

TUGAS AKHIR - 234802

# PENGEMBANGAN PROTOTIPE GAS ANALYZER UNTUK PENGUKURAN $CO_2$ DAN $CH_4$ PADA GAS BUANG KAPAL

REZZA RAMADHAN TAMAM

NRP 5019221007

Dosen Pembimbing

Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 197107201995121001

Juniarko Prananda, S.T., M.T.

NIP. 199006052015041001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026





**FINAL PROJECT - 234802**

# **PENGEMBANGAN PROTOTIPE GAS ANALYZER UNTUK PENGUKURA $CO_2$ DAN $CH_4$ PADA GAS BUANG KAPAL**

**REZZA RAMADHAN TAMAM**

**NRP 5019221007**

**Dosen Pembimbing**

**Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D.**

**NIP. 197107201995121001**

**Juniarko Prananda, S.T., M.T.**

**NIP. 199006052015041001**

**Program Studi Sarjana**

**Departemen Teknik Sistem Perkapalan**

**Fakultas Teknologi Kelautan**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**2026**

Halaman ini sengaja dikosongkan



**FINAL PROJECT - 234802**

## **DEVELOPMENT OF A GAS ANALYZER PROTOTYPE FOR MEASURING $CO_2$ AND $CH_4$ IN SHIP EXHAUST GAS**

**REZZA RAMADHAN TAMAM**

**NRP 5019221007**

**Advisor**

**Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D.**

**NIP. 197107201995121001**

**Juniarko Prananda, S.T., M.T.**

**NIP. 199006052015041001**

**Study Program Bachelor Degree**

**Department of Marine Engineering**

**Faculty of Marine Technology**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**2026**

Halaman ini sengaja dikosongkan

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGEMBANGAN PROTOTIPE GAS ANALYZER UNTUK PENGUKURAN $CO_2$ DAN $CH_4$ PADA GAS BUANG KAPAL TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada

Program Studi S-1 Teknik Sistem Perkapalan

Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **REZZA RAMADHAN TAMAM**

NRP. 5019221007

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Tanda Tangan :   
Kepala Departemen : **Dr. Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.**  
NIP : **197903272003121001**  
Tanggal : **30 Juli 2026**

**SURABAYA**

**JULI 2026**

Halaman ini sengaja dikosongkan



## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGEMBANGAN PROTOTIPE GAS ANALYZER UNTUK PENGUKURAN $CO_2$ DAN $CH_4$ PADA GAS BUANG KAPAL

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada

Program Studi S-1 Teknik Sistem Perkapalan

Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

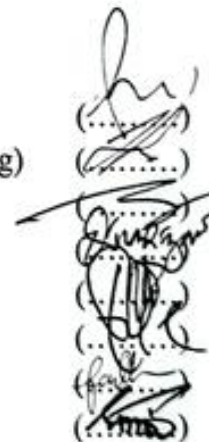
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **REZZA RAMADHAN TAMAM**

NRP. 5019221007

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

- |                                                      |                 |
|------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D. | (Pembimbing)    |
| 2. Juniarko Prananda, S.T., M.T.                     | (Ko-Pembimbing) |
| 3. Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.          | (Penguji)       |
| 4. A.A.B. Dinariyana Dwi Putranta, S.T., MES., Ph.D. | (Penguji)       |
| 5. Dr. Eng. Dhimas Widhi Handani, S.T., M.Sc.        | (Penguji)       |
| 6. Dr. Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc.             | (Penguji)       |
| 7. Fadilla Indrayuni Prastyasari, S.T., M.Sc., Ph.D. | (Penguji)       |
| 8. Dr. Emmy Pratiwi, S.T.                            | (Penguji)       |



**SURABAYA**

**JULI 2026**

Halaman ini sengaja dikosongkan

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa / NRP : Rezza Ramadhan Tamam / 5019221007  
Program Studi : Teknik Sistem Perkapalan  
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D.  
2. Juniarko Prananda, S.T., M.T.

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "PENGEMBANGAN PROTOTIPE GAS ANALYZER UNTUK PENGUKURAN  $CO_2$  DAN  $CH_4$  PADA GAS BUANG KAPAL" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Juli 2026

Mahasiswa



Rezza Ramadhan Tamam

NRP. 5019221007

Mengetahui

Dosen Pembimbing 1



Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 197107201995121001

Mengetahui

Dosen Pembimbing 2



Juniarko Prananda, S.T., M.T.

NIP. 199006052015041001

Halaman ini sengaja dikosongkan

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, Tuhan yang Maha Esa, karena berkat rahmat, nikmat, dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul " PENGEMBANGAN PROTOTIPE GAS ANALYZER UNTUK PENGUKURAN  $CO_2$  DAN  $CH_4$  PADA GAS BUANG KAPAL". Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Teknik (S1) pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini tidak akan selesai tanpa adanya bimbingan, arahan, bantuan, serta masukan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses penyusunan. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Badrut Tamam dan Ibu Sri Rejeki, serta Mozza Malika Tamam, yang telah memberikan dukungan, doa, serta menjadi motivasi bagi penulis untuk berjuang menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing utama dan Bapak Juniarko Prananda, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua, atas segala bimbingan, arahan, ilmu, dan kesabaran yang diberikan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc., A.A.B. Dinariyana Dwi P., S.T., MES., Ph.D., Dr. Eng. Dhimas Widhi Handani, S.T., M.Sc., Fadilla Indrayuni Prastyasari, S.T., M.Sc., Ph.D., Dr. Emmy Pratiwi, S.T., dan Dr. Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.
4. Pak Moh Nurafandi tenaga pendidik Laboratorium Marine Power Plant (MPP) yang telah mengizinkan dan membantu penulis dalam proses kalibrasi alat uji emisi selama penelitian ini berlangsung.
5. Teman-teman seperjuangan grup pasukan berkuda Aziz, Prabowo, Raiya, Unggul yang membantu, dalam dukungan moral selama pengerjaan Tugas Akhir ini. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah dengan tulus ikhlas memberikan doa dan semangat bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna dengan disclaimer bahwa seluruh kalkulasi ini dengan tujuan tugas akademik berdasa. Oleh karena itu, kritik serta saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan dan perbaikan kedepannya. Semoga dengan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun pembaca. Akhir kata, penulis ucapkan terima kasih dan semoga Allah memberikan rahmat dan berkah Nya kepada kita semua. Aamiin.

Surabaya, Juli 2026

Rezza Ramadhan Tamam

Halaman ini sengaja dikosongkan

## ABSTRAK

### PENGEMBANGAN PROTOTIPE *GAS ANALYZER* UNTUK PENGUKURAN $CO_2$ DAN $CH_4$ PADA GAS BUANG KAPAL

**Nama Mahasiswa / NRP** : Rezza Ramadhan Tamam / 5019221007  
**Departemen** : Teknik Sistem Perkapalan FTK - ITS  
**Dosen Pembimbing** : 1. Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D  
2. Juniarko Prananda, S.T., M.T.

#### Abstrak

Emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  dari kapal non konvensional bermesin diesel di Pantai Kenjeran, Surabaya, belum banyak diukur langsung karena keterbatasan alat ukur portabel yang murah dan mudah diaplikasikan. Penelitian ini mengembangkan prototipe gas analyzer berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sensor NDIR untuk  $CO_2$  dan sensor MOS MQ-4 untuk  $CH_4$ , dilengkapi sistem pengambilan sampel gas, pompa udara, LCD, dan catu daya, yang dikalibrasi terhadap alat uji emisi Laboratorium MPP. Hasil kalibrasi menunjukkan deviasi pembacaan  $CO_2$  sebesar 1,26-1,89% dan selisih *emission factor* 8,16-11,01%, sedangkan  $CH_4$  masih menunjukkan error 21,69-34,09% sehingga belum layak digunakan tanpa faktor koreksi. Data emisi terukur digunakan menyusun *Baseline Actual Value* (BAV) kondisi Business As Usual (BAU), yaitu 15.515,78 kg  $CO_2$ /tahun dan 3,164 kg  $CH_4$ /tahun untuk bahan bakar B0. Pemilihan bahan bakar alternatif B0, B35, dan B40 dilakukan dengan metode Analytic Hierarchy Process (AHP) dan TOPSIS berdasarkan lima kriteria teknis-ekonomis-lingkungan, menghasilkan B40 sebagai alternatif terbaik dengan closeness coefficient tertinggi 0,904. Perbandingan emisi menggunakan Life Cycle Assessment (LCA) *Tank to Wake* menunjukkan B40 memberikan reduksi intensitas emisi  $CO_2e$  terbesar, yaitu 4,36% (GWP20) dan 4,39% (GWP100) terhadap B0. Hasil ini mengindikasikan substitusi biodiesel B40 efektif secara statistik namun tidak memadai sebagai strategi tunggal dekarbonisasi sektor maritim, sehingga diperlukan intervensi tambahan di luar substitusi bahan bakar.

**Kata kunci:** *gas analyzer*,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , kapal non konvensional, AHP-TOPSIS, Life Cycle Assessment

Halaman ini sengaja dikosongkan



## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF A GAS ANALYZER PROTOTYPE FOR MEASURING $CO_2$ AND $CH_4$ IN BOAT EXHAUST GAS

**Student Name / NRP** : Rezza Ramadhan Tamam / 5019221007  
**Department** : Teknik Sistem Perkapalan FTK - ITS  
**Advisor** : 1. Prof. Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D  
2. Juniarko Prananda, S.T., M.T.

#### Abstract

$CO_2$  and  $CH_4$  emissions from non conventional diesel-engine vessels at Kenjeran Beach, Surabaya, have not been widely measured directly due to the limited availability of portable, low-cost, and easy-to apply measuring instruments. This study develops a gas analyzer prototype based on an ESP32 microcontroller, using an NDIR sensor for  $CO_2$  and a MOS MQ-4 sensor for  $CH_4$ , equipped with a gas *sampling* system, air pump, LCD, and power supply, calibrated against the emission testing instrument at the MPP Laboratory. Calibration results show a reading deviation of 1.26–1.89% and an *emission factor* difference of 8.16–11.01%, while  $CH_4$  still shows an error of 21.69–34.09%, indicating it is not yet suitable for use without a correction factor. The measured emission data were used to establish the *Baseline Actual Value* (BAV) under Business As Usual (BAU) conditions, namely 15,515.78 kg  $CO_2$ /year and 3.164 kg  $CH_4$ /year for B0 fuel. The selection of alternative fuels B0, B35, and B40 was carried out using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and TOPSIS methods based on five technical-economic-environmental criteria, resulting in B40 as the best alternative with the highest closeness coefficient of 0.904. Emission comparison using *Tank to Wake* Life Cycle Assessment (LCA) shows that B40 provides the largest reduction in  $CO_2$  e emission intensity, namely 4.36% (GWP20) and 4.39% (GWP100) relative to B0. These results indicate that B40 biodiesel substitution is statistically effective but inadequate as a standalone decarbonization strategy for the maritime sector, so additional interventions beyond fuel substitution are needed.

**Keywords:** *gas analyzer,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , non-conventional vessels AHP-TOPSIS, Life Cycle Assessment*

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR ISI

|                                                                                            |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| KATA PENGANTAR.....                                                                        | vii   |
| ABSTRAK .....                                                                              | ix    |
| ABSTRACT .....                                                                             | xi    |
| DAFTAR ISI .....                                                                           | xiii  |
| DAFTAR GAMBAR.....                                                                         | xvii  |
| DAFTAR TABEL .....                                                                         | xix   |
| DAFTAR SINGKATAN .....                                                                     | xxi   |
| DAFTAR SIMBOL .....                                                                        | xxiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....                                                                    | 1     |
| 1.1 Latar Belakang .....                                                                   | 1     |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                                                                  | 4     |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....                                                                | 4     |
| 1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....                                                         | 4     |
| 1.5 Manfaat .....                                                                          | 5     |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....                                                               | 7     |
| 2.1 Analisa Bibliometrik .....                                                             | 7     |
| 2.2 Studi Terkait .....                                                                    | 8     |
| 2.3 Dasar Teori .....                                                                      | 10    |
| 2.3.1 Konsep Emisi <i>CO2</i> dan <i>CH4</i> di Kapal .....                                | 10    |
| 2.3.2 Skenario Dasar Teoritis Kalkulasi <i>Emission factor</i> Bahan Bakar Biodiesel ..... | 21    |
| 2.3.3 Perhitungan Massa dan Energi .....                                                   | 23    |
| 2.3.4 NCV Blend dan Energy Share .....                                                     | 23    |
| 2.3.5 <i>Emission factor Blend</i> .....                                                   | 25    |
| 2.3.6 Konversi kg/TJ ke g Emisi/g Fuel .....                                               | 25    |
| 2.3.7 Metode Riset Operasi Pemilihan Bahan Bakar Pengurangan Emisi .....                   | 26    |
| BAB 3 METODOLOGI .....                                                                     | 29    |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian .....                                                          | 29    |
| 3.2 Studi Literatur .....                                                                  | 31    |
| 3.3 Lokasi dan Objek Penelitian .....                                                      | 31    |
| 3.4 Data dan Sumber Data .....                                                             | 31    |
| 3.5 Rancangan Pembuatan Alat .....                                                         | 32    |
| 3.5.1 Arsitektur Sistem dan Alur Kerja ( <i>System Architecture</i> ) .....                | 32    |
| 3.5.2 Perancangan Sistem Pengambilan Sampel ( <i>Sampling System</i> ) .....               | 33    |

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5.3 Perancangan Akuisisi Data .....                                                                                                 | 34 |
| 3.6 Metode Pengumpulan Data.....                                                                                                      | 35 |
| 3.7 Konversi Hasil Pengukuran Menjadi <i>Emission factor</i> .....                                                                    | 37 |
| 3.8 Perhitungan Emisi <i>CO2</i> dan <i>CH4</i> Kapal Kondisi BAU ( <i>Tank to Wake</i> ).....                                        | 39 |
| 3.9 Pemilihan Bahan Bakar Alternatif Menggunakan AHP-TOPSIS .....                                                                     | 40 |
| 3.9.1 Penentuan Tujuan, Kriteria, dan Alternatif.....                                                                                 | 40 |
| 3.9.2 Teknik Pengumpulan Data untuk AHP - TOPSIS .....                                                                                | 41 |
| 3.9.3 Pembuatan Form kuisioner AHP .....                                                                                              | 41 |
| 3.9.4 Tahap AHP: Pembobotan Kriteria .....                                                                                            | 42 |
| 3.9.5 Tahap TOPSIS: Pemeringkatan Alternatif.....                                                                                     | 45 |
| 3.9.6 Analisis Sensitivitas .....                                                                                                     | 48 |
| 3.10 Perbandingan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA) Tank to Wake B0 dengan BBM Terpilih.                                             | 49 |
| BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....                                                                                                    | 51 |
| 4.1 Gambaran Umum Objek Penelitian.....                                                                                               | 51 |
| 4.2 Pengembangan Prototipe Gas Analyzer .....                                                                                         | 53 |
| 4.2.1 Desain 3D Prototipe .....                                                                                                       | 53 |
| 4.2.2 Desain Sistem Elektrikal dan PCB.....                                                                                           | 54 |
| 4.2.3 Rancangan Logika Program.....                                                                                                   | 59 |
| 4.3 Pengukuran Emisi <i>CO2</i> dan <i>CH4</i> .....                                                                                  | 65 |
| 4.3.1 Kalibrasi Sensor <i>CO2</i> dan <i>CH4</i> .....                                                                                | 65 |
| 4.4 Proses Pengukuran Emisi <i>CO2</i> dan <i>CH4</i> di Kapal .....                                                                  | 69 |
| 4.4.1 Parameter Bahan Bakar B0, B35, dan B40.....                                                                                     | 70 |
| 4.4.2 Penentuan Load dan Pengukuran Konsusmsi BBM .....                                                                               | 72 |
| 4.4.3 Pengukuran Konsentrasi Emisi dan Validasi Data .....                                                                            | 74 |
| 4.4.4 Konversi Konsentrasi Gas Buang ke Exhaust Gas Flow .....                                                                        | 75 |
| 4.4.5 Perhitungan <i>Emission factor CO2</i> dan <i>CH4</i> .....                                                                     | 78 |
| 4.4.6 Kalkulasi BAV dan Perbandingan Emisi Tahunan B0, B35, dan B40 .....                                                             | 83 |
| 4.5 Hasil Pemilihan Bahan Bakar Rendah Emisi dengan AHP-TOPSIS .....                                                                  | 85 |
| 4.5.1 Hirarki AHP-TOPSIS .....                                                                                                        | 86 |
| 4.5.2 Tahap AHP: Pembobotan Kriteria per Responden .....                                                                              | 86 |
| 4.5.3 Tahap AHP Perbandingan Berpasangan Kriteria Gabungan Responden .....                                                            | 87 |
| 4.5.4 Perangkingan dengan Metode TOPSIS .....                                                                                         | 89 |
| 4.6 Perbandingan LCA ( <i>Life Cycle Assesment</i> ) Emisi BAU ( <i>Business As Usual</i> ) dan Bahan Bakar Alternatif Terpilih ..... | 91 |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6.1 Batasan dan Metodologi LCA <i>Tank to Wake</i> .....                     | 91  |
| 4.6.2 Perbandingan Reduksi Emisi <i>CO<sub>2</sub>e</i> .....                  | 92  |
| 4.6.3 Ringkasan Perbandingan LCA dan Implikasi Mitigasi.....                   | 93  |
| 4.6.4 Saran Propulsi untuk mencapai target penurunan emisi 2030 dan 2050 ..... | 94  |
| 4.7 Perbandingan Alat Uji emisi Prototipe dan Alat Uji Emisi Profesional.....  | 95  |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....                                               | 97  |
| 5.1 Kesimpulan .....                                                           | 97  |
| 5.2 Saran .....                                                                | 98  |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                            | 99  |
| LAMPIRAN .....                                                                 | 105 |
| BIODATA PENULIS.....                                                           | 131 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                                                                                      |                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Gambar 1. 1 Emisi gas rumah kaca tahunan (dalam $CO_2e$ ) untuk pelayaran internasional, menurut alokasi emisi internasional berbasis kapal dan berbasis pelayaran (International Maritime Organization, 2020) ..... | 1                                   |
| Gambar 1. 2 Timeline Pengurangan emisi Indonesia (Republic of Indonesia., 2021 & 2022)..                                                                                                                             | 2                                   |
| Gambar 1. 3 Kapal Wisata Non Konvensional (Sindonews.id., 2020).....                                                                                                                                                 | 3                                   |
| Gambar 2. 1 Analisis Bibliometrik.....                                                                                                                                                                               | 7                                   |
| Gambar 2. 2 Analisis Densitas Bibliometrik .....                                                                                                                                                                     | 8                                   |
| Gambar 2. 3 Gas Analyzer (Testo., nd) .....                                                                                                                                                                          | 12                                  |
| Gambar 2. 4 Skema Pemasangan alat Gas Analyzer (Bai, 2020).....                                                                                                                                                      | 12                                  |
| Gambar 2. 5 Sensor $CO_2$ .....                                                                                                                                                                                      | 15                                  |
| Gambar 2. 6 Jenis sensor NDIR (Non-Dispersive Infrared) .....                                                                                                                                                        | 15                                  |
| Gambar 2. 7 Sensor $CH_4$ .....                                                                                                                                                                                      | 16                                  |
| Gambar 2. 8 Jenis Sensor MOS (Metal Oxide Semiconductor).....                                                                                                                                                        | 16                                  |
| Gambar 2. 9 Pompa udara .....                                                                                                                                                                                        | 16                                  |
| Gambar 2. 10 Filter.....                                                                                                                                                                                             | 17                                  |
| Gambar 2. 11 Selang PTFE .....                                                                                                                                                                                       | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 12 Probe .....                                                                                                                                                                                             | 17                                  |
| Gambar 2. 13 Diagram elektrik antar komponen (Dokumentasi Pribadi).....                                                                                                                                              | 18                                  |
| Gambar 2. 14 Skema Tank to Wake ((International Maritime Organization, 2020).....                                                                                                                                    | 20                                  |
| Gambar 3. 1 Skema Diagram Alir Penelitian .....                                                                                                                                                                      | 29                                  |
| Gambar 3. 1 Lanjutan Skema Diagram Alir Penelitian.....                                                                                                                                                              | 30                                  |
| Gambar 4. 1 Objek kapal non konvensional.....                                                                                                                                                                        | 51                                  |
| Gambar 4. 2 a) Dengan tutup b) tanpa tutup .....                                                                                                                                                                     | 53                                  |
| Gambar 4. 3 Diagram Blok Sistem Emisi .....                                                                                                                                                                          | 54                                  |
| Gambar 4. 4 Diagram Blok Sistem Emisi .....                                                                                                                                                                          | 55                                  |
| Gambar 4. 5 Skematik Desain .....                                                                                                                                                                                    | 56                                  |
| Gambar 4. 6 Desain PCB.....                                                                                                                                                                                          | 57                                  |
| Gambar 4. 7 Hasil Rakit Komponen di PCB.....                                                                                                                                                                         | 59                                  |
| Gambar 4. 8 Diagram alur Pemrograman.....                                                                                                                                                                            | 60                                  |
| Gambar 4. 9 Pemrograman $CO_2$ .....                                                                                                                                                                                 | 62                                  |
| Gambar 4. 10 Pemrograman $CH_4$ .....                                                                                                                                                                                | 63                                  |
| Gambar 4. 11 proses kalibrasi Emisi .....                                                                                                                                                                            | 65                                  |
| Gambar 4. 11 proses kalibrasi Emisi $CH_4$ .....                                                                                                                                                                     | 67                                  |
| Gambar 4. 13 a) tachometer mengukur rpm mesin b) Jerigen Ukur penentuan load.....                                                                                                                                    | 69                                  |
| Gambar 4. 14 Proses Pengukuran secara langsung .....                                                                                                                                                                 | 70                                  |
| Gambar 4. 15 Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar (ml/S) pada Berbagai Mode Beban .....                                                                                                                                 | 73                                  |
| Gambar 4. 12 Exhaust Gas Flow per Mode Operasi dan Jenis BBM .....                                                                                                                                                   | 77                                  |
| Gambar 4. 13 <i>Emission factor</i> $CO_2$ per Mode Operasi BBM B0, B35, B40 .....                                                                                                                                   | 80                                  |
| Gambar 4. 14 <i>Emission factor</i> $CH_4$ per Mode Operasi BBM B0, B35, B40.....                                                                                                                                    | 82                                  |
| Gambar 4. 15 Perbandingan <i>Emission factor</i> Teori dengan Prototipe a $CO_2$ dan b $CH_4$ .....                                                                                                                  | 83                                  |
| Gambar 4. 16 Perbandingan Emisi Tahunan B0, B35, B40 A $CO_2$ dan B $CH_4$ .....                                                                                                                                     | 85                                  |
| Gambar 4. 17 Perbandingan Emisi dan $CO_2e$ Reduksi Bahan Bakar Biodiesel. ....                                                                                                                                      | 93                                  |

Halaman ini sengaja dikosongkan



## DAFTAR TABEL

|                                                                                                                                                                                                                                      |                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Tabel 2. 1 Latar belakang gas analyzer .....                                                                                                                                                                                         | 9                                   |
| Tabel 2. 2 Studi Terkait gas analyzer .....                                                                                                                                                                                          | 10                                  |
| Tabel 2. 4 Parameter Iklim Gas Rumah Kaca Utama (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).....                                                                                                                               | 18                                  |
| Tabel 2. 5 Penjelasan Tiga Jenis Propulsi kapal wisata non konvensional (DNV GL, 2016; European Maritime Safety Agency, 2020; Inal et al., 2022; International Maritime Organization, 2024; Jo et al., 2025; Mao et al., 2025) ..... | 22                                  |
| Tabel 2. 6 Penjelasan AHP-TOPSIS (Costa et al., 2023; Tran et al., 2024) .....                                                                                                                                                       | 26                                  |
| Tabel 3. 1 Pengukuran emisi pada kapal A .....                                                                                                                                                                                       | 36                                  |
| Tabel 3. 2 Konversi Emisi ke Exhaust Gas Flow Pada Kapal A.....                                                                                                                                                                      | 38                                  |
| Tabel 3. 3 Konversi Emisi ke <i>Emission factor</i> Pada Kapal A.....                                                                                                                                                                | 39                                  |
| Tabel 3. 4 Jadwal penelitian Tugas Akhir .....                                                                                                                                                                                       | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 1 Spesifikasi Yanmar TF 85 .....                                                                                                                                                                                            | 52                                  |
| Tabel 4. 2 List Komponen.....                                                                                                                                                                                                        | 57                                  |
| Tabel 4. 3 Perbandingan Emisi <i>CO2</i> .....                                                                                                                                                                                       | 66                                  |
| Tabel 4. 4 Perbandingan Emisi <i>CO2</i> BBM B0 .....                                                                                                                                                                                | 66                                  |
| Tabel 4. 5 Perbandingan Emisi <i>CO2</i> BBM B40 .....                                                                                                                                                                               | 66                                  |
| Tabel 4. 6 Kalkulasi Variasi Faktor Skala Teoritis .....                                                                                                                                                                             | 68                                  |
| Tabel 4. 7 Percobaan Pengambilan data <i>CH4</i> .....                                                                                                                                                                               | 68                                  |
| Tabel 4. 8 Verifikasi Dengan Metode Statistik.....                                                                                                                                                                                   | 68                                  |
| Tabel 4. 9 Pemilihan Faktor Skala .....                                                                                                                                                                                              | 69                                  |
| Tabel 4. 10 Spesifikasi Bahan Bakar B0, B35, dan B40 .....                                                                                                                                                                           | 71                                  |
| Tabel 4. 11 Parameter <i>Output</i> Konversi Exhaust Gas Flow .....                                                                                                                                                                  | 76                                  |
| Tabel 4. 12 Perhitungan Daya dan <i>Load factor</i> BBM B0.....                                                                                                                                                                      | 72                                  |
| Tabel 4. 13 Rangkuman Konsumsi Bahan Bakar (Fuel) .....                                                                                                                                                                              | 72                                  |
| Tabel 4. 14 Gabungan Emisi <i>CO2</i> dan <i>CH4</i> pada Bahan Bakar B0 .....                                                                                                                                                       | 74                                  |
| Tabel 4. 15 Gabungan Emisi <i>CO2</i> dan <i>CH4</i> pada Bahan Bakar B0 .....                                                                                                                                                       | 75                                  |
| Tabel 4. 16 Hasil Perhitungan Exhaust Gas Flow per Mode Beban BBM B0 .....                                                                                                                                                           | 77                                  |
| Tabel 4. 17 Exhaust Gas Flow per Mode Operasi dan Jenis BBM.....                                                                                                                                                                     | 77                                  |
| Tabel 4. 18 <i>Emission factor CO2</i> B0 .....                                                                                                                                                                                      | 78                                  |
| Tabel 4. 19 <i>Emission factor CO2</i> per Mode Operasi BBM B0, B35, B40 .....                                                                                                                                                       | 79                                  |
| Tabel 4. 20 <i>Emission factor CH4</i> per Mode Operasi BBM B0, B35, B40 .....                                                                                                                                                       | 80                                  |
| Tabel 4. 13 <i>Emission factor CH4</i> per Mode Operasi BBM B0, B35, B40 .....                                                                                                                                                       | 81                                  |
| Tabel 4. 14 Perbandingan <i>Emission factor</i> Teori dengan Prototipe .....                                                                                                                                                         | 82                                  |
| Tabel 4. 23 Emisi per Mode Operasi .....                                                                                                                                                                                             | 84                                  |
| Tabel 4. 24 Perbandingan BAV Emisi Tahunan B0, B35, B40.....                                                                                                                                                                         | 84                                  |
| Tabel 4. 25 Kriteria dan Tipe dalam AHP-TOPSIS.....                                                                                                                                                                                  | 86                                  |
| Tabel 4. 26 Profil Responden AHP.....                                                                                                                                                                                                | 86                                  |
| Tabel 4. 27 Matriks Penilaian Responden 1 .....                                                                                                                                                                                      | 86                                  |
| Tabel 4. 28 Normalisasi Matriks AHP dan Bobot Responden 1 .....                                                                                                                                                                      | 87                                  |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 4. 29 Vektor dan Hasil Uji Konsistensi (CI dan CR) Responden 1 ..... | 87 |
| Tabel 4. 30 Rangkuman Uji Konsistensi AHP Responden.....                   | 87 |
| Tabel 4. 31 Perhitungan AHP 3 Responden .....                              | 88 |
| Tabel 4. 32 Perhitungan AHP 3 Responden .....                              | 88 |
| Tabel 4. 33 Hasil Uji Konsistensi AHP 3 Responden.....                     | 88 |
| Tabel 4. 34 Nilai Matriks Keputusan Awal TOPSIS .....                      | 89 |
| Tabel 4. 35 Pembagi Normalisasi per Kriteria.....                          | 89 |
| Tabel 4. 36 Matriks Ternormalisasi Terbobot .....                          | 89 |
| Tabel 4. 37 Matriks Ternormalisasi Terbobot .....                          | 89 |
| Tabel 4. 38 Matriks Ternormalisasi Terbobot .....                          | 90 |
| Tabel 4. 39 Hasil Akhir TOPSIS Jarak dan Peringkat.....                    | 90 |
| Tabel 4. 40 Hasil Akhir TOPSIS Jarak dan Peringkat.....                    | 90 |
| Tabel 4. 41 Hasil Konversi $CO_2e$ per BBM GWP20 dan GWP100.....           | 92 |
| Tabel 4. 41 Hasil Konversi $CO_2e$ per BBM GWP20 dan GWP100.....           | 92 |

## DAFTAR SINGKATAN

AHP: *Analytic Hierarchy Process*  
AR6: *Assessment Report 6* (Laporan Penilaian ke-6 IPCC)  
BAU: *Business as Usual*  
BAV: *Baseline Actual Value*  
CI: *Consistency Index*  
 $CH_4$  : Methana  
 $CO_2$ : Karbon Dioksida (Carbon Dioxide)  
 $CO_2e$ : Karbon Dioksida Ekuivalen (Carbon Dioxide Equivalent)  
CR: Consistency Ratio  
DNV GL: Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd  
EF: *Emission factor* (Faktor Emisi)  
EMSA: *European Maritime Safety Agency*  
EPA: *United States Environmental Protection Agency*  
ESP: *Espressif Systems Platform* mikrokontroler ESP  
GHG: *Greenhouse Gases* (Gas Rumah Kaca)  
GRK: Gas Rumah Kaca  
GTP: Global Temperature Potential  
GWP: *Global Warming Potential*  
IMO: *International Maritime Organization*  
IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*  
ISO: *International Organization for Standardization*  
LCA: *Life Cycle Assessment*  
LTS-LCCR 2050: Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050  
MARPOL: *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*  
MEPC: *Marine Environment Protection Committee*  
MRV: *Measurement, Reporting, and Verification*  
NDC: *Nationally Determined Contribution*  
NDIR: *Non-Dispersive Infrared* (metode sensor gas)  
NO<sub>x</sub>: Oksida Nitrogen (Nitrogen Oxides: NO dan NO<sub>2</sub>)  
PCB: *Printed Circuit Board*  
ppm: *parts per million*  
PROMETHEE: *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*  
RI: *Random Index*  
SFOC: *Specific Fuel Oil Consumption*  
TOPSIS: *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*  
TtW: *Tank to Wake*  
WtT: *Well-to-Tank*  
WtW: *Well to Wake*

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR SIMBOL

$C_{\text{gas exh}}$ : konsentrasi  $CO_2$  di gas buang (fraksi volume, dari alat).

$C_{\text{gas air}}$ : konsentrasi  $CO_2$  udara ambien (fraksi volume, 0,0004).

$C_j$  = konsentrasi dari gas analyzer

$MW_j$  = massa molekul

$g_{CO_2}$  = massa gas  $CO_2$  yang dipancarkan.

$g_{CH_4}$  = massa gas  $CH_4$  (metana) yang dipancarkan.

$g_{N_2O}$  = massa gas  $N_2O$  (dinitrogen oksida/nitrous oxide) yang dipancarkan.

$GWP_{CO_2(20y)} = 1$ , karena  $CO_2$  dipakai sebagai gas acuan (standar) untuk GWP 20 tahun.

$GWP_{CH_4(20y)}$  = faktor yang menyatakan berapa kali  $CH_4$  lebih kuat menimbulkan pemanasan global dibanding  $CO_2$  dalam 20 tahun.

$GWP_{N_2O(20y)}$  = faktor yang menyatakan berapa kali  $N_2O$  lebih kuat menimbulkan pemanasan global dibanding  $CO_2$  dalam 20 tahun.

$EF_f$ : faktor emisi berbasis bahan bakar (g ( $CO_2$  dan  $CH_4$ ) /g fuel)

$EF_m$ : faktor emisi berbasis energi (g ( $CO_2$  dan  $CH_4$ ) //kWh) yang dipakai di rumus emisi .

$SFC$ : *Specific Fuel Consumption* mesin utama (g fuel/kWh).

$E$  : emisi dari mesin kapal ( g ( $CO_2$ , dan  $CH_4$ ) ).

$P$  : daya terpasang mesin kapal (kW).

$LF$  : *load factor* mesin pada rumus 2.5.

$T$ : waktu operasi kapal pada kondisi tersebut (jam).

$EF$  : faktor emisi gas (g/kWh), sumber dari persamaan (2.2).

