

SKRIPSI

***LIFE CYCLE ASSESSMENT* TERHADAP EMISI KARBON
PEMANFAATAN *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH*
SEBAGAI SUBSTITUSI MATERIAL KONSTRUKSI**

Disusun dan diajukan oleh:

**FADIQ UMAR RASYID
D131 18 1502**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

SKRIPSI

***LIFE CYCLE ASSESSMENT* TERHADAP EMISI KARBON
PEMANFAATAN *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH*
SEBAGAI SUBSTITUSI MATERIAL KONSTRUKSI**

Disusun dan diajukan oleh:

**FADIQ UMAR RASYID
D131 18 1502**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

LIFE CYCLE ASSESSMENT TERHADAP EMISI KARBON PEMANFAATAN FLY ASH DAN BOTTOM ASH SEBAGAI SUBSTITUSI MATERIAL KONSTRUKSI

Disusun dan diajukan oleh

**Fadiq Umar Rasyid
D131181502**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 21 Februari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Irwan Ridwan Rahim, S.T., M.T.
NIP 19721119 200121001

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Muhammad Akbar Caronge, S.T., M.Eng
NIP 198604092019043001

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T.
NIP 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Fadiq Umar Rasyid
NIM : D131181502
Program Studi : Teknik Lingkungan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Life Cycle Assessment Terhadap Emisi Karbon Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash Sebagai Substitusi Material Konstruksi

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 13 Maret 2023

Yang Menyatakan



Fadiq Umar Rasyid

ABSTRAK

FADIQ UMAR RASYID. *Life Cycle Assessment* Terhadap Emisi Karbon Pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Sebagai Substitusi Material Konstruksi (dibimbing oleh Irwan Ridwan Rahim dan M. Akbar Caronge)

Proses konstruksi akan memberikan dampak negatif secara signifikan terhadap lingkungan apabila tidak dilakukan penanganan. Salah satu dampak lingkungan yang diakibatkan dari proses konstruksi adalah emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang menyumbang sekitar 21,46% dari kontribusi setiap kategori dalam emisi GRK tahun 2019. Salah satu penyebab timbulnya emisi ini yaitu dari penggunaan material konstruksi seperti beton konvensional yang terbuat dari semen dimana semen diperoleh melalui proses kalsinasi yang menyumbang emisi CO₂. Peningkatan emisi tersebut berakibat terjadinya efek GRK. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui evaluasi emisi CO₂ yang dihasilkan dari pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) sebagai substitusi material konstruksi pada beton menggunakan analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) dan merumuskan strategi dalam menekan emisi CO₂ pada siklus daur hidup FABA sebagai substitusi material konstruksi pada beton. Dengan menggunakan metode kualitatif melalui analisis LCA. Dalam penelitian ini, dilakukan tiga tahapan dalam perhitungan emisi. Mulai dari tahap bahan baku, tahap transportasi serta tahap manufaktur. Dari hasil penelitian, diketahui bahwa beton sampel-3 dengan *mixed design* 30% FA(C) : 100% BA (S) menghasilkan emisi CO₂ paling kecil sebesar 196,54 kg-CO_{2eq}/m³ dan sampel-1 yang merupakan beton konvensional menghasilkan emisi CO₂ paling besar dengan nilai 258,92 kg-CO_{2eq}/m³. Adapun strategi dalam menekan emisi CO₂ pada siklus daur hidup FABA sebagai substitusi material konstruksi yaitu pemanfaatan substitusi beton dengan mix design 30% FA (C) : 100% BA (S) yang memiliki penurunan 24,09%, meminimalisir jarak antara ready mix ke tempat pengecoran dengan jarak optimum 45 km hingga maksimal 60 km, penggunaan truk bertenaga listrik seperti prototipe *arocs electric*.

Kata kunci: Beton, *Fly ash*, *Bottom Ash*, Emisi CO₂, *Life Cycle Assessment*.

ABSTRACT

FADIQ UMAR RASYID. *Life Cycle Assessment on Carbon Emissions Utilization of Fly Ash and Bottom Ash as a Substitution of Construction Materials* (supervised by Irwan Ridwan Rahim and M. Akbar Caronge)

The construction process will have a significant negative impact on the environment if it is not handled. One of the environmental impacts resulting from the construction process is Greenhouse Gas (GHG) emissions which account for around 21.46% of the contribution of each category in 2019 GHG emissions. One of the causes of these emissions is from the use of construction materials such as conventional concrete, from cement where cement is obtained through a calcination process which contributes to CO₂ emissions. The increase in emissions results in a GHG effect. This study aims to determine the evaluation of CO₂ emissions resulting from the use of Fly Ash and Bottom Ash (FABA) as a substitute for construction materials in concrete using Life Cycle Assessment (LCA) analysis and to formulate strategies to reduce CO₂ emissions in the FABA life cycle as a substitute for construction materials, on concrete. By using qualitative methods through LCA analysis. In this study, three stages were carried out in the calculation of emissions. Starting from the raw material stage, the transportation stage and the manufacturing stage. From the research results, it is known that sample-3 concrete with a mixed design of 30% FA(C) : 100% BA (S) produces the least CO₂ emissions of 196.54 kg-CO₂eq/m³ and sample-1 which is conventional concrete produces emissions CO₂ is the largest with a value of 258.92 kg-CO₂eq/m³. The strategy for reducing CO₂ emissions in the FABA life cycle as a substitute for construction materials is the use of concrete substitution with a mix design of 30% FA (C): 100% BA (S) which has a reduction of 24.09%, minimizing the distance between the ready mix and the site. casting with an optimum distance of 45 km to a maximum of 60 km, the use of electric powered trucks such as the Arocs Electric prototype

Keyword: *Concrete, Fly ash, Bottom Ash, CO₂ Emissions, Life Cycle Assessment.*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan	4
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan	4
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Emisi	6
2.2 Life Cycle Assessment (LCA)	11
2.3 Beton	14
2.4 Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)	17
2.5 Batching Plant	21
2.6 Penelitian Terdahulu	26
BAB 3 METODE PENELITIAN/PERANCANGAN	33
3.1 Bagan Alir Penelitian	33
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	34
3.3 Jenis dan Variabel Penelitian	34
3.4 Life Cycle Assessment (LCA)	35
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Analisis LCA Pemanfaatan FABA sebagai Substitusi Pada Beton.....	39
4.2 Arahan Peningkatan Aspek Lingkungan.....	44
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Ilustrasi Efek Rumah Kaca.....	6
Gambar 2. Tahapan Analisis Metode LCA.....	11
Gambar 3. Ruang Lingkup Analisis LCA.....	12
Gambar 4. Gambaran dan proyeksi Industri Semen Nasional	15
Gambar 5. <i>Batching Plant</i>	21
Gambar 6. (a) <i>Batching Plant Dry Mix</i> dan (b) <i>Batching Plant Wet Mix</i>	22
Gambar 7. Skema <i>Batching Plant</i>	22
Gambar 8. Dump Truk	23
Gambar 9. Wheel Loader	24
Gambar 10. <i>Cement Truck</i>	24
Gambar 11. Truk Mixer	25
Gambar 12. Prinsip Kerja Truk Mixer	25
Gambar 13. Bagan Alir Penelitian	34
Gambar 14. Batas sistem penilaian siklus hidup beton (LCA)	36
Gambar 15. Emisi Pada Tahap Bahan Baku	41
Gambar 16. Emisi pada tahap transportasi.....	42
Gambar 17. Total nilai emisi pada setiap tahap	44
Gambar 18. prototipe truk mixer bertenaga listrik.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Intensitas CO ₂ Bahan Bangunan untuk Manufaktur	9
Tabel 2. Intensitas CO ₂ Bahan Bakar	10
Tabel 3. Intensitas CO ₂ Sumber Energi	10
Tabel 4. Persyaratan kimia abu terbang untuk campuran beton	19
Tabel 5. Sifat fisik <i>bottom ash</i>	20
Tabel 6. Variabel Penelitian	35
Tabel 7. Kategori Nama dan Sumber Data Indeks Siklus Hidup	36
Tabel 8. Informasi Data yang Akan Dianalisis	39
Tabel 9. Mix Design Beton	40
Tabel 10. Hasil Emisi Pada Tahap Bahan Baku	40
Tabel 11. Hasil emisi pada tahap transportasi	42
Tabel 12. Hasil emisi pada tahap manufaktur	43
Tabel 13. Hasil emisi pada setiap tahapan	43

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
GRK	Gas Rumah Kaca
CO ₂	Karbon Dioksida
FA	<i>Fly Ash</i>
BA	<i>Bottom Ash</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
CH ₄	Metana
N ₂ O	Dinitrogen Oksida
HFCs	Hidrofluorokarbon
PFCs	Perfluorocarbon
SF ₆	Sulfur Heksafluorida
NF ₃	Nitrogen Trifluorida
SF ₅ CF ₃	Trifluorometil Sulfur Pentafluorida
C ₄ F ₉ OC ₂ H ₅	<i>Ethyl Perfluorobutyl Ether</i>
CF ₃ I	Trifluoroiodometana
CH ₂ Br ₂	Dibromometan
CHCl ₃	Triklorometana
CH ₃ Cl	Metil Klorida/Klorometana
CH ₂ Cl ₂	Metilena Klorida/Diklorometana
ppm	<i>Part Per Million</i>
ppb	<i>Part Per Billion</i>
GWP	<i>Global Warming Potensial</i>
CaO	Kalsium Oksida
SiO ₂	Silikon Dioksida
Al ₂ O ₃	Aluminium Oksida
Fe ₂ O ₃	Ferrioksida/Besi(III) Oksida
MgO	Magnesium Oksida
SO ₃	Sulfur Trioksida
Na ₂ +K ₂ O	Natrium+Kalium Oksida
SNI	Standar Nasional Indonesia

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
ASTM	<i>American Standard Testing and Material</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
PLTGU	Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap
GHG	<i>Green House Gas</i>
KgCO _{2e}	KG-Setara-CO ₂
STA	Stationing, merupakan patok yang dipasang untuk penomoran jalan atau tempat tertentu.
ASM	<i>Advancing Shoring Method</i>
ADPE	Akuakultur dengan pendekatan ekosistem
C	<i>Cement/Semen</i>
S	<i>Sand/Pasir</i>
GRK _M	Emisi GRK selama produksi beton
M _i	Jumlah setiap bahan baku dalam 1m ³ produksi beton
Unit MCO _{2eq}	Emisi GRK setiap bahan baku per unit
GRK _T	Emisi GRK selama pengangkutan bahan baku beton
L _t	Kapasitas muat komponen alat angkut
d	Jarak transportasi
e	Konsumsi bahan bakar
Satuan TCO _{2eq}	Emisi GRK alat transportasi per unit
GRK _F	Emisi GRK selama tahap pembuatan beton
R	Produksi beton tahunan
E _i	Konsumsi tahunan setiap sumber energi
Unit FCO _{2eq}	Emisi GRK dari setiap sumber energy per unit
kwh	<i>Kilowatt-Hour/Kilowatt per jam</i>
TK	Tenaga Kuda

