selama produksi, serta meningkatkan daya tahan beton terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Umumnya digunakan pada proyek konstruksi ramah lingkungan serta proyek infrastruktur yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap serangan kimia dan korosi. Setiap pemilihan jenis semen berpengaruh terhadap emisi yang dihasilkan, maka dari itu pemilihan jenis semen seharusnya mempertimbangkan juga emisi yang dihasilkan, tanpa mengabaikan keperluan struktur. Oleh karena itu, makalah ini akan membahas jenis-jenis campuran beton dan potensi emisi yang dihasilkan. Pada makalah ini juga akan ditinjau kasus penggunaan beton *ready mix* pada Proyek TCD TMII Fase 2 dan 3 yang berlokasi di Pinang Ranti, Jakarta Timur dikirim dari *batching plant* Adhimix Lenteng Agung, Jakarta Selatan, yang menggunakan *semen portland* untuk campuran beton.

Penelitian ini akan menganalisis *Life Cycle Assessment* (LCA) campuran material beton *ready mix* dalam proyek konstruksi, dengan daerah tinjauan kolom lantai basemen proyek TCD TMII fase 2 dan 3. Manfaat yang dapat diberikan dari hasil analisis yang disampaikan adalah meningkatkan pemahaman dan pengetahuan mengenai beton dengan semen campuran serta hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai solusi alternatif yang dapat digunakan oleh proyek di masa depan dalam upaya pencapaian konstruksi berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Metodologi untuk penelitian ini melibatkan pendekatan *Systematic Literatur Review* (SLR), SLR adalah proses yang dilakukan penulis untuk mencari berbagai sumber yang berhubungan dengan topik tertentu yang berupa jurnal, buku, artikel, atau dokumen yang relevan. Metode SLR memungkinkan penulis untuk secara sistematis mengidentifikasi, menganalisis, mengevaluasi, dan menafsirkan hasil penelitian sebelumnya. Tujuan penggunaan metode ini adalah untuk mengetahui regulasi yang digunakan oleh para peneliti dalam mengevaluasi dampak lingkungan akibat kegiatan konstruksi terutama pada proses beton pracetak. Proses ini didasarkan pada konsep dasar dari alur kerja *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA).

Langkah awal yang dilakukan adalah merumuskan pertanyaan penelitian dan mengidentifikasi kata kunci dan frasa yang terkait dengan topik tersebut. Kemudian, pencarian literatur secara menyeluruh dilakukan dengan menggunakan beberapa database elektronik, seperti Science Direct, Scopus, dan Google Scholar. Beberapa kata dan frasa kunci digunakan dalam strategi pencarian, termasuk “*life cycle assessment*”, “*concrete*”, “*carbon*”, “*additive*”, “*cement*”, “*emision*”, dan “*supplementary cementitious materials*”. Literatur yang diperoleh kemudian ditinjau, dan data dianalisis, dan temuan-temuannya disajikan dalam bentuk jurnal yang komperhensif. Berikut merupakan tahap ekstraksi data, 16 jurnal dipilih dari total 82 jurnal yang teridentifikasi sebagai berikut.