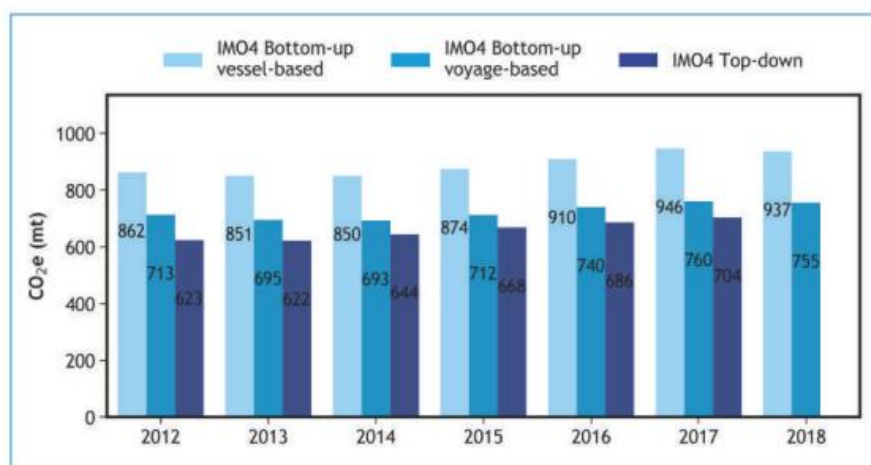
Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB 1

## PENDAHULUAN

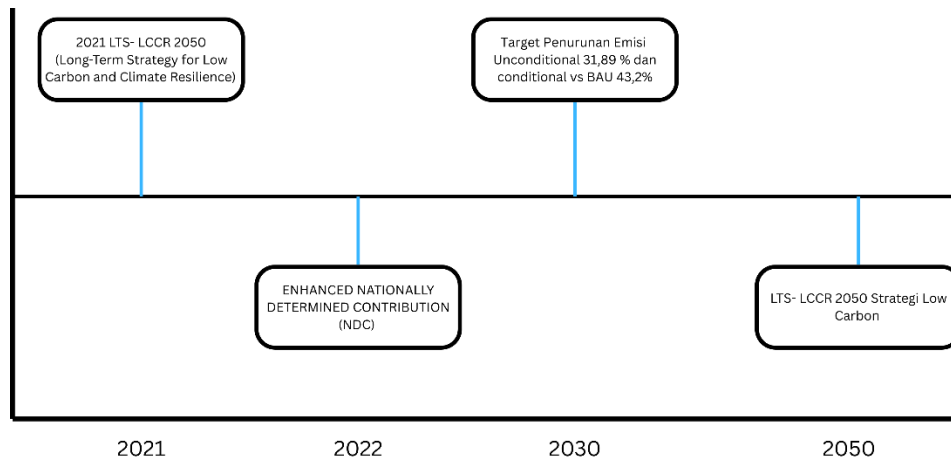
### 1.1 Latar Belakang

Pada skala global, pelayaran mendapat perhatian karena kontribusi emisinya dan tren peningkatan aktivitas. *International Maritime Organization* (IMO) melaporkan bahwa emisi GRK total dari pelayaran internasional, domestik, dan perikanan meningkat dari 977 juta ton  $CO_2e$  pada 2012 menjadi 1.076 juta ton  $CO_2e$  pada 2018 ((*International Maritime Organization*, 2020a)). Hal ini dibuktikan pada gambar 1,1 menunjukkan peningkatan emisi  $CO_2e$  dari tahun 2012-2018. Peningkatan ini menunjukkan kebutuhan intervensi yang lebih kuat agar pertumbuhan aktivitas tidak berbanding lurus dengan kenaikan emisi. Sejalan dengan itu, IMO mengadopsi *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships* yang menegaskan ambisi menuju *net zero* 2050, serta menetapkan penurunan emisi tahunan dari pelayaran internasional dibanding *baseline* 2008, yaitu  $\geq 20\%$  (*striving* 30%) pada 2030 dan  $\geq 70\%$  pada 2040 (*International Maritime Organization*., 2023). Arah kebijakan ini menuntut ketersediaan data emisi yang lebih baik, metode estimasi yang dapat dipertanggung jawabkan, serta skenario transisi yang terukur sampai 2050 (*International Maritime Organization*, 2020b).



Gambar 1. 1 Emisi gas rumah kaca tahunan (dalam  $CO_2e$ ) untuk pelayaran internasional, menurut alokasi emisi internasional berbasis kapal dan berbasis pelayaran ((*International Maritime Organization*, 2020a))

Di Indonesia, komitmen mitigasi juga diperkuat melalui dokumen kebijakan iklim. Indonesia menyampaikan *Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050* (LTS-LCCR 2050) sebagai arah pembangunan rendah karbon jangka panjang (Republic of Indonesia, 2021). Selain itu, Indonesia menyampaikan *Enhanced Nationally Determined Contribution* (2022) dengan target penurunan emisi pada 2030 sebesar 31,89% (*unconditional*) dan 43,20% (*conditional*) dibanding skenario *business-as-usual* (BaU) (Republic of Indonesia, 2021, 2022). Berikut *timeline* pengembangan gambar 1.2 .



Gambar 1. 2 Timeline Pengurangan emisi Indonesia (Republic of Indonesia, 2021, 2022)

*Monitoring* emisi kapal penting sebagai bukti kuantitatif untuk menilai kepatuhan dan kinerja pembakaran mesin (International Maritime Organization., 2021). Data menunjukkan penerapannya masih terbatas: pada awal 2025 armada niaga global sekitar 112.500 kapal ukuran  $\geq 100$  GT, sedangkan kapal yang memasang scrubber diproyeksikan dengan jumlah  $\geq 5.061$  unit atau sekitar 4,5% dari armada merujuk gambar 1.3 (United Nations Conference on Trade and Development, 2025; International Maritime Organization., 2023). Untuk konteks skripsi, uji emisi berkala dengan *gas analyzer* lebih realistis karena mengukur konsentrasi gas pada kondisi operasi tertentu tanpa sistem pemantauan kontinu yang kompleks (Environmental Protection Agency, 2025). Berbeda dengan itu, CEMS adalah sistem lengkap pemantauan emisi kontinu analyzer + *sampling* + perekaman data dan fitur QA/QC yang umumnya lebih mahal dan ditujukan untuk kebutuhan kepatuhan (South Coast Air Quality Management District, 2021; Environmental Protection Agency, 2025).

Penelitian ini menempatkan pengembangan prototipe *gas analyzer* sebagai fondasi untuk memperoleh data emisi aktual dari gas buang kapal. Gas analyzer berfungsi mengukur konsentrasi gas  $CO_2$  dan  $CH_4$  sehingga data yang diperoleh dapat menjadi dasar evaluasi performa emisi pada kondisi operasi nyata. Pengembangan prototipe yang berbiaya rendah menjadi keunggulan karena memungkinkan penerapan alat secara lebih luas, termasuk pada kapal skala kecil yang umumnya memiliki keterbatasan anggaran *monitoring* emisi. Konsep sistem *monitoring* murah berbasis mikrokontroler dan sensor gas juga telah ditunjukkan dapat bekerja secara praktis dan ekonomis dalam pemantauan kualitas udara (de Marinho et al., 2024).

Tahap awal yang penting dalam pengurangan emisi adalah penyusunan *Baseline Actual Value* (BAV). *Baseline* berfungsi sebagai gambaran kondisi emisi saat ini, sehingga dapat digunakan untuk: (1) mengukur beban emisi aktual, (2) mengidentifikasi parameter operasi yang paling memengaruhi emisi, dan (3) menjadi pembanding saat strategi mitigasi diterapkan. Pedoman inventori emisi polutan udara menekankan pentingnya konsistensi metodologi, transparansi asumsi, serta kualitas data aktivitas dalam penyusunan inventori (European Environment Agency, 2019). Jika hanya menggunakan *emission factor* dari referensi jurnal, hasil inventori cenderung memiliki ketidakpastian lebih tinggi karena *emission factor* pada dasarnya adalah nilai representatif yang mengaitkan aktivitas dengan emisi, sehingga tidak



selalu menggambarkan variasi nyata di lapangan (Environmental Protection Agency, 2025). Dalam praktiknya, inventori emisi kapal skala kecil sering menghadapi keterbatasan data aktivitas detail yakni profil kecepatan, durasi perjalanan, waktu, beban mesin, serta kondisi rute, sehingga estimasi emisi berbasis faktor emisi rata-rata dapat menghasilkan ketidakpastian yang tinggi. Karena itu, *baseline* inventori yang didukung oleh data pengukuran lapangan akan meningkatkan kredibilitas hasil dan memperkecil ketidakpastian.



Gambar 1. 3 Kapal Non Konvensional (Sindonews.id, 2020)

Kapal kayu non konvensional di Pantai Kenjeran, Surabaya, dipilih sebagai objek penelitian karena memenuhi tiga kriteria utama. Pertama, kapal ini menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama sehingga dapat dijadikan objek pengujian langsung. Kedua, kapal memiliki pola operasi yang berulang berangkat, touring, dan kembali ke dermaga sehingga kondisi pengukuran antartip dapat dibandingkan secara konsisten. Ketiga, kapal ini berskala kecil sehingga relatif lebih mudah untuk pemasangan prototipe dan pencatatan variabel operasi dibandingkan kapal niaga besar, menjadikannya studi kasus yang ideal untuk membangun pengukuran, pemodelan, dan skenario emisi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dirancang untuk menjawab kebutuhan data emisi aktual dari kapal non konvensional skala kecil yang selama ini belum tersedia. Penelitian mengembangkan prototipe *gas analyzer* berbasis ESP32 sebagai instrumen pengukuran  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada gas buang mesin kapal, yang kemudian digunakan untuk menyusun *Baseline Actual Value* (BAV) emisi kapal pada kondisi *business as usual* (BAU). Hasil pengukuran selanjutnya menjadi dasar evaluasi tiga skenario bahan bakar B0, B35, dan B40 melalui pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) *Tank to Wake* (TtW) dan metode *Analytic Hierarchy Process–Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (AHP-TOPSIS) untuk menentukan bahan bakar yang paling efektif dalam menurunkan emisi GRK. Oleh karena itu, peneliti tertarik untuk meneliti dengan judul "PENGEMBANGAN PROTOTIPE GAS ANALYZER UNTUK PENGUKURAN  $CO_2$  DAN  $CH_4$  PADA GAS BUANG KAPAL". Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada penyediaan data emisi

berbasis pengukuran lapangan yang dapat mendukung kebijakan dekarbonisasi sektor maritim di Indonesia.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, berikut ini merupakan rumusan permasalahan dari penelitian yang akan dilakukan sebagai tugas akhir ini :

1. Bagaimana merancang alat ukur emisi gas  $CO_2$  dan  $CH_4$  ?
2. Bagaimana metode untuk mengukur dan menghitung emisi aktual kapal non konvensional pada kondisi *Business As Usual* (BAU) sehingga diperoleh *Baseline Actual Value* (BAV) yang valid sebagai dasar inventarisasi emisi ?
3. Bagaimana pemilihan riset operasi pada Bahan Bakar Minyak (BBM) B0, B35, dan B40 pada kapal non konvensional?
4. Bagaimana perbandingan emisi antara kondisi BAU dan kondisi setelah penerapan BBM alternatif pada kapal non konvensional berdasarkan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dengan batasan *Tank to Wake* (TtW)?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, berikut ini merupakan tujuan dari penelitian yang akan dilakukan sebagai tugas akhir ini :

1. Merancang alat ukur emisi gas  $CO_2$  dan  $CH_4$
2. Mengukur dan menghitung emisi aktual kapal non konvensional pada kondisi *Business As Usual* (BAU) untuk memperoleh *Baseline Actual Value* (BAV) sebagai dasar inventarisasi emisi.
3. Melakukan riset operasi pemilihan jenis BBM (Bahan Bakar Minyak) B0, B35, dan B40 pada kapal non konvensional
4. Menganalisis Perbandingan kondisi BAU dan kondisi setelah penerapan Bahan Bakar Minyak (BBM) alternatif pada kapal non konvensional menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dengan batasan sistem *Tank to Wake* (TtW).

## 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Batasan ruang lingkup penelitian ini perlu di tentukan agar penelitian dapat lebih terarah dan fokus pada permasalahan yang akan di analisis. Berikut merupakan batasan ruang lingkup yang akan dibahas:

1. Penelitian berfokus pada emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$
2. Penelitian hanya berfokus pada emisi kapal non konvensional mesin diesel yang bersandar di Pantai Kenjeran, Surabaya
3. Perhitungan emisi hanya mengacu pada pendekatan *Tank to Wake* (TtW), tidak mencakup *Well to Tank* (WtT).
4. Analisis dilakukan pada skala area surabaya sebagai studi kasus, sehingga tidak mewakili seluruh pelabuhan secara nasional.

## 1.5 Manfaat

Penelitian yang dilakukan ini diharapkan dapat memiliki manfaat bagi berbagai pihak terutama pemerintah, pengguna energi gas alam, dan pihak industri lainnya. Adapun manfaatnya diantaranya sebagai berikut:

### 1. Bagi Pemerintah

Memberikan dasar ilmiah dalam menyusun regulasi dan kebijakan pengurangan emisi di sektor kapal, sekaligus mendukung target nasional pengurangan emisi gas rumah kaca dan transisi energi berkelanjutan.

### 2. Bagi Pengguna kapal

Menyediakan alat *monitoring* emisi dengan biaya murah, untuk mendukung pengurangan emisi serta manajemen penggunaan bahan bakar.

### 3. Bagi Peneliti

Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu di bidang manajemen energi, serta teknologi *monitoring* emisi murah, yang dapat dijadikan rujukan untuk penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

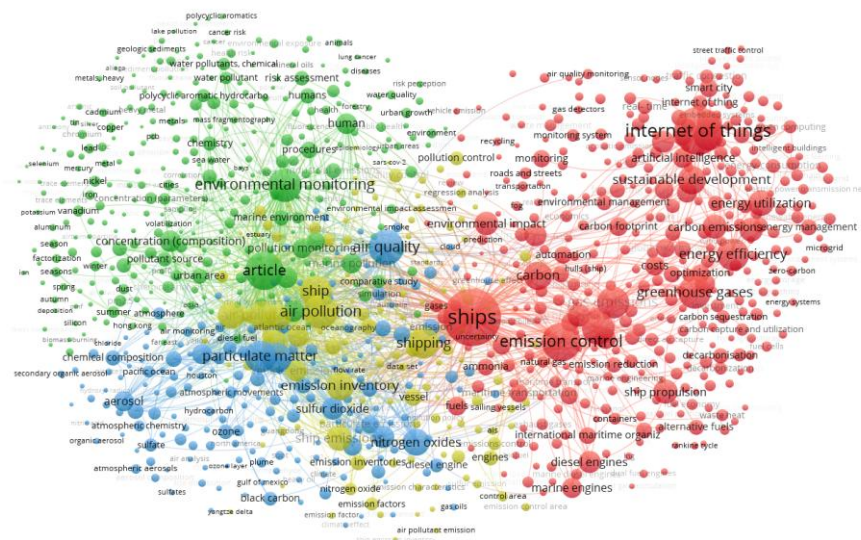
## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Analisa Bibliometrik

Analisis bibliometrik berfungsi untuk memetakan dan mengevaluasi literatur ilmiah sehingga terlihat tren riset, tema dominan, penulis berpengaruh, serta hubungan antartopik melalui jaringan kata kunci atau sitasi. *Research gap* dapat dicari dengan meninjau hasil pemetaan untuk menemukan topik yang masih jarang muncul, keterkaitan antarklaster yang lemah, atau area yang belum banyak diteliti pada konteks atau objek tertentu. Setelah itu, gap dipertegas dengan membaca artikel kunci pada klaster terkait untuk mengidentifikasi keterbatasan, variabel yang belum diuji, atau kebutuhan data yang belum terpenuhi, lalu merumuskan kontribusi penelitian yang spesifik. (Donthu et al., 2021). Pada topik tugas akhir ini didapat analisis bibliometrik dengan kata kunci *Emission Monitoring*, *Low emission ship*, *Marine GHG Emission*, *Ship Inventory*

Berdasarkan peta bibliometrik pada Gambar 2.1, kata kunci *ships* menjadi pusat yang menghubungkan tema mitigasi, teknologi, dan dampak lingkungan dari emisi pelayaran. Klaster merah efisiensi energi, pemanfaatan energi, sustainable development carbon footprint, decarbonization, greenhouse gases menunjukkan fokus riset pada pengurangan emisi melalui digitalisasi, optimasi, dan strategi dekarbonisasi sistem transportasi laut. Klaster biru shipping emissions, emission control, mesin kapal, diesel engines/mesin diesel merepresentasikan kajian teknis sumber emisi dari mesin serta teknologi pengendaliannya. Klaster hijau–kuning kualitas udara, air pollution, aerosols, environmental *monitoring*, menekankan dampak emisi kapal terhadap kualitas udara dan kesehatan sekaligus metode pemantauan serta karakterisasi polutannya.



Gambar 2. 1 Analisis Bibliometrik



Tabel 2. 1 Latar belakang gas analyzer

| No | Penulis                                                                                  | Topik Penelitian                                                                          | Judul Penelitian                                                                                                                                               | Tahun | Ringkasan Hasil Penelitian                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | International Maritime Organization (IMO)                                                | Strategi global pengurangan emisi GHG dari kapal                                          | <i>2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships</i>                                                                                              | 2023  | Strategi IMO yang direvisi menargetkan emisi GHG internasional mencapai net-zero sekitar 2050, dengan checkpoint penurunan total emisi tahunan minimal 20% (upaya 30%) pada 2030 dan 70% (upaya 80%) pada 2040 dibanding 2008, serta mendorong minimal 5% penggunaan teknologi atau fuel nol atau nyaris nol emisi pada 2030. (International Maritime Organization) |
| 2  | Republic of Indonesia                                                                    | Target dan kebijakan mitigasi emisi GRK nasional (NDC)                                    | Enhanced Nationally Determined Contribution (NDC) – Republic of Indonesia <i>Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (LTS-LCCR 2050)</i> | 2022  | Target NDC 2030 dinaikkan (31,89% tanpa syarat; 43,20% bersyarat) dan menekankan penguatan inventaris emisi perlu data emisi terukur ( $CO_2$ dan $CH_4$ ) dengan <i>gas analyzer</i> .                                                                                                                                                                             |
| 3  | Government of Indonesia                                                                  | Skenario jalur rendah karbon jangka panjang dan ketahanan iklim                           | <i>Indonesia Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (LTS-LCCR 2050)</i>                                                                 | 2021  | Skenario LCCP menurunkan emisi cepat pasca-2030 ( $MtCO_2e$ pada 2050) menuju net-zero 2060/lebih cepat membutuhkan pemantauan emisi berbasis pengukuran ( $CO_2$ dan $CH_4$ ).                                                                                                                                                                                     |
| 4  | International Maritime Organization (IMO) Marine Environment Protection Committee (MEPC) | Metodologi penilaian intensitas GRK siklus-hidup bahan bakar laut ( <i>Well to Wake</i> ) | <i>Resolution MEPC.391(81): 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (Annex 10)</i>                                                         | 2024  | Pedoman IMO WtW memakai GWP100 untuk $CO_2e$ ( $CO_2=1$ ; $CH_4=28$ ) pengukuran emisi dengan <i>gas analyzer</i> menjadi <i>output</i> penting perhitungan serta evaluasi emisi.                                                                                                                                                                                   |
| 5  | IPCC (AR6 WGI)                                                                           | Parameter GWP untuk konversi emisi GRK menjadi $CO_2e$                                    | IPCC AR6 WGI Supplementary Material: Table 7.SM.7 (Greenhouse gas lifetimes, radiative efficiencies, and metrics)                                              | 2021  | IPCC AR6 menyediakan metrik konversi $CO_2e$ ( $CO_2=1$ ; GWP100 $CH_4=27,9$ ) mendukung konversi hasil ukur $CH_4$ ( <i>gas analyzer</i> ) ke $CO_2e$ .                                                                                                                                                                                                            |

Tabel 2. 2 Studi Terkait gas analyzer

| No | Peneliti                   | Fokus Penelitian                             | Judul                                                                                                                                | Tahun | Ringkasan Hasil                                                                                                                     |
|----|----------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Bai, C., et al.            | Pemantauan emisi on-board                    | <i>Gaseous emissions from a seagoing ship under different operating conditions</i>                                                   | 2020  | Karakterisasi emisi gas pada berbagai kondisi operasi kapal di pesisir China                                                        |
| 2  | Chu-Van, T., et al.        | Pemantauan emisi on-board, kapal besar       | <i>On-board measurements of particle and gaseous emissions from a large cargo vessel</i>                                             | 2018  | <i>Emission factor</i> diukur dengan Testo 350 XL + sistem dilusi + heated <i>sampling line</i> (180°C)                             |
| 3  | Dettner, F., & Hilpert, S. | Inventarisasi emisi berbasis AIS             | <i>Emission inventory for maritime shipping emissions in the North and Baltic Sea</i>                                                | 2023  | Inventarisasi emisi resolusi tinggi                                                                                                 |
| 4  | Zhou, F., et al.           | Sensor web multi-platform                    | <i>Ship emission monitoring sensor web for research and application</i>                                                              | 2022  | Sistem sensor web real-time untuk penegakan regulasi ECA                                                                            |
| 5  | Honeycutt, W. T., et al.   | Validasi sensor gas murah (non-kapal)        | <i>Precision and limits of detection for selected commercially available, low-cost CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gas sensors</i> | 2019  | Sensor MQ-4 diuji terhadap analyzer referensi presisi tinggi; limit deteksi 16 ppm                                                  |
| 6  | Martin, C. R., et al.      | Validasi & kalibrasi sensor NDIR (non-kapal) | <i>Evaluation and environmental correction of ambient CO<sub>2</sub> measurements from a low-cost NDIR sensor</i>                    | 2017  | Sensor <i>Non-Dispersive Infrared</i> (NDIR) diuji dengan <i>gas analyzer</i> rumah kaca; akurasi <5 ppm setelah koreksi lingkungan |

## 2.3 Dasar Teori

### 2.3.1 Konsep Emisi CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> di Kapal

Emisi dari mesin kapal berasal dari gas buang hasil pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan daya propulsi, sehingga polutan seperti CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> terutama muncul saat kapal transit dan manuver (U.S. Environmental Protection Agency, 2020). Emisi mesin kapal cenderung meningkat saat kapal sering akselerasi, de akselerasi, manuver mendekati dermaga,



serta idle/kecepatan rendah ketika antri di jetty karena besarnya emisi inventaris dipengaruhi oleh durasi operasi dan beban mesin (U.S. Environmental Protection Agency, 2020). Dampaknya dapat berupa penurunan kualitas udara di area pesisir, sekaligus kontribusi terhadap perubahan iklim melalui emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  (U.S. Environmental Protection Agency, 2020). Mitigasi yang relevan untuk kapal non konvensional mesin diesel meliputi optimasi kecepatan/operasi lebih stabil, serta penggunaan bahan bakar rendah untuk menekan Emisi ((International Maritime Organization, 2023) International Maritime Organization, 2020).

Karakteristik emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  berbeda secara fundamental dalam hal sumber, besaran, dan dampak iklim jangka pendek maupun jangka panjang. Memahami perbedaan ini penting karena pemilihan metrik konversi GWP<sub>20</sub> atau GWP<sub>100</sub> akan mempengaruhi interpretasi hasil pengukuran dan peringkat bahan bakar dalam analisis LCA. Kedua gas tersebut bersumber dari pembakaran bahan bakar di mesin diesel, namun mekanisme dan kondisi pembentukannya berbeda, sehingga evaluasi harus dilakukan secara terpisah sebelum dikonversi ke  $CO_2e$  (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Secara konseptual, tiga parameter emisi yang umum dibahas pada penelitian ini memiliki karakteristik berbeda:

1.  $CO_2$  (karbon dioksida)

$CO_2$  adalah produk utama pembakaran sempurna bahan bakar berbasis karbon. Karena jumlah  $CO_2$  sangat bergantung pada kandungan karbon bahan bakar dan jumlah bahan bakar yang dibakar, emisi  $CO_2$  umumnya hampir linier terhadap konsumsi bahan bakar. Hal ini yang membuat  $CO_2$  sering digunakan sebagai indikator utama kinerja emisi nu  $gCO_2/kWh$  atau  $gCO_2/gfuel$ ). Secara global, inventarisasi IMO menunjukkan emisi GRK pelayaran meningkat dari 2012 ke 2018 dan totalnya mencapai sekitar 1.076 juta ton  $CO_2e$  pada 2018, sehingga kebijakan mitigasi banyak menitikberatkan pada penurunan  $CO_2$ . (International Maritime Organization, 2020a).

2.  $CH_4$  (metana)

$CH_4$  dapat muncul dari pembakaran tidak sempurna dan/atau methane slip. Pengaruh  $CH_4$  dalam kajian iklim sangat tinggi karena GWP metana jauh lebih besar dibanding  $CO_2$  nilai GWP yang direkomendasikan berbasis IPCC AR6, banyak dipakai dalam pelaporan inventaris GRK. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

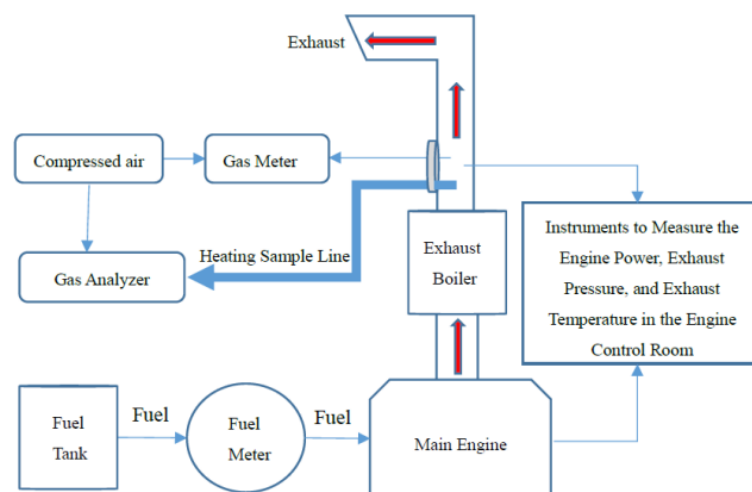
### 2.3.1.1 Pengukuran Emisi $CO_2$ dan $CH_4$ Kapal

Pengukuran emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  dari kapal pada dasarnya dilakukan dengan pendekatan on-board measurement, yaitu mengambil sampel gas buang langsung dari cerobong (funnel) kapal dan menganalisisnya menggunakan gas analyzer portabel yang mampu mengukur konsentrasi  $CO_2$  secara kontinu (Bai, 2020). Pada penelitian metode ini diterapkan pada kapal niaga yang beroperasi di perairan pesisir Tiongkok dengan memasang *sampling probe* stainless steel pada funnel mesin induk yang terhubung ke gas analyzer berbasis NDIR seperti gambar 2.3 serta beberapa tabung gas kalibrasi untuk zero dan span ((Bai, 2020).



Gambar 2. 3 Gas Analyzer (Testo., 2020)

Gambar 2.4 menunjukkan skema sistem pengukuran emisi di kapal, mulai dari bahan bakar yang mengalir dari fuel tank ke main engine melalui fuel meter sehingga laju konsumsi bahan bakar dapat dicatat. Gas buang dari main engine dialirkan ke cerobong dan sebagian diambil melalui *heating sample line*, melewati gas meter, lalu dianalisis emisi, oleh *gas analyzer* dengan bantuan aliran *compressed air*. Secara bersamaan, instrumen di *engine control room* merekam daya mesin, tekanan, dan temperatur gas buang sehingga semua data tersebut dapat digunakan untuk menghitung debit gas buang dan faktor emisi mesin.



Gambar 2. 4 Skema Pemasangan alat Gas Analyzer (Bai, 2020)

Berikut langkah-langkah pengukuran gas analyzer dari alat (Testo., 2020)

## Proses pengukuran Emisi

### 1. Nyalakan alat

- Hidupkan control unit, biarkan tersambung ke measuring box.

### 2. Set tampilan emisi dan fuel

- Aktifkan parameter salah satu emisi gas  $CO_2$  agar muncul di layar.

### 3. Pasang probe di exhaust

- Masukkan probe lewat *sampling* point, arahkan ke hot spot atau tengah duct.
- Kunci dengan probe supaya tidak goyang.

### 4. Mulai ukur & baca emisi gas

- Di menu Flue gas, tekan Start.
- Alat akan zeroing kurang lebih 30 detik dengan udara segar.
- Setelah itu pompa menghisap gas buang dengan flow kurang lebih 1 L/min .
- Tunggu angka stabil, lalu baca nilai  $CO_2$  d (vol%) di layar (konsentrasi  $CO_2$  kering).

Sesuai gambar 2.4 bahwa gas buang dari funnel dialirkan melalui heated *sampling* line menuju rangkaian kondisioning sampel yang terdiri atas filter partikel, pengendali suhu dan tekanan, kemudian masuk ke gas analyzer untuk diukur konsentrasinya secara *real time*. Temperatur dan kelembaban gas buang diperoleh dari sensor tambahan, sedangkan data konsumsi bahan bakar dan daya mesin diambil dari sistem pemantauan di ruang kendali mesin. Dengan kombinasi data ini, kemudian menghitung *emission factor* (EF)  $CO_2$  dalam satuan massa per energi (g/kWh) untuk setiap kondisi operasi kapal, seperti berthing, manoeuvring di pelabuhan, dan anchoring (Bai et al., 2020).

Pertama hitung *Exhaust gas flow* (debit gas buang)

$$\text{Exhaust gas flow} = \frac{\text{Fuel consumption (kg h}^{-1}\text{)} \times \text{Fuel oil carbon content (\%)} \times \frac{44}{12}}{(\text{Density gas CO}_2 \text{ kg m}^{-3}) \times (C_{\text{gas, exh}} - C_{\text{gas, air}})} [\text{m}^3\text{h}^{-1}] \quad (2.1)$$

Fuel consumption (kg h<sup>-1</sup>): konsumsi bahan bakar per jam dari *fuel meter*.

Fuel oil carbon content (%): persen massa karbon dalam fuel (dari sertifikat fuel).

Density of gas (kg m<sup>-3</sup>): densitas  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada kondisi standar. Contoh perbandingan massa molekul  $CO_2$  (44) dan C (12) untuk mengubah massa C massa  $CO_2$  sehingga (44/12)

$C_{\text{gas exh}}$ : konsentrasi  $CO_2$  di gas buang (fraksi volume, dari alat).

$C_{\text{gas air}}$ : konsentrasi  $CO_2$  udara ambien (fraksi volume, 0,0004).

Langkahnya: pembilang menghitung laju massa  $CO_2$  yang terbentuk dari fuel, lalu dibagi densitas  $CO_2$  untuk mendapatkan volume  $CO_2$  dan dibagi lagi dengan  $(C_{\text{gas, exh}} - C_{\text{gas, air}})$  menjadi total volume gas buang (*Exhaust gas flow*).

Ubah konsentrasi gas Parts Per Million (ppm) menjadi konsentrasi massa, dari analyzer dalam satuan ppm, rumus yang dipakai adalah rumus

$$EF_j = (C_j \times 10^{-6}) \times \frac{MW_j}{22.4 \times 10^{-3}} \times \frac{\text{Exhaust gas flow}}{\text{Engine power}} \text{ [g kWh}^{-1}\text{]} \quad (2.2)$$

Contoh pada perhitungan  $CH_4$ :

$C_j$  = konsentrasi  $CH_4$ , dari gas analyzer dalam ppm.

$MW_j$  = massa molekul  $CH_4$ , = 16,04 g/mol.

Ubah konsentrasi gas Vol % menjadi konsentrasi massa, dari analyzer dalam satuan vol %, rumus yang dipakai adalah rumus

$$F_j = (C_j \times 10^{-3}) \times \frac{MW_j}{22.4 \times 10^{-3}} \times \frac{\text{Exhaust gas flow}}{\text{Engine power}} \text{ [g kWh}^{-1}\text{]} \quad (2.3)$$

Contoh pada perhitungan  $CO_2$ :

$C_j$  = konsentrasi  $CO_2$  dari gas analyzer dalam Vol %.

$MW_j$  = massa molekul  $CO_2$  = 44 g/mol

### 2.3.1.2 Perancangan Prototipe Alat Uji Emisi Gas $CO_2$ dan $CH_4$

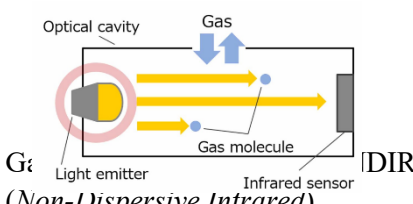
Gas analyzer adalah instrumen yang digunakan untuk mengukur konsentrasi gas  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada aliran gas buang secara *real time* melalui rangkaian pengambilan sampel, pengkondisian sampel, dan unit analisis gas. Dalam standar uji emisi mesin pembakaran dalam, ((International Organization of Legal Metrology, 2008)) menekankan bahwa sistem pengukuran emisi mencakup proses *sampling* gas buang, filter partikel, serta sensor dengan akurasi hasil bagus. Pada pengukuran lapangan, gas buang dapat dialirkan dari funnel menuju dan probe *sampling* line dan filter partikel sebelum masuk ke gas analyzer agar pembacaan konsentrasi lebih stabil dan representatif. Lalu dianalisis dengan sensor dan Pendekatan ini lazim digunakan pada pengukuran kapal untuk memperoleh data konsentrasi gas buang yang dapat dikonversi menjadi *emission factor* pada berbagai fase operasi.

Pengukuran  $CO_2$  pada prototipe ini menggunakan sensor NDIR (*Non-Dispersive Infrared*), yang bekerja berdasarkan prinsip absorpsi selektif cahaya inframerah sesuai Hukum

Beer-Lambert semakin tinggi konsentrasi gas target, semakin besar atenuasi intensitas cahaya inframerah yang terukur pada panjang gelombang karakteristiknya (Dinh et al., 2016). Prinsip ini telah banyak diterapkan pada prototipe sensor gas berbiaya rendah, termasuk untuk pemantauan  $CO_2$  pada sistem IoT sederhana (Galindo Talhami et al., 2024). Sementara itu, pengukuran  $CH_4$  menggunakan sensor MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) tipe MQ-4, yang bekerja melalui perubahan konduktivitas listrik pada lapisan oksida logam akibat reaksi permukaan dengan gas target (Dey, 2018). Kedua prinsip sensor ini juga menjadi dasar sistem pemantauan kualitas udara berbiaya rendah berbasis mikrokontroler yang telah terbukti bekerja secara praktis dan ekonomis (de Marinho et al., 2024).