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Total Emisi pada Sampel-1	54
Lampiran 2 Perhitungan Total Emisi pada Sampel-2	55
Lampiran 3 Perhitungan Total Emisi pada Sampel-3	56
Lampiran 4 Perhitungan Total Emisi pada Sampel-4	57
Lampiran 5 Perhitungan Total Emisi pada Sampel-5	58
Lampiran 6 Perhitungan Total Emisi pada Sampel-6	59
Lampiran 7 Perhitungan Total Emisi Serta Persentase Tiap Tahapan	60
Lampiran 8 Dokumentasi	61

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala yang atas berkat dan karunia-Nya sehingga penyusunan tugas akhir yang berjudul "***Life Cycle Assessment Terhadap Emisi Karbon Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash Sebagai Substitusi Material Konstruksi***" dapat terselesaikan.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mengalami hambatan, namun berkat bantuan dan arahan yang ikhlas dari berbagai pihak, akhirnya tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis ingin menyampaikan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Bapak Fifin Arifin dan Ibu Dhona Iftie Qularyas, selaku orang tua penulis yang selalu memberikan dukungan dan doa yang tulus hingga penulis sampai di titik ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin atas semua kebijakan dan dukungannya yang telah membantu penulis selama perkuliahan;
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas semua dukungan dan kebijakannya sehingga penulis dapat mengikuti perkuliahan dengan baik;
4. Ibu Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan dan nasehat yang diberikan;
5. Bapak Dr. Eng. Irwan Ridwan Rahim, S.T., M.T., selaku Kepala Lab Riset Sanitasi dan Persampahan sekaligus Dosen Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu, kesempatan, dan tenaganya untuk membimbing penulis dalam penulisan tugas akhir;
6. Bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang selalu sabar saat memberi arahan saat proses penelitian hingga proses bimbingan tugas akhir;

7. Ibu Dr. Eng. Asiyanthi T Lando, S.T., M.T. dan Ibu Annisa Dwi Damayanti, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan komentar, saran dan arahan;
8. Seluruh Dosen Departemen Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin yang telah membimbing penulis sejak awal perkuliahan hingga penulis lulus;
9. Ibu Sumi dan Pak Olan, selaku staf Departemen Teknik Lingkungan yang selalu membantu semua proses administrasi;
10. Faturrahman Al-Hamid almarhum (3 Juni 2022), yang telah menemani serta membantu penulis melewati masa-masa sulit yang penulis alami baik permasalahan kuliah maupun diluar perkuliahan;
11. Khumairah Zulqaidah, S.T., yang telah membantu hingga bertukar ide dan wawasan hingga sekarang, serta turut membantu dan mendoakan selama proses pembuatan laporan tugas akhir.
12. Andi Dania Triska Fiyanda, S.T. dan Richard Majestic, selaku anggota tim Himalaya yang telah kebersamai selama perlombaan NEO 2019 serta cerita dan kenangannya hingga saat ini.
13. Teman-teman Teknik Lingkungan 2018 yang selalu memberikan semangat, dukungan, cerita, hingga suka maupun duka selama berproses di Teknik.
14. Serta segala pihak yang ikut serta terlibat dalam penelitian hingga pembuatan laporan tugas akhir yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam pembuatan tugas akhir ini. Untuk itu, saran dan kritik yang bersifat membangun sangat dibutuhkan oleh penulis untuk perbaikan ke depannya. Terimakasih.

Makassar, 3 Januari 2023

(Fadiq Umar Rasyid)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini setiap negara termasuk Indonesia berperan aktif dalam menyukseskan program SDG's (*Sustainable Development Goals*) yang diusung guna menjamin kehidupan generasi mendatang yang berkelanjutan. Keberlanjutan ini ditekankan pada seluruh aspek termasuk dalam hal konstruksi, yang tidak hanya meninjau keefektifan fungsinya tetapi juga meninjau dampak lingkungan yang ditimbulkan dari setiap proses konstruksi tersebut. Hal ini dilakukan mengingat percepatan pembangunan infrastruktur di Indonesia semakin digencarkan (Sapulete dkk., 2018). Indeks infrastruktur Indonesia mengalami peningkatan hingga menempati peringkat ke-62 pada tahun 2019 berdasarkan *The Global Competitiveness Report 2017-2019*.

Proses konstruksi akan memberikan dampak negatif secara signifikan terhadap lingkungan apabila tidak dilakukan penanganan. Salah satu dampak lingkungan yang diakibatkan dari proses konstruksi adalah emisi GRK yang menyumbang sekitar 21,46% dari kontribusi setiap kategori dalam emisi GRK tahun 2019 (Pusat Data dan Teknologi Informasi ESDM, 2020). Salah satu penyebab timbulnya emisi ini yaitu dari penggunaan material konstruksi seperti beton konvensional yang terbuat dari semen. Semen diperoleh melalui proses kalsinasi yang menyumbang emisi CO₂ mulai dari pembuatan semen, pembakaran bahan bakar, dan energi listrik yang digunakan (Sapulete dkk., 2018).

Produksi emisi di Indonesia meningkat dari tahun 1977 sampai 2020 dengan peningkatan dari 31,5 menjadi 568,3 juta Ton (Knoema, 2021). Konsentrasi gas CO₂ di atmosfer bertambah dengan cepat hingga melampaui ambang batas, terjadi peningkatan 5,4% pada tahun 2020 dibandingkan tahun 2019 (UNEP, 2021). Emisi GRK yang dilepaskan ke atmosfer dari aktivitas manusia yang memiliki potensi atas pemanasan global adalah CO₂ dan CH₄. Gas CO₂ dan CH₄ ini apabila digabungkan akan berubah menjadi CO_{2e} dimana CO_{2e} secara internasional telah ditentukan sebagai ukuran yang digunakan untuk menetapkan pengaruh gas rumah

kaca ke lingkungan (Putri, 2017). Peningkatan emisi tersebut berakibat terjadinya efek gas rumah kaca. Emisi gas rumah kaca berguna untuk menahan dan menangkap panas matahari dan radiasinya ke bumi. Hal ini mengakibatkan panas bumi mengalami peningkatan menjadi 2°C (UNEP, 2021). Peningkatan panas bumi yang terjadi mampu mempengaruhi perubahan iklim yang sangat ekstrem, dimana akan merusak proses yang terjadi pada ekosistem hutan maupun ekosistem lainnya (Putri, 2017).

Adapun upaya yang dapat dilakukan guna mengurangi emisi CO₂ dari proses konstruksi adalah penggunaan material yang lebih ramah lingkungan, salah satunya dengan penggunaan beton yang memanfaatkan abu (*fly ash*) dan debu (*bottom ash*) batu bara sebagai substitusi material konstruksi, yang tidak hanya dapat mengurangi penggunaan semen tetapi juga dapat memanfaatkan kembali limbah buangan batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pemanfaatan beton dengan substitusi *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) tersebut sesuai dengan SNI 2847-2020 terkait Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung. Pemanfaatan beton substitusi ini mampu mengurangi sekitar 80% emisi karbon akibat industri semen dan agregat (Davidovits, 1994 dan Wallah, 2014).

Dalam meninjau keefektifan penggunaan beton substitusi untuk mengurangi emisi karbon, perlu dilakukan analisis yang mengkaji keseluruhan proses pembuatan beton substitusi mulai dari ekstraksi sumber daya sampai pada daur ulang limbahnya. Adapun analisis yang sesuai dilakukan yaitu menggunakan analisis *life cycle assessment* (LCA). Penilaian Daur Hidup atau Life Cycle Assessment (LCA) berdasarkan SNI ISO 14044:2017 adalah kumpulan dan evaluasi masukan, keluaran dan dampak lingkungan potensial dari sistem produk di seluruh daur hidupnya. LCA yaitu pendekatan dari hulu ke hilir atau *cradle-to-grave* ketika hendak menilai suatu sistem produk secara kuantitatif. Di Indonesia sendiri, perhitungan LCA merupakan salah satu aspek penilaian pada dokumen hijau PROPER 2021. Setelah mengetahui total emisi yang dihasilkan dari seluruh proses, dicarilah proses atau tahapan yang menghasilkan nilai emisi tertinggi yang kemudian akan dilakukan pemilihan alternative untuk mengurangi dampak yang dihasilkan (Permen LHK No. 1/2021).

Adapun salah satu pengaplikasian LCA untuk meninjau besaran emisi dapat dilihat berdasarkan penelitian terdahulu dari Kim dkk. (2017). Dalam penelitiannya peninjauan besaran emisi dilakukan dengan menggunakan cradle-to-gate sebagai ruang lingkup LCA yang menghitung tahapan bahan baku, transportasi dan manufaktur. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa tahapan bahan baku menyumbang emisi secara signifikan dibandingkan dengan tahapan transportasi dan manufaktur. Adapun semen portland menyumbang pengaruh lebih besar daripada agregat atau campuran beton lainnya sebesar 944 Kg-CO_{2e}/Ton. Oleh karena itu, untuk mengurangi emisi yang dihasilkan hingga 60-80% dari jumlah campuran semen (kg/m³) dilakukan dengan cara pengurangan penggunaan semen melalui pemanfaatan furnace slag powder (GGBS) dan fly ash (FA) yang memiliki nilai emisi GGBS (41,8 Kg-CO_{2e}/Ton) dan FA (15,3 Kg-CO_{2e}/Ton).

Pengaplikasian LCA juga digunakan dalam penelitian Sapulete dkk. (2018). Analisis dilakukan dengan menggunakan cradle-to-cradle yang meninjau emisi yang dihasilkan mulai dari tahapan produksi hingga ke tahap manajemen. Adapun hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penggunaan beton geopolimer dengan bahan fly ash dapat mereduksi 80% emisi CO₂ dengan kekuatan beton 75% lebih besar dibandingkan beton konvensional. Adapun bentuk penanganan Sapulete dkk. Terhadap emisi yang dihasilkan yaitu dengan memanfaatkan kembali limbah silinder beton pada pekerjaan pembuatan retaining wall.