Distribusi Jurnal Berdasarkan Jumlah Sitasi dan Indeks Jurnal

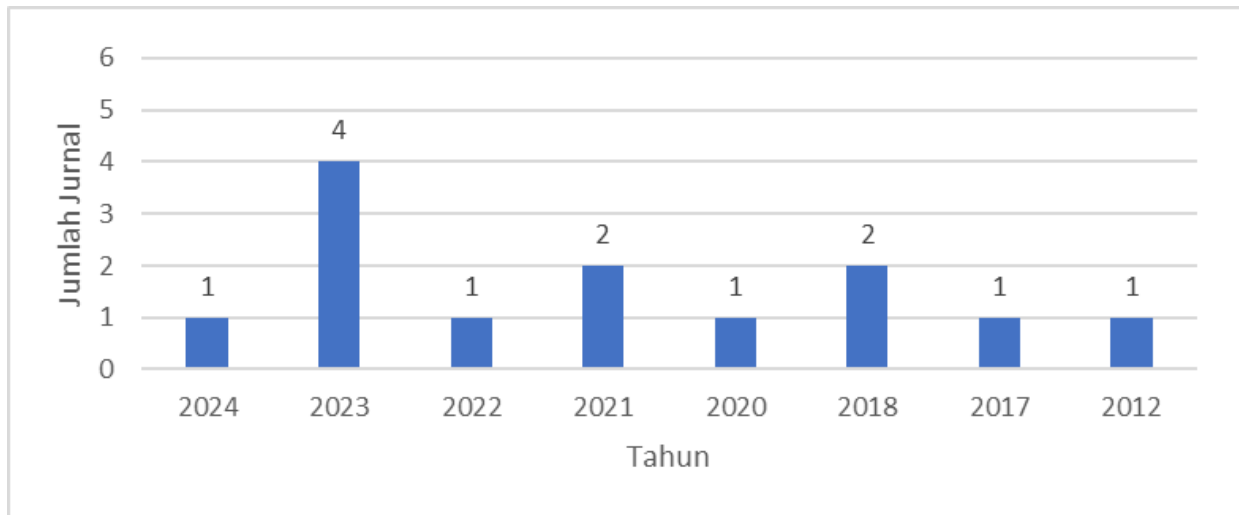
Berdasarkan data referensi, terdapat variasi jumlah sitasi dan indeks jurnal. Artikel dengan indeks Q1 mendominasi, dengan jumlah sebanyak 5 artikel, termasuk karya Georgiades, Gettu, Scrivener, Terán-Cuadrado, dan Panjaitan. Indeks Q2 diwakili oleh 4 artikel, seperti karya Manjunatha, Nigri, Cordoba, dan Meshram. Sementara itu, hanya 1 artikel yang berada di indeks Q3, yaitu oleh Ige & Olanrewaju. Dari segi sitasi, publikasi dengan sitasi tertinggi adalah karya Manjunatha (115 sitasi) yang terindeks di Q2, sedangkan beberapa artikel seperti oleh Terán-Cuadrado dan Panjaitan tidak mencantumkan jumlah sitasi. Dominasi indeks Q1 mencerminkan kualitas akademik yang tinggi dari sebagian besar referensi. Detail distribusi jurnal berdasarkan jumlah sitasi dan indeks jurnal tiap-tiap jurnal dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Distribusi Jurnal Berdasarkan Jumlah Sitasi dan Indeks Jurnal

Refrensi	Jumlah Sitasi	Indeks Jurnal
(Manjunatha, S. dkk., 2021)	115	Q2
(Georgiades, M. dkk., 2023)	102	Q1
(Nigri, E. M. dkk., 2010)	35	Q2
(Gettu, R. et al., 2018)	108	Q1
(Ige, O. E., & Olanrewaju, O. A. 2022)	79	Q3
(Scrivener, K. et al., 2018)	100	Q1
(Terán-Cuadrado, G., dkk., 2024)	-	Q1
(Cordoba, G & Irassar, E, F. 2023)	4	Q2
(Panjaitan, T. et. al., 2020)	-	Q1
(Meshram, R. et. al., 2021)	63	Q2