Pemilihan sensor *gas analyzer* pada prototipe ini mempertimbangkan tiga rujukan standardisasi yang berbeda cakupan dan tingkat kesesuaiannya. OIML R 99-1 & R 99-2:2008 menetapkan persyaratan metrologis dan teknis bagi instrumen pengukur emisi gas buang kendaraan bermotor berpenggerak bensin (*spark ignition*), dengan rentang pengukuran minimum sebesar 0–16% vol untuk  $CO_2$  dan 0–2.000 ppm vol untuk hidrokarbon (International Organization of Legal Metrology, 2008).,Berikut komponen utama sesuai rujukan di Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Komponen Utama pada Gas Analyzer (International Organization of Legal Metrology, 2008)

| Komponen                                                                            | Deskripsi                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Peraturan                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|  |  <p>NDIR (<i>Non-Dispersive Infrared</i>) dipilih karena mampu mendeteksi konsentrasi 1–100 Vol% dengan prinsip absorpsi selektif cahaya inframerah yang tahan terhadap interferensi gas lain (Dinh et al., 2016)</p> | <p>Berdasarkan SNI , minimal bisa deteksi 1-16 Vol %</p> |

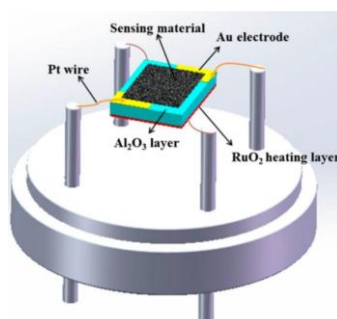
Gambar 2. 5 Sensor  $CO_2$

Tabel 2. 3 Lanjutan Komponen Utama pada Gas Analyzer (International Organization of Legal Metrology, 2008)

| Komponen | Deskripsi | Peraturan |
|----------|-----------|-----------|
|----------|-----------|-----------|



Gambar 2. 7 Sensor  $CH_4$



Gambar 2. 8 Jenis Sensor MOS  
(*Metal Oxide Semiconductor*)

Berdasarkan SNI , Minimal  
0-2000 PPM

Sensor *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) tipe MQ-4 mendeteksi, sensor ini sesuai untuk mengukur emisi gas buang diesel karena resolusi sensor ini yakni(300–10.000 ppm)



Gambar 2. 9 Pompa udara

Pompa udara sebagai mengambil  
sample emisi gas

Berdasarkan SNI , minimal  
bisa deteksi 1-16 Vol %

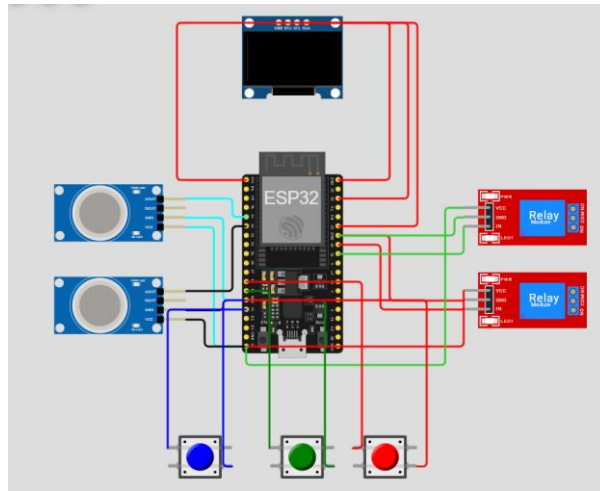
Tabel 2. 3 Lanjutan Komponen Utama pada Gas Analyzer (International Organization of Legal Metrology, 2008)

| Komponen                                                                           | Deskripsi                                                                                                      | Peraturan                            |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|   | Filter <i>penyaring sekaligus menangkap uap air</i>                                                            | Berdasarkan SNI , Minimal 0-2000 PPM |
|  | Tabung besi yang langsung menyentuh objek harus tahan panas dan anti karat dipilih tabung SS (stainless steel) | Wajib tersedia                       |

Gambar 2. 10 Filter

Gambar 2. 11 Probe

Skema koneksi elektrik antar seluruh komponen prototipe *gas analyzer* dengan ESP32 sebagai unit pemrosesan pusat yang menghubungkan sensor NDIR  $CO_2$ , sensor MQ-4  $CH_4$  tombol kontrol, dan LCD Nextion 2,8 inci. Diagram ini diperlukan sebagai acuan fabrikasi PCB dan verifikasi jalur sinyal sebelum perakitan fisik, karena ESP32 memiliki keterbatasan pin analog sehingga membutuhkan konverter ADC eksternal ADS1115 untuk membaca keluaran sensor MQ-4 secara akurat (de Marinho et al., 2024). Sensor  $CO_2$  dihubungkan melalui jalur UART karena mengeluarkan data digital berformat teks, sensor MQ-4 melalui protokol I<sup>2</sup>C via ADS1115, dan sensor DHT22 melalui pin digital *single-wire*, sedangkan LCD Nextion terhubung via UART sekunder agar tidak membebani pemrosesan data utama. Diagram ini dirancang terlebih dahulu menggunakan *platform* simulasi Wokwi sebelum diterjemahkan ke desain PCB, sehingga kesalahan sambungan dapat dideteksi dan diperbaiki sebelum fabrikasi fisik dilakukan.



Gambar 2. 12 Diagram elektrik antar komponen (Dokumentasi Pribadi)

### 2.3.1.3 Life Cycle Assessment (LCA)

*Life Cycle Assessment* (LCA) adalah metode untuk menilai dampak lingkungan suatu produk atau sistem secara menyeluruh sepanjang siklus hidupnya, mulai dari pengambilan bahan baku, proses produksi, distribusi, penggunaan, hingga pembuangan akhir. Dalam konteks kapal, LCA digunakan untuk menghitung emisi gas rumah kaca dari bahan bakar kapal pada tahap *Well-to-Tank* (WtT), *Tank to Wake* (TtW), hingga total *Well to Wake* (WtW). Dengan LCA, kita bisa membandingkan berbagai jenis bahan bakar atau teknologi berdasarkan intensitas emisi yang dihasilkan selama keseluruhan siklus hidupnya (International Maritime Organization, 2024).

- Well-to-Tank* (WtT) : emisi dari ekstraksi/penanaman bahan baku, proses produksi fuel, transport, penyimpanan, sampai bunkering ke kapal.
- Tank to Wake* (TtW) : emisi dari pemakaian fuel di kapal, termasuk pembakaran di mesin/fuel cell dan *slip* atau kebocoran.
- Well to Wake* (WtW) : jumlah WtT + TtW, sehingga menggambarkan emisi siklus hidup penuh dari suatu bahan bakar.

Berikut ini tabel untuk konstanta LCA dari IPCC *Global Warming Potential* (GWP) *Global Temperature Potential* dan dengan yakini proyeksi emisi 20, 50, dan 100 tahun ke depan dari berdasarkan data Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) AR 6 tahun 2021

Tabel 2. 4 Parameter Iklim Gas Rumah Kaca Utama (*Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021*)

| Nama gas        | Rumus           | GWP 20 | GWP 100 | GWP 500 | GTP 50 | GTP 100 |
|-----------------|-----------------|--------|---------|---------|--------|---------|
| Karbon dioksida | CO <sub>2</sub> | 1      | 1       | 1       | 1      | 1       |
| Metana          | CH <sub>4</sub> | 81,2   | 27,9    | 7,95    | 11     | 5,38    |



Berikut ini Rumus untuk LCA diambil contoh GWP 20 tahun

$$g_{CO_2eq(20y)} = (GWP_{CO_2(20y)} \times g_{CO_2}) + (GWP_{CH_4(20y)} \times g_{CH_4}) + GWP_{N_2O(20y)} \times g_{N_2O} \quad (2.4)$$

$g_{CO_2eq(20y)}$  = total massa emisi ekuivalen  $CO_2$  bisa dalam gram, kg, atau ton, untuk Proyeksi waktu 20 tahun.

$g_{CO_2}$  = massa gas  $CO_2$  yang dipancarkan.

$g_{CH_4}$  = massa gas  $CH_4$  (metana) yang dipancarkan.

$g_{N_2O}$  = massa gas  $N_2O$  (dinitrogen oksida/nitrous oxide) yang dipancarkan.

$GWP_{CO_2(20y)} = 1$ , karena  $CO_2$  dipakai sebagai gas acuan (standar) untuk GWP 20 tahun.

$GWP_{CH_4(20y)}$  = faktor yang menyatakan berapa kali  $CH_4$  lebih kuat menimbulkan pemanasan global dibanding  $CO_2$  dalam 20 tahun.

$GWP_{N_2O(20y)}$  = faktor yang menyatakan berapa kali  $N_2O$  lebih kuat menimbulkan pemanasan global dibanding  $CO_2$  dalam 20 tahun.

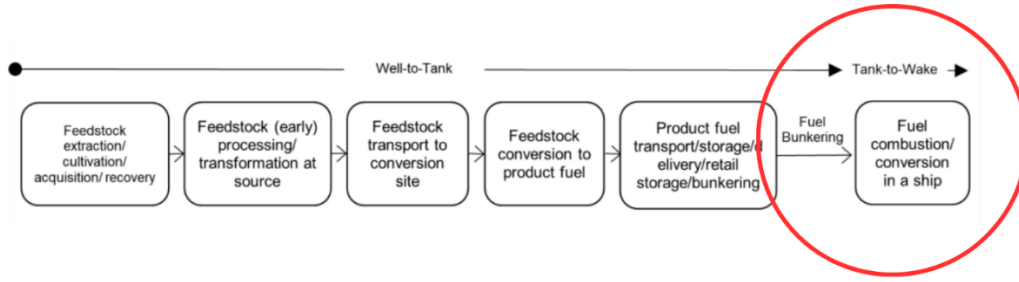
Karena pada penelitian ini fokus pada  $CO_2$  dan  $CH_4$  maka dari itu rumus dipersingkat berikut

$$g_{CO_2eq(20y)} = (GWP_{CO_2(20y)} \times g_{CO_2}) + (GWP_{CH_4(20y)} \times g_{CH_4}) \quad (2.5)$$

$g_{CO_2}$  didapat setelah perhitungan dari rumus 2.10

#### 2.3.1.4 Perhitungan Emisi $CO_2$ dan $CH_4$ Kapal Kondisi *Tank to Wake* (TtW)

Emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  dari kapal merupakan salah satu kontributor utama emisi dari sektor pelayaran. Emisi tersebut terutama berasal dari pembakaran saat kapal beraktivitas. Secara umum, emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  berbanding hampir linier dengan konsumsi bahan bakar, karena jumlah emisi yang terbentuk dipengaruhi langsung oleh kandungan karbon dalam bahan bakar yang dibakar. (International Maritime Organization, 2024) Dalam penelitian ini, besarnya emisi dihitung dengan pendekatan, yaitu dimulai dari aktivitas aktual tiap kapal daya mesin, faktor beban, jenis bahan bakar, dan durasi operasi pada setiap fase pelayaran maupun kegiatan di pelabuhan yang kemudian dikalikan dengan faktor emisi berbasis bahan bakar (Hasil dari pengukuran dari rumus 2.2 dan 2.3).



Gambar 2. 13 Skema *Tank to Wake* ((International Maritime Organization, 2020)

Pendekatan *bottom-up* menghitung emisi berdasarkan aktivitas spesifik kapal yakni rute, kondisi operasi, dan beban mesin, sehingga hasilnya lebih representatif terhadap kondisi operasional aktual dan mampu memberikan resolusi spasial-temporal yang tinggi (Zhang et al., 2025). Berbeda dengan metode *top-down* yang umumnya mengekstrapolasi emisi dari data konsumsi bahan bakar agregat dan lebih sesuai untuk skala global namun kurang presisi secara spasial, *bottom-up* lebih kuat untuk analisis detail di area pelabuhan (Zhang et al., 2025). Fokus perhitungan pada mesin kapal. Pertama melihat kondisi kecepatan kapal, lalu menghitung seberapa besar beban kerja mesin kapal dibandingkan kondisi maksimumnya berdasarkan perbandingan kecepatan aktual kapal terhadap kecepatan desain. (Zhang et al., 2025)

$$LF_m = \frac{P_{actual}}{P_{rated}} \quad (2.6)$$

$LF_m$  : *load factor* (faktor beban) mesin kapal, tidak bersatuan (0–1).

$P_{aktual}$  : daya mesin saat operasi

$P_{rated}$  : daya maksimum daya terpasang mesin

$$EF_f = \frac{EF_m}{SFOC} \quad (2.7)$$

$EF_f$ : faktor emisi berbasis bahan bakar (g ( $CO_2$  dan  $CH_4$ ) /g fuel)

$EF_m$ : faktor emisi berbasis energi (g ( $CO_2$  dan  $CH_4$ ) //kWh) yang dipakai di rumus emisi .

$SFOC$ : *Specific Fuel Oil Consumption* mesin utama (g fuel/kWh).

Perhitungan emisi pada mesin kapal

$$E = P \times LF \times T \times EF \quad (2.8)$$

$E$  : emisi dari mesin kapal ( g ( $CO_2$  dan  $CH_4$ ) ).

$P$  : daya terpasang mesin kapal (kW).

$LF$  : *load factor* mesin pada rumus 2.5.

$T$ : waktu operasi kapal pada kondisi tersebut (jam).

$EF$  : faktor emisi gas (g/kWh), sumber dari persamaan (2.2).

Total emisi kapal di masukkan pada Life Cycle Assesment persamaan 2.4 untuk proyeksi 20 tahun

### 2.3.2 Skenario Dasar Teoritis Kalkulasi *Emission factor* Bahan Bakar Biodiesel

Sub-bab ini membahas dasar teori perhitungan *emission factor* (EF) untuk bahan bakar campuran biodiesel (B35 dan B40) yang digunakan dalam penelitian ini mencakup tahapan konversi data spesifikasi bahan bakar hingga diperoleh nilai emisi per satuan massa bahan bakar (g emisi/g fuel). Pembahasan dasar teori ini diperlukan karena *emission factor* bahan bakar campuran tidak dapat diambil langsung dari nilai baku bahan bakar tunggal (diesel murni atau FAME murni), melainkan harus dihitung melalui serangkaian tahap konversi dan pembobotan yang saling bergantung satu sama lain mulai dari konversi volume ke massa dan energi, penentuan energy share sebagai dasar pembobotan, hingga pemisahan kontribusi karbon fosil dan biogenik sesuai prinsip *Life Cycle Assessment* (LCA) *Tank to Wake*. Tanpa pemahaman menyeluruh terhadap rangkaian tahap ini, hasil perhitungan emisi bahan bakar campuran berisiko menghasilkan nilai yang tidak akurat atau tidak dapat dipertanggungjawabkan secara metodologis. Oleh karena itu, dasar teori ini disusun secara berjenjang mengikuti alur perhitungan sub bab di bawah

#### 2.3.2.1 Data Spek Biodiesel

Data spesifikasi bahan bakar berupa densitas, nilai kalor (NCV), dan *emission factor* merupakan data dasar yang harus tersedia sebelum emisi dari bahan bakar campuran dapat dihitung secara sistematis. Hal ini diperlukan karena diesel dan FAME (biodiesel) memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda secara signifikan diesel memiliki densitas lebih rendah namun nilai kalor lebih tinggi dibanding FAME, sehingga keduanya tidak dapat diasumsikan setara dalam perhitungan energi maupun emisi. Ketidaktepatan dalam menetapkan data dasar ini akan merambat menjadi kesalahan sistematis pada seluruh tahap perhitungan berikutnya, mengingat setiap tahap kalkulasi *emission factor* bersifat berjenjang dan saling bergantung. Data ini umumnya diperoleh dari basis data properti bahan bakar yang telah terverifikasi secara internasional, seperti *Alternative Fuels Data Center* (AFDC) untuk sifat fisik bahan bakar, serta pedoman inventarisasi emisi gas rumah kaca dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) untuk faktor emisi baku tiap jenis bahan bakar (AFDC, 2024; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

Tabel 2. 5 Data Spesifikasi Biodiesel (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006)

| Parameter                             | Diesel | FAME   |
|---------------------------------------|--------|--------|
| Density kg/m <sup>3</sup> (kg/L)      | 860    | 875    |
| NCV (Net Calorific Value) MJ/kg       | 42,7   | 27     |
| CO <sub>2</sub> emission factor kg/TJ | 74.100 | 70.800 |
| CH <sub>4</sub> emission factor kg/TJ | 10,4   | 10     |

Tabel 2. 5 ini sebagai fondasi data kuantitatif yang menjadi rujukan bagi seluruh persamaan pada tahap-tahap selanjutnya. Karena posisinya sebagai *output* dasar, validitas dan akurasi seluruh rangkaian kalkulasi *emission factor* campuran mulai dari perhitungan massa, energi, energy share, hingga *emission factor* akhir per gram bahan bakar sepenuhnya bergantung pada ketepatan data pada tahap ini. Oleh karena itu, pemilihan sumber data yang kredibel dan telah tervalidasi secara internasional menjadi krusial untuk menjaga keandalan hasil penelitian secara keseluruhan.

### 2.3.2.2 Komposisi Bahan Bakar (*Volume Share*)

Komposisi bahan bakar berupa proporsi volume diesel dan FAME perlu ditetapkan sejak awal karena bahan bakar biodiesel seperti B35 dan B40 secara definisi langsung merepresentasikan persentase volume biodiesel yang dicampurkan ke dalam diesel murni. Penetapan proporsi ini penting karena seluruh perhitungan massa dan energi pada tahap selanjutnya bergantung sepenuhnya pada nilai volume share ini sebagai variabel pembobot dasar. Proporsi campuran ini bukan angka yang ditentukan sembarangan, melainkan mengikuti standar regulasi biofuel yang berlaku secara internasional maupun nasional, termasuk pedoman dari Organisasi Maritim Internasional (IMO) terkait penggunaan biofuel pada kapal, yang menetapkan definisi dan batasan campuran biodiesel yang diizinkan untuk digunakan pada sektor pelayaran (International Maritime Organization, 2023).

$$V_{diesel} = 1 - x_{FAME} \quad (2.9)$$

$V_{diesel}$  = volume share diesel (fraksi, 0–1)

$x_{FAME}$  = persentase biodiesel sesuai bahan bakar (B35 = 0,35; B40 = 0,40)

$$V_{FAME} = x_{FAME} \quad (2.10)$$

$V_{FAME}$  = volume share FAME/biodiesel (fraksi, 0–1)

Pada persamaan 2.9 dan 2.10 Volume share menjadi variabel pembobot paling mendasar dalam seluruh rangkaian perhitungan *emission factor* campuran, karena nilai inilah yang pertama kali dikalikan dengan densitas komponen untuk memperoleh massa, dan pada akhirnya menentukan proporsi energi yang disumbangkan tiap komponen bahan bakar (Korean Register, 2023).

### 2.3.3 Perhitungan Massa dan Energi

Konversi volume bahan bakar menjadi massa dan energi merupakan langkah yang tidak dapat dihindari dalam perhitungan *emission factor*, karena data konsumsi bahan bakar kapal di lapangan umumnya dicatat dalam satuan volume (liter), sementara *emission factor* baku yang tersedia di literatur dinyatakan dalam satuan energi (kg/TJ). Tanpa konversi ini, kedua besaran tidak dapat dipertemukan secara matematis. Proses konversi dilakukan secara bertahap: volume dikalikan densitas untuk memperoleh massa, kemudian massa dikalikan nilai kalor (NCV) untuk memperoleh kandungan energi. Pendekatan bertahap ini konsisten dengan metodologi inventarisasi emisi bahan bakar yang direkomendasikan IPCC, yang menekankan pentingnya basis energi (bukan volume atau massa semata) dalam perhitungan emisi pembakaran bahan bakar (IPCC, 2006).

$$m_i = V_i \times \rho_i \quad (2.11)$$

$$E_i = m_i \times NCV_i \quad (2.12)$$

$$m_{total} = \sum_i m_i ; E_{total} = \sum_i E_i \quad (2.13)$$

$m_i$  = massa komponen  $i$  (kg/L)

$\rho_i$  = densitas komponen  $i$  (kg/L)

$E_i$  = energi komponen  $i$  (MJ/L)

$NCV_i$  = nilai kalor komponen  $i$  (MJ/kg)

$i$  = diesel atau FAME

$m_{total}, E_{total}$  = total massa/energi campuran per liter bahan bakar

Persamaan 2.11 sampai 2.13 ini merupakan titik peralihan penting dari basis volume ke basis energi, yang menjadi prasyarat mutlak sebelum *emission factor* campuran dapat dihitung pada tahap selanjutnya. Hasil dari tahap ini yaitu energi masing-masing komponen dan total energi campuran akan langsung digunakan untuk menghitung energy share pada tahap berikutnya, sehingga akurasi perhitungan massa dan energi di sini menentukan ketepatan pembobotan emisi tiap komponen bahan bakar

### 2.3.4 NCV Blend dan Energy Share

NCV (*Net Calorific Value*) nilai kalor bersih bahan bakar, yaitu jumlah energi yang dihasilkan per satuan massa saat bahan bakar dibakar sempurna, tidak termasuk panas laten uap air hasil pembakaran. Hal ini penting karena emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran pada dasarnya sebanding dengan jumlah energi yang dilepaskan, bukan volume atau massa bahan

bakar yang terbakar prinsip ini menjadi dasar mengapa pembobotan berbasis energi (bukan volume) digunakan dalam standar perhitungan emisi bahan bakar campuran. Sementara itu, NCV blend sebaiknya tidak hanya diestimasi secara teoritis melalui rata-rata tertimbang energi komponen, melainkan divalidasi melalui pengujian laboratorium langsung menggunakan metode standar seperti ASTM Laboratorium DRPM ITS,

**Hasil Pengujian**

| No. | Nama Contoh | Jenis Uji      | Hasil | Satuan | Metode Pengujian |
|-----|-------------|----------------|-------|--------|------------------|
| 1.  | B35         | Kadar Belerang | 0,006 | %, b/b | SNI 7431:2015    |
|     |             | CCR            | 0,010 | %      | ASTM D 189-97    |
|     |             | LHV            | 42,77 | MJ/Kg  | ASTM D 240       |
| 2.  | B40         | Kadar Belerang | 0,013 | %, b/b | SNI 7431:2015    |
|     |             | CCR            | 0,006 | %      | ASTM D 189-97    |
|     |             | LHV            | 42,76 | MJ/Kg  | ASTM D 240       |

Gambar 2. 14 Data Pengujian NCV (Dokumentasi Pribadi)

$$ES_i = \frac{E_i}{E_{total}} \quad (2.14)$$

$$NCV_{blend} = NCV_{uji\ lab} \quad (2.15)$$

$ES_i$  = energy share komponen  $i$  (fraksi, 0–1), dengan  $\sum ES_i = 1$

$E_i, E_{total}$  = energi komponen dan total energi dari Persamaan (2.12)–(2.13)

$NCV_{blend}$  = nilai kalor bahan bakar campuran, diambil dari hasil uji laboratorium, bukan estimasi teoritis pencampuran

*Energy Share* ( $ES_i$ ) proporsi kontribusi energi satu komponen terhadap energi total campuran bahan bakar, energi ini menjadi bobot utama yang menentukan seberapa besar kontribusi masing-masing komponen bahan bakar terhadap *emission factor* campuran pada tahap selanjutnya, sedangkan NCV blend menjadi faktor konversi krusial pada tahap akhir perhitungan (energi ke massa per gram bahan bakar) (Korean Register, 2023). Data NCV blend melalui pengujian laboratorium, alih-alih hanya mengandalkan estimasi teoritis, terbukti penting karena nilai kalor aktual hasil pengujian dapat berbeda dari hasil estimasi teoritis pencampuran volumetrik sederhana sebagaimana ditemukan pada data B35 dan B40 penelitian ini, di mana LHV hasil uji laboratorium pada Gambar 2.15 (42,77 dan 42,76 MJ/kg) ternyata jauh lebih mendekati nilai kalor diesel murni dibanding estimasi teoritis pencampuran energi (~37 MJ/kg). Hal ini menegaskan pentingnya validasi empiris dalam penelitian berbasis pengukuran nyata.

### 2.3.5 Emission factor Blend

Kalkulasi *emission factor* campuran dilakukan untuk memperoleh nilai representatif emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  dari bahan bakar campuran B35 dan B40, karena *emission factor* bahan bakar tunggal (diesel murni atau FAME murni) tidak dapat langsung diterapkan pada campuran keduanya. Perhitungan dilakukan dengan membobot *emission factor* tiap komponen berdasarkan *energy share* yang telah dihitung sebelumnya, sekaligus memisahkan kontribusi karbon fosil dan karbon biogenik sesuai prinsip *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan batasan *Tank to Wake* (TtW). Pemisahan ini penting karena  $CO_2$  dan  $CH_4$  yang berasal dari pembakaran komponen biodiesel (FAME) berasal dari karbon biomassa yang telah menyerap  $CO_2$  dan  $CH_4$  dari atmosfer selama masa pertumbuhannya, sehingga secara konvensi dianggap netral karbon dalam siklus jangka pendek, berbeda dengan pembakaran diesel fosil yang merupakan penambahan neto karbon ke atmosfer (ClassNk, 2023).

$$EF_{blend} = \sum_i (E S_i \times EF_i) \quad (2.16)$$

$$EF_{CO_2, fossil} = ES_{diesel} \times EF_{CO_2, diesel} \quad (2.17)$$

$EF_{blend}$  = *emission factor* campuran ( $CO_2$  total atau  $CH_4$ ), kg/TJ

$EF_i$  = *emission factor* komponen  $i$  (Tabel 2.5)

$EF_{CO_2, fossil}$  = *emission factor* emisi dari komponen fosil saja

Persamaan 2.16 dan 2.17 merupakan inti dari pendekatan LCA *Tank to Wake* yang digunakan dalam penelitian ini, karena secara eksplisit memisahkan emisi yang dihitung sebagai kontribusi gas rumah kaca. Pemisahan ini memiliki implikasi signifikan terhadap hasil akhir penelitian, karena penggunaan bahan bakar campuran biodiesel yang lebih tinggi B40 dibanding B35 akan menunjukkan penurunan *emission factor* pada gas emisi yang lebih besar, sehingga metode perhitungan ini menjadi dasar kuantitatif untuk mengevaluasi efektivitas substitusi bahan bakar alternatif dalam menurunkan emisi gas rumah kaca kapal.

### 2.3.6 Konversi kg/TJ ke g Emisi/g Fuel

Konversi *emission factor* dari satuan kg/TJ ke g/kWh diperlukan karena performa dan konsumsi bahan bakar mesin diesel di kapal umumnya diukur dan dilaporkan berdasarkan energi output dalam kWh, bukan dalam satuan energi *output* bahan bakar (TJ). Tanpa konversi ini, *emission factor* hasil perhitungan tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan data operasional mesin di lapangan, seperti *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) yang dinyatakan dalam gram bahan bakar per kWh. Konversi ini murni bersifat transformasi satuan energi, menggunakan hubungan baku bahwa 1 TJ setara dengan 277.777,78 kWh, tanpa mengubah nilai fisis emisi yang sebenarnya (International Maritime Organization, 2021).

$$EF_{(g/kWh)} = \frac{EF_{(kg/TJ)}}{277.778} \times 1000 \quad (2.18)$$

faktor konversi (1 TJ = 277.777,78 kWh)

Konversi satuan ini menjadi jembatan yang menghubungkan hasil perhitungan berbasis energi bahan bakar dengan kebutuhan analisis performa mesin berbasis kWh. Persamaan 2.18 ini juga menjadi prasyarat teknis sebelum *emission factor* dapat dikonversi lebih lanjut menjadi satuan per gram bahan bakar pada tahap akhir. Persamaan 2.19 menghasilkan *emission factor* dalam satuan gram emisi per gram bahan bakar, yang merupakan bentuk paling praktis untuk diterapkan pada data konsumsi bahan bakar aktual kapal yang umumnya dicatat dalam satuan massa (kg fuel/tahun atau kg fuel/perjalanan). Dengan tersedianya *emission factor* dalam satuan ini, total emisi tahunan kapal dapat dihitung secara langsung tanpa memerlukan konversi tambahan, menjadikan nilai ini sebagai variabel kunci dalam penyusunan *Baseline Actual Value* (BAV) emisi kapal pada kondisi *Business As Usual* (BAU), yang selanjutnya menjadi dasar perbandingan terhadap skenario bahan bakar alternatif (ClassNK, 2023).

$$NCV_{(kWh/g)} = \frac{NCV_{blend} (MJ/kg)}{3600} \quad (2.19)$$

$$EF_{(g/g \text{ fuel})} = EF_{(g/kWh)} \times NCV_{(kWh/g)} \quad (2.20)$$

$NCV_{(kWh/g)}$  = nilai kalor bahan bakar dalam satuan kWh per gram

3600 = faktor konversi MJ ke kWh (1 kWh = 3,6 MJ), sekaligus kg → g pada penyebut

$EF_{(g/g \text{ fuel})}$  = *emission factor* akhir per gram bahan bakar

Nilai *emission factor* akhir dalam satuan g emisi/g fuel merupakan hasil kumulatif dari seluruh tahap perhitungan sebelumnya mulai dari data spesifikasi bahan bakar, komposisi campuran, konversi massa energi, *energy share*, hingga *emission factor* blend dan konversi satuan. Nilai inilah yang secara langsung dikalikan dengan total konsumsi bahan bakar aktual kapal untuk menghasilkan estimasi total emisi tahunan (BAV)

### 2.3.7 Metode Riset Operasi Pemilihan Bahan Bakar Pengurangan Emisi

*Analytic Hierarchy Process* (AHP) merupakan metode pengambilan keputusan multikriteria yang menghasilkan bobot prioritas kriteria melalui *pairwise comparison* dan uji konsistensi (Chaube et al., 2024). Namun, AHP sendiri tidak dirancang untuk meranking alternatif secara langsung, sehingga dalam penerapannya AHP umum diintegrasikan dengan metode perankingan lain seperti *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*



(PROMETHEE), dan *Elimination and Choice Expressing Reality* (ELECTRE). Ketiga metode ini berfungsi sebagai tahap perankingan alternatif setelah bobot kriteria diperoleh dari AHP, tetapi menggunakan prinsip perhitungan yang berbeda (Wardana et al., 2022; Tran et al., 2024). Perbandingan ketiga metode integrasi ini diperlukan karena pemilihan metode perankingan yang tepat akan memengaruhi validitas dan interpretasi hasil riset operasi, mengingat setiap metode memiliki asumsi, kebutuhan data, dan tingkat kompleksitas komputasi yang berbeda, sehingga metode yang cocok untuk satu kasus belum tentu sesuai untuk kasus lain (Chaube et al., 2024). Pada penelitian pemilihan bahan bakar, karakteristik data (kuantitatif/kualitatif), jumlah alternatif, dan kebutuhan interpretasi hasil menjadi pertimbangan utama dalam menentukan metode perankingan yang paling sesuai (Costa et al., 2023).

Secara teknis, AHP-TOPSIS bekerja dengan menjadikan bobot AHP sebagai bobot kriteria, kemudian menghitung kedekatan geometris setiap alternatif terhadap solusi ideal positif dan ideal negatif, menghasilkan skor tunggal berupa *closeness coefficient* (Costa et al., 2023; Tran et al., 2024). AHP-PROMETHEE menggunakan fungsi preferensi berpasangan antar-alternatif untuk setiap kriteria, lalu menghitung arus keunggulan positif dan negatif (*outranking flow*) sebagai dasar perankingan alternatif (Wardana et al., 2022). Sementara itu, AHP-ELECTRE bekerja berdasarkan konsep *outranking* melalui uji konkordansi (kesepakatan) dan diskordansi (ketidaksepakatan) antar-alternatif, sehingga menghasilkan hubungan keunggulan yang tidak selalu berupa peringkat tegas (Govindan & Jepsen, 2016).