Dengan demikian penelitian ini tidak hanya menghasilkan tinjauan emisi CO₂ yang diproduksi dari masing-masing proses pemanfaatan FABA pada beton substitusi melalui metode LCA atau penilaian daur hidup, tetapi juga dapat mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan aspek lingkungan dalam siklus hidupnya agar dapat digunakan sebagai usulan perbaikan untuk mereduksi emisi yang dihasilkan. Oleh karena itu, hasil akhir dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui keefektifan penggunaan beton substitusi yang memanfaatkan FABA sebagai salah satu substitusi material konstruksi yang berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang mengenai fakta dampak negatif dari penggunaan semen sebagai bahan konstruksi, maka diambil rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana evaluasi emisi CO₂ yang dihasilkan dari pemanfaatan FABA sebagai substitusi material konstruksi pada beton menggunakan analisis LCA?
2. Bagaimana strategi dalam menekan emisi CO₂ pada siklus daur hidup FABA sebagai substitusi material konstruksi pada beton?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Adapun tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yang ditinjau adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui evaluasi emisi CO₂ yang dihasilkan dari pemanfaatan FABA sebagai substitusi material konstruksi pada beton menggunakan analisis LCA.
2. Merumuskan strategi dalam menekan emisi CO₂ pada siklus daur hidup FABA sebagai substitusi material konstruksi pada beton.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Adapun manfaat penelitian yang diharapkan adalah sebagai berikut.

1. Manfaat akademis, diharapkan dapat mejadi referensi bagi peneliti maupun mahasiswa lain guna menambah pengetahuan dan pemahaman terkait LCA terutama dalam pemanfaatan FABA sebagai material substitusi serta strategi guna mengurangi penggunaan semen pada bahan konstruksi dan mengurangi emisi karbon CO₂ .
2. Manfaat praktis, diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk diterapkan dalam setiap pembangunan konstruksi dengan meninjau besaran emisi CO₂ yang dihasilkan serta strategi untuk menekan besaran emisinya.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

Agar penelitian ini dapat dilakukan lebih fokus dan mendalam maka penulis memandang permasalahan penelitian yang diangkat perlu dibatasi variabelnya. Oleh sebab itu, penulis memberikan ruang lingkup penelitian sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi proses pembuatan beton substitusi dengan ruang lingkup LCA menggunakan tipe *cradle-to-gate* pada proses produksi bahan penyusun, transportasi dan produksi beton.
2. Menghitung perbandingan nilai emisi CO₂ yang dihasilkan dari beton konvensional dengan beton yang memanfaatkan FABA.
3. LCA beton yang ditinjau berupa besaran emisi CO₂ yang dihasilkan dari masing-masing material beton.
4. Material yang dihitung hanya mencakup semen portland, pasir, kerikil, dan air saja. Nilai emisi FABA dianggap tidak ada karena dianggap telah berada langsung di lokasi pengecoran serta dianggap sebagai limbah atau sesuatu yang akan dibuang.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Emisi

Emisi merupakan zat, energi, dan/atau komponen lain yang berasal dari suatu kegiatan yang masuk dan/atau dimasukkannya ke dalam udara ambien yang mempunyai dan/atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar (Permen LHK Nomor 9 Tahun 2014). Selain itu menurut EPA (2016), emisi merupakan istilah yang digunakan untuk mendeskripsikan gas dan partikel yang dilepaskan ke udara atau dipancarkan oleh berbagai sumber.

1) Emisi GRK

Gas Rumah Kaca (GRK) merupakan gas yang terkandung dalam atmosfer baik alami maupun antropogenik, yang berfungsi untuk menyerap serta melakukan penyerapan kembali terhadap radiasi infra merah. Radiasi infra merah yang dipancarkan oleh GRK pada lapisan atmosfer bawah dekat dengan permukaan bumi akan diserap dan menimbulkan efek panas yang dikenal sebagai “Efek Rumah Kaca”. Sementara, emisi GRK dapat didefinisikan sebagai pelepasan GRK ke atmosfer pada suatu area tertentu dengan jangka waktu tertentu (Permen ESDM Nomor 22 Tahun 2019). Emisi GRK yang terpancar ke atmosfer mengalami peningkatan yang sangat pesat yang berakibat pada peningkatan konsentrasi gas GRK di atmosfer akibat adanya berbagai aktivitas manusia. Adapun ilustrasi untuk efek rumah kaca dari GRK tersebut dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Ilustrasi Efek Rumah Kaca

Sumber: Deputi Bidang Pengendalian Kerusakan Lingkungan dan Perubahan Iklim, 2012

Pada Gambar 1 di atas terlihat ilustrasi dari efek rumah kaca. Atmosfer bumi dideskripsikan sebagaimana kaca pada bangunan rumah kaca. Cahaya matahari terpancar ke bumi dan melewati atmosfer tersebut sehingga hangat dari panas matahari tersebut memungkinkan makhluk hidup dapat tinggal di bumi. GRK yang berfungsi mengatur serapan panas matahari yang diteruskan ke bumi ini juga berpotensi menyebabkan terjadinya perubahan iklim. Adapun jenis GRK yang berpotensi menyebabkan terjadinya perubahan iklim yaitu CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, C₄F₉OC₂H₅, CHF₂OCF₂OC₂F₄OCHF₂, CHF₂OCF₂OCHF₂, dan senyawa-senyawa halocarbon yang tidak termasuk Protokol Montreal, yaitu CF₃I, CH₂Br₂, CHCl₃, CH₃Cl, CH₂Cl₂. Adapun yang menjadi GRK utama yaitu CO₂, CH₄, dan N₂O. Diantara ketiga gas tersebut CO₂ menjadi gas yang paling banyak terkandung dalam atmosfer (Deputi Bidang Pengendalian Kerusakan Lingkungan dan Perubahan Iklim, 2012).

Konsentrasi CO₂ di atmosfer ialah sekitar 383 ppm (part per million) atau sekitar 0.0383% volume atmosfer (Deputi Bidang Pengendalian Kerusakan Lingkungan dan Perubahan Iklim, 2012). Sedangkan CH₄ dan N₂O masing-masing 1745 ppb dan 314 ppb (part per billion) atau sekitar 0.000175% dan 0.0000314% volume atmosfer. Kemampuan potensi pemanasan global atau Global Warming Potensial (GWP) gas rumah kaca dapat menunjukkan bahwa nilai CO₂ paling kecil (Deputi Bidang Pengendalian Kerusakan Lingkungan dan Perubahan Iklim, 2012).

2) Emisi CO₂

Emisi yaitu proses terbebasnya gas rumah kaca ke atmosfer, dari bahan yang bersifat organik baik dari mikroba yang dapat mengeluarkan gas CO₂ atau CH₄ (Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya KLHK, 2015). Sementara karbon yaitu unsur kimia non logam yang banyak dijumpai pada bahan organik dan sebagai salah satu unsur yang ada di udara sebagai CO₂ (Gonick dan Outwater, 2004 dalam Gobel, 2019). Dengan demikian, emisi CO₂ merupakan pencemaran dan pelepasan gas CO₂ ke udara (Equaldo & Idrawati, 2012). Dalam Peraturan Menteri Perindustrian No 12/M-IND/PER/1/2012 tentang Peta Panduan (*RoadMap*) Pengurangan Emisi CO₂ Industri Semen ditetapkan pengurangan terhadap emisi karbon sebesar 2% dalam kurun waktu 2011 dan 3% untuk kurun waktu 2016 – 2020.

3) Penyebab Emisi CO₂

Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca ini disebabkan oleh berbagai interaksi antara komponen-komponennya dan faktor eksternal seperti erupsi vulkanik, variasi sinar matahari serta aktivitas manusia seperti emisi bahan bakar fosil, perubahan penggunaan lahan, limbah, dan aktivitas industri (DITJEN PPI KLHK, 2017 dalam Patrianty, 2020). Adapun sumber emisi CO₂ dapat digolongkan menjadi 4 macam (Equaldo & Idrawati, 2012). Sumber emisi tersebut yaitu:

- a. Sumber yang bergerak, diantaranya alat transportasi (kendaraan bermotor, pesawat udara, kereta api, kapal bermotor serta penegangan/evaporasi gasoline).
- b. Sumber yang tidak bergerak, diantaranya mencakup bidang konstruksi (perumahan, daerah perdagangan, tenaga dan pemasaran industri, serta tenaga uap yang digunakan sebagai energi pada berbagai industri).
- c. Proses industri, diantaranya meliputi proses kimiawi, metalurgi, kertas dan penambangan minyak.
- d. Pembuangan sampah, diantaranya hasil buangan rumah tangga dan perdagangan, buangan hasil pertambangan dan pertanian.

4) Dampak Emisi

Apabila emisi GRK meningkat, maka dapat menyebabkan terjadinya perubahan iklim akibat pemanasan global yang semakin parah, terjadinya bencana seperti tingginya permukaan air laut, longsor, banjir, polusi udara dan cuaca yang ekstrim (Patrianty, 2020). Perubahan iklim yang terjadi dapat meingkatkan suhu permukaan bumi yang menajdikan gunung es di wilayah kutub mencair, sehingga air laut akan meningkat. Selain itu peningkatan derajat suhu permukaan bumi menyebabkan terjadinya kepunahan pada beberapa spesies flora dan fauna akibat tidak dapat beradaptasi dengan peningkatan suhu yang terjadi. Apabila tidak dilakukan penanggulangan maka dampak yang dihasilkan akan semakin parah bahkan hingga menyebabkan hancurnya peradaban dunia (Patrianty, 2020).

5) Emisi CO₂ dalam Bidang Konstruksi

Beton sebagai bahan konstruksi umum yang sering digunakan diketahui mengeluarkan sejumlah besar limbah berbahaya bagi lingkungan. Diantara bahan konstruksi, beton merupakan bahan yang mengeluarkan sejumlah besar gas rumah kaca (GRK) di seluruh siklus hidupnya mulai dari proses produksi, konstruksi,

pemeliharaan, proses pembongkaran dan pembuangan, dan penilaian dampak (Taehyoung dkk., 2017). Beton mengeluarkan sejumlah besar GRK dari produksi bahan bakunya, termasuk semen, agregat, dan bahan tambahan, hingga transportasi dan produksi beton. Selain itu, perubahan alih fungsi lahan juga berpengaruh terhadap timbulan gas CO₂ dimana adanya proses konstruksi seperti pembangunan perumahan memberikan sumbangsi yang cukup besar terhadap emisi GRK khususnya pada emisi CO₂ (Taehyoung dkk., 2017).