Distribusi Jurnal Berdasarkan Tahun

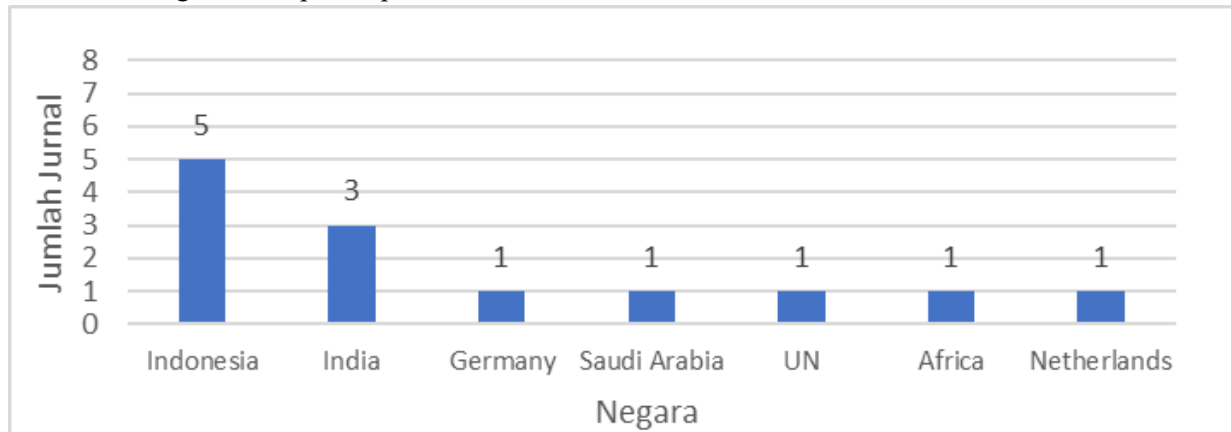
Distribusi jurnal berdasarkan tahun menunjukkan jumlah jurnal yang diterbitkan pada berbagai tahun. Secara umum, jumlah jurnal yang diterbitkan cenderung bervariasi dari tahun ke tahun. Pada tahun 2012, 2017, 2020, dan 2024, hanya terdapat satu jurnal yang diterbitkan. Jumlah ini juga sama dengan yang terlihat pada tahun 2022. Namun, ada peningkatan jumlah jurnal yang diterbitkan pada beberapa tahun, seperti tahun 2018 dan 2021, masing-masing mencatatkan dua jurnal. Tahun 2023 menjadi puncak produktivitas dengan empat jurnal yang diterbitkan, jauh lebih tinggi dibandingkan tahun-tahun lainnya. Fluktuasi jumlah jurnal ini menunjukkan adanya variasi aktivitas publikasi yang cukup signifikan dari waktu ke waktu. Grafik distribusi jurnal berdasarkan tahun ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi Jurnal Berdasarkan Tahun

Distribusi Jurnal Berdasarkan Negara

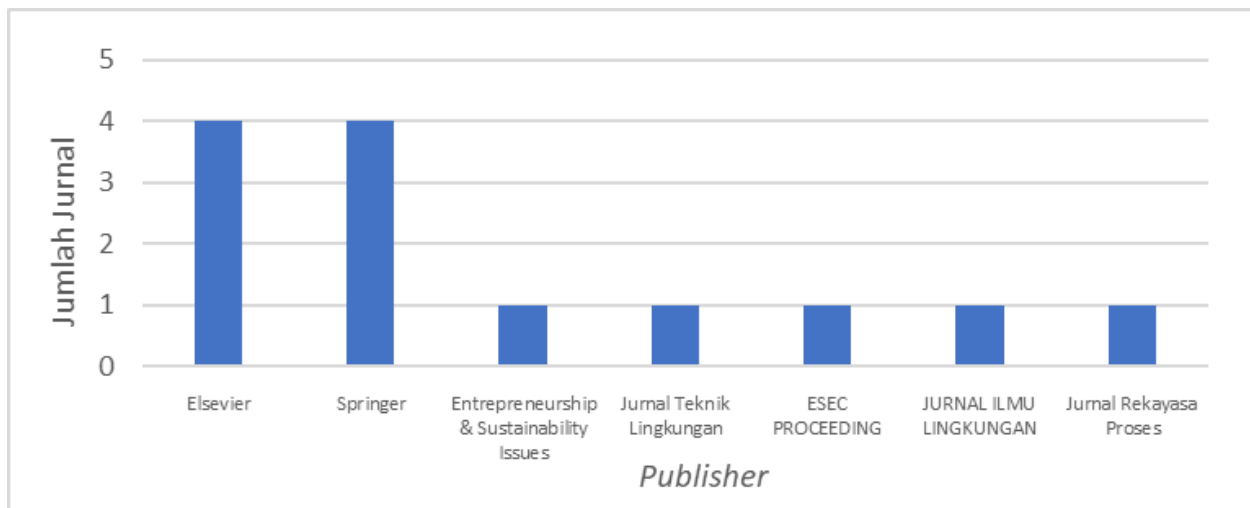
Distribusi jurnal berdasarkan negara menunjukkan distribusi jumlah jurnal yang diterbitkan berdasarkan negara. Indonesia menjadi negara dengan jumlah jurnal terbanyak, yaitu sebanyak 5 jurnal. Posisi kedua diisi oleh India dengan 3 jurnal. Sementara itu, negara-negara lainnya, seperti Jerman, Arab Saudi, organisasi internasional seperti PBB (UN), Afrika, dan Belanda, masing-masing hanya memiliki 1 jurnal yang diterbitkan. Grafik ini menunjukkan dominasi Indonesia dalam kontribusi jumlah jurnal dibandingkan dengan negara-negara lainnya yang memiliki jumlah lebih kecil dan merata. Distribusi jurnal berdasarkan negara ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi Jurnal Berdasarkan Negara