Tabel 2. 6 Perbandingan Metode Integrasi AHP-TOPSIS, AHP-PROMETHEE, dan AHP-ELECTRE (Costa et al., 2023; Tran et al., 2024; Wardana et al., 2022; Govindan & Jepsen, 2016)

| Aspek              | AHP-TOPSIS                                                         | AHP-PROMETHEE                                                  | AHP-ELECTRE                                                                                  |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prinsip            | Melihat seberapa dekat tiap opsi ke "opsi paling ideal"            | Membandingkan opsi satu-satu berpasangan pakai aturan tertentu | Mengecek seberapa kuat bukti yang mendukung vs menentang satu opsi lebih baik dari opsi lain |
| Output             | Satu angka jelas per opsi langsung bisa diurutkan rangking 1, 2, 3 | Bisa dapat urutan lengkap, atau kadang cuma sebagian           | Bisa jadi hasilnya "dua opsi ini nggak bisa dibandingkan" — bukan rangking pasti             |
| Parameter tambahan | Minimal (hanya bobot AHP)                                          | Fungsi preferensi + ambang                                     | Ambang konkordansi-diskordansi                                                               |
| Kompleksitas       | Rendah                                                             | Sedang-tinggi                                                  | Tinggi                                                                                       |
| Cocok untuk        | Data kuantitatif                                                   | Hubungan non-linear                                            | Data tak pasti                                                                               |
| Parameter tambahan | Minimal (hanya bobot AHP)                                          | Fungsi preferensi + ambang                                     | Ambang konkordansi-diskordansi                                                               |

Penelitian ini memilih AHP-TOPSIS dibanding AHP-PROMETHEE atau AHP-ELECTRE karena tiga alasan: hasilnya jelas dan pasti berupa satu angka per bahan bakar yang langsung bisa diurutkan berbeda dari ELECTRE yang hasilnya tidak bisa dibandingkan, datanya berupa angka pasti hasil pengukuran langsung sehingga cocok dengan cara kerja TOPSIS yang mengukur jarak ke opsi paling ideal, dan TOPSIS tidak memerlukan aturan

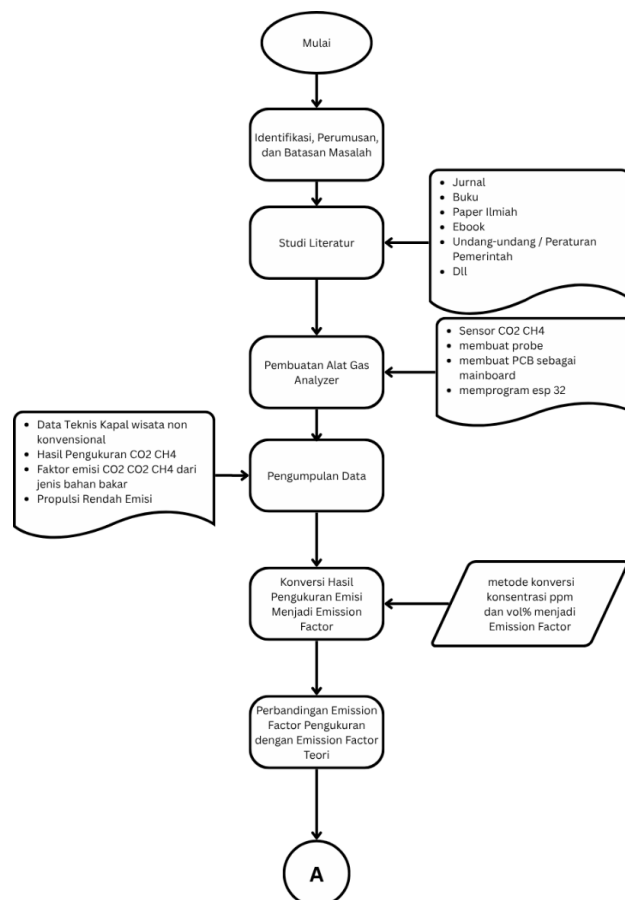
tambahan yang harus ditentukan sendiri oleh peneliti seperti pada PROMETHEE atau ELECTRE, sehingga meminimalkan unsur subjektif dan cukup mengandalkan bobot kriteria yang telah diperoleh dari tahap AHP.

## BAB 3

### METODOLOGI

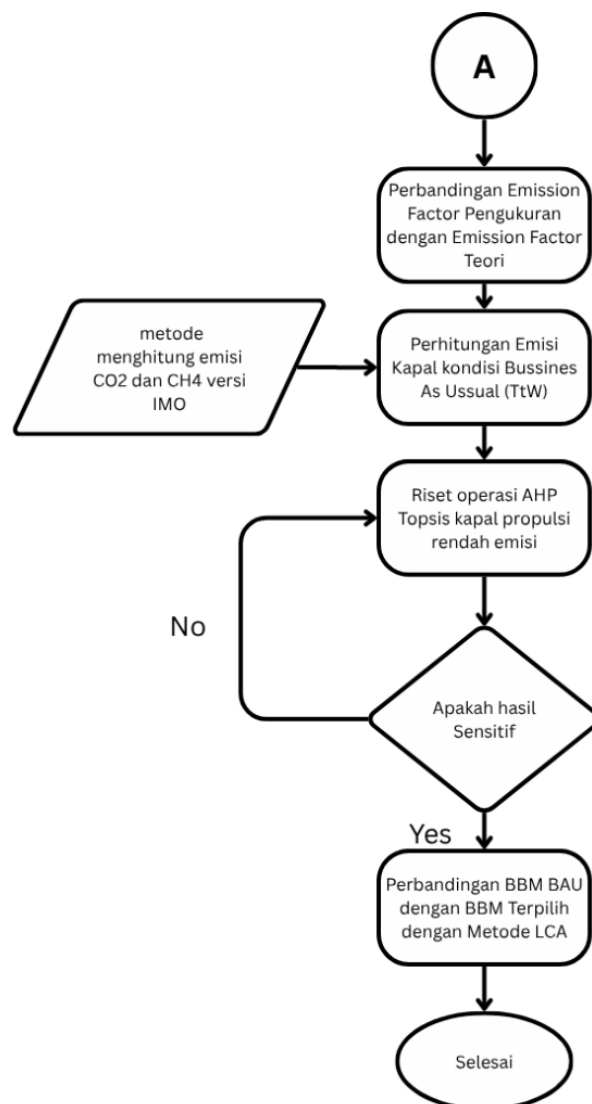
#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini menjelaskan tahapan kajian penurunan emisi gas yakni  $CO_2$  dan  $CH_4$  kapal non konvensional di pantai kenjeran, Surabaya. Penelitian diawali pada Gambar 3.1 bagian pertama menampilkan enam tahap awal alur penelitian dari identifikasi masalah hingga perbandingan *emission factor* pengukuran dengan teori, yang berakhir di node A sebagai penghubung ke bagian kedua. Urutan tahapan ini dirancang secara berprasyarat karena setiap *output* menjadi *output* tahap berikutnya prototipe tidak dapat digunakan untuk pengukuran lapangan sebelum terverifikasi, dan *emission factor* tidak dapat dihitung sebelum data konsentrasi gas tersedia (de Marinho et al., 2024). Penelitian diawali dengan identifikasi dan pembatasan masalah, dilanjutkan studi literatur dari jurnal, regulasi IMO, dan peraturan pemerintah, kemudian pembuatan prototipe gas analyzer mencakup fabrikasi probe, PCB, dan pemrograman ESP32, lalu pengumpulan data teknis kapal dan hasil pengukuran  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada tiga jenis bahan bakar. Data konsentrasi gas mentah (ppm dan vol%) selanjutnya dikonversi menjadi *emission factor* menggunakan metode neraca massa karbon sesuai Persamaan 2.2 dan 2.3, dan hasilnya dibandingkan dengan nilai teoritis sebagai validasi sebelum digunakan pada analisis lanjutan.



Gambar 3. 1 Skema Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 bagian kedua melanjutkan alur dari node A dengan tahapan perhitungan emisi BAU, riset operasi AHP-TOPSIS, uji sensitivitas, dan perbandingan LCA sebagai tahap penutup penelitian. Perhitungan emisi kapal pada kondisi *Business as Usual* fokus(*Tank to Wake*) dilakukan menggunakan metode IMO berbasis *emission factor* yang telah divalidasi, menghasilkan BAV sebagai titik referensi yang akan dibandingkan dengan skenario bahan bakar alternatif (International Maritime Organization, 2024). Hasil AHP-TOPSIS kemudian diuji melalui analisis sensitivitas apabila peringkat berubah saat bobot divariasikan (sensitif/No), proses kembali ke tahap AHP-TOPSIS untuk evaluasi ulang, sedangkan apabila peringkat stabil (tidak sensitif/Yes), penelitian dilanjutkan ke tahap berikutnya (Costa et al., 2023). Tahap akhir adalah perbandingan emisi BBM BAU dengan BBM terpilih menggunakan metode LCA *Tank to Wake* untuk mengkuantifikasi penurunan emisi  $CO_2e$  dari skenario B35 dan B40 terhadap *baseline* B0 (International Maritime Organization, 2024).



Gambar 3. 1 Lanjutan Skema Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Studi Literatur

Studi literatur pada penelitian ini dilakukan untuk memperoleh landasan teoritis terkait upaya penurunan emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  kapal di Pantai Kenjeran. Kajian pustaka dihimpun dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, buku teks, laporan penelitian, *e-book*, peraturan IMO maupun regulasi pemerintah yang berkaitan dengan standar emisi dan efisiensi energi pada sektor maritim. Literatur yang dikaji mencakup konsep emisi kapal pada kondisi *business as usual* (BAU). Selain itu, ditelaah pula teori mengenai faktor emisi, metode konversi konsentrasi gas buang menjadi *emission factor*, serta pendekatan *life cycle assessment* (LCA) untuk menilai dampak lingkungan secara menyeluruh. Studi literatur juga mencakup referensi tentang prinsip kerja Propulsi rendah emisi untuk diterapkan kapal. Hasil studi literatur ini menjadi acuan dalam penyusunan kerangka berpikir, perumusan variabel penelitian, serta pengembangan metode analisis yang digunakan dalam tugas akhir ini.

### 3.3 Lokasi dan Objek Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di Pantai Kenjeran, Surabaya, dengan objek penelitian berupa kapal non konvensional yang beroperasi menempuh rute touring dari dermaga keberangkatan, berkeliling area pantai, hingga kembali ke dermaga, pada kondisi *business as usual* (BaU). Pemilihan lokasi dan objek ini penting dilakukan karena Pantai Kenjeran merupakan salah satu kawasan nelayan di Surabaya dengan populasi kapal wisata non konvensional yang cukup signifikan namun belum banyak dikaji dari aspek emisi gas buangnya, sementara kesediaan operator kapal untuk pemasangan alat ukur pada cerobong mesin selama siklus operasi penuh menjadikan lokasi ini memungkinkan untuk pengambilan data lapangan secara langsung dan berkelanjutan. Penelitian dilaksanakan dengan memasang prototipe alat ukur emisi pada cerobong mesin kapal uji, kemudian melakukan pengamatan terhadap data teknis kapal, data operasional saat sandar, serta besaran emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  yang dihasilkan sepanjang siklus operasi kapal mulai dari keberangkatan, touring, hingga kembali ke dermaga.

### 3.4 Data dan Sumber Data

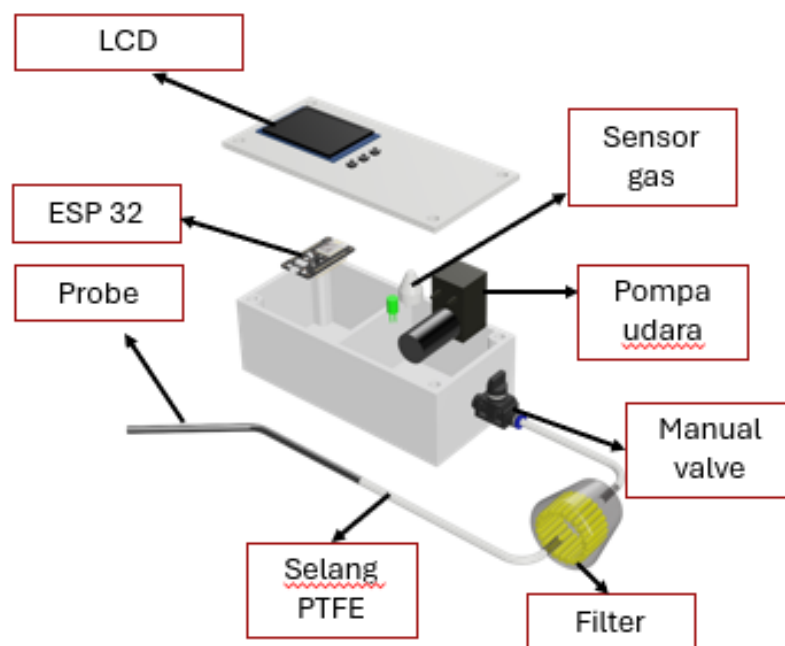
Pengumpulan data dalam penelitian ini diarahkan untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai karakteristik teknis kapal, besaran emisi yang dihasilkan, serta acuan regulasi yang relevan sebagai dasar analisis. Data - data tersebut diperlukan karena perhitungan *emission factor*, perbandingan emisi *Business as Usual*, serta evaluasi bahan bakar alternatif pada bab-bab selanjutnya membutuhkan data primer hasil pengukuran lapangan maupun data sekunder dari literatur dan regulasi sebagai pembanding. Proses pengumpulannya dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu pengambilan data primer langsung dari kapal uji menggunakan prototipe alat ukur emisi, serta penelusuran data sekunder dari buku, jurnal atau *paper* ilmiah, laporan kajian studi, laporan tahunan perusahaan, regulasi atau peraturan pemerintah, keputusan pemerintah, serta informasi dari situs resmi instansi dan perusahaan terkait. Data-data yang diperlukan dalam penelitian ini dapat dikelompokkan sebagai berikut.

1. Data teknis kapal meliputi dimensi kapal, spesifikasi mesin, dan jenis bahan bakar yang digunakan. Pengujian diwakilkan oleh 1 kapal untuk menentukan *emission factor*.
2. Data hasil pengukuran emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada cerobong mesin kapal.

3. Data faktor emisi dari berbagai jenis bahan bakar kapal.
4. Data regulasi dan peraturan pemerintah IMO, EPA terkait batas emisi, efisiensi energi, dan kebijakan dekarbonisasi sektor maritim.
5. Data pendukung lain yang berkaitan dengan penerapan BBM.
6. Data pendukung lain yang berkaitan dengan dengan penerapan BBM

### 3.5 Rancangan Pembuatan Alat

Penelitian ini merancang dan membangun sebuah prototipe *gas analyzer* portabel yang berfungsi mengukur konsentrasi  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada gas buang mesin kapal secara *real time*, sebagai instrumen utama untuk memperoleh data emisi yang menjadi dasar seluruh perhitungan *emission factor* dan evaluasi kinerja lingkungan pada bab-bab selanjutnya. Perancangan alat ini menjadi krusial karena data emisi lapangan yang akurat dan konsisten hanya dapat diperoleh melalui instrumen ukur yang andal, sementara alat ukur emisi profesional pada umumnya berukuran besar, mahal, dan tidak praktis dipasang pada kapal non konvensional berskala kecil, sehingga dibutuhkan solusi prototipe yang portabel namun tetap memenuhi kaidah pengukuran yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Proses perancangannya dilakukan dengan terlebih dahulu menyusun dan menyimulasikan rangkaian sistem menggunakan *platform* Wokwi sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.12, sebelum direalisasikan dalam bentuk desain tiga dimensi pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 3D Design Gas Analyzer

#### 3.5.1 Arsitektur Sistem dan Alur Kerja (*System Architecture*)

Sub-bab ini menjabarkan arsitektur sistem prototipe *gas analyzer*, yaitu susunan komponen perangkat keras dan alur kerja perangkat lunak yang membentuk satu kesatuan

sistem pengukuran emisi *on-board* berbasis mikrokontroler ESP32. Arsitektur ini perlu dirancang secara sistematis agar proses pengambilan sampel gas buang, pembacaan sensor, hingga penyimpanan data dapat berjalan secara otomatis dan terintegrasi tanpa memerlukan intervensi manual yang berlebihan selama kapal beroperasi, sekaligus menjaga agar sinyal yang terbaca benar-benar merepresentasikan kondisi gas buang aktual dan bukan gangguan (*noise*) dari lingkungan pengukuran. Realisasinya dilakukan dengan menyusun *coding* menggunakan bahasa C++ pada perangkat lunak Wokwi mengacu pada Gambar 2.12 untuk mensimulasikan prototipe sebelum diimplementasikan pada Arduino IDE, dengan alur kerja sistem sebagai berikut:

1. Gas buang diambil melalui *probe* pada saluran buang mesin kapal, kemudian dialirkan menggunakan pompa udara 12 VDC menuju ruang sensor.
2. Sampel gas melewati unit *conditioning* dengan filtrasi partikel sebagai kontrol kualitas utama, untuk menstabilkan kondisi gas dan menjaga integritas sampel sebelum masuk ke sensor.
3. Konsentrasi  $CO_2$  dibaca oleh sensor berbasis NDIR (0–100% vol), sedangkan konsentrasi  $CH_4$  dibaca oleh sensor MQ-4 berbasis MOS (300–10.000 ppm), secara paralel dan kontinu.
4. Sinyal keluaran kedua sensor dikuatkan oleh rangkaian *amplifier*, kemudian dikonversi dari domain analog ke digital melalui modul ADS1115 (ADC 16-bit, 4-channel) sebelum dikirim ke ESP32.
5. ESP32 berperan sebagai pengendali pusat yang mengolah data konsentrasi, menampilkan hasil pembacaan pada LCD Nextion 2,8", mengaktifkan pompa udara melalui *driver* MOSFET, serta memicu buzzer sebagai indikator peringatan apabila konsentrasi melebihi ambang batas yang ditentukan.

### 3.5.2 Perancangan Sistem Pengambilan Sampel (*Sampling System*)

Bagian ini merancang prosedur pengujian pengambilan sampel (*sampling system*) yang bertujuan memastikan bahwa sensor  $CO_2$  (NDIR) dan sensor  $CH_4$  (MQ-4) yang digunakan, meskipun sudah dalam kondisi *calibrated* dari pabrikan, tetap menghasilkan data yang terpercaya dan valid ketika diaplikasikan pada kondisi pengukuran lapangan yang sesungguhnya. Pengujian tambahan ini diperlukan karena kalibrasi bawaan sensor dilakukan pada kondisi laboratorium ideal, sedangkan kondisi operasional di kapal getaran mesin, fluktuasi suhu, kelembapan gas buang, serta potensi kebocoran pada jalur *sampling* dapat menyebabkan penyimpangan pembacaan yang tidak tertangkap oleh kalibrasi pabrik semata, sehingga tanpa verifikasi tambahan hasil pengukuran berisiko tidak representatif atau bias. Prosedur verifikasinya mengacu pada (International Organization of Legal Metrology, 2008) dan terdiri dari empat pengujian:

1. *Zero test* memastikan bahwa saat diberi gas nol/udara bersih, bacaan sensor  $CO_2$  dan  $CH_4$  mendekati nol
2. *Repeatability test* mengecek konsistensi hasil pembacaan sensor saat mengukur gas yang sama secara berulang pada kondisi yang sama.

3. *Drift test* melihat apakah pembacaan sensor bergeser seiring waktu selama alat beroperasi.

$$\text{Deviasi (\%)} = \frac{|x_{(ukur)} - x_{(referensi)}|}{x_{(referensi)}} \times 100\% \quad (3.1)$$

$x_{ukur}$  = hasil pengukuran emisi dari alat

$x_{referensi}$  = hasil perhitungan atau nilai acuan/referensi (bisa dari alat uji Lab)

$|x_{ukur} - x_{referensi}|$  = selisih absolut antara hasil ukur dan hasil referensi

= persen deviasi relatif terhadap nilai referensi

hasil pengujian tersebut kemudian dibandingkan antara alat referensi profesional dan prototipe menggunakan rumus deviasi persen (Persamaan 3.1). Penelitian (Pang et al, 2021) dalam mengungkap adanya perbedaan signifikan antara hasil uji alat di lapangan dengan model emisi teoritis standar (seperti model NONROAD US EPA dan Pedoman Nasional Tiongkok), di mana pendekatan teoritis tersebut terbukti ekitar 75% hasil uji langsung untuk gas CO, HC, dan NO menunjukkan angka yang lebih rendah dari teori (artinya teori mengalami *overestimate*), sedangkan untuk polutan PM<sub>2,5</sub> hasil riilnya justru jauh lebih tinggi (artinya teori mengalami *underestimate*) penggunaan faktor emisi lokal berbasis bahan bakar hasil pengukuran langsung di dunia nyata sangat mutlak diperlukan demi membangun inventarisasi emisi yang akurat maka dari itu perbedaan besar adalah hal yang diwajarkan

### 3.5.3 Perancangan Akuisisi Data

Sub-bab ini merancang sistem akuisisi data (*data acquisition system*) yang bertugas mengintegrasikan pembacaan sensor CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> dengan mikrokontroler ESP32 sehingga data emisi hasil pengukuran dapat direkam, diberi penanda waktu (*timestamp*), dan disimpan secara otomatis selama kapal beroperasi. Perancangan ini penting dilakukan karena pengujian emisi di kapal berlangsung sepanjang siklus operasi mulai dari keberangkatan, touring, hingga kembali ke dermaga sehingga dibutuhkan sistem yang mampu merekam data secara kontinu dan tersinkronisasi waktu tanpa kehilangan data akibat keterbatasan kapasitas penyimpanan sementara maupun gangguan selama alat beroperasi di lapangan. Secara teknis, alur kerja akuisisi data dirancang sebagai berikut:

1. Inisialisasi seluruh periferal (sensor CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>, LCD Nextion, pompa udara, buzzer) saat sistem dinyalakan, dilanjutkan dengan pemeriksaan koneksi dan status baterai melalui modul BMS.
2. Setelah sistem dinyatakan siap, pompa udara aktif secara otomatis untuk menarik sampel gas dari saluran buang menuju ruang sensor.
3. Sensor CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> membaca konsentrasi gas secara paralel menggunakan dihunungkan pada ESP32, dan hasilnya ditampilkan secara *real-time* pada LCD Nextion bersama *timestamp* dan status alat.



### 3.6 Metode Pengumpulan Data

#### 1. Studi literatur / dokumentasi

- Menelusuri jurnal ilmiah, prosiding, dan laporan penelitian terkait emisi CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> kapal, produk guide gas analyzer, paper contoh prototipe dan teknologi propulsi kapal.
- Menggunakan laporan lembaga internasional (IMO, IPCC, dll.), buku teks, standar teknis, serta dokumen LCA untuk memperoleh faktor emisi, parameter teknis, data biaya, dan referensi metode perhitungan.
- Data yang diperoleh pada tahap ini berperan sebagai data sekunder dan menjadi acuan utama dalam penyusunan model perhitungan dan skenario penelitian.

#### 2. Pengukuran langsung emisi di kapal

Melakukan pengukuran konsentrasi CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> pada gas buang mesin bantu kapal menggunakan alat *gas analyzer*. penelitian ini diperlukan jumlah sampel setiap load sesuai ISO 8712 *Low Load* (<25%), *Medium Load* (25%-50%), *High Load* (50%-75%), dan *Full Near Load* (75%-100%) yang memadai agar nilai rata-rata *emission factor* untuk setiap kelompok daya mesin kapal, dapat mewakili kondisi sebenarnya berikut contoh tabel 3.1. cara menentukan Load mesin kapal dengan persamaan berikut

$$P_{aktual} = P_{rated} \left( \frac{N_{aktual}}{N_{rated}} \right)^3 \quad (3.2)$$

$P_{rated}$  = daya referensi yaitu daya yang sudah diketahui pada kondisi awal.

$P_{aktual}$  = daya yang ingin dicari yaitu daya pada putaran baru atau kondisi pengukuran.

$N_{rated}$  = putaran referensi yaitu rpm awal yang dipasangkan dengan  $P_1$ .

$N_{aktual}$  = putaran pengukuran / putaran baru yaitu rpm yang sedang Anda ukur dengan tachometer.

Setelah itu menggunakan rumus 2. 5 sebagai patokan *Load factor* dan Rumus 3.2 berdasarkan referensi (MAN Energy solution., 2018) dapat digunakan sebagai metode estimasi daya pada kapal non konvensional dengan FPP direct drive tanpa gearbox. Persamaan ini dipilih karena sesuai dengan konsep propeller law, yaitu daya propulsi berbanding mendekati pangkat tiga terhadap perubahan putaran. Namun, hasil perhitungan tidak boleh dianggap sebagai daya aktual mutlak

Setiap parameter emisi diukur tiga kali pengulangan untuk setiap kombinasi bahan bakar dan kondisi beban, dan koefisien variasi (CV) dipilih sebagai ukuran ringkasan karena mampu menormalkan sebaran data terhadap besaran rata-ratanya sehingga presisi CO<sub>2</sub> (skala %vol) dan CH<sub>4</sub> (skala ppm) dapat dibandingkan secara setara meski beda

satuan; CV telah diadopsi luas di berbagai bidang termasuk teknik mesin dan manufaktur sebagai indikator kualitas karakteristik fisik produk, karena banyak besaran fisis memiliki simpangan baku yang proporsional terhadap rata-ratanya (Jalilibal et al., 2021), sehingga nilai CV yang dihasilkan dari data *triplicate* ini kemudian diklasifikasikan ke dalam kategori stabilitas/presisi menggunakan ambang yang telah dipakai secara konsisten pada berbagai studi pengukuran berulang (Bucher et al., 2023),

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3.3)$$

$\bar{X}$  adalah nilai tunggal yang mewakili "pusat" dari tiga hasil pengukuran (X1, X2, X3) pada satu kombinasi bahan bakar dan beban. Karena setiap kombinasi diukur tiga kali, nilai individual bisa sedikit berbeda-beda akibat variasi acak alat maupun kondisi pengujian  $\bar{X}$  inilah yang dilaporkan sebagai hasil akhir pengukuran

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (3.4)$$

$SD$  mengukur seberapa jauh ketiga nilai pengukuran (X1, X2, X3) tersebar/menyimpang dari rata-ratanya ( $\bar{X}$ ). Kalau ketiga nilai hampir sama satu sama lain,  $SD$  kecil artinya sensor konsisten. Kalau ketiga nilai jauh berbeda satu sama lain,  $SD$  besar artinya ada variabilitas tinggi antar-pengulangan, atau karena kondisi pengujian tidak stabil atau karena sensor kurang presisi.  $SD$  dinyatakan dalam satuan yang sama dengan data aslinya

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3.5)$$

$CV$  mengubah  $SD$  (yang satuannya spesifik) menjadi persentase relatif terhadap rata-rata, sehingga menjadi angka tanpa satuan (dimensionless).

Tabel 3. 1 Pengukuran emisi pada kapal A

| No | Load                      | Daya Kuda (kW) | X1 | X2 | X3 | Xn | Mean ( $\bar{x}$ ) |
|----|---------------------------|----------------|----|----|----|----|--------------------|
| 1  | Low Load (<25%)           |                |    |    |    |    |                    |
| 2  | Medium Load (25%-50%),    |                |    |    |    |    |                    |
| 3  | High Load (50%-75%)       |                |    |    |    |    |                    |
| 4  | Full Near Load (75%-100%) |                |    |    |    |    |                    |

Tabel 3.1 merangkum hasil pengukuran emisi untuk satu jenis bahan bakar dan satu jenis gas pada empat kondisi beban mesin (Low Load <25%, Medium Load 25–50%, High Load 50–75%, dan Full Near Load 75–100%), dengan kolom Daya Kuda (kW) sebagai bukti kuantitatif nyata dari kategori beban tersebut, bukan sekadar label persentase; kolom X1, X2, X3 memuat

data mentah dari tiga kali pengulangan pengukuran pada setiap kondisi beban, yang kemudian diolah menjadi Mean ( $\bar{X}$ ) sebagai nilai rata-rata representatif,

Tabel 3. 2 Validasi CV hasil data

| No | Load                      | Daya Kuda (kW) | X1 | X2 | X3 | Mean ( $\bar{X}$ ) | SD | CV (%) |
|----|---------------------------|----------------|----|----|----|--------------------|----|--------|
| 1  | Low Load (<25%)           |                |    |    |    |                    |    |        |
| 2  | Medium Load (25%-50%)     |                |    |    |    |                    |    |        |
| 3  | High Load (50%-75%)       |                |    |    |    |                    |    |        |
| 4  | Full Near Load (75%-100%) |                |    |    |    |                    |    |        |

Tabel 3.2 dilanjutkan SD sebagai ukuran seberapa besar sebaran ketiga nilai pengulangan terhadap rata-ratanya (dalam satuan asli data), dan CV (%) sebagai simpangan baku yang dinormalkan menjadi persentase terhadap Mean sehingga bisa dipakai untuk menilai kualitas/presisi data secara relatif dan dibandingkan antar-parameter; secara umum, semakin ke bawah tabel (dari Low Load ke Full Near Load) beban dan daya mesin meningkat sehingga nilai emisi rata-rata juga cenderung meningkat mengikuti pola konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi, sementara kolom SD dan CV pada baris yang sama menunjukkan tingkat konsistensi pengukuran di setiap kondisi beban sebelum data ini dibandingkan lintas bahan bakar B0, B35, dan B40

Meskipun ambang klasifikasi CV dapat bervariasi tergantung bidang keilmuan, angka 10% cukup konsisten muncul sebagai titik acuan umum antara presisi tinggi dan presisi sedang. Oleh karena itu, nilai ini digunakan dalam penelitian bukan sebagai kriteria valid/tidak valid secara mutlak, melainkan sebagai acuan pembandingan deskriptif untuk menginterpretasikan presisi relatif antara  $CO_2$  dan  $CH_4$ . Dengan pendekatan ini, seluruh data tetap dilaporkan apa adanya beserta konteksnya, tanpa menggugurkan salah satu parameter hanya berdasarkan posisinya terhadap satu angka acuan tunggal (Jalilibal et al., 2021).

### 3.7 Konversi Hasil Pengukuran Menjadi *Emission factor*

Hasil pengukuran dengan gas analyzer memberikan data konsentrasi  $CO_2$  dan  $CH_4$  di gas buang dalam satuan persen % volume dan ppm. Agar bisa dipakai untuk perhitungan emisi dan dibandingkan dengan teori, data ini harus diubah menjadi *emission factor* dengan satuan g ( $CO_2$ , dan  $CH_4$ )/kWh. Proses konversi mengacu pada metode di Subbab 2.3.2.1.

#### 1. Menentukan Jumlah *Sampling*

Jumlah sampel pengukuran pada tiap kelompok daya mesin ditentukan terlebih dahulu menggunakan rumus ukuran sampel sehingga nilai faktor emisi yang diperoleh dianggap mewakili masing-masing kelompok berdasarkan sub bab 3.6

#### 2. Menentukan laju gas buang

Dari data konsumsi bahan bakar dan kandungan karbon dalam bahan bakar dihitung berapa banyak gas buang yang dihasilkan mesin sesuai persamaan pada rumus.

#### 3. Mengonversi menjadi g $CO_2$ dan $CH_4$ / kWh

Laju massa emisi kemudian dibagi dengan daya keluaran mesin saat pengukuran (kW), sehingga diperoleh *emission factor* dalam satuan g  $CO_2$  dan  $CH_4$  /kWh sesuai

persamaan 2. 1. Hasil ini nantinya digunakan pada perhitungan emisi (Business As Usual) BAU. Seperti Tabel 3.2

Tabel 3. 3 Konversi Emisi ke Exhaust Gas Flow Pada Kapal

| No | Load                             | Konsentrasi<br>Emisi Mean<br>( $\bar{x}$ ) | Fuel<br>Consumption<br>(Kg/h) | Carbon<br>Content | Density<br>Emisi<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Suhu<br>emisi | Exhaust<br>Gas Flow<br>(m <sup>3</sup> /h) |
|----|----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------|
| 1  | Low Load<br>(<25%)               |                                            |                               |                   |                                          |               |                                            |
| 2  | Medium<br>Load (25%-<br>50%),    |                                            |                               |                   |                                          |               |                                            |
| 3  | High Load<br>(50%-75%)           |                                            |                               |                   |                                          |               |                                            |
| 4  | Full Near<br>Load (75%-<br>100%) |                                            |                               |                   |                                          |               |                                            |

Tabel 3.4 merupakan tahap lanjutan dari data mentah pada Tabel 3.3, di mana konsentrasi emisi rata-rata yang telah diperoleh (Mean,  $\bar{X}$ ) dikonversi menjadi laju alir gas buang (*exhaust gas flow*) pada setiap kondisi beban mesin. Kolom Konsentrasi Emisi Mean ( $\bar{X}$ ) merupakan nilai rata-rata hasil pengukuran CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> dari Tabel 3.3 sebelumnya, yang menjadi *output* utama perhitungan; Fuel Consumption (Kg/h) adalah laju konsumsi bahan bakar per jam, dikonversi dari waktu konsumsi 100 ml pada prosedur pengambilan data (3.1) menjadi satuan massa per jam; Carbon Content adalah kandungan karbon dalam bahan bakar yang dipakai (berbeda nilainya untuk B0, B35, dan B40 sesuai proporsi campuran biodiesel), dipakai sebagai dasar neraca massa karbon dari bahan bakar menuju gas buang; Density Emisi (kg/m<sup>3</sup>) adalah massa jenis gas emisi pada kondisi pengukuran, diperlukan untuk mengonversi satuan massa ke volume; Suhu Emisi dicatat karena densitas gas dipengaruhi suhu (sesuai hukum gas ideal), sehingga nilai densitas perlu dikoreksi terhadap suhu aktual saat pengukuran; dan Exhaust Gas Flow (m<sup>3</sup>/h) adalah hasil akhir tabel ini estimasi volume gas buang yang dihasilkan mesin per jam pada setiap kondisi beban. Nilai *exhaust gas flow* inilah yang menjadi *output* utama untuk perhitungan *emission factor* pada Tabel 3.5. Setelah Mendapatkan *exhaust gas flow* dilanjutkan menghitung *emission factor* dengan rumus 2.2 dan 2.3 dengan pada daya kapal menggunakan rumus 3.2, berikut hasil perhitungannya Tabel 3.3

Tabel 3. 4 Konversi Emisi ke *Emission factor* Pada Kapal

| No | Load                         | Daya Kuda<br>Mesin<br>(kW) | Exhaust<br>Gas Flow<br>( $m^3/h$ ) | emisi (%vol<br>dan ppm) | Bobot molekul<br>per emisi<br>(g/mol) | <i>Emission<br/>factor</i> (g<br>kW/h) |
|----|------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
| 1  | Low Load<br>(<25%)           |                            |                                    |                         |                                       |                                        |
| 2  | Medium Load<br>(25%-50%),    |                            |                                    |                         |                                       |                                        |
| 3  | High Load<br>(50%-75%)       |                            |                                    |                         |                                       |                                        |
| 4  | Full Near Load<br>(75%-100%) |                            |                                    |                         |                                       |                                        |

Tabel 3.5 menggunakan hasil *exhaust gas flow* dari Tabel 3.4 sebagai dasar untuk menghitung *emission factor* (faktor emisi), yaitu massa polutan yang dihasilkan per satuan energi yang dibangkitkan mesin. Kolom Daya Kuda Mesin (kW) adalah daya aktual mesin pada kondisi beban tersebut (sama dengan kolom Daya Kuda pada Tabel Rekapitulasi sebelumnya), menjadi penyebut dalam perhitungan faktor emisi karena satuan akhirnya dinyatakan per kW-jam; Exhaust Gas Flow ( $m^3/h$ ) diambil langsung dari hasil Tabel 3.4; emisi (%vol dan ppm) adalah konsentrasi emisi  $CO_2$  (dalam %vol) dan  $CH_4$  (dalam ppm) yang diukur langsung dari sensor; Bobot Molekul per Emisi (g/mol) adalah massa molekul relatif masing-masing gas ( $CO_2 = 44$  g/mol;  $CH_4 = 16$  g/mol), digunakan untuk mengonversi konsentrasi volumetrik gas menjadi massa gas melalui persamaan gas ideal; dan *Emission factor* (g/kWh) adalah hasil akhir tabel ini massa emisi gas (dalam gram) yang dihasilkan per kWh energi yang dibangkitkan mesin, dihitung menggunakan rumus 2.2 dan 2.3 yang menggabungkan *exhaust gas flow*, konsentrasi emisi, bobot molekul, dan daya mesin. Nilai *emission factor* inilah yang menjadi parameter pembanding utama antar bahan bakar (B0 vs B35 vs B40) pada analisis di Bab 4, karena sudah dinormalisasi terhadap daya mesin sehingga dapat dibandingkan secara adil meski kondisi beban berbeda-beda.