Berdasarkan tahapan siklus beton dalam bidang kontruksi dapat digolongkan ke dalam tiga tahapan yaitu tahapan bahan baku, transportasi dan manufaktur.

a. Tahap Bahan Baku Beton

Tahapan ini menggambarkan emisi yang dihasilkan dari setiap bahan baku penyusun beton untuk setiap 1 m³ produksinya. Besaran emisi yang dihasilkan pada tahap ini didapatkan dari penjumlahan emisi tiap bahan baku setiap 1m³ dan mengalikannya dengan nilai emisi tiap bahan baku dengan intensitas CO₂ tiap bahan baku menurut Svendsen (2022) pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Intensitas CO₂ Bahan Bangunan untuk Manufaktur

Material	Satuan	GRK yang terkandung (KgCO ₂ e)
<i>Concrete block</i>	Kg	0,24
Semen	Kg	0,35
<i>Autoclaved aerated concrete (AAC)</i>	Kg	0,71
<i>Fiber cement weatherboard</i>	Kg	2,2
<i>Gypsum plaster</i>	Kg	0,44
<i>Concrete roof tile</i>	Kg	0,39
<i>Flat glass</i>	Kg	2
<i>Laminated glass</i>	Kg	2,8
<i>Toughened glass</i>	Kg	2,2
Aspal	Kg	0,2
Air	Kg	0,001
<i>High density polyethylene (HDPE)</i>	Kg	6,4
<i>Low density polyethylene (LDPE)</i>	Kg	6,4
<i>Polypropylene (PP)</i>	Kg	7,4
<i>Polyurethane (PU)</i>	Kg	7,7
<i>Polyvinyl chloride (PVC)</i>	Kg	11,2
<i>Clay brick</i>	Kg	0,32
<i>Gravel</i>	Kg	0,036
Agregat	Kg	0,008
Pasir	Kg	0,024

Sumber: Danish Energy Agency, 2022

b. Tahap Transportasi

Tahapan ini menggambarkan emisi yang dihasilkan selama proses pengangkutan campuran beton siap pakai (*ready mix*). Adapun besaran emisi yang dihasilkan dihitung melalui perhitungan jumlah komponen alat angkut yang dibutuhkan dengan jumlah total setiap material dan kapasitas muat angkut yang bersangkutan serta jarak transportasi dari tempat pencampuran menuju ke tempat manufaktur dan mengalikannya dengan emisi bahan bakar yang digunakan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Intensitas CO₂ Bahan Bakar

Bahan Bakar	Emisi CO₂ (kg-CO_{2eq}/liter)
Diesel (campuran biofuel rata-rata)	2,51233
Diesel (100% mineral diesel)	2,70553
Minyak Bakar	3,17522
Minyak Gas	2,75857
Pelumas	2,74972

Sumber: Gov UK, 2021

c. Tahap Manufaktur

Tahapan ini menggambarkan emisi yang dihasilkan selama proses manufaktur dengan menghitung jumlah emisi yang dihasilkan dari setiap alat dan energi yang digunakan dan mengalikannya dengan emisi sumber energi yang digunakan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Intensitas CO₂ Sumber Energi

Bahan Bakar	Emisi CO₂ (kg-CO_{2eq}/liter)
Listrik	0,23
Minyak Diesel/Solar	0,84
Bensin	0,81
Gas Alam	2,75857
Minyak Bakar	3,17522
Biomassa	2,51233
Pelumas	2,74972

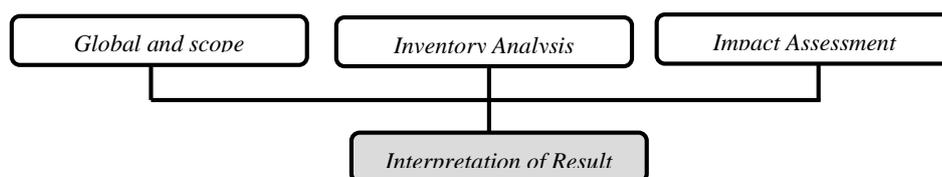
Sumber: IPCC, 1997

2.2 Life Cycle Assessment (LCA)

LCA merupakan pendekatan terhadap keseluruhan proses daur hidup suatu produk yang meliputi proses, ekstraksi, pemrosesan bahan mentah, manufaktur, transportasi dan distribusi, penggunaan ulang/pemeliharaan, daur ulang, hingga pada tahap penyelesaian akhir. LCA merupakan salah satu metode evaluasi untuk meninjau tingkat keberlanjutan suatu produk (Sapulete dkk., 2018). Adapun keunggulan LCA dibandingkan metode evaluasi lainnya yaitu LCA tidak hanya mengidentifikasi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari suatu produk, tetapi juga dapat mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan aspek lingkungan dari keseluruhan siklus hidup produk tersebut (Mulyana dkk., 2017). Selain itu, LCA mampu membantu dalam hal-hal berikut :

- mengidentifikasi peluang dalam peningkatan kinerja lingkungan dari suatu produk di berbagai titik daur hidupnya,
- menginformasikan pihak pengambil keputusan dalam sebuah industri, organisasi, pemerintah atau non-pemerintah yang memiliki tujuan merancang strategi, menentukan prioritas, produk atau proses desain,
- memilih indikator relevan dari kinerja lingkungan, termasuk teknik pengukuran, dan
- pemasaran misalkan penerapan skema ecolabel, pembuatan sebuah klaim lingkungan, atau menghasilkan suatu deklarasi pada suatu produk lingkungan.

Dengan demikian dapat dilakukan pengoptimalan pemanfaatan dari produk tersebut dalam hal ini pelaporan ini diharapkan mampu mengakomodasikan keperluan selama pelaporan PROPER sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan oleh organisasi atau pemekarsa kajian LCA (Dirjen PPKL KLHK, 2021). Adapun tahapan analisis menggunakan metode LCA menurut Vertech Group Sarl (2015) dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.

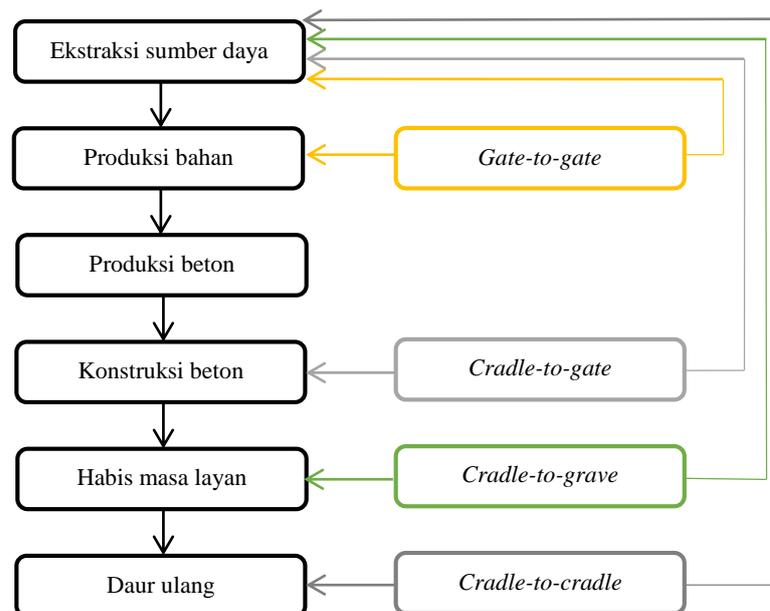


Gambar 2. Tahapan Analisis Metode LCA
Sumber: Vertech Group Sarl, 2015

Pada Gambar 2 di atas terlihat bahwa tahapan analisis metode LCA terbagi kedalam 4 (empat) tahap yaitu *global and scope definiton*, *inventory analysis*, *impact assessment dan interpretatio of result*. Adapun penjabarannya adalah sebagai berikut.

1. *Global and Scope Definition*

Tahapan ini merupakan tahapan untuk mengidentifikasi dan menetapkan ruang lingkup, tujuan dan sistem batasan yang digunakan dalam melakukan evaluasi LCA (Sapulete dkk., 2018). Ada 4 (empat) tipe yang dapat digunakan yaitu *gate-to-gate* (analisis mulai dari proses ekstraksi sumber daya sampai proses produksi penyusunan), *cradle-to-gate* (analisis mulai dari proses ekstraksi sumber daya sampai proses konstruksi beton), *cradle-to-grave* (analisis mulai dari proses ekstraksi sumber daya sampai proses habis masa layan) dan *cradle-to-cradle* (analisis mulai dari proses ekstraksi sumber daya sampai proses daur ulang). Adapun lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Ruang Lingkup Analisis LCA

Sumber: Sapulete dkk., 2018

Pada Gambar 3 di atas terlihat bahwa ruang lingkup LCA dengan tipe “*cradle-to-cradle*” merupakan ruang lingkup paling kompleks dengan mengkaji keseluruhan prosesnya. Adapun tipe “*gate-to-gate*” merupakan ruang lingkup LCA paling sederhana dengan mengkaji 2 (dua) tahapan pada keseluruhan prosesnya.

2. *Inventory Analysis*

Tahapan ini merupakan tahapan penginputan data yang akan dianalisis, berupa laju material produk yang ditinjau serta keluaran hasil akhir yang nantinya akan menjadi bahan evaluasi (Sapulete dkk., 2018).

3. *Impact Assessment*

Tahapan ini merupakan tahapan untuk mengevaluasi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari masing-masing siklus hidup sebuah produk, baik emisi CO₂ maupun lainnya (Sapulete dkk., 2018).

4. *Interpretation of Result*

Tahapan ini memuat simpulan, rekomendasi serta pengambilan keputusan yang berlandaskan pada batasan penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya serta hasil dari masing-tahap-tahap sebelumnya (Sapulete dkk., 2018). Selain keempat tahapan di atas, dalam proses evaluasi LCA dikenal juga tahapan *system boundary* (Sapulete dkk., 2018).

Dengan menjalankan penilaian daur hidup, pihak pengambil keputusan dapat memiliki landasan yang berbasis data dan fakta dalam mengambil suatu keputusan. LCA mampu digunakan mulai dari perancangan produk, pengembangan proses produksi menjadi lebih baik, inovasi produk dan proses, meningkatkan sistem manajemen lingkungan, pemilihan produk atau proses serta pemilihan pemasok, mengomunikasikan informasi lingkungan untuk produk yang dihasilkan oleh perusahaan, menetapkan strategi perusahaan, hingga pengambilan keputusan untuk kebijakan pada pemerintahan. LCA merupakan suatu alat ukur kuantitatif untuk pembangunan berkelanjutan (Dirjen PPKL KLHK, 2021).

Ada 7 prinsip pada LCA yang mendasar, yaitu persektif daur hidup, fokus lingkungan, pendekatan relatif dan unit fungsional, pendekatan iteratif, transparansi, bersifat komprehensif, dan prioritas pendekatan ilmiah. LCA dapat diaplikasikan untuk berbagai keperluan dari pemrakarsa. Dalam hal ini pedoman penyusunan pelaporan ini diharapkan dapat mengakomodasi kebutuhan penyusunan laporan untuk pelaporan PROPER sesuai dengan tujuan yang ditetapkan oleh organisasi atau pemrakarsa kajian LCA (Dirjen PPKL KLHK, 2021).