Distribusi Jurnal Berdasarkan Publisher

Distribusi jurnal berdasarkan *publisher* menunjukkan jumlah jurnal yang diterbitkan berdasarkan penerbit atau *publisher*. Elsevier dan Springer menjadi penerbit dengan kontribusi terbesar, masing-masing menerbitkan 4 jurnal. Sementara itu, penerbit lainnya seperti *Entrepreneurship & Sustainability Issues*, Jurnal Teknik Lingkungan, *ESEC Proceeding*, Jurnal Ilmu Lingkungan, dan Jurnal Rekayasa Proses masing-masing hanya menerbitkan 1 jurnal. Data ini mengindikasikan bahwa Elsevier dan Springer mendominasi dalam penerbitan jurnal dibandingkan dengan *publisher* lainnya yang memiliki kontribusi lebih kecil. Distribusi Jurnal berdasarkan *publisher* ditampilkan pada Gambar 3.



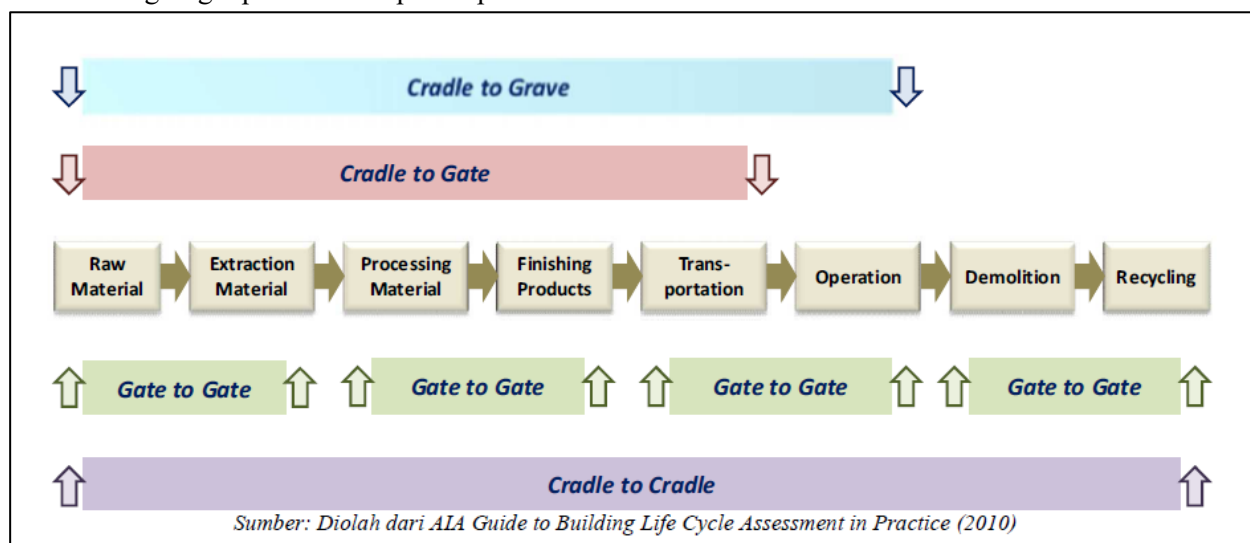
Gambar 3. Distribusi Jurnal Berdasarkan Publisher

HASIL DAN PEMBAHASAN

LCA secara khusus menilai beberapa dampak lingkungan, termasuk emisi *Greenhouse Gas Emissions* atau gas rumah kaca (GRK), seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan nitrogen oksida (NO_x), yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Menurut Hermawan dkk (2013) Tahapan LCA berawal dari Ekstraksi dan Pemrosesan Bahan Baku, Pabrikasi dan Produksi Material Bangunan, Transportasi Material, Tahap Konstruksi, Pengoperasian dan Pemeliharaan Gedung, dan terakhir Daur Ulang atau Pembuangan Akhir. Ruang lingkup LCA terdiri dari:

1. *Cradle to grave*, mencakup analisis daur hidup dari bahan baku hingga pengoperasian produk.
2. *Cradle to gate*, mencakup proses dari bahan baku hingga pintu keluar sebelum produk dioperasikan.
3. *Gate to gate* adalah lingkup analisis daur hidup paling terbatas, hanya mencakup aktivitas yang paling dekat dalam siklus.
4. *Cradle to cradle* melibatkan analisis daur hidup dari bahan baku hingga proses daur ulang material.