### 3.8 Perhitungan Emisi $CO_2$ dan $CH_4$ Kapal Kondisi BAU (*Tank to Wake*)

Pada tahap ini dilakukan perhitungan emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  kapal dalam kondisi *Business as Usual* (BAU). Perhitungan dilakukan dengan pendekatan *Tank to Wake* (TtW), sesuai rumus cara sederhana, emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  dihitung dari konsumsi bahan bakar dan faktor emisi masing-masing jenis bahan bakar untuk setiap mesin dan mode operasi kapal Akselerasi, perjalanan, dan deakselerasi sesuai rumus 2.7. emisi factor untuk g(emisi)/g fuel didapat setelah pengukuran selesai. Emisi per kapal diperoleh dengan menjumlahkan emisi dari seluruh mesin selama kapal berada di area, kemudian dikalikan dengan 12 bulan untuk mendapatkan total emisi per tahun sehingga diperoleh emisi tahunan sebagai nilai *baseline Actual Value* (BAV) yang akan dibandingkan dengan skenario penerapan propulsi rendah emisi pada kapal non konvensional pada subbab berikutnya.

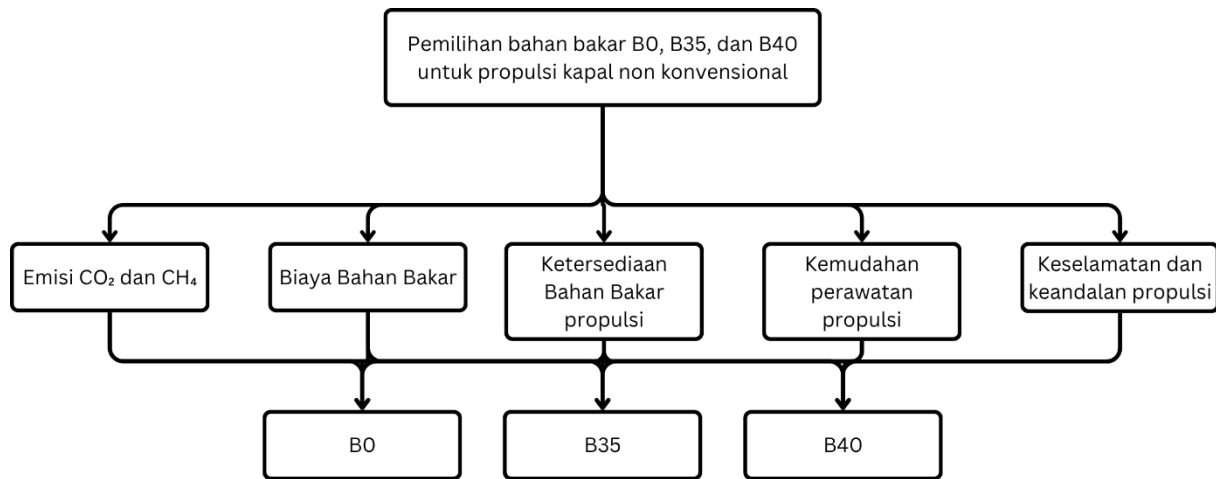
### 3.9 Pemilihan Bahan Bakar Alternatif Menggunakan AHP-TOPSIS

Penelitian ini menggunakan metode gabungan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dan *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) untuk menentukan prioritas alternatif strategi/teknologi pengurangan emisi di pelabuhan. AHP digunakan untuk memperoleh bobot kriteria berdasarkan penilaian pakar melalui *pairwise comparison*, sedangkan TOPSIS digunakan untuk menghasilkan peringkat alternatif berdasarkan kedekatan terhadap solusi ideal terbaik dan terburuk. Kombinasi AHP–TOPSIS banyak digunakan karena AHP kuat dalam pembobotan yang terstruktur, sementara TOPSIS efektif untuk pemeringkatan alternatif secara kuantitatif. (Costa et al., 2023; Tran et al., 2024).

#### 3.9.1 Penentuan Tujuan, Kriteria, dan Alternatif

- Tujuan (*Goal*): menentukan alternatif Bahan Bakar B0, B35, dan B40 untuk propulsi kapal non konvensional.
- Kriteria : emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada Bahan Bakar, Biaya Bahan Bakar, ketersediaan sumber energi, Kemudahan perawatan propulsi, keselamatan dan keandalan propulsi
- Alternatif yaitu B0, B35, dan B40

Struktur keputusan disusun dalam bentuk hierarki: Tujuan, Kriteria, dan Alternatif sebagai Gambar 3.3 menampilkan struktur hierarki keputusan AHP tiga level untuk pemilihan bahan bakar propulsi kapal non konvensional, terdiri dari *goal*, lima kriteria, dan tiga alternatif (B0, B35, B40). Struktur hierarki ini diperlukan untuk memecah masalah keputusan multikriteria yang melibatkan faktor kuantitatif dan kualitatif menjadi komponen yang dapat dinilai secara berpasangan, karena tanpa hierarki yang eksplisit konsistensi penilaian antar responden tidak dapat dijamin (Saaty, 2008). Lima kriteria yang ditetapkan terdiri dari dua kriteria *cost* emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  serta biaya bahan bakar dan tiga kriteria *benefit* ketersediaan bahan bakar, kemudahan perawatan, serta keselamatan dan keandalan propulsi yang dipilih berdasarkan relevansinya terhadap konteks operasional kapal wisata skala kecil di Pantai Kenjeran. Ketiga alternatif (B0, B35, B40) dievaluasi secara bersamaan terhadap seluruh kriteria menggunakan data emisi aktual hasil pengukuran lapangan sebagai *output* TOPSIS, sehingga peringkat akhir mencerminkan kondisi operasional nyata kapal dan bukan asumsi generik (Chaube et al., 2024).



Gambar 3. 3 Hirarki AHP-Topsis (Dokumentasi Pribadi)

### 3.9.2 Teknik Pengumpulan Data untuk AHP - TOPSIS

- Responden yang di rencanakan yakni operator kapal dan akademisi
- Instrumen: kuesioner AHP (*pairwise comparison*) dan lembar penilaian alternatif terhadap kriteria angka
- Data kuantitatif : Emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  dan Biaya Bahan Bakar

### 3.9.3 Pembuatan Form kuisoner AHP

Penyusunan form AHP dimulai dengan menetapkan *goal* (tujuan), kemudian menyusun struktur hirarki yang terdiri dari kriteria serta alternatif yang akan dipilih (Saaty, 2008). Setelah hirarki ditetapkan, instrumen dibuat dalam bentuk pertanyaan *pairwise comparison* pada setiap level: (1) kriteria vs kriteria untuk memperoleh bobot kriteria, dan (2) alternatif vs alternatif pada setiap kriteria untuk memperoleh prioritas alternatif pada masing-masing kriteria; jumlah pertanyaan pada setiap kelompok perbandingan mengikuti rumus  $n(n-1)/2$  untuk  $n$  elemen yang dibandingkan (Kou et al., 2016). Untuk setiap pertanyaan, responden diminta memilih intensitas kepentingan relatif menggunakan skala 1 - 9 agar preferensi dapat dibentuk menjadi matriks perbandingan dan dihitung bobot prioritasnya (Saaty, 2008). Setelah data terkumpul, penilaian responden perlu diuji konsistensinya melalui *consistency ratio* (CR) dan indeks konsistensi lain yang dibahas dalam literatur agar keputusan berbasis AHP tidak diturunkan dari penilaian yang acak atau kontradiktif; jika konsistensinya tidak memadai maka data dapat ditinjau ulang atau diminta pengisian ulang sebelum dilakukan sintesis bobot dan perankingan akhir (Pant et al., 2022).

Responden dalam penelitian ini dipilih berdasarkan kompetensi dan keterlibatan langsung pada isu yang dinilai. Pendekatan ini digunakan karena pada AHP-TOPSIS kualitas hasil sangat bergantung pada ketepatan penilaian responden terhadap kriteria dan alternatif, sehingga pemilihan responden harus didasarkan pada relevansi pengalaman, pengetahuan, dan

peran praktisnya, bukan semata-mata pada jumlah responden atau pendidikan formal saja(Pant et al., 2022)..

Kriteria inklusi responden dalam penelitian ini meliputi:

1. memiliki latar belakang pengalaman kerja atau keterlibatan yang relevan dengan bidang kapal, mesin kapal, bahan bakar, sistem propulsi, energi, atau kebijakan maritim;
2. memiliki pengalaman praktis atau profesional pada bidang yang berkaitan
3. memahami karakteristik operasi kapal non konvensional atau mesin diesel kapal;
4. memiliki pemahaman mengenai evaluasi bahan bakar, emisi, atau perawatan propulsi terhadap bbm;
5. bersedia mengisi kuesioner secara lengkap serta memberikan penilaian secara objektif (Pant et al., 2022).

Responden pada penelitian ini dipilih berdasarkan relevansi langsung terhadap topik penelitian, yaitu evaluasi bahan bakar alternatif pada kapal non konvensional. Responden terdiri dari dua bidang: (1) akademisi dengan fokus keahlian pada bidang propulsi kapal, energi, atau bahan bakar alternatif maritim, yang merepresentasikan aspek keilmuan dan validitas teoritis; serta (2) operator kapal yang memiliki pengalaman langsung dalam pengoperasian mesin dan pemakaian bahan bakar kapal sehari-hari, yang merepresentasikan aspek praktis operasional di lapangan. Kombinasi kedua kelompok ini memastikan hasil penilaian AHP-TOPSIS mempertimbangkan baik sisi keilmuan maupun sisi realitas operasional kapal.

### **3.9.4 Tahap AHP: Pembobotan Kriteria**

#### **a) Penyusunan struktur hierarki**

Masalah keputusan disusun dalam bentuk hierarki: tujuan goal, kriteria, dan alternatif.

#### **b) Penyusunan matriks perbandingan berpasangan**

Penilaian ada dua kuantitatif dan Responden/pakar memberikan penilaian perbandingan antar elemen dalam satu level kriteria sehingga terbentuk matriks perbandingan berpasangan  $c = [c_{ij}]$ .

Lalu karena ada lebih dari 1 responden maka perlu, setiap responden memberikan nilai pairwise comparison  $a_{ij}^{(k)}$ , maka nilai gabungan pairwise comparison dihitung dengan geometric mean:



$$\bar{x}_{ij} = \left( \prod_{k=1}^m x_{ij}^{(k)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.6)$$

$\bar{x}_{ij}$  = nilai gabungan alternatif  $i$  pada kriteria  $j$

$x_{ij}^{(k)}$  = nilai alternatif  $i$  pada kriteria  $j$  menurut responden ke- $k$

$m$  = jumlah responden

Normalisasi dalam AHP merupakan tahap untuk menyetarakan nilai pada matriks perbandingan berpasangan agar bobot prioritas setiap kriteria atau alternatif dapat dihitung secara proporsional. Pada data kuantitatif, nilai yang sudah berbentuk numerik dapat langsung dimasukkan ke dalam matriks perbandingan dan dinormalisasi (Mardani et al., 2019; Brunelli et al., 2024; Pant et al., 2021)

Rumus normalisasi matriks:

$$C_j = \sum_{i=1}^n C_{ij} \quad (3.7)$$

$$X_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^n C_{ij}} \quad (3.8)$$

Keterangan:

$C_{ij}$  = nilai elemen pada baris ke- $i$  dan kolom ke- $j$  pada matriks perbandingan

$C_j$  = jumlah seluruh elemen pada kolom ke- $j$

$X_{ij}$  = nilai hasil normalisasi

$n$  = jumlah elemen yang dibandingkan

Selanjutnya bobot prioritas (vektor bobot) dihitung menggunakan rata-rata baris dari matriks ternormalisasi:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad (3.9)$$

$w_i$ : bobot prioritas (prioritas relatif) untuk elemen ke- $i$ .

$x_{ij}$ : elemen matriks normalisasi pada baris  $i$  kolom  $j$ .

$\sum_{j=1}^n x_{ij}$ : jumlah seluruh elemen pada baris ke- $i$  dari matriks normalisasi.

$n$ : jumlah elemen yang dibandingkan (ukuran matriks).

$i$ : indeks elemen yang bobotnya dihitung,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

$j$ : indeks kolom pada matriks normalisasi,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Langkah normalisasi dan pembentukan bobot ini mengikuti uraian “Normalization – The mathematics of AHP”.

d) Uji konsistensi (CI dan CR)

Vektor konsistensi diperoleh dengan mengalikan matriks perbandingan berpasangan dengan vektor bobot, kemudian hasilnya dibagi bobot untuk mendapatkan nilai konsistensi per kriteria; nilai  $\lambda$  (lambda) dihitung dengan merata-ratakan nilai konsistensi tersebut. Indeks konsistensi dan rasio konsistensi dihitung sebagai:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.10)$$

$CI$ : *Consistency Index* (mengukur tingkat ketidakkonsistenan penilaian).

$\lambda$  : nilai eigen maksimum (atau nilai rata-rata dari *consistency vector* yang merepresentasikan tingkat konsistensi matriks).

$n$ : jumlah elemen yang dibandingkan (orde matriks).

$n - 1$ : faktor pembagi untuk menyesuaikan ukuran matriks.

$CR$ : *Consistency Ratio* (rasio konsistensi).

$RI$ : *Random Index* (nilai acuan konsistensi acak yang bergantung pada ukuran matriks  $n$ ).

Interpretasi umum: matriks dianggap konsisten bila  $CR \leq 0,10(10\%)$ .

Nilai RI bergantung pada ukuran matriks, dan matriks dinyatakan dapat diterima bila  $CR \leq 0,10 (10\%)$ ; jika lebih, penilaian perlu diperbaiki karena tidak konsisten. Rumus ini digunakan saat perbandingan antar kriteria dan antar alternatif, Output AHP: bobot kriteria  $w_j$  yang konsisten untuk dipakai pada tahap TOPSIS.

### 3.9.5 Tahap TOPSIS: Pemeringkatan Alternatif

#### a) Penyusunan matriks keputusan

Dalam TOPSIS disediakan Data Kuantitatif dan Data Kulitatif Pada Tabel Berikut Disusun matriks keputusan  $X = [x_{ij}]$  yang memuat nilai performa alternatif  $A_i$  pada setiap kriteria  $C_j$ .

Tabel 3. 5 Data Awal TOPSIS

| Alternatif | Emisi<br>(Cost)                                | Biaya<br>(Cost) | Ketersediaan<br>(Benefit)                                     | Perawatan<br>(Benefit) | Keselamatan<br>(Benefit) |
|------------|------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| B0         |                                                |                 |                                                               |                        |                          |
| B35        | Data Kuantitatif ditentukan dengan Hasil Riset |                 | Data kualitatif ditentukan oleh Responden dengan Skala Likert |                        |                          |
| B40        |                                                |                 |                                                               |                        |                          |

Karena lebih dari 1 responden, yang di rata-rata adalah nilai alternatif terhadap kriteria data kualitatif. maka nilai gabungan alternatif  $i$  pada kriteria  $j$  dapat dihitung dengan arithmetic mean:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{ij}^{(k)} \quad (3.11)$$

Keterangan:

$\bar{x}_{ij}$  = nilai gabungan alternatif  $i$  pada kriteria  $j$

$x_{ij}^{(k)}$  = nilai alternatif  $i$  pada kriteria  $j$  menurut responden ke- $k$

$m$  = jumlah responden

b) Normalisasi matriks keputusan

Pada Tabel 3.4 terdapat dua Data yakni kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif hasil dari riset, data kualitatif didapat dari 3 responden dilakukan rata-rata lalu di masukkan pada tabel 3.4, setelah itu masing-masing data dengan persamaan 3.9

Normalisasi menggunakan normalisasi vektor:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3.12)$$

$x_{ij}$ : nilai kinerja alternatif ke- $i$  pada kriteria ke- $j$  (data awal).

$r_{ij}$ : nilai normalisasi dari  $x_{ij}$ .

$\sum_{i=1}^m x_{ij}^2$ : jumlah kuadrat nilai pada kriteria ke- $j$  untuk seluruh alternatif.

$\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}$ : akar jumlah kuadrat (penormalisasi vektor) untuk kolom kriteria  $j$ .

$m$ : jumlah alternatif,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

$n$ : jumlah kriteria,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

dengan  $m$  jumlah alternatif dan  $n$  jumlah kriteria.

c) Matriks ternormalisasi terbobot

Nilai normalisasi dikalikan bobot kriteria (dari AHP) untuk memperoleh matriks ternormalisasi terbobot:

$$y_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (3.13)$$

$y_{ij}$ : nilai ternormalisasi terbobot untuk alternatif  $i$  pada kriteria  $j$ .

$w_j$ : bobot kriteria ke- $j$  (diambil dari hasil AHP).

$r_{ij}$ : nilai normalisasi alternatif  $i$  pada kriteria  $j$ .

$i$ : indeks alternatif,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

$j$ : indeks kriteria,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Rumus ini ditunjukkan pada tahap “Matriks Keputusan Ternormalisasi Terbobot”.

d) Penentuan solusi ideal positif dan negatif ( $A^+$  dan  $A^-$ )

TOPSIS membedakan kriteria manfaat (benefit) dan kriteria biaya (cost). Solusi ideal positif ( $A^+$ ) dan negatif ( $A^-$ ) ditentukan dari  $y_{ij}$  dengan prinsip:

- untuk benefit:  $A^+ = \text{nilai maksimum}$ ,  $A^- = \text{nilai minimum}$
- untuk cost:  $A^+ = \text{nilai minimum}$ ,  $A^- = \text{nilai maksimum}$

e) Jarak ke solusi ideal positif dan negatif

Jarak Euclidean alternatif terhadap solusi ideal dihitung sebagai:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^+)^2} \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^-)^2} \quad (3.14)$$

$D_i^+$ : jarak alternatif  $i$  terhadap solusi ideal positif.

$D_i^-$ : jarak alternatif  $i$  terhadap solusi ideal negatif.

$y_{ij}$ : nilai ternormalisasi terbobot alternatif  $i$  pada kriteria  $j$ .

$y_j^+$ : nilai ideal positif pada kriteria  $j$ .

$y_j^-$ : nilai ideal negatif pada kriteria  $j$ .

$n$ : jumlah kriteria.

$i$ : indeks alternatif,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Tahap jarak ini ditegaskan sebagai pengukuran jarak Euclidean terhadap  $A^+$  dan  $A^-$ .

f) Nilai preferensi (koefisien kedekatan) dan peringkat

Nilai preferensi dihitung:

$$V_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (3.15)$$

$V_i$ : nilai preferensi (koefisien kedekatan) alternatif  $i$ ,  $0 \leq V_i \leq 1$ .

$D_i^-$ : jarak alternatif *i* ke solusi ideal negatif.

$D_i^+$ : jarak alternatif *i* ke solusi ideal positif.

Interpretasi: semakin besar  $V_i$ , alternatif semakin dekat ke solusi ideal positif dan semakin diprioritaskan. Semakin besar  $V_i$ , semakin tinggi prioritas alternatif. Output TOPSIS: nilai  $V_i$  dan urutan peringkat alternatif..

### 3.9.6 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji kekuatan (*robustness*) hasil peringkat alternatif yang diperoleh dari tahap TOPSIS pada subbab 3.9.5, mengingat bobot kriteria pada AHP diperoleh dari penilaian subjektif responden yang berpotensi bervariasi antar individu (Costa et al., 2023). Apabila peringkat alternatif (B0, B35, B40) tetap konsisten meskipun bobot kriteria diubah dalam rentang tertentu, maka hasil keputusan pemilihan bahan bakar dapat dianggap kuat dan tidak sensitif terhadap ketidakpastian penilaian responden. Skema pengujian dilakukan dengan pendekatan *one-at-a-time* (OAT), yaitu mengubah bobot satu kriteria pada satu waktu sementara bobot kriteria lainnya disesuaikan secara proporsional agar total bobot tetap bernilai 1. Tahapannya sebagai berikut.

#### a) Penentuan skenario perubahan bobot

Bobot kriteria hasil AHP (subbab 3.9.4) dinaikkan dan diturunkan sebesar +20% dan – 20 % dari nilai awal secara bergantian untuk setiap kriteria, sehingga menghasilkan sejumlah skenario pengujian:

$$\text{Jumlah skenario} = n_{\text{kriteria}} \times n_{\text{variasi}} \quad (3.16)$$

$n_{\text{kriteria}}$  = jumlah kriteria yang diuji (5 kriteria, mengacu subbab 3.9.3)

$n_{\text{variasi}}$  = jumlah tingkat variasi bobot yang diuji (2, yaitu –20%, +20%)

Dengan demikian diperoleh 10 skenario pengujian sensitivitas.

#### b) Normalisasi ulang bobot

Setelah satu bobot kriteria diubah, bobot kriteria lainnya dinormalisasi ulang secara proporsional agar total tetap 1:

$$w_j' = w_j \times \frac{1 - w_i^{\text{baru}}}{1 - w_i^{\text{awal}}} \quad (3.17)$$

$w_j'$  = bobot baru kriteria  $j$  (selain kriteria  $i$  yang diubah) setelah normalisasi ulang

$w_j$  = bobot awal kriteria  $j$  dari hasil AHP

$w_i^{baru}$  = bobot kriteria  $i$  setelah divariasikan ( $\pm 10\%/\pm 20\%$ )

$w_i^{awal}$  = bobot awal kriteria  $i$  sebelum divariasikan

### c) Perhitungan ulang TOPSIS dan pemeriksaan peringkat

Bobot baru dari tiap skenario dimasukkan kembali ke tahap TOPSIS (rumus 3.12–3.14 pada subbab 3.9.5) untuk menghasilkan nilai preferensi  $V_i$  dan peringkat alternatif pada tiap skenario. Peringkat pada setiap skenario kemudian dibandingkan dengan peringkat awal (bobot asli hasil AHP).

## 3.10 Perbandingan *Life Cycle Assessment* (LCA) Tank to Wake B0 dengan BBM Terpilih

Perhitungan emisi *Tank to Wake* dilakukan untuk mengkuantifikasi besarnya penurunan emisi yang diperoleh ketika bahan bakar *baseline* (B0) digantikan dengan bahan bakar alternatif hasil pemilihan AHP-TOPSIS pada subbab 3.9, sehingga keputusan pemilihan bahan bakar tidak hanya didasarkan pada peringkat preferensi, melainkan juga didukung oleh bukti kuantitatif berupa besaran penurunan emisi  $CO_2$  ekuivalen. Perhitungan LCA dalam penelitian ini dibatasi pada tahap *Tank to Wake* (TtW), yaitu emisi yang dihasilkan dari pemakaian bahan bakar di kapal berupa pembakaran pada mesin, sesuai definisi TtW pada Bab 2 subbab *Life Cycle Assessment*. Tahap *Well-to-Tank* (produksi dan distribusi bahan bakar) tidak dimasukkan dalam perhitungan agar cakupan analisis tetap fokus pada performa operasional kapal.  $CO_2$  dan  $CH_4$

Objek yang dibandingkan adalah emisi tahunan bahan bakar B0 sebagai *baseline* (BAV) yang telah dihasilkan pada subbab 3.8, terhadap proyeksi emisi tahunan bila kapal menggunakan bahan bakar terpilih (B35 atau B40). Perhitungan emisi masing-masing skenario mengikuti tahapan berikut. Hasil emisi per mesin dijumlahkan untuk memperoleh emisi tahunan kapal, sebagaimana telah dilakukan untuk BBM B0 pada subbab 3.8 untuk mendapatkan nilai BAV.

### a) Konversi ke $CO_2$ ekuivalen

Emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  hasil perhitungan tersebut dikonversi menjadi satu satuan  $CO_2$ -ekuivalen ( $CO_2e$ ) agar kedua gas dapat dibandingkan dalam skala pemanasan global yang setara. Konversi dilakukan menggunakan rumus 2.5 (bentuk sederhana dari rumus 2.4) Perhitungan

ini dilakukan baik untuk skenario B0 maupun skenario BBM terpilih (B35/B40), menggunakan *emission factor* masing-masing jenis campuran biodiesel.

#### **b) Perbandingan dan persentase reduksi**

Setelah nilai  $CO_2e$  tahunan untuk kedua skenario diperoleh, dilakukan perbandingan untuk menghitung persentase penurunan emisi sebagai berikut.

$$\%Reduksi = \frac{CO_2e_{B0} - CO_2e_{terpilih}}{CO_2e_{B0}} \times 100\% \quad (3.18)$$

$\%Reduksi$  = persentase penurunan emisi  $CO_2e$

$CO_2e_{B0}$  = total emisi  $CO_2e$  tahunan pada kondisi *baseline* (B0)

$CO_2e_{terpilih}$  = total emisi  $CO_2e$  tahunan pada skenario bahan bakar terpilih (B35 dan B40)

Hasil persentase reduksi ini menjadi indikator akhir untuk menilai efektivitas penerapan bahan bakar alternatif terhadap penurunan emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  kapal non konvensional di Pantai Kenjeran, sekaligus menjadi dasar kesimpulan mengenai kelayakan penerapan bahan bakar terpilih dibandingkan kondisi *business as usual*.



## BAB 4

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil pengembangan prototipe *gas analyzer*, hasil pengukuran emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$ , konversi data pengukuran menjadi *emission factor*, perhitungan emisi kapal pada kondisi Business as Usual, pemilihan bahan bakar menggunakan metode AHP-TOPSIS, serta perbandingan emisi dengan pendekatan Life Cycle Assessment *Tank to Wake*. Data yang digunakan dalam bab ini berasal dari hasil pengukuran dan perhitungan pada bahan bakar B0, B35, dan B40. Pembahasan dilakukan secara bertahap. Tahap pertama menjelaskan objek penelitian dan parameter teknis mesin. Tahap kedua menjelaskan pengembangan prototipe gas analyzer. Tahap ketiga membahas hasil pengukuran emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada beberapa kondisi beban mesin. Tahap keempat mengonversi konsentrasi emisi menjadi *emission factor*. Tahap kelima menghitung emisi tahunan sebagai *Baseline Actual Value* pada kondisi BAU. Tahap keenam membahas pemilihan bahan bakar rendah emisi menggunakan AHP-TOPSIS. Tahap terakhir membandingkan emisi  $CO_2e$  ekuivalen dari masing-masing bahan bakar dengan pendekatan LCA *Tank to Wake*.

#### 4.1 Gambaran Umum Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah kapal non konvensional dengan bahan kayu bermesin diesel yang beroperasi di wilayah Pantai Kenjeran, Surabaya. Kapal ini dipilih karena memiliki pola operasi yang relatif sederhana, menggunakan mesin diesel sebagai sumber penggerak utama, serta memungkinkan dilakukan pengukuran emisi secara langsung menggunakan prototipe gas analyzer, dimensi kapal Length : 8 meter, Breadth : 2 meter, dan Height : 1 meter, kapal yang diuji pada gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Objek kapal non konvensional

Mesin yang digunakan dalam perhitungan adalah Yanmar TF 85. Mesin ini merupakan mesin diesel horizontal empat langkah dengan sistem pembakaran direct injection. Daya maksimum mesin sebesar 8,5 HP pada putaran 2200 rpm. Nilai tersebut dikonversi menjadi 6,338 kW dengan faktor konversi 1 HP = 0,7457 kW. Data teknis mesin ini digunakan untuk menghitung daya operasi, *load factor*, konsumsi bahan bakar, *emission factor*, dan total emisi tahunan kapal.pada Tabel 4.1 Berikut

Tabel 4. 1 Spesifikasi Yanmar TF 85

| No. | Spesifikasi                  | Nilai             | Satuan             | Keterangan                                                                           |
|-----|------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Jenis Mesin                  |                   |                    | Motor diesel horizontal 4 langkah berpendingin air                                   |
| 2   | Sistem Pembakaran            |                   |                    | Pengabutan langsung / direct injection                                               |
| 3   | Jumlah Silinder              | 1                 | silinder           |                                                                                      |
| 4   | Saat Pengabutan              | 18                | ° sebelum TMA      |                                                                                      |
| 5   | Diameter x Panjang Langkah   | 85 x 87           | mm                 |                                                                                      |
| 6   | Volume Silinder              | 493               | cc                 |                                                                                      |
| 7   | Daya Kontinyu                | 7,5               | dk                 |                                                                                      |
| 8   | Putaran Daya Kontinyu        | 2200              | rpm                |                                                                                      |
| 9   | Daya Maksimum Sesaat         | 8,5               | dk                 |                                                                                      |
| 10  | Putaran Daya Maksimum Sesaat | 2200              | rpm                |                                                                                      |
| 11  | Torsi Maksimum               | 3,44              | kg.m               |                                                                                      |
| 12  | Putaran Torsi Maksimum       | 1600              | rpm                |                                                                                      |
| 13  | Perbandingan Kompresi        | 18                |                    |                                                                                      |
| 14  | Arah Putaran Poros           |                   |                    | Berlawanan arah jarum jam, dilihat dari sisi roda gaya                               |
| 15  | Pemakaian Bahan Bakar        | 171               | gr/dk.jam          | -                                                                                    |
| 16  | Pompa Bahan Bakar            | -                 | -                  | Tipe Bosch                                                                           |
| 17  | Tekanan Injektor             | 200               | kg/cm <sup>2</sup> | -                                                                                    |
| 18  | Sistem Pelumasan             |                   |                    | Pelumasan paksa menggunakan pompa & katup regulator hidrolik, pompa jenis trochoidal |
| 19  | Kapasitas Tangki Bahan Bakar | 10,5              | liter              |                                                                                      |
| 20  | Kapasitas Minyak Pelumas     | 2,2               | liter              |                                                                                      |
| 21  | Jenis Minyak Pelumas         |                   |                    | SAE 40 kelas CC atau CD                                                              |
| 22  | Sistem Pendinginan           |                   |                    | Radiator                                                                             |
| 23  | Kapasitas Tangki Pendingin   | 1,65              | liter              |                                                                                      |
| 24  | Cara Menghidupkan            | -                 | -                  | Manual / engkol                                                                      |
| 25  | Dimensi Mesin (P x L x T)    | 672 x 330,5 x 496 | mm                 |                                                                                      |
| 26  | Lampu                        | 12                | V                  | 45 W / 45 W                                                                          |
| 27  | Berat Kosong                 | 89,5              | kg                 |                                                                                      |
| 28  | Ukuran Kemasan (P x L x T)   | 780 x 480 x 700   | mm                 |                                                                                      |

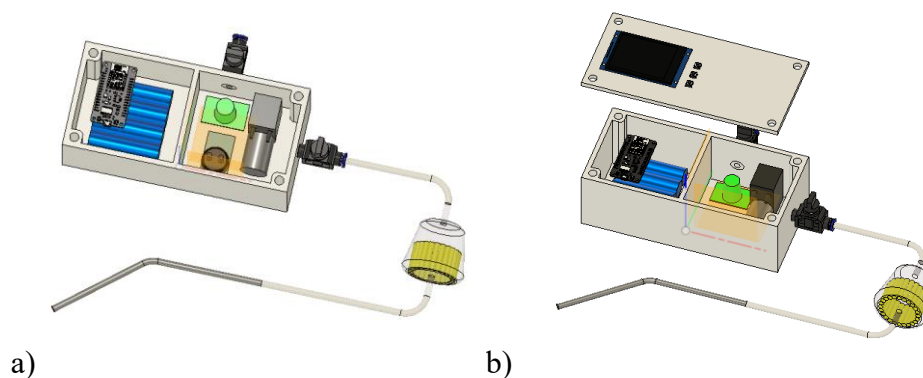
## 4.2 Pengembangan Prototipe Gas Analyzer

Alat komersial seperti *flue gas analyzer* (penganalisis gas buang) tingkat profesional biasanya dijual dengan harga puluhan hingga ratusan juta rupiah, dan didesain untuk kapal besar yang memiliki sistem saluran gas buang (*exhaust*) yang sudah terstandar. Akibatnya, alat semacam itu tidak cocok dipakai pada kapal kayu kecil yang mesinnya tidak seragam antar satu kapal dengan kapal lain. Karena itu, penelitian ini membuat purwarupa (*prototype*) alat pengukur gas berbiaya rendah yang bisa langsung mengukur kadar karbon dioksida ( $CO_2$ ) dan metana ( $CH_4$ ) di lapangan.