2.3 Beton

Beton merupakan material komposit yang tersusun atas medium pengikat, agregat halus dan agregat kasar dengan atau tanpa menggunakan bahan campuran tambahan lainnya (Pedoman Pekerjaan Beton – Wika Beton). Beton merupakan bahan konstruksi yang paling sering digunakan, baik dari dahulu hingga sekarang. Beton terdiri dari beberapa material penyusun yang diproduksi menggunakan serangkaian alat yang disebut *batching plant*.

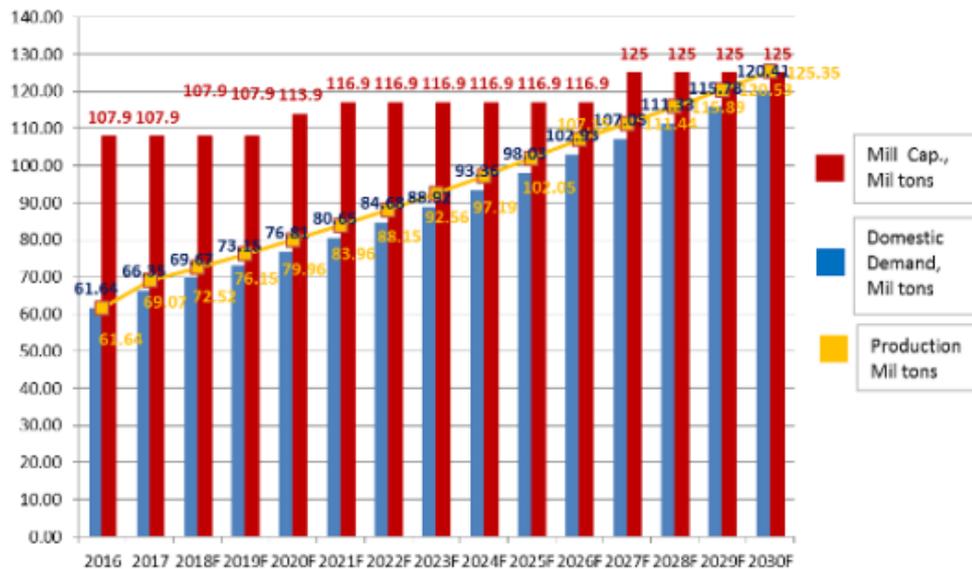
Pencampuran bahan beton dapat dikategorikan berdasarkan teknik cara pencampuran maupun dari segi pemanfaatannya. Pencampuran beton dari segi teknik pencampurannya terbagi menjadi dua yaitu *freefall mixer* dan *power mixer*. Pada *freefall mixer*, maka material yang akan diaduk diangkat ke atas oleh sudu-sudu keong dalam drum yang berputar kemudian teraduk-aduk pada saat berjatuhan artinya material di dalam drum pencampur akan teraduk sendiri akibat sudu-sudu di dalam drum yang berputar. Pada *power mixer*, maka material yang berada di dalam mixer akan diaduk oleh pedal-pedal di dalam mixer yang diputar mesin (Direktur Jenderal Bina Marga, 2010).

Sementara pencampuran beton dari segi pemanfaatannya terbagi menjadi dua yaitu *transit mixed* dan *ready mixed*. *Transit mixed* yaitu proses pencampuran selama pengangkutan. *Central mixed* atau biasa disebut *Ready mixed*, yaitu pencampuran yang dilakukan di satu tempat (terpusat). Pada umumnya saat ini pelaksanaan pekerjaan beton semen menggunakan tata cara pencampuran di pusat *batching plant* dan mengangkut hasil campuran beton semennya (*ready mixed*) ke lokasi pekerjaan menggunakan *truck mixer*. Adapun material bahan campuran beton terdiri dari semen, agregat, air dan bahan tambahan lain seperti aditif atau *retarder* (Direktur Jenderal Bina Marga, 2010).

1. Semen

Semen merupakan salah satu bahan campuran di bidang konstruksi dalam pembuatan beton. Semen merupakan bahan konstruksi yang tersusun dari material alam batu kapur, tanah liat, pasir besi dan pasir silika (Sunarsip, 2007 dalam Pramesthi, 2009). Permintaan akan semen terus meningkat setiap tahunnya dikarenakan berbagai pembangunan infrastruktur yang dijalankan. Ada tujuh (7) produsen semen terbesar di Indonesia yaitu Semen, Semen

Gresik Group (SGG), Indocement, Holcim Indonesia, Semen Andalas, Semen Baturaja, Semen Bosowa, dan Semen Kupang (Sunarsip, 2007 dalam Pramesthi, 2009). Adapun gambaran dan proyeksi semen di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Gambaran dan proyeksi Industri Semen Nasional
Sumber: Santoso, 2018

Pada Gambar 4 di atas terlihat bahwa permintaan dan produksi semen semakin meningkat setiap tahunnya. Semen menjadi material utama dari beton. Meski demikian, semen juga merupakan salah satu material yang menghasilkan gas karbondioksida (CO_2) yang dapat mencemari lingkungan. Produksi semen yang semakin meningkat menyebabkan persediaan bahan baku untuk pembuatan semen semakin menipis. Oleh karena itu, untuk mengatasi masalah pencemaran lingkungan dan persediaan semen yang semakin terbatas ini dengan menggunakan beton geopolimer yang memanfaatkan material substitusi alternatif untuk mengurangi penggunaan semen (Direktur Jenderal Bina Marga, 2010).

Pada semen portland, material utama merupakan batu kapur yang memiliki komponen-komponen utama CaO (kapur) dan tanah liat yang mengandung komponen-komponen SiO_2 (silica), Al_2O_3 (alumina), Fe_2O (oksida besi), MgO (magnesium), SO_3 (sulfur) serta $\text{Na}_2+\text{K}_2\text{O}$ (soda/potash).

2. Air

Air merupakan bahan yang digunakan sebagai pelarut untuk bahan baku beton lainnya. Air yang akan dicampur dengan semen sehingga timbul proses hidrasi harus bersih dari bahan-bahan lain seperti bahan-bahan organik atau minyak yang akan mempengaruhi ikatan semen dengan agregat. Bahan-bahan alkali dan asam akan menimbulkan reaksi kimiawi dengan semen yang mengakibatkan bubur semen berkurang kekuatannya sehingga akan merusak konstruksi beton semen setelah jadi (Direktur Jenderal Bina Marga, 2010).

Air yang boleh dipakai pada pembuatan campuran beton semen harus bebas dari bahan-bahan organik, alkalis, asam serta minyak sesuai yang dipersyaratkan dalam spesifikasi teknis Direktorat Jenderal Bina Marga. Pada umumnya air minum dapat dipakai dalam pencampuran beton semen. Air yang diperlukan untuk pencampuran beton semen disimpan di dalam tangki air yang bersih yang dilengkapi pengukur isi tangki (Direktur Jenderal Bina Marga, 2010).

3. Agregat

Agregat merupakan salah satu bahan baku dalam campuran yang perlu dijaga kebersihannya serta memenuhi persyaratan spesifikasi untuk dijadikan sebagai bahan campuran. Agregat tersebut akan disimpan didalam bin yang dibedakan berdasarkan fraksi atau ukuran agregatnya (Direktur Jenderal Bina Marga, 2010).

Menurut Modul 3 tentang Rancangan Campuran Beton, ukuran maksimum agregat ditetapkan berdasarkan pertimbangan ketersediaan material yang ada, biaya, atau jarak tulangan terkecil yang ada. Agregat kasar harus dipilih sedemikian rupa sehingga ukuran agregat terbesar tidak lebih dari $\frac{3}{4}$ jarak bersih minimum antara baja tulangan atau antara baja tulangan dengan acuan, atau celah-celah lainnya dimana beton harus dicor (Pusdiklat JPPIW, 2017).

4. Aditif

Aditif atau bahan tambahan kimia merupakan bahan yang digunakan untuk mengubah sifat-sifat beton, mempermudah pengerjaan beton; meningkatkan ketahanan beton; lebih ekonomis; menambah atau mengurangi waktu pengikatan; mempercepat kekuatan dan atau mengontrol panas hidrasi. Bahan

tambahan kimia digunakan setelah dilakukan evaluasi secara cermat (SNI 7656:2012).

Bahan tambahan/aditif untuk mengurangi kadar air pencampur dan atau mengatur waktu pengikatan yang memenuhi syarat ASTM C 494, bila digunakan dengan atau tanpa campuran bahan tambahan kimia lainnya, akan banyak mengurangi jumlah air per satuan isi beton. Penggunaan sedikit bahan tambahan kimia, untuk slump yang sama, akan memperbaiki sifat beton seperti sifat pengerjaan, penyelesaian akhir (finishing), pemompaan, keawetan, dan kuat tekan serta kuat lenturnya. Penambahan bahan tambahan kimia cair dalam jumlah banyak harus dianggap sebagai bagian dari air pencampur (SNI 7656:2012).

5. Retarder

Retarder merupakan bahan yang digunakan untuk memperlambat waktu ikatan serta waktu pengerasan pada beton. Bahan ini sangat berguna pada pencampuran beton dalam cuaca panas atau pada waktu antara pencampuran dan pengecoran cukup panjang. Waktu pengikatan beton lebih tinggi pada cuaca dengan temperatur yang tinggi. Sehingga pemanfaatan retarder dapat melakukan pengunduran waktu ikatan hingga mencapai waktu yang dibutuhkan. Adapun beberapa bahan yang termasuk dalam kategori retarder diantaranya adalah plastocrete-R, Sikamen-520 dan gula pasir (gula tebu) (Saepu dkk.,2005).

2.4 Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)

Penambahan abu hasil pembakaran batu bara sebagai pengikat mempengaruhi sifat beton segar dan sifat mekanik serta daya tahannya. Sejauh mana sifat abu tersebut mempengaruhi beton tergantung pada sifat dan proporsi abu yang digunakan. Penambahan abu ke campuran beton dapat mempengaruhi beton antara lain, meningkatkan tingkat kemudahan pengerjaan, mengurangi bleeding, ketahanan terhadap korosi dan permeabilitas, ketahanan sulfat. , menurunkan panas hidrasi, menurunkan harga beton, dan meningkatkan kekuatan akhir beton. Untuk mencapai masing-masing sifat di atas, komposisi abu yang ditambahkan harus tepat. Oleh karena itu, percobaan pencampuran diperlukan untuk mencapai sifat beton yang diharapkan di setiap skema. (SE Menteri PUPR, 2019).