Ruang lingkup LCA ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ruang Lingkup LCA (AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice, 2010)

Alternatif Campuran dan Emisi yang Dihasilkan

Dalam Sunarni (2022) Penggunaan *additive* dalam pembuatan beton memiliki selisih emisi sebesar *Fly ash* = 1,55%, *Metakaolin* = 4,63%, *Silica fume* = 4,21%, *Zeolit* = 1,52%. *Metakaolin* merupakan zat *additive* paling ramah lingkungan karena memiliki selisih karbon yang dihasilkan dengan ditambahkan dan

tidak ditambahkan terbesar yaitu 4,63%. Interpretasi perbandingan total emisi beton dengan dan tanpa *additive* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Interpretasi Perbandingan Total Emisi Beton Dengan dan Tanpa Additive

Alternatif	Jumlah GRK Dengan Campuran <i>Additive</i> (kgCO _{2e})	Jumlah GRK (Tanpa Campuran <i>Additive</i>) (kgCO _{2e})	Selisih (%)
(1)	(2)	(3)	(4) = {(2)-(3)}/(3)
<i>Existing (fly ash)</i>	362.118,88	367.803,90	1,55%
Alternatif 1 (Metakaolin)	297.651,40	312.111,77	4,63%
Alternatif 2 (<i>Silica fume</i>)	307.133,65	320.616,99	4,21%
Alternatif 3 (Zeolit)	327.033,28	332.094,15	1,52%

Studi Kasus Proyek TCD TMII Fase 2 dan 3

Penelitian ini berfokus pada perhitungan emisi GRK (gas rumah kaca) yang dihasilkan dari pembuatan bahan dan material untuk struktur kolom. Untuk mengurangi emisi, dilakukan modifikasi dengan menyubstitusi semen menggunakan bahan tambahan atau *additive* berupa *fly ash* dan *superplasticizer*. Perhitungan didasarkan pada data sekunder dari proyek TCD TMII fase 2 dan 3 yang telah diolah kembali, mencakup volume pekerjaan beton untuk struktur kolom lantai basemen. Analisis menggunakan data volume penggunaan material struktur kolom pada fase 2 dan 3, data pekerjaan, produksi material dan bahan proyek disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Produksi Material dan Bahan Proyek

Data	Beton fc' 35 MPa	Beton fc' 45 MPa
Volume	330,98 m ³	450,49 m ³
Besi tulangan	103.002,02 kg	120.545,62 kg

Data rancangan *ready mix* beton pada penelitian ini didapatkan dari data proyek TCD TMII fase 2 dan 3. Data rancangan *mix design* beton disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Rancangan *Mix Design* Beton

Nomor	Uraian	Nilai	Satuan
Mutu Beton 45 Mpa			
1	<i>superplasticizer</i>	1%	
2	ukuran agregat <i>max</i>	20	mm
3	kadar air	160	kg/m ³
4	kadar semen	450	kg/m ³
5	kadar agregat kasar	1050	
6	kadar agregat halus	700	
7	bahan kimia	4,5	%
Mutu Beton 35 Mpa			
1	<i>superplasticizer</i>	1%	
2	ukuran agregat <i>max</i>	20	mm
3	kadar air	180	kg/m ³
4	kadar semen	350	kg/m ³
5	kadar agregat kasar	1050	
6	kadar agregat halus	700	
7	bahan kimia	3,5	%

Contoh perhitungan kebutuhan total beton f_c' 35 MPa (Fase 2) yakni berikut ini:

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Semen} &= \text{Volume beton} \times \text{Data kebutuhan /m}^3 \\ &= 330,98 \text{ m}^3 \times 350 \text{ kg/m}^3 \\ &= 80.675,53 \text{ kg} \end{aligned}$$

Contoh perhitungan kebutuhan total beton f_c' 45 MPa (Fase 3) yakni berikut ini:

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Semen} &= \text{Volume beton} \times \text{Data kebutuhan /m}^3 \\ &= 450,49 \text{ m}^3 \times 450 \text{ kg/m}^3 \\ &= 202.722,66 \text{ kg} \end{aligned}$$

Data total kebutuhan bahan dan material beton proyek TCD TMII Fase 2 dan 3 disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Total Kebutuhan Bahan dan Material Beton Proyek TCD TMII Fase 2 dan 3

	Jumlah Total Kebutuhan Fase 2 & 3	Satuan
Semen	283.398,18	Kg
Kerikil	715.046,10	Kg
Pasir	476.697,40	Kg
Air	113.569	Kg
Admixture	2.833,98	Kg
Baja Tulangan	155.673,35	Kg

Data faktor emisi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Data Faktor Emisi

No.	Nama Material	Jumlah Gas Rumah Kaca (kgCO _{2e} / kg Material)	Sumber
1	Semen	1,067	Kuncara, 2018
2	Agregat	0,0032	Zapata dan Gambatese, 2005
3	Besi Tulangan	2	Hughes dan Hare, 2012
4	<i>Fly Ash</i>	0,01	PE Internasional, 2011
5	<i>Admixture</i>	0,69	EFCA Enviromental Declaration

Data faktor emisi, volume material, dan jumlah emisi GRK untuk kebutuhan struktur kolom disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Faktor Emisi, Volume Material, dan Jumlah Emisi GRK untuk Kebutuhan Struktur Kolom

No.	Material	Faktor Emisi GRK (kgCO _{2e} /kg Material)	Volume (kg)	Jumlah Emisi GRK (kgCO _{2e})
	(1)	(2)	(3)	(4) = (3) x (2)
1	Semen	1,067	283.398,18	302.385,86
2	Agregat Kasar	0,0032	715.046,10	2.288,15
3	Agregat Halus	0,0032	476.697,40	1.525,43
4	<i>Admixture</i>	0,69	2.833,98	1.955,45
6	Baja Tulangan	2,00	155.673,35	311.346,70
Total Emisi GRK				619.501,59

Sumber: Nurjanah et al., 2024

Perhitungan emisi gas rumah kaca di atas yaitu produksi material dan bahan struktur atas yaitu kolom lantai basemen proyek TCD TMII fase 2 dan 3 berdasarkan data sekunder olahan mahasiswa magang proyek dan nilai Faktor Emisi (FE) yang didapatkan dari kajian literatur.

Contoh Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada Material Semen

$$\begin{aligned} \text{Emisi GRK} &= \text{VolSemen} \times \text{FESemen} \\ &= 283.398,18 \times 1,067 \\ &= 302.385,86 \text{ kgCO}_2\text{e} \end{aligned}$$

Selanjutnya akan dihitung kebutuhan material dengan tambahan *additive* sebagai alternatif yang akan digunakan dalam analisis mengurangi dampak emisi gas rumah kaca. Perhitungan jumlah emisi karbon dengan dan tanpa zat *additive* disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perhitungan Jumlah Emisi Karbon Dengan dan Tanpa Zat *Additive*

Alternatif	Dengan Campuran <i>Additive</i>						Tanpa Campuran <i>Additive</i>					
	Semen	Agregat kasar	Agregat halus	Bahan <i>additive</i>	Admixture	Besi tulangan	Semen	Agregat kasar	Agregat halus	Bahan <i>additive</i>	Admixture	Besi tulangan
Alternatif 1 (<i>fly ash</i>)	68.164,74	959,22	751,81	425,90	912,68	311.34,70	311.346,70	2.288,15	1.525,43	0,00	1.955,45	311.346,70
Alternatif 2 (Metakaolin)	51.353,05	266,99	321,07	13.375,06	912,68	76.540,63	76.540,63	1.509,62	743,55	0,00	1.955,45	311.346,70
Alternatif 3 (<i>Silica fume</i>)	62.696,11	339,69	232,48	540,24	912,68	82.567,40	82.567,40	1.356,22	928,19	0,00	1.955,45	311.346,70
Alternatif 4 (Zeolit)	61.437,37	315,86	386,06	4.944,16	912,68	88.776,38	88.776,38	1.261,08	1.541,34	0,00	1.955,45	311.346,70

Perhitungan emisi GRK di atas berdasarkan data sekunder beton kolom lantai basement proyek TCD TMII fase 2 dan 3 jenis *existing* (tanpa bahan *additive*) dan perhitungan alternatif dengan ditambahkan bahan *additive* sebagai bahan pengganti semen dengan perbandingan faktor emisi *additive* yang didapatkan dari penelitian-penelitian sebelumnya yaitu Sunarni (2022). Perhitungan jumlah emisi gas rumah kaca (GRK) pada beton dengan dan tanpa campuran *additive* disajikan pada Tabel 9, dan interpretasi perbandingan jumlah dan selisih emisi beton dengan dan tanpa campuran *additive* disajikan pada Tabel 10.