Purwarupa ini dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32, dipilih karena memiliki prosesor dua inti (*dual-core*) yang memungkinkan pembacaan beberapa sensor sekaligus secara waktu nyata (*real-time*), sudah dilengkapi konektivitas bawaan untuk pengembangan lanjutan seperti pencatatan data (*logging*) dan pengiriman data jarak jauh (*telemetry*), serta didukung banyak pustaka (*library*) siap pakai untuk menghubungkan sensor analog maupun digital. Sistem ini terdiri dari lima subsistem yang saling terhubung: (1) subsistem pengambilan sampel gas menggunakan pompa udara, (2) subsistem penginderaan (*sensing*) yang memakai sensor  $CO_2$  berjenis *Non-Dispersive Infrared* (NDIR) dan sensor  $CH_4$  berjenis *Metal Oxide Semiconductor* (MOS), (3) subsistem pengolahan sinyal yang terdiri dari penguat (*amplifier*) dan pengubah sinyal analog ke digital (*Analog-to-Digital Converter/ADC*) eksternal ADS1115, (4) subsistem kendali dan antarmuka menggunakan ESP32 dan layar LCD Nxtion, serta (5) subsistem catu daya yang terdiri dari sistem manajemen baterai (*Battery Management System/BMS*) dan baterai litium-ion. Penjelasan pemilihan tiap komponen akan diuraikan lebih lanjut pada Sub-bab 4.2.1 sampai 4.2.3.

### 4.2.1 Desain 3D Prototipe

Desain fisik prototipe harus memenuhi dua kebutuhan yang berpotensi saling bertentangan: portabilitas untuk operasional di kapal kecil dengan ruang terbatas, dan proteksi komponen elektronik dari kondisi lingkungan kapal yakni getaran mesin, kelembaban, cipratan air. Untuk menjawab kebutuhan ini, casing dirancang dalam dua konfigurasi menggunakan pemodelan 3D: kondisi tertutup untuk operasi lapangan yang melindungi komponen dari elemen eksternal, dan kondisi terbuka untuk keperluan perawatan dan troubleshooting (Gambar 4.2)..



Gambar 4. 2 a) Dengan tutup b) tanpa tutup

Dimensi akhir casing dioptimalkan untuk dapat dibawa dan dioperasikan pada kapal berukuran 8×2×1 centimeter (cm) sebagaimana objek penelitian, dengan hasil akhir ditampilkan pada Gambar 4.2 dalam kondisi tertutup (a) dan terbuka (b).

#### 4.2.2 Desain Sistem Elektrikal dan PCB

Pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 disusun untuk memetakan alur sinyal dan alur daya secara terpisah sebelum diterjemahkan ke skematik dan tata letak PCB, sehingga setiap jalur baik jalur data sensor maupun jalur distribusi listrik dapat diverifikasi logikanya terlebih dahulu sebelum masuk ke tahap perakitan fisik yang lebih sulit diubah. Pendekatan ini memungkinkan kesalahan desain (misalnya jalur sinyal yang berdekatan dengan sumber noise) terdeteksi lebih awal, alih-alih ditemukan setelah PCB selesai dicetak.

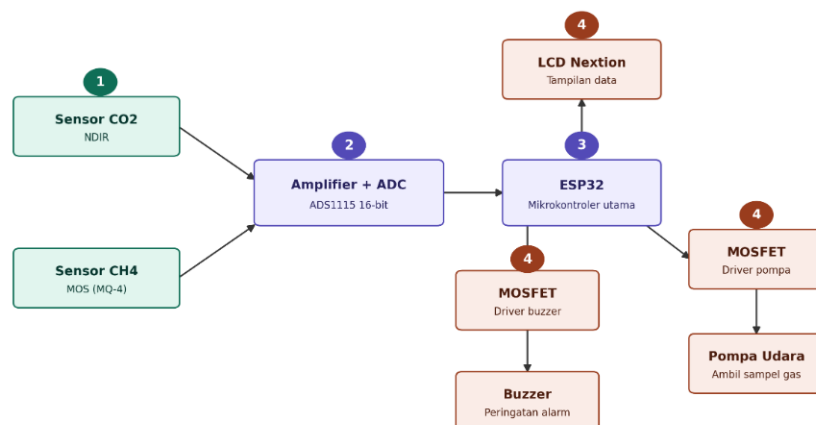
Rangkaian elektrikal awalnya diuji menggunakan sambungan kabel konvensional pada tahap purwarupa, namun pendekatan ini rentan menghasilkan kesalahan sambungan dan ketidakstabilan mekanik akibat getaran mesin kapal selama pengukuran di lapangan. Untuk mengatasi hal ini, rangkaian akhir diimplementasikan dalam bentuk Printed Circuit Board (PCB) yang memberikan sambungan permanen, mengurangi risiko human error saat instalasi ulang, dan meningkatkan keandalan sistem pada kondisi operasional yang dinamis.

Perancangan elektrikal dipecah menjadi dua diagram blok independen dengan fungsi yang berbeda, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Pembagian Fungsional Diagram Blok Elektrikal

| Blok                            | Fungsi Utama                       | Komponen Kunci                                                                  | Referensi Gambar |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Sistem Emisi                    | Akuisisi dan pemrosesan sinyal gas | Sensor NDIR $CO_2$ , sensor MOS $CH_4$ , amplifier, ADS1115 (ADC 16-bit), ESP32 | Gambar 4.3       |
| BMS (Battery Management System) | Manajemen dan proteksi daya        | Modul BMS 20A, baterai lithium-ion, buck converter LM2596                       | Gambar 4.4       |

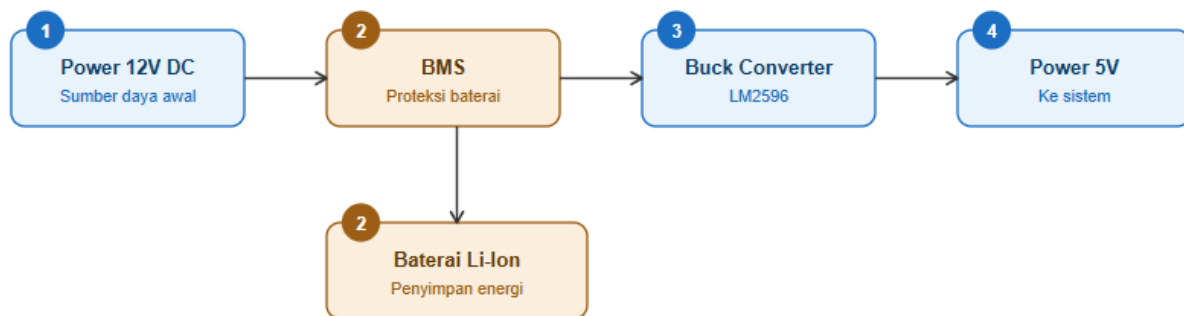
Setelah itu dilanjutkan relaisasi di diagram blok pada gambar 4.3 dan 4.4



Gambar 4. 3 Diagram Blok Sistem Emisi

Diagram Gambar 4.3 menggambarkan alur pemrosesan sinyal dari sensor gas hingga menjadi output yang bisa dipakai pengguna. Prosesnya berjalan dalam empat tahap:

1. Akuisisi sinyal Sensor  $CO_2$  (berbasis NDIR) dan sensor  $CH_4$  (berbasis MQ-4) membaca konsentrasi gas buang secara terus-menerus dan menghasilkan sinyal analog mentah.
2. Pengondisian sinyal Sinyal analog dari kedua sensor dikuatkan oleh rangkaian amplifier, lalu dikonversi menjadi data digital oleh modul ADS1115 (ADC 16-bit) supaya bisa dibaca mikrokontroler dengan presisi tinggi.
3. Pemrosesan pusat ESP32 menerima data digital, mengolahnya menjadi nilai konsentrasi gas yang terbaca, dan memutuskan aksi apa yang perlu dijalankan berikutnya.
4. Output/aksi ESP32 mengendalikan tiga output secara bersamaan: menampilkan hasil pembacaan pada LCD Nextion, mengaktifkan buzzer (via driver MOSFET) sebagai peringatan bila konsentrasi gas melebihi ambang batas, dan mengaktifkan pompa udara (via driver MOSFET terpisah) untuk menarik sampel gas baru.



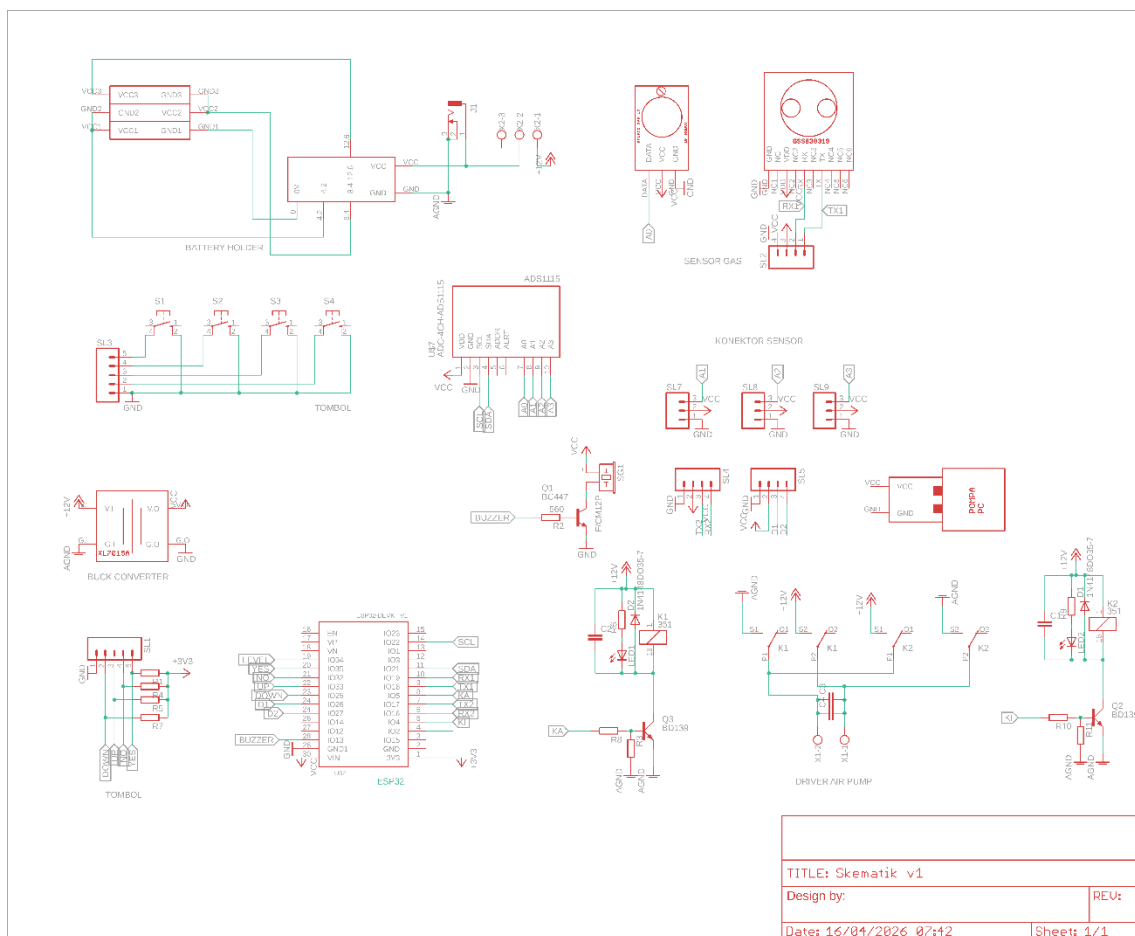
Gambar 4. 4 Diagram Blok Sistem Emisi

Diagram Gambar 4.4 menggambarkan alur distribusi daya dari sumber listrik hingga siap dipakai komponen elektronik, dengan jalur proteksi baterai sebagai cabang terpisah:

1. Sumber daya Listrik 12V DC masuk sebagai *output* awal ke sistem.
2. Proteksi baterai Modul BMS 20A menerima daya tersebut dan berfungsi ganda: melindungi baterai lithium-ion dari kondisi overcharge, overdischarge, overcurrent, dan short-circuit, sekaligus mengisi baterai sebagai cadangan energi.
3. Regulasi tegangan Setelah melalui BMS, tegangan 12V diturunkan oleh buck converter LM2596 menjadi 5V, karena sebagian besar komponen elektronik pada prototipe (ESP32, sensor, LCD) membutuhkan suplai 5V, bukan 12V.

4. Distribusi ke sistem Output 5V inilah yang mendistribusikan daya ke seluruh papan rangkaian Print Circuit Board (PCB).

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 4.3 dan 4.4, tahap selanjutnya adalah menerjemahkan hubungan antar-subsistem tersebut menjadi skematik elektrik yang memetakan setiap jalur sinyal dan daya secara eksplisit. Diagram blok belum memuat detail teknis seperti alamat I<sup>2</sup>C, rating arus, maupun urutan pin, sehingga sebelum masuk ke tahap desain PCB, kebutuhan ini perlu dikunci terlebih dahulu melalui skematik agar potensi kesalahan sambungan dapat dikoreksi lebih awal, jauh lebih murah dibanding mengoreksi PCB yang sudah dicetak. Hasil penyusunan skematik elektrik lengkap ditampilkan pada Gambar 4.5. Daftar lengkap komponen yang digunakan disajikan pada Tabel 4.2

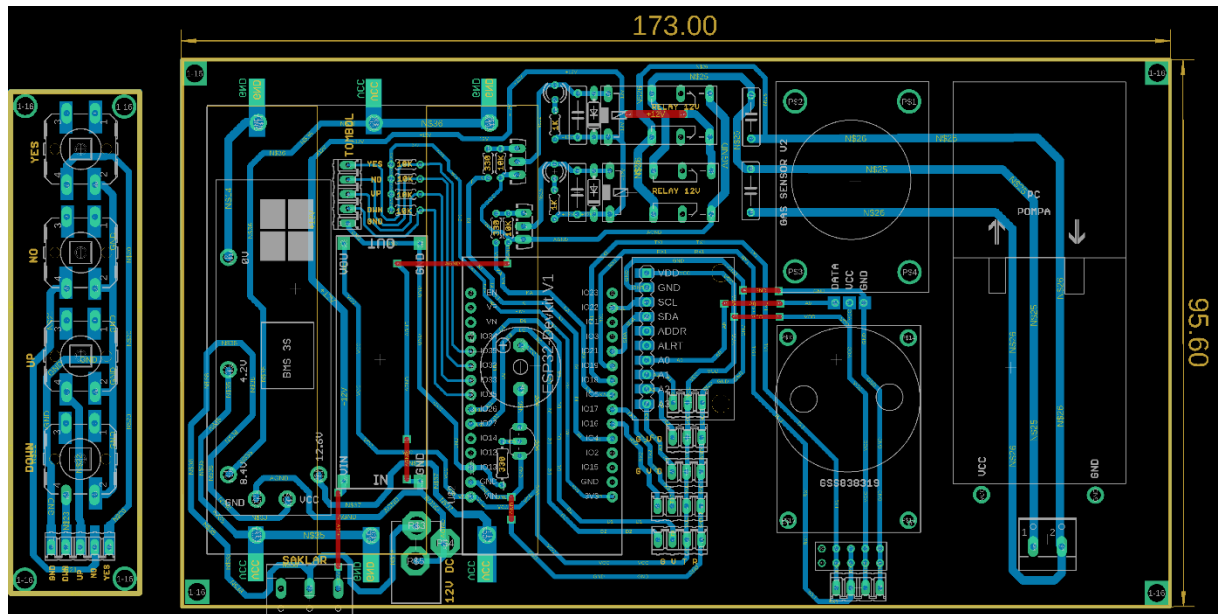


Gambar 4. 5 Skematik Desain

Setelah skematik elektrik pada Gambar 4.5 disusun sebagai terjemahan dari diagram blok pada Gambar 4.3 dan 4.4, rancangan tersebut selanjutnya diterjemahkan ke dalam layout Print Circuit Board (PCB) pada Gambar 4.6. Kedua gambar ini saling melengkapi: Gambar 4.5 memetakan jalur sinyal dan daya secara logis antar-komponen, sedangkan Gambar 4.6 menerjemahkannya menjadi jalur fisik tembaga di atas papan berukuran 173,00 mm X 95,60 mm. Keduanya penting ditampilkan karena menjadi bukti bahwa perancangan elektrik prototipe melalui tahap perencanaan formal sebelum fabrikasi bukan dirakit langsung tanpa acuan sekaligus menjadi dasar verifikasi bahwa setiap komponen pada Tabel 4.2 benar-benar

terhubung sesuai fungsinya dan tidak saling bertabrakan secara mekanik maupun termal, sebagaimana disyaratkan pada tahap desain 3D di Subbab 4.2.1.

Berdasarkan skematik elektrik pada Gambar 4.5, rancangan tersebut selanjutnya diterjemahkan ke dalam layout Print Circuit Board (PCB) sebagai acuan fisik penempatan jalur dan komponen. Hasil desain PCB ditampilkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Desain PCB

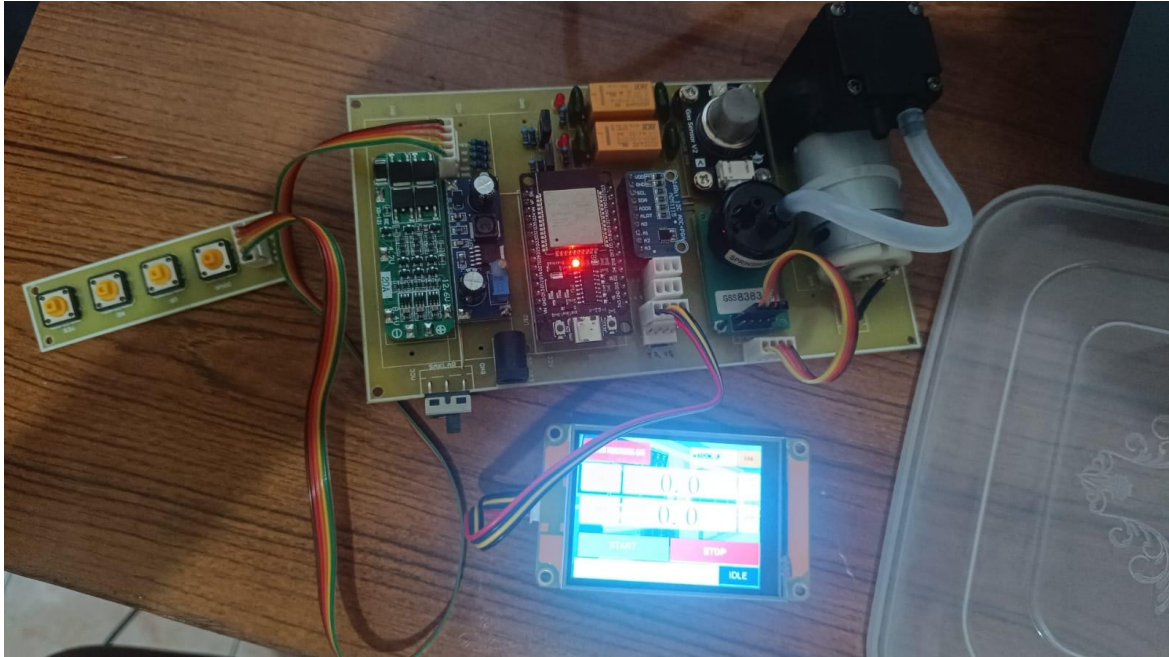
Skematik pada Gambar 4.5 tersebut selanjutnya diterjemahkan ke dalam layout Print Circuit Board (PCB) yang ditampilkan pada Gambar 4.6, berukuran 173,00 mm × 95,60 mm, terdiri dari papan utama yang memuat ESP32 sebagai mikrokontroler pusat, konektor GAS SENSOR dan POMPA, dua modul RELAY 12V, header TOMBOL, serta modul BMS 3S dan *output* 12V DC, dengan papan tambahan terpisah di sisi kiri untuk empat push button (YES, NO, UP, DOWN). Layout ini penting ditampilkan karena membuktikan bahwa seluruh sambungan pada skematik telah dikonversi menjadi jalur fisik (jalur biru sebagai trace tembaga dan garis merah sebagai indikasi ratsnest/jalur yang masih perlu diperiksa) yang siap difabrikasi, sekaligus menjadi dasar verifikasi bahwa penempatan komponen tidak saling bertabrakan secara mekanik maupun termal sebagaimana disyaratkan pada tahap desain 3

Tabel 4. 3 List Komponen

| No | Komponen              | Fungsi                                                                    | Spesifikasi Utama                         |
|----|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1  | ESP32                 | Mikrokontroler pusat; membaca sensor, mengolah data, mengendalikan sistem | Dual-core, Wi-Fi & Bluetooth              |
| 2  | Sensor $CO_2$         | Mendeteksi kadar karbon dioksida dalam gas buang                          | NDIR, 0-100% vol                          |
| 3  | Sensor $CH_4$         | Mendeteksi kadar metana dalam gas buang                                   | MOS, 0-10.000 ppm                         |
| 4  | ADS1115               | Mengonversi sinyal analog sensor ke digital 16-bit                        | I <sup>2</sup> C, 4-channel               |
| 5  | Amplifier             | Menguatkan sinyal keluaran sensor sebelum ADC                             | Op-amp presisi                            |
| 6  | LCD Nextion 2,8"      | Menampilkan pembacaan $CO_2$ , $CH_4$ , status, dan menu                  | Serial UART                               |
| 7  | Baterai Li-ion        | Sumber daya portabel untuk seluruh rangkaian                              | 12 V, kapasitas sesuai kebutuhan lapangan |
| 8  | BMS 20 A              | Proteksi baterai (overcharge, overdischarge, dll.)                        | 20 A kontinyu                             |
| 9  | Buck Converter LM2596 | Menurunkan tegangan baterai ke 5 VDC                                      | Output 7-35 V, output 5 V                 |
| 10 | Driver MOSFET         | Saklar elektronik untuk pompa udara dan aktuator                          | Sesuai kebutuhan beban                    |
| 11 | Pompa Udara 12 VDC    | Mengalirkan gas buang dari probe ke sensor                                | Flow $\pm 1$ L/menit                      |
| 12 | Buzzer                | Alarm suara saat konsentrasi melewati ambang batas                        | Aktif 5 V                                 |
| 13 | PCB                   | Media jalur dan penopang komponen elektronik                              | Kustom single layer                       |

Setelah diagram blok dan skematik rangkaian selesai dibuat, rancangan dilanjutkan ke tahap desain PCB. PCB digunakan untuk menggantikan hubungan kabel konvensional agar rangkaian menjadi lebih rapi, stabil, dan mudah dirakit. Desain PCB juga membantu mengurangi risiko kesalahan sambungan antar komponen serta meningkatkan keandalan sistem saat alat digunakan di lapangan.



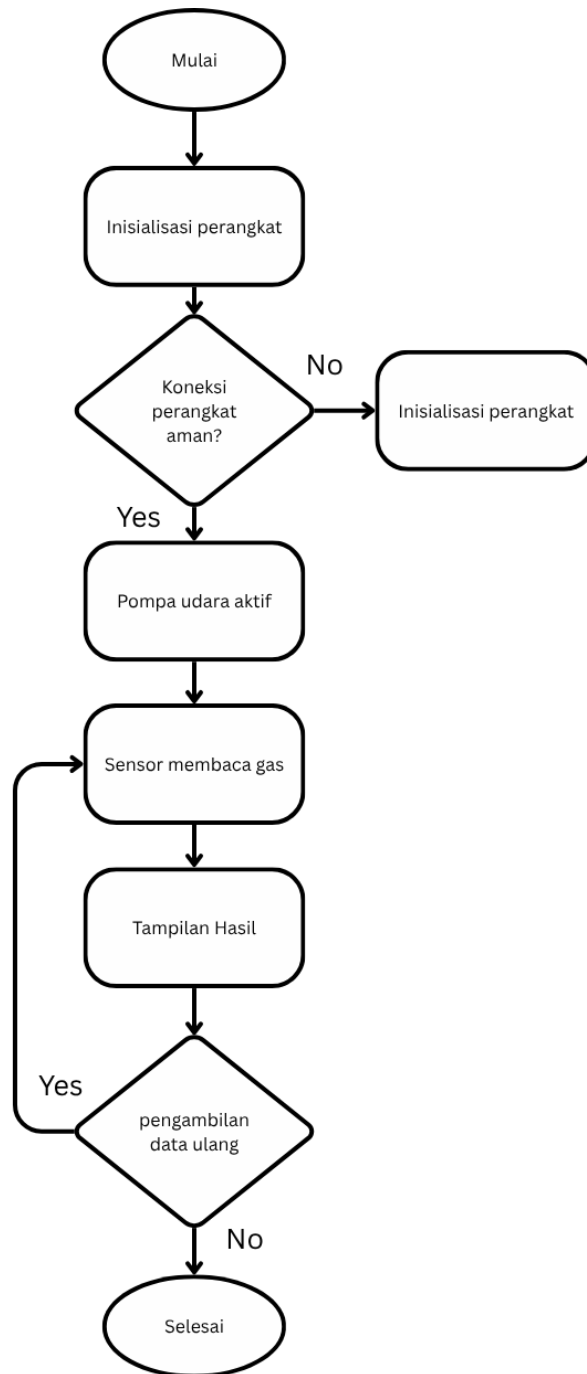


Gambar 4. 7 Hasil Rakit Komponen di PCB

#### 4.2.3 Rancangan Logika Program

Alur logika program dirancang agar prototipe beroperasi secara terstruktur dan andal di lapangan. Program diawali dengan inisialisasi seluruh periferal (sensor, LCD, pompa, buzzer), dilanjutkan pemeriksaan koneksi dan status baterai. Setelah sistem dinyatakan siap, pompa udara aktif secara otomatis untuk menarik sampel gas dari saluran buang menuju ruang sensor.

Sensor  $CO_2$  dan  $CH_4$  membaca konsentrasi gas secara paralel, dan hasilnya ditampilkan secara real-time pada LCD Nextion bersama timestamp dan status alat. Jika konsentrasi melebihi ambang batas yang diprogram, buzzer diaktifkan sebagai peringatan. Data juga dapat disimpan ke SD card untuk analisis pasca-pengukuran. Siklus pembacaan berulang terus-menerus selama sistem aktif sehingga perubahan konsentrasi gas dapat diamati secara langsung.



Gambar 4. 8 Diagram alur Pemrograman

Diagram gambar 4.8 ini menunjukkan bagaimana program pada prototipe bekerja secara berurutan, mulai dari perangkat dinyalakan sampai proses pengukuran berjalan terus-menerus secara otomatis.

### 1. Tahap Awal: Persiapan Sistem

Program dimulai dengan menjalankan inisialisasi perangkat, yaitu proses menyiapkan seluruh komponen yang dibutuhkan mikrokontroler ESP32, sensor gas, layar LCD, pompa udara, dan buzzer agar semuanya siap digunakan.

## **2. Tahap Pemeriksaan Koneksi**

Sebelum pengukuran dilakukan, sistem lebih dulu memastikan seluruh perangkat keras terhubung dengan baik melalui pemeriksaan "Koneksi Perangkat OK?". Pemeriksaan ini penting untuk mencegah kesalahan pengukuran akibat sensor atau komponen yang belum siap.

- Jika koneksi belum baik, sistem akan menampilkan status error kepada pengguna, kemudian mengulang pemeriksaan sampai koneksi dinyatakan normal.
- Jika koneksi sudah baik, proses akan dilanjutkan ke tahap berikutnya.

## **3. Tahap Pengambilan dan Pembacaan Data**

Setelah koneksi dipastikan aman, pompa udara akan aktif untuk menarik sampel gas buang dari saluran mesin menuju ruang sensor. Selanjutnya, sensor akan membaca konsentrasi gas  $CO_2$  dan  $CH_4$  secara bersamaan, dan hasilnya langsung ditampilkan secara real-time pada layar LCD.

## **4. Tahap Evaluasi Ambang Batas**

Sistem kemudian memeriksa apakah konsentrasi gas yang terbaca melebihi ambang batas yang telah ditentukan.

- Jika melebihi, buzzer akan aktif sebagai tanda peringatan.
- Jika tidak melebihi, sistem akan langsung melanjutkan proses tanpa tindakan tambahan.

## **5. Tahap Pengulangan Siklus**

Baik setelah buzzer aktif maupun tidak, sistem akan kembali ke tahap pembacaan sensor. Hal ini membentuk siklus berulang yang memungkinkan alat terus memantau kondisi emisi gas secara otomatis selama perangkat dalam keadaan menyala, tanpa memerlukan intervensi manual dari pengguna.

#### 4.2.3.1 Pemrograman Sensor $CO_2$

```
1 void getMultiplier() {
2     Serial.println("Membersihkan buffer sebelum mencari multiplier...");
3     while(CO2Serial.available() > 0) {
4         CO2Serial.read();
5     }
6     Serial.println("Mengirim perintah pengali (.)...");
7     CO2Serial.print(".\r\n");
8     delay(1000);
9     if (CO2Serial.available() > 0) {
10        String resp = CO2Serial.readStringUntil('\n');
11        resp.trim();
12        int dotIndex = resp.indexOf('.');
13        if (dotIndex >= 0) {
14            String multStr = resp.substring(dotIndex + 1);
15            multStr.trim();
16            multiplier = multStr.toInt();
17            if (multiplier > 0) {
18                Serial.print("BERHASIL! Multiplier ditemukan: ");
19                Serial.println(multiplier);
20            } else {
21                multiplier = 10;
22            }
23        }
24    }
25 }
26
27 void ReadCO2(){
28     if (CO2Serial.available() > 0) {
29         String rawData = CO2Serial.readStringUntil('\n');
30         rawData.trim();
31         if (rawData.startsWith("Z")) {
32             String rawValue = rawData.substring(2);
33             long zValue = rawValue.toInt();
34             float co2Percent = (float)zValue / 100.0;
35             co2Percent = co2Percent - 0.0;
36             ppmCO2 = co2Percent;
37         }
38     }
39 }
40
41 void TaskHandleCO2Func(void* parameter) {
42     getMultiplier();
43     delay(1000);
44     for (;;) {
45         if (!FlagKal) ReadCO2();
46         delay(10);
47     }
48 }
```

Gambar 4. 9 Pemrograman  $CO_2$

Program sensor  $CO_2$  terdiri dari tiga fungsi yang bekerja secara berurutan. Pertama, fungsi `getMultiplier()` dijalankan satu kali saat sistem menyala. Fungsi ini membersihkan buffer UART terlebih dahulu untuk membuang sisa data residual, kemudian mengirimkan perintah "." ke sensor  $CO_2$  melalui jalur serial. Sensor merespons dengan nilai faktor pengali (*multiplier*) yang menentukan skala pembacaan sesuai rentang sensor yang terpasang. Jika respons tidak valid, program menggunakan nilai default 10 sebagai fallback. Kedua, fungsi `ReadCO2()` membaca data konsentrasi  $CO_2$  yang dikirim sensor secara kontinu. Data difilter berdasarkan awalan karakter "Z" yang merupakan penanda data konsentrasi valid sesuai protokol komunikasi sensor NDIR. Nilai integer setelah karakter "Z" kemudian dikonversi menjadi konsentrasi dalam satuan persen volume (%vol) menggunakan persamaan:

$$\text{CO}_2 (\% \text{vol}) = \frac{Z_{\text{value}}}{100} \quad (4.1)$$

Hasil konversi disimpan pada variabel global `ppmCO2` untuk ditampilkan pada LCD dan digunakan dalam perhitungan emisi. Ketiga, fungsi `TaskHandleCO2Func()` merupakan *task* RTOS yang berjalan secara paralel dengan proses lain di ESP32. *Task* ini memanggil `getMultiplier()` sekali saat inisialisasi, kemudian memanggil `ReadCO2()` secara berulang setiap 10 ms selama tidak ada proses kalibrasi aktif yang ditandai oleh *flag* `FlagKal`.

#### 4.2.3.2 Pemrograman Sensor CH<sub>4</sub>

```

1  float getVoltage(byte Address) {
2
3      int samples = 7;
4      for(int i = 0; i < samples; i++) {
5          total += adc.convert(Address, ADS1115_RANGE_4096);
6          delay(100);
7      }
8      float avgRaw = (float)total / samples;
9      return avgRaw * 4.096 / 32768.0;
10 }
11
12 float KalibrasiMQ4(){
13     const float RL_VALUE = 10.0;
14     const float RO_CLEAN_AIR_RATIO = 4.4;
15     const float MQ4_SLOPE = -0.38;
16     const float MQ4_INTERCEPT = 1.14;
17
18     Serial.println("--- MEMULAI KALIBRASI MQ-4 ---");
19     float sensor_volt = getVoltage(ADS1115_CHANNEL0);
20     float rs = ((5.0 * RL_VALUE) / sensor_volt) - RL_VALUE;
21     float R0 = rs / RO_CLEAN_AIR_RATIO;
22
23     Serial.print("Vout: "); Serial.print(sensor_volt);
24     Serial.print("V | RS: "); Serial.print(rs);
25     Serial.print(" | Hasil R0: "); Serial.println(R0);
26     return R0;
27 }
28
29 float ReadMQ4(){
30     const float RL_VALUE = 10.0;
31     const float MQ4_SLOPE = -0.38;
32     const float MQ4_INTERCEPT = 1.14;
33
34     float vOut = getVoltage(ADS1115_CHANNEL0);
35     float rs_gas = ((5.0 * RL_VALUE) / vOut) - RL_VALUE;
36     float ratio = rs_gas / R0_MQ4;
37
38     float log_ppm = (log10(ratio) - MQ4_INTERCEPT) / MQ4_SLOPE;
39     float ppm_CH4 = pow(10, log_ppm);
40
41     ppm_CH4 = ppm_CH4 * 55.6;
42
43     return ppm_CH4;

```

Gambar 4. 10 Pemrograman CH<sub>4</sub>

Program sensor  $CH_4$  terdiri dari tiga fungsi yang saling bergantung. Pertama, fungsi `getVoltage()` membaca tegangan keluaran sensor MQ 4 dari modul ADS1115. Untuk meredam *noise* pembacaan, tegangan dirata-rata dari 7 sampel berturut-turut dengan jeda 100 ms per sampel. Nilai *raw* ADC dikonversi ke satuan Volt menggunakan persamaan:

$$V_{out} = \frac{ADC_{raw} \times 4,096}{32768} (\text{Volt}) \quad (4.2)$$

di mana 4,096 V adalah tegangan referensi penuh (*full-scale*) ADS1115 pada konfigurasi  $\pm 4,096$  V, dan  $32768 = 2^{15}$  merepresentasikan nilai tengah resolusi 16-bit ADC.