1. Abu Terbang (Fly Ash)

Abu terbang (*fly ash*) merupakan bagian dari hasil buangan pembakaran batu bara yang terjadi dalam boiler berupa material halus *amorf* yang memiliki sifat *pozzolan* sehingga dapat bereaksi dengan kapur di suhu kamar melalui media air (Maryoto, 2008).

FA digunakan sebagai salah satu material campuran dalam pembuatan beton. Adapun komponen penyusun FA yaitu silikon dioksida (SiO_2) kalsium oksida (CaO), Aluminium (Al_2O_3), dan besi (Fe_2O_3) (Madhavi, 2014). Adapun sifat dasar keempat senyawa kimia utama yaitu (Farhan, 2016):

a. *Tricalcium Silikat* ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$)

Senyawa ini sifatnya hampir sama dengan sifat semen apabila ditambahkan air senyawa ini akan membuat kaku dan dalam beberapa jam saja akan mengeras. *Tricalcium Aluminate* membantu kekuatan awal semen dan menimbulkan panas hidrasi kurang lebih 58 kalori/gram setelah 3 hari.

Hidrasi *Tricalcium Aluminate*:



b. *Dicalcium Silikat* ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$)

Senyawa ini apabila ditambahkan air setelah reaksi yang menyebabkan mengeras dan menimbulkan panas 12 kalori/gram setelah 3 hari. campuran akan mengeras dimana perkembangan kekuatannya stabil dan lambat, pada beberapa minggu kemudian mencapai kekuatan tekan akhir hampir sama dengan *Tricalcium Silikat*.

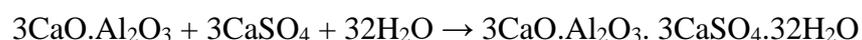
Hidrasi *Dicalcium Silikat*:



c. *Tricalcium Aluminate* ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$)

Senyawa ini apabila bereaksi dengan air akan menimbulkan panas hidrasi tinggi 212 kalori/gram setelah 3 hari. Perkembangan kekuatan yang sangat rendah terjadi satu sampai dua hari.

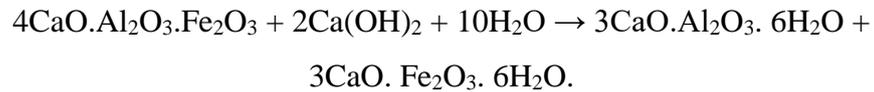
Hidrasi *Tricalcium Aluminate*:



d. *Tetra Calcium Aluminoferrite* ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)

Senyawa ini saat bereaksi dengan air berlangsung sangat cepat dan campuran terbentuk dalam beberapa menit, menimbulkan panas hidrasi 68 kalori/gram.

Hidrasi *Tetra Calcium Aluminoferrite*:



Partikel FA memiliki ukuran bervariasi mulai lebih kecil dari 1 μm (micrometer) sampai lebih besar dari 100 μm , kebanyakan partikel memiliki ukuran < 20 μm . Biasanya hanya 10 % hingga 30 % ukuran partikel FA lebih besar dari 50 μm . Luas permukaan FA biasanya berkisar 300 m^2/kg – 500 m^2/kg FA, dengan batas bawah 200 m^2/kg dan batas atas 700 m^2/kg (Madhavi, 2014).

Berdasarkan SNI 2460: 2014, tentang Spesifikasi Abu Terbang Batubara dan Pozolan Alam Mentah atau yang Telah Dikalsinasi untuk Digunakan dalam Beton, ketentuan pemakaian abu terbang pada campuran beton yang digunakan memiliki batasan 25% hingga 30%. Adapun material FA terbagi menjadi tiga (3) kelas yaitu kelas F, kelas C, dan Kelas N. Adapun persyaratan kimia untuk abu terbang kelas F yang dapat digunakan sebagai campuran beton dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Persyaratan kimia abu terbang untuk campuran beton

Sifat	Persyaratan	Kelas F
Sifat Kimia	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, minm %	70
	SO_3 , maks %	5
	Kadar air, maks, %	3
	Hilang pijar, maks, %	6
	CaO	<10%
Sifat Fisika	Kehalusan/Fineness, maks%	34
	Dengan portland cement, 7 hari, min%	75
	Dengan portland cement, 28 hari, min%	
	Kebutuhan air, maks% control	105
	Soundness, autoclave expansion atau kontraksi, maks%	0,8
Persyaratan Keseragaman	Berat jenis, maks% variasi dari rata-rata	5,00
	Persentase tertahan pada saringan 45 μm (No. 325), maks % variasi dari rata-rata	5

Sumber: SNI 2460:2014

Material FA digunakan sebagai material pembentuk beton berdasarkan sifat material ini yang mempunyai kemiripan dengan sifat semen. Kemiripan sifat ini

dapat ditinjau dari dua sifat utama, yaitu sifat fisik dan kimiawi. Secara fisik, material FA mempunyai kemiripan dengan semen dalam hal kehalusan butir-butirnya. Menurut ACI Committee 226, FA mempunyai butiran yang cukup halus dengan lolos ayakan No. 325 (45 mili micron) 5-27 % dengan specific gravity antara 2,15-2,6 dan berwarna abu-abu kehitaman. Sifat kimia yang dimiliki oleh FA berupa silica dan alumina dengan presentase mencapai 80%. Dengan adanya kemiripan sifat-sifat ini membuat FA dapat digunakan sebagai material pengganti untuk mengurangi jumlah semen sebagai material penyusun beton mutu tinggi (Setiawati, 2018).

2. Bottom Ash

Bottom ash (BA) yaitu sisa buangan dari pembakaran batu bara dalam boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTGU) yang terkumpul di dasar tungku pembakaran dan memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan FA (Klarens, K. dkk., 2016). BA merupakan limbah sisa pembakaran yang jumlahnya akan bertambah selama industri masih berjalan (Ristinah dkk., 2012). BA mengandung mineral dasar berupa silika dan kadar oksida yang dapat digunakan sebagai bahan campuran dalam pembuatan semen dengan biaya produksi yang lebih hemat (Ristinah dkk., 2012). Adapun sifat fisik BA dapat dilihat pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Sifat fisik *bottom ash*

Sifat Fisik Bottom Ash	Basah	Kering
Bentuk	Angular/bersiku	Berbutir kecil/granular
Warna	Hitam	Abu-abu gelap
Tampilan	Keras mengkilap	Seperti pasir halus, sangat berpori
Ukuran (% lolos ayakan)	No.40 (90-100%)	1,5 s/d ¾ in (100%)
	No.10 (40-60%)	No.4 (50-90%)
	No.40 (10%)	No. 10 (10-60%)
	No. 200 (5%)	No.40 (0-10%)
<i>Specific gravity</i>	2,3 – 2,9	2,1 – 2,7
<i>Dry unit Weight</i>	96001440 kg/m ³	720-1600 kg/m ³

Sumber: Ristinah dkk., 2012

Ukuran BA lebih mendekati ukuran pasir, biasanya 50 % - 90 % lolos pada saringan 4.75 mm (No. 4), 10 % - 60 % lolos pada saringan 0.6 mm (No. 40), 0 % - 10 % lolos pada saringan 0.075 mm (No. 200), dan ukuran paling besar berkisar antara 19 mm (3/4 in) sampai 38.1 mm (1- 1/2 in) (Ristinah dkk., 2012).

2.5 Batching Plant

Batching plant menurut Modul 4 tentang Produksi Dan Pengangkutan Campuran Beton, merupakan serangkaian alat konstruksi yang digunakan untuk tempat mencampur serta memproduksi beton siap pakai dalam skala besar. *Batching Plant* digunakan dalam produksi beton skala besar agar kualitas, kinerja dan kontinuitas produksi dapat dijaga dengan baik sesuai standar yang ditetapkan (Pusdiklat JPPIW, 2017). Adapun contoh *batching plant* dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 5. *Batching Plant*
Sumber: Pusdiklat JPPIW, 2017

Pada Gambar 5 di atas terlihat contoh *batching plant* pengerjaan beton. *Batching plant* dapat digolongkan kedalam dua tipe yaitu *dry mix* dan *wet mix*. Tipe *dry mixed* merupakan tipe *batching plant* yang digunakan hanya untuk menimbang bahan atau material lainnya, sementara perncampuran dan pengadukan agar menjadi beton siap pakai dilakukan di truk *mixer*. Semua material termasuk bahan additif yang akan diaduk ditimbang terlebih dahulu sesuai *job mix* dengan memperhitungkan kadar air dalam agregat kasar ataupun agregat halus. Adapun kelemahan *batching plant dry mix* yaitu tidak mampu mengaduk slump yang lebih dari 5 (biasa digunakan untuk rigid), dan jika sedang produksi suara *truck mixer* berisik dan cenderung berdebu dari material semen saat masuk ke dalam truck mixer

Tipe *wet mix* (adukan basah/jadi) yaitu *batching plant* yang setelah semua material di timbang (sesuai mutu yg di inginkan) material akan di aduk dalam *pan mixer*

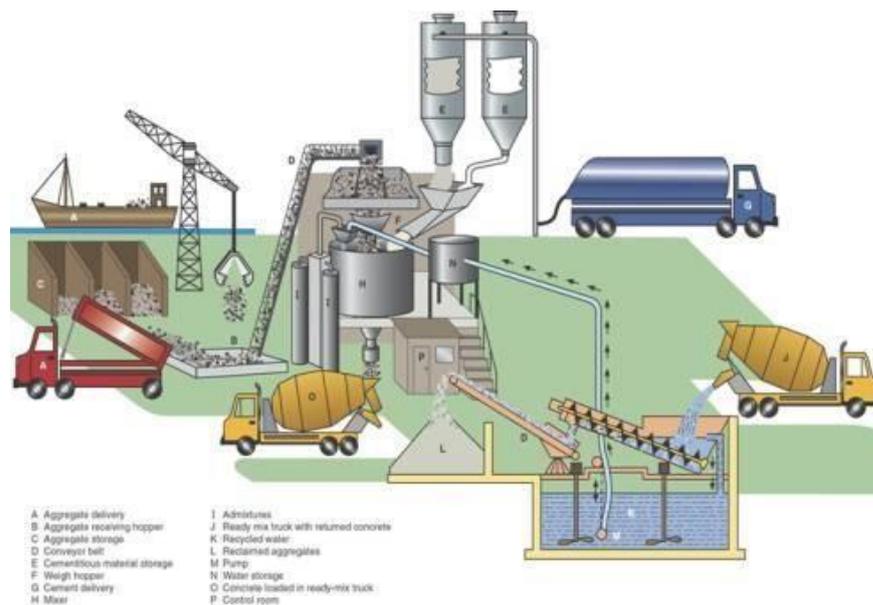
sampai mencapai slump (tingkat keenceran/kekentalan yg di harapkan) dan akan di masukkan ke dalam truck mixer (mobil molen) dan siap di kirim ke lokasi pengecoran. Keunggulan pada plant jenis wet mix bisa mengaduk untuk beton slump rendah, cenderung tidak berdebu dari semen dan tidak berisik. Adapun gambar *batching plant* tipe *dry mix* dan *wet mix* dapat dilihat pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. (a) *Batching Plant Dry Mix* dan (b) *Batching Plant Wet Mix*

Sumber: Pusdiklat JPPIW, 2017

Batching plant terdiri dari beberapa alat yang saling terintegrasi satu sama lain untuk memproduksi beton. Adapun bagian-bagian penting dari *batching plant* adalah sebagai berikut.