Tabel 9. Perhitungan Jumlah Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada Beton Dengan dan Tanpa Campuran *Additive*

Alternatif	Menggunakan Campuran <i>Additive</i> (kgCO _{2e})	Tanpa Campuran <i>Additive</i> (kgCO _{2e})
<i>Fly ash</i>	382.561,05	619.501,59
Metakaolin	142.769,49	598.350,80
<i>Silica fume</i>	147.288,61	593.712,97
Zeolit	156.772,52	588.647,11

Tabel 10. Interpretasi Perbandingan Jumlah dan Selisih Emisi Beton Dengan dan Tanpa Campuran *Additive*

Alternatif	Jumlah Emisi (Dengan Campuran <i>Additive</i>) (kgCO _{2e})	Jumlah Emisi (Tanpa Campuran <i>Additive</i>) (kgCO _{2e})	Selisih Dengan dan Tanpa Campuran <i>Additive</i> (%)
(1)	(2)	(3)	(4) = {(2)-(3)}/(3)
Alternatif 1 (<i>fly ash</i>)	382.561,05	619.501,59	-38,25%
Alternatif 2 (Metakaolin)	142.769,49	598.350,80	-76,14%
Alternatif 3 (<i>Silica fume</i>)	147.288,61	593.712,97	-75,19%
Alternatif 4 (Zeolit)	156.772,52	588.647,11	-73,37%

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh penggunaan bahan tambahan (*additive*) terhadap total emisi GRK yang dihasilkan oleh berbagai alternatif material dalam produksi semen. Berikut adalah hasil analisis dari empat jenis alternatif bahan tambahan:

- Alternatif 1 (*Fly Ash*) Penggunaan *fly ash* sebagai bahan tambahan menghasilkan total emisi sebesar 382.561,05 kgCO_{2e}, dibandingkan dengan 619.501,59 kgCO_{2e} jika bahan tambahan tidak digunakan. Ini menunjukkan pengurangan emisi sebesar 38,25%.
- Alternatif 2 (Metakaolin) Metakaolin menghasilkan total emisi sebesar 142.769,49 kgCO_{2e} dengan bahan tambahan, jauh lebih rendah dibandingkan dengan 598.350,80 kgCO_{2e} tanpa bahan tambahan. Pengurangan emisi mencapai 76,14%, yang merupakan pengurangan tertinggi di antara semua alternatif.
- Alternatif 3 (*Silica Fume*) *Silica fume* menghasilkan total emisi sebesar 147.288,61 kgCO_{2e} dengan bahan tambahan, dibandingkan dengan 593.712,97 kgCO_{2e} tanpa bahan tambahan. Ini memberikan pengurangan emisi sebesar 75,19%.
- Alternatif 4 (Zeolit) Penggunaan zeolit sebagai bahan tambahan menghasilkan total emisi sebesar 156.772,52 kgCO_{2e}, dibandingkan dengan 588.647,11 kgCO_{2e} tanpa bahan tambahan. Emisi berkurang sebesar 73,37%.

SIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan bahan tambahan seperti metakaolin, *silica fume*, zeolit dan *fly ash* dapat secara signifikan mengurangi total emisi GRK dibandingkan tanpa bahan tambahan, dengan metakaolin memberikan pengurangan tertinggi.

Emisi yang dihasilkan proyek TCD TMII Fase 2 dan 3 pada konstruksi kolom lantai basement yaitu sebesar 619.501,59 kgCO_{2e}. Dengan penggunaan *additive*, terjadi penurunan emisi yang signifikan, terutama dengan penggunaan metakaolin (-76,14%), *silica fume* (-75,19%), zeolit (-73,37%), dan *fly ash* (-38,25%).