Kedua, fungsi `KalibrasiMQ4()` dijalankan satu kali di udara bersih untuk menentukan nilai  $R_0$ , yaitu resistansi referensi sensor pada kondisi tanpa gas target. Resistansi sensor  $R_S$  dihitung dari tegangan keluaran menggunakan prinsip rangkaian pembagi tegangan dengan resistansi beban  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$

$$R_S = \frac{V_{CC} \times R_L}{V_{out}} - R_L = \frac{5,0 \times 10}{V_{out}} - 10(\text{k}\Omega) \quad (4.3)$$

Setelah tegangan output dikonversi dulu menjadi resistansi menggunakan rumus pembagi tegangan, di mana  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$  adalah resistor pembanding yang nilainya tetap.:

$$R_0 = \frac{R_S}{4,4} \quad (4.4)$$

$R_0$  adalah resistansi sensor saat berada di udara bersih ini dijadikan titik acuan pengukuran. Nilai 4,4 adalah rasio  $R_S/R_0$  di udara bersih yang sudah ditetapkan di datasheet MQ-4. Proses ini harus dilakukan sekali sebelum pengukuran dimulai, dengan cara mengalirkan udara bersih ke sensor selama beberapa menit.:

$$\log(\text{ppm}) = \frac{\log(R_S/R_0) - b}{m} = \text{ppm}_{CH_4} = 10^{\log(\text{ppm})} \quad (4.5)$$

Kurva karakteristik MQ-4 berbentuk garis lurus dalam skala log-log artinya hubungan antara  $R_S/R_0$  dan konsentrasi gas mengikuti pola logaritmik. Rumus ini membalik kurva tersebut: dari nilai  $R_S/R_0$  yang terukur, dihitung berapa ppm  $CH_4$  yang sesuai. Nilai -0,38 adalah kemiringan kurva (slope) dan 1,14 adalah titik potong (intercept) dari datasheet.:

$$\text{ppm}_{\text{ch4l}} = \text{ppm}_{\text{ch4}} \times 55,6 \quad (4.6)$$

Dari sub bab 4.3 bagian c Faktor 55,6 diperoleh dari hasil eksperimen kalibrasi dilusi fisik pada Tabel 4.6 dan 4.7, di mana 9 mL biogas dicampur dengan 491 mL udara bersih menghasilkan CV = 2,99% yang memenuhi batas keberterimaan 5%.

### 4.3 Pengukuran Emisi $CO_2$ dan $CH_4$

Kalibrasi prototipe dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat uji emisi profesional yang dioperasikan secara bersamaan pada objek emisi yang sama. Seluruh pengujian dilaksanakan di Laboratorium Marine Power Plant (MPP) ITS menggunakan mesin diesel Yanmar TF85 sebagai sumber emisi terkontrol. Kriteria keberterimaan mengacu pada US EPA (2022), yaitu deviasi antara prototipe dan alat referensi tidak melebihi 10%. Kalibrasi dilakukan dalam tiga tahap progresif untuk  $CO_2$  dan satu tahap terpisah untuk  $CH_4$ . Setiap hasil yang tidak memenuhi kriteria diikuti oleh perbaikan rangkaian sebelum pengujian berikutnya dilaksanakan.



Gambar 4. 11 proses kalibrasi Emisi

#### 4.3.1 Kalibrasi Sensor $CO_2$ dan $CH_4$

Kalibrasi Untuk  $CO_2$  validasi mencakup empat parameter sesuai CEN (2022): akurasi deviasi 1,26–1,89% terhadap alat uji profesional lab Marine Power Plant, presisi CV<5% pada seluruh kondisi pembebanan, Tabel 4.3 dan 4.4, linearitas deviasi tidak membesar signifikan dari load rendah ke tinggi, dan bias sistematis (cenderung under-reading, berpotensi dikoreksi melalui faktor kalibrasi linear pada pengembangan selanjutnya). Hasil ini menunjukkan sensor NDIR prototipe valid digunakan untuk inventarisasi emisi  $CO_2$  pada kapal non-konvensional skala kecil. Berikut proses kalibrasi  $CO_2$

## Perbandingan Alat uji emisi profesional dan prototipe objek emisi $CO_2$

Tabel 4. 4 Perbandingan Emisi  $CO_2$

| Dummy Load<br>(Watt) | RPM  | Emisi $CO_2$ alat<br>profesional<br>(Vol%) | Emisi $CO_2$<br>Prototipe<br>(Vol%) | Selisih (%) |
|----------------------|------|--------------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 2000                 | 1400 | 2,95                                       | 3.79                                | 28,47%      |
|                      | 1600 | 3.47                                       | 4.34                                | 25,07%      |
|                      | 1800 | 3.87                                       | 4.70                                | 21,45%      |
|                      | 2000 | 3.64                                       | 4.19                                | 15,11%      |
|                      | 2200 | 3.47                                       | 4.57                                | 31,70%      |

Pengujian Selisih antara prototipe dan alat profesional berkisar 15,11-31,70%, jauh melampaui batas toleransi 10%. Penyebab utama belum diterapkannya kalibrasi offset pada sensor NDIR di lingkungan gas panas

### a. Progres ke 2 Perbandingan Alat uji emisi profesional dan prototipe objek emisi $CO_2$

Setelah perbaikan amplifier dan penyesuaian gain ADS1115, pengujian tahap kedua dilakukan menggunakan bahan bakar B0 pada variasi RPM 2.000-2.200 dengan dua level beban per RPM Verifikasi kalibrasi dilanjutkan menggunakan bahan bakar B40 (campuran 40% biodiesel FAME) guna memastikan konsistensi pembacaan pada bahan bakar dengan profil emisi yang berbeda. Hasil ditampilkan pada tabel 4.4 dan 4.5

Tabel 4. 5 Perbandingan Emisi  $CO_2$  BBM B0

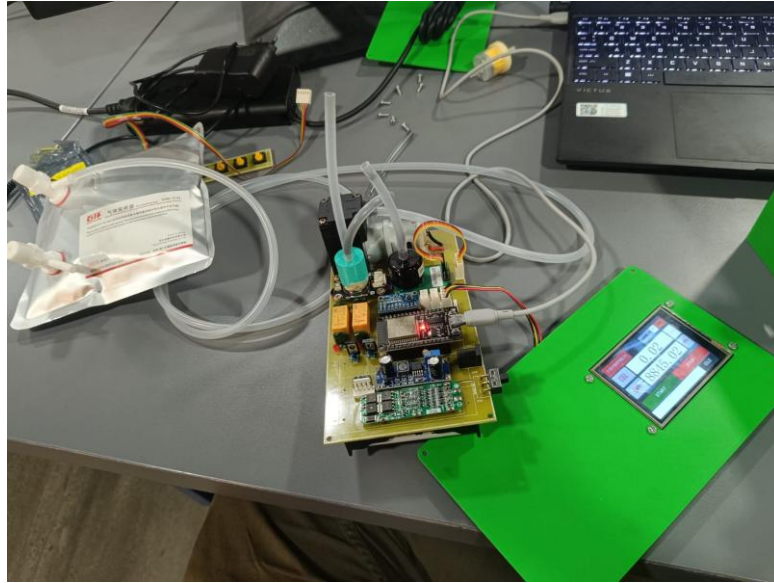
| No | RPM  | Daya<br>(kW) | $CO_2$<br>Profesional<br>(%vol) | $CO_2$ Prototipe<br>(%vol) | Selisih<br>(%) |
|----|------|--------------|---------------------------------|----------------------------|----------------|
| 1  | 2000 | 2,038        | 3,90                            | 3,95                       | 1,28           |
|    |      | 3,235        | 4,74                            | 4,82                       | 1,69           |
| 2  | 2100 | 2,081        | 3,94                            | 4,01                       | 1,78           |
|    |      | 3,271        | 4,71                            | 4,78                       | 1,49           |
| 3  | 2200 | 2,085        | 3,98                            | 4,04                       | 1,51           |
|    |      | 3,306        | 4,89                            | 4,97                       | 1,64           |

Tabel 4. 6 Perbandingan Emisi  $CO_2$  BBM B40

| No | RPM  | Daya<br>(kW) | $CO_2$<br>Profesional<br>(%vol) | $CO_2$ Prototipe<br>(%vol) | Selisih<br>(%) |
|----|------|--------------|---------------------------------|----------------------------|----------------|
| 1  | 2000 | 2,030        | 3,90                            | 3,97                       | 1,79           |
|    |      | 3,173        | 4,74                            | 4,80                       | 1,27           |
| 2  | 2100 | 2,083        | 3,94                            | 4,00                       | 1,52           |
|    |      | 3,286        | 4,71                            | 4,79                       | 1,70           |
| 3  | 2200 | 2,102        | 3,98                            | 4,03                       | 1,26           |
|    |      | 3,320        | 4,89                            | 4,96                       | 1,43           |



b. Perbandingan Alat uji emisi profesional dan prototipe objek emisi  $\text{CH}_4$



Gambar 4. 12 proses kalibrasi Emisi  $\text{CH}_4$

Untuk  $\text{CH}_4$ , evaluasi menunjukkan hasil yang sangat berbeda. Deviasi ekstrem terhadap nilai teori bukan mengindikasikan masalah kalibrasi yang dapat dikoreksi melalui penyesuaian linear, melainkan ketidaksesuaian fundamental antara karakteristik sensor MOS MQ-4 (dirancang untuk deteksi kebocoran gas pada rentang 300–10.000 ppm) dengan konsentrasi  $\text{CH}_4$  aktual pada gas buang diesel yang berada jauh di bawah rentang deteksi efektif sensor tersebut, diperparah oleh potensi interferensi gas lain dalam komposisi gas buang yang kompleks (Mirzaei et al., 2022). Presisi yang baik pada proses dilusi ( $\text{CV} < 5\%$ , Tabel 4.8) mengonfirmasi metode dilusi fisik berjalan presisi

Dengan menerapkan persamaan pencampuran gas ideal

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_{total} \quad (4.7)$$

Selanjutnya berikut contoh kalkulasi diambil data percobaan 3

$$V_{biogas} = \frac{9.000}{500.000} \times 500 \text{ mL} = 9 \text{ mL}$$

$$V_{udara} = V_{total} - V_{biogas} = 500 - 9 = 491 \text{ mL}$$

$$V_{udara} = V_{total} - V_{biogas} = 500 - 9 = 491 \text{ mL}$$

$$Faktor_{dilusi} = \frac{V_{total}}{V_{biogas}} = \frac{500}{9} = 55,6$$

Tabel 4. 7 Kalkulasi Variasi Faktor Skala Teoritis

| Percobaan | V Biogas (mL) | Vudara (mL) | Faktor Teoritis |
|-----------|---------------|-------------|-----------------|
| 1         | 7             | 493         | 71,4            |
| 2         | 8             | 492         | 62,5            |
| 3         | 9             | 491         | 55,6            |
| 4         | 10            | 490         | 50,0            |

Metode dilusi fisik diterapkan untuk menyesuaikan konsentrasi  $CH_4$  biogas Nongkojajar sekitar 50%-70% atau diambil satuan ppm ~500.000 ppm (Ariyanto & Soedarto, 2025), dilanjutkan gas diukur ke dalam rentang pengukuran sensor MQ-4 dengan (0–10.000 ppm). Volume biogas sebesar 9 mL dicampur dengan 491 mL udara bersih dalam *sampling* bag berkapasitas 500 mL, menghasilkan faktor dilusi sebesar 55,6 berdasarkan prinsip konservasi massa gas ideal ISO 6145. Maka sebelum edit rumus perlu dilakukan pengukuran untuk penentuan faktor teoritisnya di tabel 4.8 Berikut.

Tabel 4. 8 Percobaan Pengambilan data  $CH_4$ 

| Percobaan | V Biogas (mL) | PPM TERBACA | Faktor Teoritis | PPM AKTUAL |
|-----------|---------------|-------------|-----------------|------------|
| 1         | 7             | 71,35       | 71,4            | 5096,4     |
| 2         | 8             | 84,68       | 62,5            | 5292,5     |
| 3         | 9             | 91,15       | 55,6            | 5063,9     |
| 4         | 10            | 98,47       | 50,0            | 4923,5     |

Konsentrasi  $CH_4$  hasil pengukuran pada tabel 4.8 berada jauh di bawah rentang deteksi resmi sensor MQ-4 (300-10.000 ppm) bahkan jauh di bawah titik kalibrasi rekomendasi pabrikan untuk modul DFRobot yang digunakan sehingga akurasi pembacaan pada rentang tersebut tidak dapat dijamin. Meski demikian, nilai serendah itu secara fisis tetap masuk akal, mengingat *unburned methane slip* pada pembakaran diesel memang jauh lebih kecil dibanding mesin berbahan bakar gas. Setelah itu koreksi ppm aktual dengan koreksi statistik

Tabel 4. 9 Verifikasi Dengan Metode Statistik

| Selisih kuadrat | Rata-Rata | SD     | CV    |
|-----------------|-----------|--------|-------|
| 5,5             | 5094,1    | 152,08 | 2,99% |

Secara statistik hasil CV di bawah 5% maka hasil pembacaan sensor MQ-4 terhadap faktor koreksi memenuhi.

**Tabel 4. 10 Pemilihan Faktor Skala**

| Percobaan | Faktor Teoritis | PPM TARGET | Dikali faktor teoritis |
|-----------|-----------------|------------|------------------------|
| 1         | 71,4            | 9000       | 642857,1429            |
| 2         | 62,5            | 9000       | 562500                 |
| 3         | 55,6            | 9000       | 500000                 |
| 4         | 50,0            | 9000       | 450000                 |

Target konsentrasi masuk sensor sebesar 9.000 ppm dipilih untuk memberikan safety margin terhadap batas atas sensor.. Koreksi faktor dilusi diimplementasikan dalam perangkat lunak dengan persamaan  $\text{ppm\_ch4} = \text{ppm\_ch4} \times 55,6$ , sehingga pada tampilan digital bisa mencapai 500.000 ppm

#### 4.4 Proses Pengukuran Emisi $CO_2$ dan $CH_4$ di Kapal

Sub-bab ini menyajikan proses pengukuran emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  dari gas buang mesin Yanmar TF85 pada kondisi operasi aktual kapal non konvensional di Pantai Kenjeran, Surabaya. Pengukuran langsung dipilih karena *emission factor* generik dari referensi tidak mencerminkan karakteristik pembakaran mesin diesel kapal skala kecil yang beroperasi pada beban bervariasi, sehingga data aktual per mode beban diperlukan sebagai dasar inventarisasi emisi yang valid (Bai et al., 2020). Proses dilaksanakan melalui lima langkah berurutan

1. Penetapan parameter bahan bakar, yaitu densitas, nilai kalor bersih (NCV), kandungan karbon, dan *emission factor* teoritis B0, B35, dan B40 ditetapkan sebagai *output* tetap sebelum pengukuran dimulai (International Maritime Organization, 2024).
2. Penetapan mode beban dan pengukuran konsumsi bahan bakar, mesin dioperasikan pada empat tingkat RPM yang merepresentasikan *low*, *medium*, *high*, dan *full near load* dengan tachometer, lalu memperhatikan jerigen konsumsi bahan bakar diukur secara volumetrik per 100 mL pada setiap beban.



a



b

dGambar 4. 13 a) tachometer mengukur rpm mesin b) Jerigen Ukur penentuan load

3. Pengukuran konsentrasi emisi dan validasi statistik, konsentrasi  $CO_2$  (% vol) dan  $CH_4$  (ppm) diukur sebanyak tiga ulangan per titik pengukuran, kemudian divalidasi menggunakan *Coefficient of Variation* ( $CV \leq 5\%$ ) pada tingkat kepercayaan 95% sesuai Persamaan (3.2).



Gambar 4. 14 Proses Pengukuran secara langsung

4. Konversi konsentrasi gas ke *Exhaust Gas Flow* dan *Emission factor*, konsentrasi gas dikonversi menjadi EGF menggunakan Persamaan (2.1) berbasis neraca massa karbon, kemudian dihitung *emission factor*  $CO_2$  dan  $CH_4$  dalam satuan g/kWh dan g/g fuel menggunakan Persamaan (2.2) dan (2.3), termasuk koreksi faktor dilusi 62,5 pada pembacaan  $CH_4$  sensor MQ-4 (Dey, 2018).
5. Kalkulasi BAV emisi tahunan, *emission factor* per mode beban dikalikan dengan profil operasi aktual kapal (1.872 trip/tahun; 1 jam akselerasi, 4 jam pelayaran, 1 jam deselerasi per trip) menggunakan Persamaan (2.8) untuk menghasilkan total emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  tahunan sebagai *Baseline Actual Value* (BAV) (U.S. Environmental Protection Agency, 2020).

#### 4.4.1 Parameter Bahan Bakar B0, B35, dan B40

Sebelum konsentrasi gas buang hasil pengukuran prototipe dapat dikonversi menjadi *emission factor* aktual, penelitian ini terlebih dahulu menetapkan nilai *emission factor* teoritis (EF teori) dan kandungan karbon masing-masing bahan bakar sebagai basis pembanding. Secara teori, EF baku pada literatur Tabel 2.5 hanya tersedia untuk bahan bakar tunggal diesel murni dan FAME murni sedangkan biodiesel B35 dan B40 merupakan campuran (*blend*) keduanya, sehingga EF-nya tidak dapat diambil langsung dari tabel referensi, melainkan harus diturunkan melalui pembobotan berbasis kandungan energi (*energy share*) sesuai kerangka pada Sub-bab 2.4. Pendekatan berbasis energi ini dipilih ketimbang rata-rata volumetrik sederhana karena densitas dan nilai kalor diesel dan FAME berbeda signifikan, sehingga proporsi volume tidak merepresentasikan proporsi kontribusi pembakaran yang sesungguhnya terhadap total energi yang dilepas.

Volume share ditentukan dari persentase biodiesel (Persamaan 2.9–2.10), dikonversi ke massa dan energi per liter (Persamaan 2.11–2.13), lalu ke *energy share* (Persamaan 2.14) berikut contoh perhitungan untuk B35 ( $x_{FAME} = 0,35$ ), menggunakan data Tabel 2.5 ( $\rho_{diesel} = 860$ ;  $\rho_{FAME} = 875 \text{ kg/m}^3$ ;  $NCV_{diesel} = 42,7$ ;  $NCV_{FAME} = 27 \text{ MJ/kg}$ ):

$$m_{diesel} = 0,65 \times 0,860 = 0,559 \text{ kg/L}, m_{FAME} = 0,35 \times 0,875 = 0,306 \text{ kg/L}$$

$$E_{diesel} = 0,559 \times 42,7 = 23,87 \text{ MJ}, E_{FAME} = 0,306 \times 27 = 8,27 \text{ MJ}$$

$$E_{total} = 32,14 \text{ MJ} \rightarrow ES_{diesel} = 0,743, ES_{FAME} = 0,257$$

*Energy share* ini dikalikan EF baku tiap komponen (Persamaan 2.16), untuk  $CO_2$  ( $EF_{diesel} = 74.100$ ;  $EF_{FAME} = 70.800 \text{ kg/TJ}$ ):

$$EF_{CO_2,blend} = (0,743 \times 74.100) + (0,257 \times 70.800) \approx 73.251 \text{ kg/TJ}$$

dan dengan rumus yang sama untuk  $CH_4$  ( $EF_{diesel} = 10,4$ ;  $EF_{FAME} = 10,0 \text{ kg/TJ}$ ):

$$\begin{aligned} EEF_{CH_4,blend} &= (ES_{diesel} \times EF_{CH_4,diesel}) + (ES_{FAME} \times EF_{CH_4,FAME}) \\ &= (0,743 \times 10,4) + (0,257 \times 10,0) \approx 10,297 \text{ kg/TJ} \end{aligned}$$

Kedua hasil ini konsisten dengan EF teori B35 pada Tabel 4.22 ( $CO_2 = 73.250 \text{ kg/TJ}$ ;  $CH_4 = 10,297 \text{ kg/TJ}$ ).

EF  $CO_2$  maupun  $CH_4$  teori sama-sama menurun konsisten seiring naiknya proporsi biodiesel, karena EF baku FAME untuk kedua gas  $70.800 \text{ kg/TJ}$  untuk  $CO_2$ ;  $10,0 \text{ kg/TJ}$  untuk  $CH_4$  lebih rendah dibanding diesel  $74.100 \text{ kg/TJ}$ ;  $10,4 \text{ kg/TJ}$ . Ini terjadi akibat kandungan oksigen intrinsik pada gugus ester FAME yang menggantikan sebagian ikatan karbon hidrogen murni, sehingga proporsi massa karbon dan potensi pembentukan  $CH_4$  dari pembakaran tak sempurna per satuan energi yang dilepas ikut menurun. Penurunan EF  $CH_4$  teori memang jauh lebih kecil secara persentase dibanding  $CO_2$  (karena rentang nilai baku diesel FAME untuk  $CH_4$  lebih sempit), namun arah trennya tetap sejalan. Nilai EF teori dan kandungan karbon ini (Tabel 4.10-4.11) menjadi pembanding bagi EF aktual pada Sub-bab 4.4.5, sekaligus parameter tetap dalam perhitungan *exhaust gas flow* pada Sub-bab 4.4.4.

Tabel 4. 11 Spesifikasi Bahan Bakar B0, B35, dan B40

| Parameter               | B0 (Diesel) | B35<br>(Interpolasi) | B40<br>(Interpolasi) | Satuan            |
|-------------------------|-------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Komposisi diesel / FAME | 100% / 0%   | 65% / 35%            | 60% / 40%            | vol/vol           |
| Densitas blended        | 860,0       | 865,25               | 866,0                | kg/m <sup>3</sup> |
| NCV blended (Data Lab)  |             | 42.7                 |                      | MJ/kg             |
| EF $CO_2$ teori         | 74.100      | 73.261,6             | 73.121,2             | kg/TJ             |
| EF $CH_4$ teori         | 10.4        | 10,297               | 10,280               | kg/TJ             |

#### 4.4.2 Penentuan Load dan Pengukuran Konsusmsi BBM

Daya aktual mesin pada tiap mode operasi tidak dapat diukur langsung menggunakan dynamometer di lapangan, sehingga penelitian ini mengestimasi melalui pendekatan *propeller law* (afinity law) sesuai Persamaan (3.2). Secara teori, hukum ini menyatakan bahwa pada kapal dengan *Fixed Pitch Propeller* (FPP) *direct drive* tanpa gearbox, daya poros berbanding hampir pangkat tiga terhadap putaran mesin, karena torsi yang dibutuhkan baling-baling meningkat secara kuadratik terhadap kecepatan putar sementara daya adalah hasil kali torsi dan kecepatan sudut sehingga hubungan daya-putaran menjadi kubik, bukan linier (MAN Energy Solution, 2018). Empat mode beban diuji pada 600, 1.200, 1.500, dan 1.700 RPM dibatasi 1.700 RPM karena putaran lebih tinggi menyebabkan air masuk ke kapal dengan 1.700 RPM (6,338 kW) ditetapkan sebagai titik referensi *rated* untuk kondisi pengujian ini.

Contoh Medium Load ( $N_{actual} = 1.200$ ;  $N_{rated} = 1.700$ ;  $P_{rated} = 6,338\text{kW}$ ):

$$EEP_{aktual} = 6,338 \times \left(\frac{1.200}{1.700}\right)^3 = 6,338 \times 0,3517 = 2,229 \text{ kW}$$

Sesuai Tabel 4.12. Konsumsi bahan bakar diukur volumetrik per 100 mL lalu dikonversi ke kg/h via densitas; Medium Load B0 (waktu 731 detik) menghasilkan 0,4235 kg/h sesuai Tabel 4.13. Karena hubungan daya-putaran bersifat kubik, kenaikan RPM kecil di beban rendah menghasilkan penurunan daya jauh lebih tajam dibanding kenaikan linier menjelaskan *load factor* Low Load hanya 4,4% meski RPM-nya mencapai 35% dari RPM referensi. Nilai *load factor* ini dipakai kembali pada Sub-bab 4.4.6 untuk mengalikan EF dengan durasi tiap fase pelayaran.

Tabel 4. 12 Perhitungan Daya dan *Load factor* BBM B0

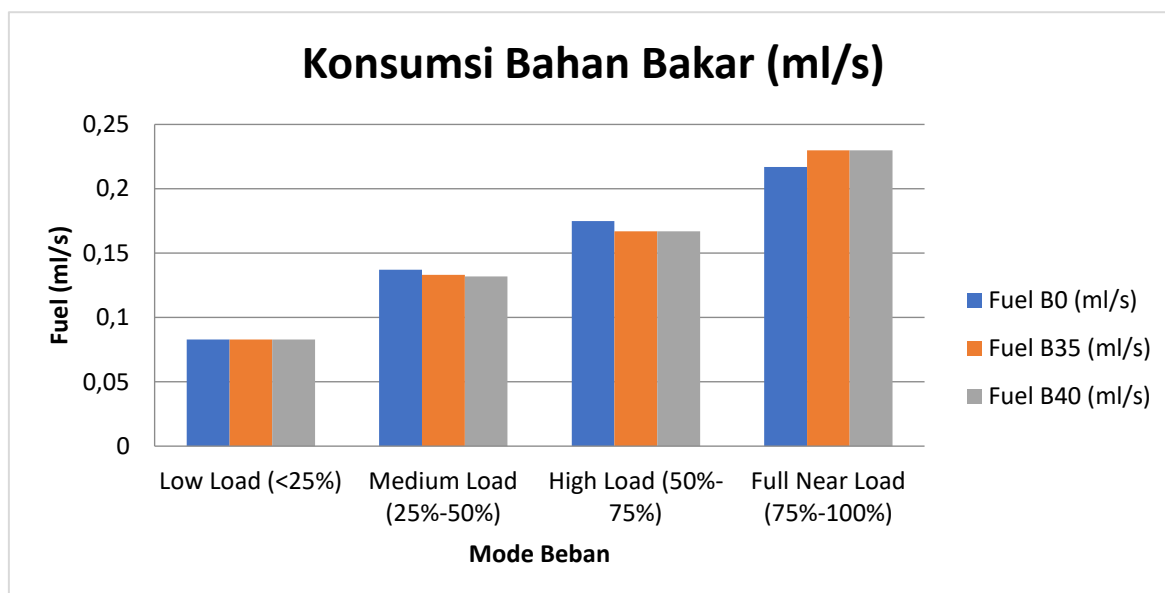
| No | Mode Beban               | RPM   | Daya (HP) | Daya (kW) | <i>Load factor</i> | Waktu 100 mL (s) | Fuel (kg/h) |
|----|--------------------------|-------|-----------|-----------|--------------------|------------------|-------------|
| 1  | Low Load (<25%)          | 600   | 0,374     | 0,279     | 0,0440             | 1.207            | 0,2565      |
| 2  | Medium Load (25-50%)     | 1.200 | 2,990     | 2,229     | 0,3517             | 731              | 0,4235      |
| 3  | High Load (50-75%)       | 1.500 | 5,839     | 4,354     | 0,6870             | 570              | 0,5432      |
| 4  | Full Near Load (75-100%) | 1.700 | 8,500     | 6,338     | 1,0000             | 461              | 0,6716      |

Tabel 4.13 menunjukkan hasil estimasi daya dan *load factor* pada empat mode beban operasional kapal, mulai dari *low load* hingga *full near load*. Terlihat bahwa daya meningkat secara non-linear seiring kenaikan rpm, sesuai dengan sifat *propeller law* yang berbanding lurus dengan pangkat tiga putaran mesin kenaikan rpm dari 600 ke 1.700 menghasilkan kenaikan daya dari 0,279 kW ke 6,338 kW , jauh lebih besar dibanding kenaikan rpm nya. Nilai SFOC hasil pengujian pada kondisi Medium, High, dan Full Load (189,98; 124,74; dan 105,95 g/kWh) lebih rendah dari spesifikasi pabrikan (230,66 g/kWh). Hal ini disebabkan Daya aktual mesin

dihitung menggunakan pendekatan korelasi RPM sesuai Persamaan (3.2) bukan pengukuran torsi langsung sehingga berpotensi menyimpang dari daya aktual mesin. Nilai SFOC ini kemudian menjadi pembagi pada Persamaan (2.7) untuk konversi Emission Factor dari basis energi ke basis bahan bakar. Perbedaan dengan spek pabrikan juga wajar terjadi karena spek diuji pada kondisi bench test terkontrol, sedangkan penelitian ini menggunakan kondisi operasional lapangan aktual.

Tabel 4. 13 Rangkuman Konsumsi Bahan Bakar (Fuel)

| No | Mode Beban (Load)         | Fuel B0 (ml/s) | Fuel B35 (ml/s) | Fuel B40 (ml/s) | Fuel B0 (Kg/h) | Fuel B35 (Kg/h) | Fuel B40 (Kg/h) |
|----|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | Low Load (<25%)           | 0,083          | 0,083           | 0,083           | 0,257          | 0,258           | 0,259           |
| 2  | Medium Load (25%-50%)     | 0,137          | 0,133           | 0,132           | 0,424          | 0,413           | 0,410           |
| 3  | High Load (50%-75%)       | 0,175          | 0,167           | 0,167           | 0,543          | 0,521           | 0,520           |
| 4  | Full Near Load (75%-100%) | 0,217          | 0,230           | 0,230           | 0,672          | 0,718           | 0,717           |



Gambar 4. 15 Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar (ml/S) pada Berbagai Mode Beban

Tabel 4.13 dan Gambar 4.15 membandingkan konsumsi bahan bakar ketiga varian (B0, B35, B40) pada setiap mode beban. Secara umum, pola konsumsi bahan bakar ketiga varian relatif serupa dan meningkat searah dengan kenaikan beban, dari sekitar 0,257–0,259 kg/h pada *low load* hingga 0,672–0,718 kg/h pada *full near load*, mengonfirmasi bahwa perbedaan komposisi biodiesel tidak mengubah pola umum kebutuhan energi mesin terhadap beban. Namun demikian, terdapat kecenderungan menarik pada beban rendah hingga menengah: B35 dan B40 mengonsumsi bahan bakar sedikit lebih banyak dibanding B0 pada *low* dan *medium load* (misalnya 0,410–0,413 kg/h berbanding 0,424 kg/h pada *medium load*, justru B35/B40 sedikit lebih rendah), namun pada *full near load* pola ini berbalik, di mana B35 dan B40 (0,718 dan 0,717 kg/h) mengonsumsi bahan bakar lebih banyak dibanding B0 (0,672 kg/h). Kecenderungan ini sejalan dengan nilai kalor (NCV) FAME yang lebih rendah dibanding solar

murni Tabel 4.11, sehingga pada beban tinggi mesin memerlukan volume bahan bakar campuran biodiesel yang lebih besar untuk menghasilkan energi output yang setara. Temuan ini penting sebagai konteks bahwa penurunan emisi B35 dan B40 pada sub-bab berikutnya tidak disebabkan oleh konsumsi bahan bakar yang lebih hemat, melainkan oleh perbedaan *emission factor* per satuan energi dari komposisi bahan bakarnya.

#### 4.4.3 Pengukuran Konsentrasi Emisi dan Validasi Data

Setiap kombinasi bahan bakar dan mode beban diukur tiga kali pengulangan (*triplicate*). Secara teori statistik, pengulangan pengukuran diperlukan karena setiap pembacaan sensor mengandung galat acak (*random error*) dari fluktuasi pembakaran, respons sensor, dan kondisi lingkungan, sehingga satu kali pengukuran tidak cukup representatif; rata-rata dari beberapa pengulangan (Persamaan 3.3) memberikan estimasi yang lebih mendekati nilai sebenarnya berdasarkan hukum bilangan besar. Sebarannya diukur dengan *Standard Deviation* (Persamaan 3.4), lalu dinormalisasi menjadi *Coefficient of Variation* atau CV (Persamaan 3.5) dipilih karena CV bersifat tanpa satuan (*dimensionless*), sehingga presisi  $CO_2$  (%vol) dan  $CH_4$  (ppm) dapat dibandingkan setara meski beda skala satuan (Jalilibal et al., 2021)

Berikut contoh Low Load B0,  $CO_2(X_1 = 3,083; X_2 = 3,157; X_3 = 3,198\%vol)$ ,  $n = 3$ :

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{n} = \frac{3,083 + 3,157 + 3,198}{3} = \frac{9,438}{3} = 3,146 \%vol$$

$$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 0,003969 + 0,000121 + 0,002704 = 0,006794$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,006794}{3 - 1}} = \sqrt{\frac{0,006794}{2}} = \sqrt{0,003397} = 0,0583$$

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100\% = \frac{0,0583}{3,146} \times 100\% = 1,85\%$$

CV  $CO_2$  yang rendah mengonfirmasi sensor NDIR memberi pembacaan stabil, sementara CV  $CH_4$  yang tinggi menandakan keterbatasan presisi sensor MOS (MQ-4) yang sensitivitasnya lebih rentan terhadap komposisi gas campuran kompleks dibanding gas tunggal saat kalibrasi. Nilai mean pada tahap ini menjadi *output* langsung bagi perhitungan EGF di Sub-bab 4.4.4.