Gambar 7. Skema *Batching Plant*

Sumber: Pusdiklat JPPIW, 2017

Adapun penjabaran dari tiap bagian dalam skema tersebut adalah sebagai berikut.

- a. *Cement silo*, berfungsi untuk penyimpanan semen atau fly ash dan menjaganya agar tetap baik.
- b. *Belt conveyor*, berfungsi untuk menarik material (agregat kasar dan halus) ke atas dari bin ke storage bin.
- c. *Bin*, berfungsi sebagai tempat pengumpulan bahan (agregat kasar dan halus) yang berasal dari penumpukan bahan di base camp dengan bantuan loader untuk ditarik ke atas (storage bin).
- d. *Storage bin* digunakan untuk pemisah fraksi agregat. Storage bin dibagi menjadi 4 (empat) fraksi yaitu agregat butir kasar (*split*), butir menengah (*screening*), butir halus (pasir).
- e. Timbangan pada alat batching plant dibagi menjadi 4 (empat) macam yaitu untuk agregat, semen, *fly ash* dan air.
- f. *Dosage pump* digunakan untuk penambahan bahan admixture seperti retarder, superplasticizer dan lain-lain.
- g. Tempat penampungan air yang berfungsi sebagai suplai kebutuhan air pada ready mix.

Adapun menurut Pusdiklat JPPIW (2017), alat berat yang sering digunakan dalam proses pembuatan beton di batching plant adalah sebagai berikut:

1. *Dump Truk*

Dump truk berfungsi untuk mengangkut material agregat kasar dan halus dari *quarry* menuju *batching plant*. Adapun gambar drump truk dapat dilihat pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Dump Truk
Sumber: Pusdiklat JPPIW, 2017

2. *Wheel Loader*

Wheel loader berfungsi untuk mengangkat material dari tempat penumpukan ke bin. *Wheel loader* memiliki bucket untuk membawa material dan bergerak dengan roda karet, sehingga mobilitasnya tergolong lincah. Adapun gambar *wheel loader* dapat dilihat pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. *Wheel Loader*
Sumber: Pusdiklat JPPIW, 2017

3. *Cement Truck*

Cement truck berfungsi sebagai pengangkutan semen curah atau *fly ash* ke *base camp*. Adapun contoh cemen truck dapat dilihat pada Gambar 10 berikut ini.



Gambar 10. *Cement Truck*
Sumber: Pusdiklat JPPIW, 2017

4. *Concrete mixer Truck*

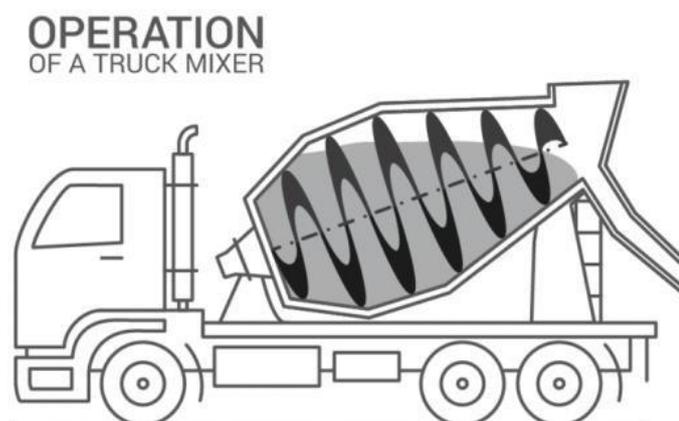
Concrete mixer truck atau truk *mixer* adalah suatu kendaraan truk khusus yang dilengkapi dengan *concrete mixer* yang berfungsi mengaduk atau mencampur

campuran beton (berfungsi sama seperti alat molen). Truk *mixer* digunakan untuk mengangkut adukan beton dari tempat pencampuran beton ke lokasi proyek. Selama pengangkutan, mixer terus berputar dengan kecepatan 8-12 rpm agar beton tetap homogen dan beton tidak mengeras. Adapun contoh truk mixer dapat dilihat pada Gambar 11 berikut ini.



Gambar 11. Truk Mixer
Sumber: Pusdiklat JPPIW, 2017

Adapun prinsip kerja truk mixer ini secara sederhana dimana dalam drum terdapat bilah-bilah baja, ketika dalam perjalanan menuju lokasi proyek, drum ini berputar perlahan-lahan berlawanan dengan putaran jarum jam sehingga adukan mengarah ke dalam. Perputaran di dalam ini bertujuan agar tidak terjadi segregasi sehingga adukan tetap homogen. Dengan demikian mutu beton akan tetap terjaga sesuai dengan perencanaan (BPSDM, 2017).



Gambar 12. Prinsip Kerja Truk Mixer
Sumber: Pusdiklat JPPIW, 2017

Ketika sampai di lokasi proyek dan pengecoran berlangsung, arah putaran drum dibalikkan searah putaran jarum jam dan percepatan putaran diperbesar sehingga adukan beton keluar. Proses pengiriman beton ready mix diatur dengan memperhatikan jarak, kondisi lalu lintas, cuaca, dan suhu, karena hal-hal tersebut dapat mempengaruhi waktu dalam pelaksanaan pekerjaan pengecoran. Pada umumnya, pengadaan concrete mixer truck menjadi tanggung jawab penyedia ready mix (Pusdiklat JPPIW, 2017).

Adapun truk mixer pengangkut beton cor atau truk molen umumnya tidak melakukan perjalanan lebih dari 2 jam dimana kontraktor mengharuskan truk mixer sampai di lokasi pengecoran dalam waktu 90 menit setelah pemuatan material yang dimaksudkan untuk menghindari cor di dalam truk mengeras. umumnya truk mixer pengangkut beton cor atau truk molen mempunyai kecepatan jalan yang terbatas, yaitu antara 30-90 km/jam dengan jarak optimum sejauh 45 km dan jarak maksimum sejauh 60 km (Pusdiklat JPPIW, 2017).

2.6 Penelitian Terdahulu

Adapun beberapa penelitian terdahulu dengan tema atau kajian serupa yaitu sebagai berikut.

1. Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) Pada Pemilihan Perkerasan Kaku dan Lentur Kontruksi Jalan Tol Balikpapan – Samarinda (Wawarisa Alnu Fistcar, 2020)

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca pada pekerjaan konstruksi jalan tol Balikpapan– Samarinda, yaitu pada STA 23+200 – STA 24+200 (perkerasan lentur) dan STA 20+825 – 21+825 (perkerasan kaku). Penelitian ini menggunakan dua metode untuk mengestimasi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (CO₂), yaitu metode Tabel Energy Use and GHG Emissions for Pavement Construction dan metode konversi bahan bakar. Hasil estimasi dari dua metode tersebut kemudian akan dibandingkan secara matematis, yaitu dengan mencari selisih dan perbandingannya. Tahap yang diamati pada penelitian ini adalah pada tahap produksi pada AMP/BCP, tahap transportasi dan tahap kontruksi dengan menggunakan pendekatan LCA. Dari hasil analisis jalan aspal menghasilkan

emisi gas rumah kaca sebesar 208.138,14 KgCO₂ dengan persentase tahap produksi 80.49%, tahap transportasi 17.42%, tahap konstruksi 2.09% sedangkan analisis jalan beton dengan metode konversi bahan bakar menghasilkan emisi gas rumah kaca sebesar 1.224.876,384 KgCO₂ dengan prosentase tahap produksi 85.38%, tahap transportasi 14.41 % dan konstruksi 0.21%.

2. Sustainability Bantalan Jalan Rel Tipe Beton Prategang Mutu K-600 dengan Metode Analisis Life Cycle Assessment (LCA) terhadap Pencemaran Udara (Ryan Hardianto, Hera Widyastuti, Arie Dipareza Syafei, 2020)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas ekosistem dan mempertimbangkan pencampuran FA sebagai bahan material alternatif. Pencampuran komposisi FA disimulasikan dengan 3 skenario jenis percobaan diantaranya; 100% semen, 90% semen & 10% fly ash, dan 75% semen & 25% fly ash. Pengaruh campuran beton dan FA dapat dianalisis dengan menggunakan aplikasi uji kelayakan emisi Simapro 9.0. Penghijauan dapat menurunkan dampak pencemaran udara terhadap global warming. Diharapkan efektifitas hasil pelepasan emisi terhadap lingkungan menggunakan metode Life Cycle Assesment (LCA) pada produksi bantalan beton prestressed dapat mereduksi. Dari hasil analisis melalui tiga skenario yang diasumsikan, impact assessment human toxicity air, masingmasing skenario memiliki skor yaitu, skenario-1 sebesar 0,223 Pt, skenario-2 sebesar 0,221 Pt dan skenario-3 sebesar 0,222 Pt. Sehingga untuk analisis skenario yang tertinggi dihasilkan pada skenario-1. Penggunaan campuran fly ash berkontribusi pada output terhadap lingkungan dan menghasilkan nilai yang tertinggi berupa human toxicity air sebesar 0,273 Pt. Dari hasil output yang dikeluarkan, nilai tersebut masih terkategori ramah lingkungan.

3. Estimasi Emisi CO₂ dari Pembangunan Berbagai Ukuran Rumah Sederhana (Priana Sudjono, 2 Chendy Octaviana Yudhi, 2011)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besaran emisi CO₂ dari pembangunan rumah sederhana. Penelitian diawali dengan pendataan jenis bahan bangunan dan perhitungan kebutuhan bahan bangunan setiap tipe rumah yang merupakan fungsi luas lantai. Kemudian penentuan faktor emisi berbagai

bahan bangunan didasarkan pada penelitian terdahulu. Untuk memperoleh gambaran hubungan antara jenis bahan bangunan dan tipe rumah dengan besaran emisi CO₂, simulasi dilakukan dengan berbagai skenario yang menyertakan luas rumah dan variasi bahan bangunan sebagai variabel.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tipe rumah dan jenis bahan bangunan berperan penting dalam mencapai besaran emisi CO₂. Terdapat indikasi bahwa kerumitan pembuatan bahan bangunan dan rumah mempengaruhi besaran emisi CO₂. Dengan demikian kesimpulan yang dapat diambil adalah besaran emisi CO₂ berbanding lurus dengan luas rumah, jenis dan volume kebutuhan bahan bangunan serta tingkat kerumitan proses konstruksi. Dengan mempertimbangkan variabel tersebut, konstruksi suatu rumah yang rendah emisi CO₂ dapat direncanakan.