Hasil ini membuktikan bahwa substitusi sebagian semen dengan bahan ramah lingkungan merupakan strategi yang relevan untuk konstruksi berkelanjutan. Oleh karena itu, penerapan LCA sangat direkomendasikan dalam proses pengambilan keputusan material proyek guna mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) di sektor infrastruktur.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan integrasi data primer (lapangan) dalam proses LCA untuk meningkatkan akurasi hasil, serta memperluas ruang lingkup analisis hingga tahap operasional dan daur ulang bangunan (*cradle to grave* atau *cradle to cradle*).

DAFTAR PUSTAKA

- Cordoba, G., & Irassar, E. F. (2023). Carbon footprint of reinforced concrete columns with and without supplementary cementitious materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(7), 800-812.
- European Federation of Concrete Admixtures Associations (EFCA). (n.d.). Environmental Product Declarations (EPD) for Admixtures. EFCA.
- Georgiades, M., Shah, I. H., Steubing, B., Cheeseman, C., & Myers, R. J. (2023). Prospective life cycle assessment of European cement production. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 106998.
- Gettu, R., Patel, A., Rathi, V., Prakasan, S., Basavaraj, A. S., Palaniappan, S., & Maity, S. (2019). Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context. *Materials and Structures*, 52, 1-11.

- Hermawan, P. F. M., Abduh, M., & Driejana, R. (2013). Peran Life Cycle Analysis (LCA) Pada Material Konstruksi Dalam Upaya Menurunkan Dampak Emisi Karbon Dioksida Pada Efek Gas Rumah Kaca (031K).
- Hughes, W., & Hare, A. (2012). An analysis of accident statistics to determine the potential use of project-specific accident and incident data in health and safety management. *Construction Management and Economics*, 30(10), 1005–1017.
- Ige, O. E., & Olanrewaju, O. A. (2023). Comparative life cycle assessment of different Portland cement types in South Africa. *Clean Technologies*, 5(3), 901-920.
- Kuncara, F. M. (2018). Evaluasi Emisi Gas Rumah Kaca pada Tahap Pekerjaan Beton High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete Konstruksi Rumah Dua Lantai dengan Metode Life Cycle Analysis, Digilib UNS.
- Manjunatha, M., Preethi, S., Mounika, H. G., & Niveditha, K. N. (2021). Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3637-3644.
- Meshram, R. B., & Kumar, S. (2022). Comparative life cycle assessment (LCA) of geopolymer cement manufacturing with Portland cement in Indian context. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), 4791-4802.
- Muttaqien, A., nowo Martono, D., & Gusdini, N. (2023). Analisis Daur Hidup Produksi Beton Fly Ash sebagai Upaya Mengurangi Dampak Emisi CO₂. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 68-75.
- Nigri, E. M., Rocha, S. D. F., & Romeiro Filho, E. (2010). Portland cement: an application of life cycle assessment. *Product: Management and Development*, 8(2), 167-172.
- Nurjanah, S., Wijatmiko, I., & Wresniwira, S. (2024). Analisis Emisi Gas Rumah Kaca melalui Implementasi BIM 6D pada Gedung B Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Brawijaya. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil*, 1(2). <https://sipil.studentjournal.ub.ac.id/index.php/jmts/article/view/1512>
- Pahlevi, M. R., & Nisa, S. Q. Z. (2023). Analisis dampak asidifikasi industri semen PT X metode life cycle assessment (LCA): Gate to gate.
- Panjaitan, T. W. S., Dargusch, P., & Wadley, D. (2020). Toward the best practice emissions reduction in an emerging economy: an fanalysis of cement manufacturing in Indonesia (Doctoral dissertation, Petra Christian University).
- PE International. (2011). GaBi Software: Product Sustainability Performance.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and concrete Research*, 114, 2-26.
- Terán-Cuadrado, G., Tahir, F., Nurdiawati, A., Almarshoud, M. A., & Al-Ghamdi, S. G. (2024). Current and potential materials for the low-carbon cement production: Life cycle assessment perspective. *Journal of Building Engineering*, 96, 110528.
- WBCSD. 2009. A sectoral approach: greenhouse gas mitigation in the cement industry. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Geneva, Switzerland.
- Zapata, P., & Gambatese, J. A. (2005). Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *Journal of infrastructure systems*, 11(1), 9-20.