4. Sustainability Beton Metode LCA Studi Kasus: Limbah Beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Departemen Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang (Christhy Amalia Sapulete, Han Ay Lie, Yulita Arni Priastiwi, 2018)

Penelitian ini menggunakan ruang lingkup *cradle-to-cradle*, dengan tujuan untuk mengevaluasi konsumsi semen pada produksi beton hingga manajemen limbah beton dengan mengambil studi kasus limbah beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang. Hasil evaluasi menyatakan penggunaan beton geopolimer dengan bahan dasar fly ash sebagai pengganti semen dapat mereduksi hingga 80% emisi CO₂ dengan kekuatan beton 75% lebih besar dibandingkan dengan beton konvensional. Manajemen limbah beton yang dilakukan Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang adalah dengan menggunakan kembali limbah silinder beton pada pekerjaan pembuatan retaining wall sebagai pengganti material batu kali.

5. Identifikasi Besar Biaya Sumber Emisi CO₂ Pekerjaan Pengecoran Struktur Beton Bertulang Pada Ruang Lingkup Gate To Gate (Devi Kumala Birgitta , Cindy Regan Handoyo , Hermawan dan Budi Setiyadi, 2018)

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi besarnya biaya akibat emisi CO₂ yang ditimbulkan pada pekerjaan tersebut. Besar emisi CO₂ yang diindikasikan

turut menentukan besarnya biaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sumber emisi CO₂ terhadap besaran biaya pada pekerjaan struktur beton bertulang. Ruang lingkup penelitian ini adalah gate to gate yaitu pada pekerjaan pengecoran struktur beton bertulang bangunan tingkat tinggi dengan menggunakan tower crane dan concrete pump.

Tahapan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari pemodelan aktivitas pekerjaan dengan CYCLONE. Selanjutnya, diestmasi besarnya emisi CO₂ dengan menggunakan formula dari penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pelaksanaan pekerjaan pengecoran menggunakan tower crane, diperoleh estimasi emisi CO₂ ± 239,87 kg. CO₂ dengan besar biaya Rp. 241.711,00/hari, sedangkan untuk concrete pump sebesar ± 84,56 kg. CO₂ dengan besar biaya Rp. 1.560.000/hari/tangki.

6. Analisis Konsumsi Energi dan Emisi Gas Rumah Kaca pada Tahap Konstruksi Studi Kasus : Konstruksi Jalan Cisumdawu (Agung Mulyana, Reini D. Wirahadikusumah, 2017)

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca pada pekerjaan konstruksi jalan Cisumdawu dengan perkerasan kaku pada STA 10+700 hingga STA 11+500 yang meliputi pekerjaan subgrade (galian dan timbunan), pekerjaan lapisan subbase, serta pekerjaan perkerasan kaku dengan menggunakan pendekatan LCA. Dari hasil analisis diperoleh pekerjaan perkerasan kaku berkontribusi 78.78%, sedangkan pekerjaan subbase berkontribusi 17.04% dan pekerjaan subgrade berkontribusi 4.18%. Sementara itu secara keseluruhan material berkontribusi sebesar 92.80%, kegiatan transportasi berkontribusi 1.97% dan kegiatan konstruksi berkontribusi 5.23% dari total besaran dampak lingkungan yang dihasilkan dari konstruksi jalan tersebut.

7. Life Cycle Assessment (LCA) pada Transportasi Distribusi Produk Kertas (Cici Finansial, 2021)

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan alternatif transportasi pendistribusian produk kertas dengan membandingkan dampak lingkungan dari skenario moda transportasi yang paling mungkin untuk digunakan. Evaluasi beban lingkungan secara komprehensif dilakukan dengan metode LCA dan

IMPACT 2002+ sebagai metode klasifikasi kategori dampak lingkungan. Unit fungsional yang digunakan yaitu 70 ton kertas chipboard dengan titik angkut utama yaitu pabrik PT. Papertech Magelang. Hasil perhitungan LCA menunjukkan bahwa skenario distribusi menggunakan transportasi kereta api diesel mampu menurunkan nilai kontribusi pada keseluruhan damage category.

8. Analisis Emisi Gas Rumah Kaca Produksi Karet Dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA) Dan Perhitungan Penyerapan Karbon Pt. Perkebunan Nusantara IX Ngobo (Utamiria Dwi Kartika, Winardi Dwi Nugraha dan Mochtar Hadiwidodo, 2017)

Penelitian dilakukan pada salah satu perkebunan karet, PT. Perkebunan Nusantara IX Ngobo sebagai eksportir kepada perusahaan kelas dunia seperti Michelin dan Good Year pada bulan November 2016 hingga Februari 2017. Analisis emisi karbon digunakan dengan metode LCA berdasarkan ISO 14040, sementara perhitungan penyerapan karbon dilakukan dengan olah citra Landsat 8.0 dibantu oleh software Arc Map 10.4 dan ENVI 4.5.

Hasil yang didapatkan berupa penghasilan emisi tahun 2015-2016 pada perkebunan karet sebesar 6,65 ton CO₂ equivalent per ton lateks per tahun dan pabrik pengolahan adalah sebesar 8,84 ton CO₂ equivalent per ton lateks per tahun. Jumlah penyerapan karbon yang didapat adalah sebesar 31,52 ton CO₂ equivalent per hektar per tahun atau 145,72 ton CO₂ equivalent per ton lateks per tahun. Berdasarkan hasil yang didapatkan dapat dikatakan bahwa nilai potensi penyerapan karbon di PT. Perkebunan Nusantara IX Ngobo lebih besar daripada nilai potensi emisinya.

9. Pembangunan Perumahan Rendah Emisi Karbon di Surabaya Timur (Failasuf Herman Hendra, 2016)

Penelitian ini termasuk kedalam jenis penelitian deskriptif dengan pendekatan survei dengan teknik *purposive sampling* dan kajian literatur serta penghitungan emisi karbon untuk selanjutnya dilakukan analisis dengan statistik deskriptif. Adapun populasi penelitian adalah perumahan kluster kecil pada beberapa kawasan di Surabaya Timur, dimana kebutuhan perumahan horizontal sangat banyak namun ketersediaan lahan perumahan sangat terbatas.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata emisi karbon pada konstruksi pembangunan perumahan kluster kecil ini rata-rata masih dibawah ambang batas karbon yang dipersyaratkan untuk keseimbangan lingkungan (314 ppm). Jejak karbon konstruksi pembangunan perumahan secara serentak relatif lebih tinggi dibandingkan dengan secara berjenjang, dengan rasio perbandingan emisi karbon rata-rata 2,1:1,7. Emisi karbon terbesar terjadi pada penggunaan bahan bangunan yakni sebesar 64-69%.

10. Pemodelan Estimasi Dampak Lingkungan Pada Struktur Bawah Infrastruktur Jembatan Girder Beton (Okti Diana Wulan Sari, 2019)

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak lingkungan selama siklus hidup jembatan girder beton. Penelitian ini menggunakan jenis jembatan dengan spesifikasi teknik konstruksi bangunan atas dengan PC-Box Girder dengan metode Advancing Shoring Method (ASM). Hasil penelitian ini terbagi menjadi Life Cycle Inventory (LCI) dan LCA. Daftar inventaris berupa data material dan peralatan yang digunakan pada saat pembangunan jembatan girder beton untuk menyelesaikan analisis LCA sekitar 55% dari data pada bagian bawah jembatan (substructure). Dalam hal persediaan data mengenai alat berat, data yang digunakan yakni 70% untuk substructure.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi dari GWP pada saat pembangunan pondasi dan tiang jembatan terlihat lebih signifikan dibandingkan dengan emisi yang berasal dari ADPE dan smog. Hal ini terjadi karena jumlah material dari pondasi pada jembatan girder beton memiliki porsi yang besar dari ready-mix concrete dan reinforcement cage (jalinan penulangan) yang mempengaruhi total emisi GWP.

11. Fly Ash sebagai Bahan Pengganti Semen pada Beton (Maria Setiawati & Muhammad Imaduddin, 2018)

Persentase fly ash yang digunakan pada masing-masing sampel adalah 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5%, 20%. Adapun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kuat tekan beton untuk masing-masing sampel beton normal memenuhi nilai kuat tekan kriteria K-300. Penggunaan fly ash sampai 12,5% pada campuran beton masih mendapatkan nilai kuat tekan beton yang direncanakan.

12. Penelitian Awal Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash PLTU Suralaya dalam Pembuatan Beton di Lingkungan Pantai (Kurniawati Ester Ghozali, Albertus Yonathan , Antoni , dan Djwantoro Hardjito)

Penggunaan bottom ash didalam campuran mortar dan beton harus memperhatikan gradasi dari masing – masing ukuran bottom ash. Penggunaan bottom ash sebagai pengganti 100% agregat halus menghasilkan kuat tekan maksimal sebesar 36.6 MPa dengan menggunakan fly ash sebanyak 54% dari total cementitious material, dimana nilai ini tidak jauh berbeda dari kuat tekan mortar dengan pasir sebagai agregat halus yaitu sebesar 42.8 MPa. Beton yang menggunakan bottom ash sebagai pengganti agregat halus sepenuhnya menghasilkan kuat tekan maksimal sebesar 24.8 MPa dengan w/cm sebesar 0.3 dan SP sebanyak 0.3% dari jumlah cementitious materials.

Penurunan kekuatan beton yang terjadi setelah perendaman selama 28 hari di larutas sodium sulfat memberikan indikasi awal yang cukup baik, dimana beton dengan 40% fly ash dan 100% bottom ash mengalami penurunan kekuatan sebesar 1.63 MPa atau sebesar 5.3%. Sedangkan beton dengan 40% fly ash dan tidak menggunakan bottom ash sama sekali tidak mengalami penurunan kekuatan. Beton yang direndam selama 28 hari di larutan sodium sulfat tidak mengalami kehilangan berat yang berarti. Kehilangan berat terbesar terjadi pada beton yang menggunakan 40% fly ash dan 100% bottom as, yaitu sebesar 0.41% dari berat awal. Hal ini mengindikasikan ketahanan beton yang cukup baik terhadap serangan sulfat.