Tabel 4. 14 Gabungan Emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada Bahan Bakar B0

| No | Mode Beban               | $CO_2$<br>(B0<br>X1) | $CO_2$<br>(B0<br>X2) | $CO_2$<br>(B0<br>X3) | $CO_2$<br>(B0<br>Mean) | $CH_4$<br>(B0<br>X1) | $CH_4$<br>(B0<br>X2) | $CH_4$<br>(B0<br>X3) | $CH_4$<br>(B0<br>Mean) |
|----|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| 1  | Low Load<br>(<25%)       | 3,08                 | 3,16                 | 3,20                 | 3,15                   | 17,34                | 19,87                | 21,43                | 19,547                 |
| 2  | Medium Load<br>(25%-50%) | 3,49                 | 3,56                 | 3,61                 | 3,55                   | 17,91                | 20,23                | 22,18                | 20,107                 |



Tabel 4. 14 Lanjutan Gabungan Emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada Bahan Bakar B0

| No | Mode Beban                   | $CO_2$<br>(B0<br>X1) | $CO_2$<br>(B0<br>X2) | $CO_2$<br>(B0<br>X3) | $CO_2$<br>(B0<br>Mean) | $CH_4$<br>(B0<br>X1) | $CH_4$<br>(B0<br>X2) | $CH_4$<br>(B0<br>X3) | $CH_4$ (B0<br>Mean) |
|----|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 3  | High Load<br>(50%-75%)       | 3,69                 | 3,75                 | 3,82                 | 3,75                   | 18,47                | 20,89                | 22,64                | 20,667              |
| 4  | Full Near Load<br>(75%-100%) | 4,07                 | 4,15                 | 4,24                 | 4,16                   | 19,12                | 21,54                | 22,93                | 21,197              |

Tabel 4.14 menunjukkan hasil tiga kali pengulangan pengukuran  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada tiap mode beban. Konsentrasi  $CO_2$  meningkat konsisten seiring kenaikan beban, dari rata-rata 3,15 %vol pada *low load* menjadi 4,16 %vol pada *full near load*, sejalan dengan meningkatnya laju pembakaran bahan bakar. Sebaliknya, konsentrasi  $CH_4$  justru meningkat seiring naiknya beban 19,547 ke 21,197 ppm, berlawanan dengan tren  $CO_2$ . Pola ini mengindikasikan bahwa pada beban tinggi, meski laju pembakaran meningkat, proporsi metana tak terbakar.

Tabel 4. 15 Validasi Statistik  $CO_2$  dan  $CH_4$  pada Bahan Bakar B0

| No | Mode Beban                   | Mean<br>$CO_2$<br>(vol%) | SD<br>$CO_2$ | CV<br>$CO_2$ | Mean $CH_4$<br>(ppm) | SD<br>$CH_4$ | CV<br>$CH_4$ |
|----|------------------------------|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|
| 1  | Low Load<br>(<25%)           | 3,146                    | 0,058        | 1,85%        | 19,547               | 2,064        | 10,56%       |
| 2  | Medium Load<br>(25%-50%)     | 3,552                    | 0,063        | 1,78%        | 20,107               | 2,138        | 10,63%       |
| 3  | High Load<br>(50%-75%)       | 3,752                    | 0,068        | 1,81%        | 20,667               | 2,094        | 10,13%       |
| 4  | Full Near Load<br>(75%-100%) | 4,155                    | 0,085        | 2,05%        | 21,197               | 1,928        | 9,10%        |

Tabel 4.15 menunjukkan CV  $CO_2$  pada seluruh mode beban berkisar 1,78-2,05%, jauh di bawah ambang toleransi 5%, sehingga data  $CO_2$  dinyatakan presisi dan andal digunakan pada perhitungan selanjutnya. Sebaliknya, CV  $CH_4$  berkisar 9,10-10,63%, yang mengindikasikan pembacaan sensor MQ-4 persebaran data variatif dibanding sensor  $CO_2$  NDIR. Meski demikian, tren penurunan  $CH_4$  tetap konsisten pada tiap pengulangan, sehingga data ini masih layak dipakai dengan catatan interpretasi yang lebih hati-hati.

#### 4.4.4 Konversi Konsentrasi Gas Buang ke Exhaust Gas Flow

*Exhaust Gas Flow* (EGF) adalah debit volumetrik total gas buang yang keluar dari mesin per satuan waktu ( $m^3/h$ ), yang merupakan variabel antara krusial untuk mengkonversi konsentrasi gas dari sensor menjadi laju massa emisi per satuan daya. EGF dihitung menggunakan Persamaan (2.1) berbasis neraca massa karbon: pembilang menghitung laju massa  $CO_2$  yang terbentuk dari pembakaran karbon dalam bahan bakar, kemudian dibagi densitas  $CO_2$  untuk mendapatkan volume  $CO_2$ , dan selanjutnya dibagi fraksi volume  $CO_2$  di gas buang untuk mendapatkan total volume gas buang. Parameter yang digunakan pada perhitungan

ini adalah konsumsi bahan bakar aktual (kg/h) hasil pengukuran volumetrik, *carbon content* bahan bakar masing-masing campuran (B0 = 86,1%; B35 = 82,8%; B40 = 82,3%), densitas  $CO_2$  standar 1,977 kg/m<sup>3</sup>, serta konsentrasi  $CO_2$  rata-rata hasil pengukuran prototipe. Nilai EGF meningkat seiring kenaikan beban mesin karena konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi menghasilkan laju pembakaran yang lebih besar, dengan EGF B0 High Load mencapai 23,37 m<sup>3</sup>/h sebagai nilai tertinggi dalam mode operasi utama kapal.

Konsentrasi gas buang (%vol, ppm) belum bisa dibandingkan antar mode beban karena belum memperhitungkan volume total gas buang yang dihasilkan. Secara teori, *Exhaust Gas Flow* (EGF) diturunkan dari prinsip kesetimbangan massa karbon (*carbon mass balance*): seluruh atom karbon dalam bahan bakar yang terbakar sempurna akan muncul kembali sebagai karbon dalam  $CO_2$  pada gas buang, sehingga volume gas buang total dapat dihitung mundur dari laju konsumsi bahan bakar, kandungan karbonnya, dan konsentrasi  $CO_2$  terukur, sesuai Persamaan (2.1).

Tabel 4. 16 Parameter *Output* Konversi Exhaust Gas Flow

| Parameter                             | Nilai  | Satuan            |
|---------------------------------------|--------|-------------------|
| Kandungan karbon B0                   | 0,861  | fraksi massa      |
| Kandungan karbon B35<br>(Interpolasi) | 0,828  | fraksi massa      |
| Kandungan karbon B40<br>(Interpolasi) | 0,823  | fraksi massa      |
| Densitas $CO_2$ ( $\rho_{CO_2}$ )     | 1,977  | kg/m <sup>3</sup> |
| Konsentrasi $CO_2$ ambien             | 0,0004 | fraksi vol        |
| Volume molar gas                      | 24,45  | L/mol             |
| MW $CO_2$                             | 44     | g/mol             |
| MW $CH_4$                             | 16,04  | g/mol             |

Contoh kalkulasi Low Load B0 (Fuel=0,2565 kg/h; CC=0,861;  $\rho_{CO_2}$  = 1,977kg/m<sup>3</sup>;  $C_{exh}$  = 0,03146;  $C_{air}$  = 0,0004):

$$EGF = \frac{0,2565 \times 0,861 \times (44/12)}{1,977 \times (0,03146 - 0,0004)} \approx 13,19 \text{ m}^3/\text{h}$$

EF dihitung dengan menggabungkan EGF, konsentrasi emisi, bobot molekul gas, dan daya aktual, menggunakan Persamaan (2.3) untuk  $CO_2$  dan (2.2) untuk  $CH_4$ . Secara teori, EF dalam satuan g/kWh merepresentasikan massa emisi yang dihasilkan per satuan kerja mesin, sehingga menjadi ukuran efisiensi pembakaran yang independen dari ukuran mesin memungkinkan perbandingan antar mesin berbeda skala. EF ini selanjutnya dikonversi ke g/g fuel melalui SFOC (Persamaan 2.7), karena satuan g/g fuel lebih relevan untuk perbandingan langsung antar jenis bahan bakar tanpa dipengaruhi variasi efisiensi mesin per mode beban.

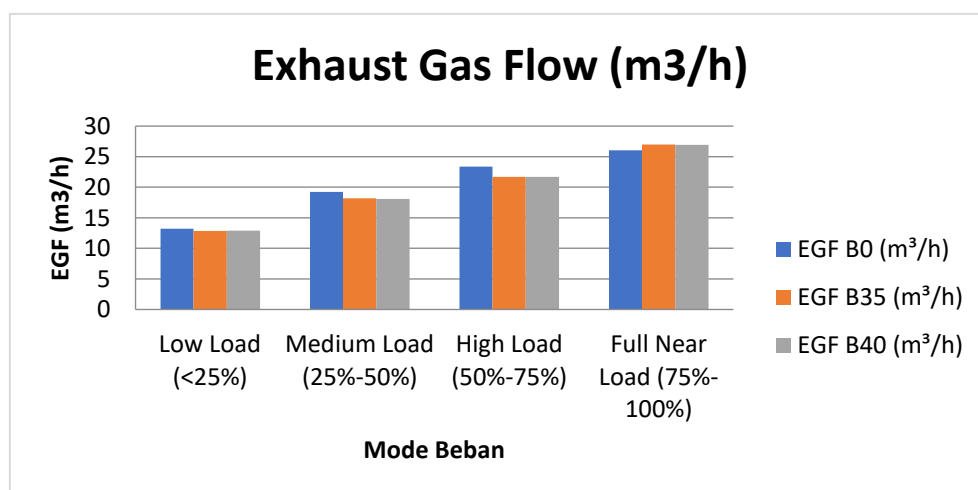
Tabel 4. 17 Hasil Perhitungan Exhaust Gas Flow per Mode Beban BBM B0

| No | Mode Beban                   | CO <sub>2</sub><br>Mean (%) | Fuel<br>(kg/h) | Carbon<br>Content | $\rho$ CO <sub>2</sub><br>(kg/m <sup>3</sup> ) | EGF B0<br>(m <sup>3</sup> /h) |
|----|------------------------------|-----------------------------|----------------|-------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1  | Low Load<br>(<25%)           | 3,146                       | 0,2565         | 0,861             | 1,977                                          | 13,187                        |
| 2  | Medium Load<br>(25%-50%)     | 3,552                       | 0,4235         | 0,861             | 1,977                                          | 19,257                        |
| 3  | High Load<br>(50%-75%)       | 3,752                       | 0,5432         | 0,861             | 1,977                                          | 23,366                        |
| 4  | Full Near Load<br>(75%-100%) | 4,155                       | 0,6716         | 0,861             | 1,977                                          | 26,061                        |

Tabel 4.17 menunjukkan nilai EGF meningkat konsisten seiring kenaikan beban, dari 13,187 m<sup>3</sup>/h pada *low load* hingga 26,061 m<sup>3</sup>/h pada *full near load*. Peningkatan ini sejalan dengan naiknya laju konsumsi bahan bakar (0,2565 ke 0,6716 kg/h), yang menghasilkan volume gas buang total lebih besar meski konsentrasi CO<sub>2</sub> dan *carbon content* relatif stabil. Nilai EGF per mode beban inilah yang selanjutnya menjadi pembagi utama dalam perhitungan *emission factor* CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>.

Tabel 4. 18 Exhaust Gas Flow per Mode Operasi dan Jenis BBM

| No | Load                      | EGF B0<br>(m <sup>3</sup> /h) | EGF B35<br>(m <sup>3</sup> /h) | EGF B40<br>(m <sup>3</sup> /h) |
|----|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1  | Low Load (<25%)           | 13,187                        | 12,831                         | 12,874                         |
| 2  | Medium Load (25%-50%)     | 19,257                        | 18,193                         | 18,076                         |
| 3  | High Load (50%-75%)       | 23,366                        | 21,701                         | 21,682                         |
| 4  | Full Near Load (75%-100%) | 26,061                        | 26,968                         | 26,918                         |



Gambar 4. 16 Exhaust Gas Flow per Mode Operasi dan Jenis BBM

Tabel 4.18 dan grafik gambar 4.16 di atas menunjukkan EGF ketiga varian bahan bakar meningkat konsisten seiring kenaikan beban, dari kisaran 12,8-13,2 m<sup>3</sup>/h pada *low load* hingga 26-27 m<sup>3</sup>/h pada *full near load*. Pada *low*, *medium*, dan *high load*, EGF B35 dan B40 sedikit lebih rendah dibanding B0, namun pada *full near load* pola ini berbalik, di mana EGF B35 (26.968 m<sup>3</sup>/h) dan B40 (26.918 m<sup>3</sup>/h) justru melampaui B0 (26.061 m<sup>3</sup>/h). Kecenderungan ini konsisten dengan pola konsumsi bahan bakar pada Tabel 4.14, di mana B35 dan B40 memerlukan volume bahan bakar lebih besar pada beban tinggi akibat NCV FAME yang lebih rendah, sehingga menghasilkan gas buang total yang lebih besar pula.

#### 4.4.5 Perhitungan *Emission factor CO<sub>2</sub>* dan *CH<sub>4</sub>*

*Emission factor* (EF) adalah besaran yang menyatakan massa emisi suatu gas yang dihasilkan per satuan energi output mesin dinyatakan dalam g/kWh atau per satuan massa bahan bakar yang dikonsumsi g emisi/g fuel. Nilai ini dipakai karena EF bersifat independen terhadap ukuran mesin besar dan kecil dapat dibandingkan secara adil selama dinyatakan dalam basis energi atau massa bahan bakar yang sama, bukan dalam angka emisi mentah yang dipengaruhi ukuran mesin.

Setelah *exhaust gas flow* (EGF) per mode beban diperoleh pada Sub-bab 4.4.4, tahap berikutnya adalah mengonversi konsentrasi gas terukur (*CO<sub>2</sub>* dalam %vol, *CH<sub>4</sub>* dalam ppm) menjadi EF. Konversi ini diperlukan karena konsentrasi gas saja belum mencerminkan laju massa emisi dua kondisi beban bisa punya konsentrasi *CO<sub>2</sub>* yang sama tetapi menghasilkan massa emisi total berbeda jika volume gas buangnya berbeda. Persamaan (2.2) dan (2.3) pada Bab 2 menggabungkan empat komponen sekaligus: konsentrasi gas, bobot molekul (MW) gas, volume molar gas ideal, dan rasio EGF terhadap daya aktual mesin, sehingga hasil akhirnya adalah EF dalam g/kWh yang siap dibandingkan antar mode beban maupun antar bahan bakar. Nilai EF dalam g/kWh ini kemudian dikonversi lagi ke satuan g emisi/g fuel melalui *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) parameter yang menyatakan berapa gram bahan bakar dikonsumsi mesin untuk menghasilkan 1 kWh energi menggunakan Persamaan (2.7), karena satuan g/g fuel lebih relevan untuk membandingkan bahan bakar secara langsung tanpa dipengaruhi variasi efisiensi mesin di tiap mode beban.

. Contoh Perhitungan (Low Load B0:  $C_{CO_2} = 3,146\%vol$ ;  $EGF = 13,187 m^3/h$ ;  $P = 0,279 kW$ ;  $MW_{CO_2} = 44 g/mol$ ; volume molar =  $24,45 L/mol$ ;  $SFOC = 920,457 g fuel/kWh$ ):

$$EF_{CO_2} = \frac{3,146 \times 10^{-2} \times 44}{24,45 \times 10^{-3}} \times \frac{13,187}{0,279} \approx 2.679,2 g/kWh$$

$$EF_{f,CO_2} = \frac{2.679,2}{920,457} \approx 2,911 g CO_2/g fuel$$

Dari contoh diatas maka dapat dibuat kalkulasi keseluruhannya pada tabel 4.19

Tabel 4. 19 *Emission factor CO<sub>2</sub> B0*

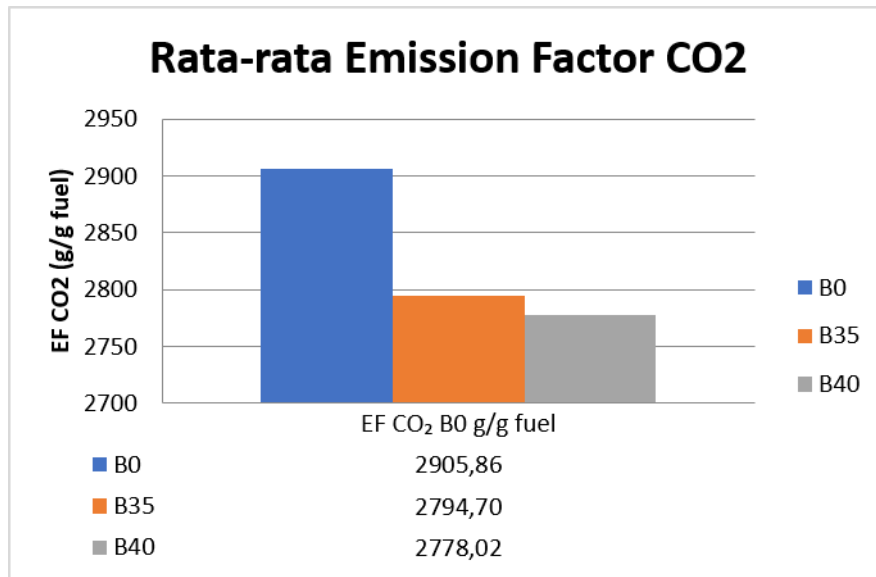
| No | Load                                   | Daya<br>kW | EGF<br>m <sup>3</sup> /h | CO <sub>2</sub> % | MW<br>CO <sub>2</sub> | Molar<br>Volume | SFOC<br>(gfuel/kWh) | EF<br>CO <sub>2</sub> g/kWh | EF<br>CO <sub>2</sub> g/g<br>fuel |
|----|----------------------------------------|------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 1  | Low<br>Load<br>(<25%)                  | 0,279      | 13,187                   | 3,146             | 44,000                | 24,450          | 920,457             | 2679,184                    | 2,9107                            |
| 2  | Medium<br>Load<br>(25%-<br>50%)        | 2,229      | 19,257                   | 3,552             | 44,000                | 24,450          | 189,978             | 552,158                     | 2,9064                            |
| 3  | High<br>Load<br>(50%-<br>75%)          | 4,354      | 23,366                   | 3,752             | 44,000                | 24,450          | 124,743             | 362,337                     | 2,9047                            |
| 4  | Full<br>Near<br>Load<br>(75%-<br>100%) | 6,338      | 26,061                   | 4,155             | 44,000                | 24,450          | 105,954             | 307,440                     | 2,9016                            |

Tabel 4.19 menunjukkan EF CO<sub>2</sub> B0 menurun konsisten dari 2.679,18 g/kWh pada *low load* menjadi 307,44 g/kWh pada *full near load*, namun setelah dikonversi ke g/g fuel melalui SFOC, nilainya justru relatif stabil di kisaran 2,90 -2,91 g/g fuel pada seluruh mode beban mengonfirmasi bahwa satuan g/g fuel memang dirancang untuk menghilangkan pengaruh variasi efisiensi mesin antar mode beban.

Tabel 4. 20 *Emission factor CO<sub>2</sub> per Mode Operasi BBM B0, B35, B40*

| No | Mode Operasi | EF CO <sub>2</sub> B0 (g/kWh) | EF CO <sub>2</sub> B35 (g/kWh) | EF CO <sub>2</sub> B40 (g/kWh) |
|----|--------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1  | Low Load     | 2.679,18                      | 2.590,29                       | 2.581,38                       |
| 2  | Medium Load  | 552,16                        | 517,98                         | 511,27                         |
| 3  | High Load    | 362,34                        | 334,19                         | 331,92                         |
| 4  | Full Load    | 307,44                        | 315,99                         | 313,65                         |
|    | Rata-rata    | 2.905,86 g/g fuel             | 2.794,70 g/g fuel              | 2.778,02 g/g fuel              |

Tabel 4.20 menunjukkan pola yang konsisten pada ketiga bahan bakar: EF CO<sub>2</sub> g/kWh tertinggi pada *low load* dan menurun tajam seiring naiknya beban, dengan B35 dan B40 secara sistematis berada di bawah B0 pada setiap mode operasi. Perbandingan visual antar ketiga bahan bakar pada tiap mode beban ditampilkan pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4. 17 *Emission factor CO<sub>2</sub>* per Mode Operasi BBM B0, B35, B40

Gambar 4.17 memperjelas secara visual bahwa selisih EF  $CO_2$  antar B0, B35, dan B40 relatif kecil pada tiap mode beban dibanding perbedaan antar mode beban itu sendiri, yang jauh lebih dominan mengindikasikan bahwa faktor operasional (beban mesin) memberi pengaruh lebih besar terhadap intensitas emisi  $CO_2$  dibanding komposisi bahan bakar.

Perhitungan EF  $CH_4$  mengikuti prosedur yang sama dengan  $CO_2$  namun menggunakan Persamaan (2.2) karena data konsentrasi  $CH_4$  dari sensor MQ-4 dinyatakan dalam satuan ppm (parts per million) bukan persen volume. Nilai ppm dikonversi menggunakan faktor  $10^{-6}$  (bukan  $10^{-3}$  pada  $CO_2$ ) untuk memperoleh fraksi volume, kemudian dikalikan dengan massa molekul  $CH_4$  (16,04 g/mol), dibagi volume molar, dan dikalikan rasio EGF terhadap daya. Nilai  $CH_4$  ppm dalam perhitungan ini sudah merupakan nilai terkoreksi pasca penerapan faktor dilusi 55,6 dari kalibrasi sensor MQ-4 pada Sub bab 4.3.1 tanpa koreksi ini nilai ppm terbaca tidak sesuai dari nilai aktual., dengan tren penurunan yang konsisten dari B0 ke B40 sejalan dengan penurunan konsentrasi  $CH_4$  terukur pada campuran biodiesel yang lebih tinggi.

Contoh Perhitungan  $CH_4$  (Low Load B0):

Data:  $C_{CH_4} = 19,547 \text{ ppm}$  ;  $EGF = 13,187 \text{ m}^3/\text{h}$  ;  $P = 0,279 \text{ kW}$  ;  $MW_{CH_4} = 16,040 \text{ g/mol}$ ; volume molar =  $24,45 \text{ L/mol}$ ;  $SFOC = 920,457 \text{ g fuel/kWh}$

$$:EF_{CH_4} = \frac{19,547 \times 10^{-6} \times 16,040}{24,45 \times 10^{-3}} \times \frac{13,187}{0,279} \approx 0,607 \text{ g/kWh}$$

$$EF_{f,CH_4} = \frac{0,607}{920,457} \approx 0,000659 \text{ g } CH_4/\text{g fuel}$$

Dari contoh kalkulasi diatas didapat data

Tabel 4. 21 *Emission factor CH<sub>4</sub>* per Mode Operasi BBM B0

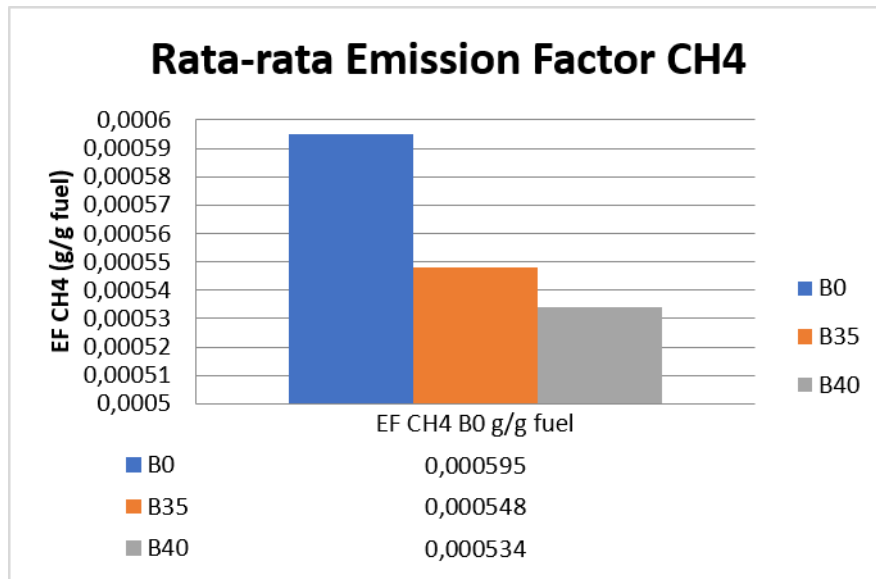
| No | Load                      | Daya kW | EGF m <sup>3</sup> /h | CH <sub>4</sub> ppm | MW CH <sub>4</sub> | Molar Volume | SFOC (g <sub>fuel</sub> /kWh) | EF CH <sub>4</sub> g/kWh | EF CH <sub>4</sub> g/g fuel |
|----|---------------------------|---------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1  | Low Load (<25%)           | 0,279   | 13,187                | 3,146               | 16,040             | 24,450       | 920,457                       | 0,607                    | 0,000659                    |
| 2  | Medium Load (25%-50%)     | 2,229   | 19,257                | 3,552               | 16,040             | 24,450       | 189,978                       | 0,114                    | 0,000600                    |
| 3  | High Load (50%-75%)       | 4,354   | 23,366                | 3,752               | 16,040             | 24,450       | 124,743                       | 0,073                    | 0,000583                    |
| 4  | Full Near Load (75%-100%) | 6,338   | 26,061                | 4,155               | 16,040             | 24,450       | 105,954                       | 0,057                    | 0,000540                    |

Tabel 4.21 menunjukkan pola EF CH<sub>4</sub> yang serupa dengan CO<sub>2</sub> dari sisi tren terhadap beban menurun dari 0,607 g/kWh pada *low load* menjadi 0,057 g/kWh pada *full near load* namun dengan orde besaran yang jauh lebih kecil karena konsentrasi CH<sub>4</sub> pada gas buang memang jauh lebih rendah dibanding CO<sub>2</sub>. Perhitungan yang sama diterapkan pada bahan bakar B35 dan B40, dengan hasil perbandingan EF CH<sub>4</sub> ketiga bahan bakar disajikan pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 22 *Emission factor CH<sub>4</sub>* per Mode Operasi BBM B0, B35, B40

| No                          | Mode Operasi | EF CH <sub>4</sub> B0 (g/kWh)   | EF CH <sub>4</sub> B35 (g/kWh)  | EF CH <sub>4</sub> B40 (g/kWh)  |
|-----------------------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1                           | Low Load     | 0,607                           | 0,56                            | 0,547                           |
| 2                           | Medium Load  | 0,114                           | 0,102                           | 0,099                           |
| 3                           | High Load    | 0,073                           | 0,064                           | 0,063                           |
| 4                           | Full Load    | 0,057                           | 0,056                           | 0,055                           |
| Rata-rata konversi g/g fuel |              | $0,595 \times 10^{-3}$ g/g fuel | $0,548 \times 10^{-3}$ g/g fuel | $0,534 \times 10^{-3}$ g/g fuel |

Tabel 4.22 menunjukkan EF CH<sub>4</sub> rata-rata menurun dari B0 ( $0,595 \times 10^{-3}$  g/g fuel) ke B40 ( $0,548 \times 10^{-3}$  g/g fuel), sejalan dengan tren penurunan EF CO<sub>2</sub> pada Tabel 4.19, meski dengan besaran penurunan yang berbeda. Perbandingan visual EF CH<sub>4</sub> antar ketiga bahan bakar pada tiap mode operasi ditampilkan pada Gambar 4.14 berikut.



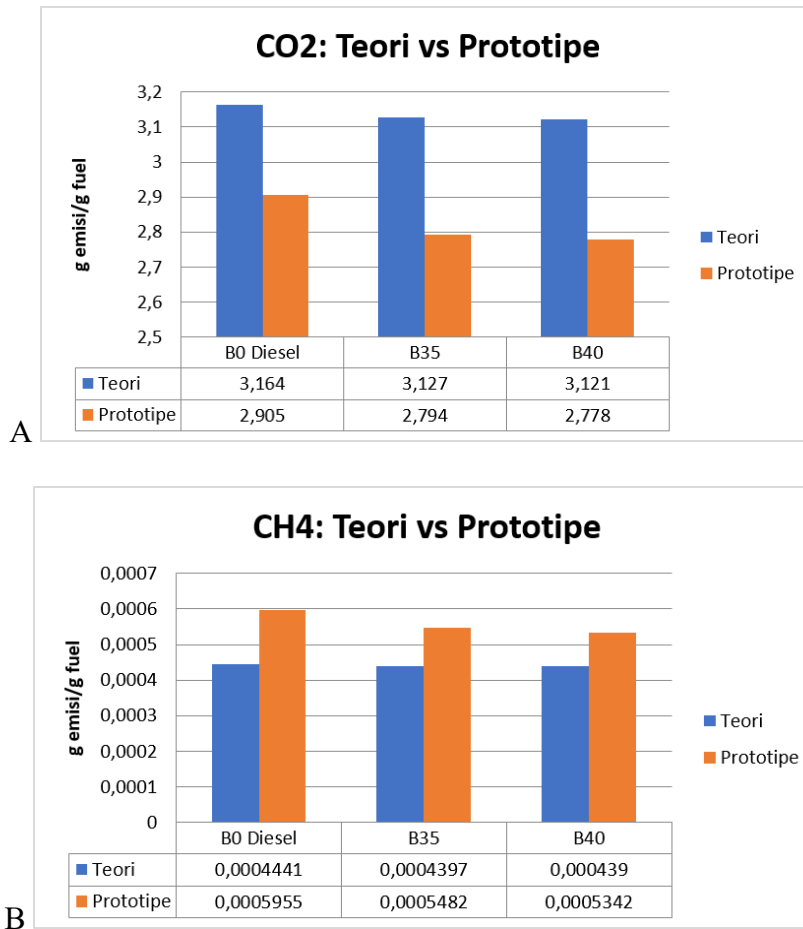
Gambar 4. 18 *Emission factor CH<sub>4</sub>* per Mode Operasi BBM B0, B35, B40

Berdasarkan perbandingan nilai *Emission factor*, alat prototipe menunjukkan tingkat akurasi yang dapat diandalkan untuk pengukuran gas  $CO_2$  dengan teori 8,16% - 11,01 % masih bisa diterima oleh us EPA, karena *emission factor* teoritis kumpulan dari seluruh terhadap perhitungan teori. Sebaliknya, terjadi anomali ekstrem pada pembacaan gas  $CH_4$  yang menunjukkan pembengkakan selisih *error* hingga lebih dari 10% pada semua varian bahan bakar. Kelemahan fatal pada data  $CH_4$  ini murni diakibatkan oleh penggunaan sensor MQ-4 yang peruntukannya tidak sesuai untuk menganalisis komposisi gas buang hasil pembakaran yang kompleks. Oleh karena itu, agar hasil pembacaan gas metana menjadi presisi dan valid sesuai teori, sistem prototipe ke depannya harus menggunakan sensor berteknologi NDIR yang memang dikalibrasi khusus untuk gas buang.

Tabel 4. 23 Perbandingan *Emission factor* Teori dengan Prototipe

| Fuel      | Emisi  | kg/TJ<br>(Teori) | g/kWh<br>(Teori) | g emisi/g fuel<br>(Teori) | g emisi/g fuel<br>(Prototipe) | Selisih     |
|-----------|--------|------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------|
| B0 Diesel | $CO_2$ | 74.100.          | 266,76           | 3,164                     | 2,905                         | 8,16%       |
| B0 Diesel | $CH_4$ | 10,400           | 0,037            | 0,0004441                 | 0,0005955                     | -<br>34,09% |
| B35       | $CO_2$ | 73.250           | 263,703          | 3,127                     | 2,794                         | 10,65%      |
| B35       | $CH_4$ | 10,297           | 0,037            | 0,0004397                 | 0,0005482                     | -<br>24,68% |
| B40       | $CO_2$ | 73.109           | 263,194          | 3,121                     | 2,778                         | 11,01%      |
| B40       | $CH_4$ | 10,280           | 0,037            | 0,000439                  | 0,0005342                     | -<br>21,69% |





Gambar 4. 19 Perbandingan *Emission factor* Teori dengan Prototipe a  $CO_2$  dan b  $CH_4$

#### 4.4.6 Kalkulasi BAV dan Perbandingan Emisi Tahunan B0, B35, dan B40

Setelah *emission factor*  $CO_2$  dan  $CH_4$  untuk ketiga bahan bakar tersedia, total emisi tahunan dihitung sebagai *Baseline Actual Value* (BAV) menggunakan Persamaan (2.8) berbasis aktivitas aktual kapal per mode operasi yang diperoleh dari observasi lapangan. Parameter operasional yang digunakan mencakup 6 trip per hari, 26 hari per bulan, dan 12 bulan per tahun, sehingga menghasilkan total 1.872 trip per tahun dengan akumulasi 11.232 jam operasi per tahun. Setiap trip terdiri dari tiga fase operasi, yaitu 1 jam akselerasi pada medium load, 4 jam pelayaran pada high load, dan 1 jam deselerasi pada low load, di mana masing-masing fase dipasangkan dengan EF yang sesuai tingkat bebannya karena perbedaan kondisi pembakaran antar fase menghasilkan karakteristik emisi yang berbeda signifikan. Mode low load mendapat perhatian khusus karena memiliki EF tertinggi dibanding mode lainnya, sehingga fase deselerasi berkontribusi signifikan terhadap total emisi meskipun hanya berlangsung selama satu jam per trip. Hasil perhitungan BAV menunjukkan bahwa skenario B0 menghasilkan emisi  $CO_2$  sebesar 15.515,78 kg/tahun dan  $CH_4$  sebesar 3,164 kg/tahun, sementara skenario B40 menghasilkan  $CO_2$  sebesar 14.302,49 kg/tahun dan  $CH_4$  sebesar 2,74 kg/tahun, dengan penurunan emisi kedua skenario tersebut akan dianalisis lebih lanjut dalam konteks LCA pada Sub bab 4.7.

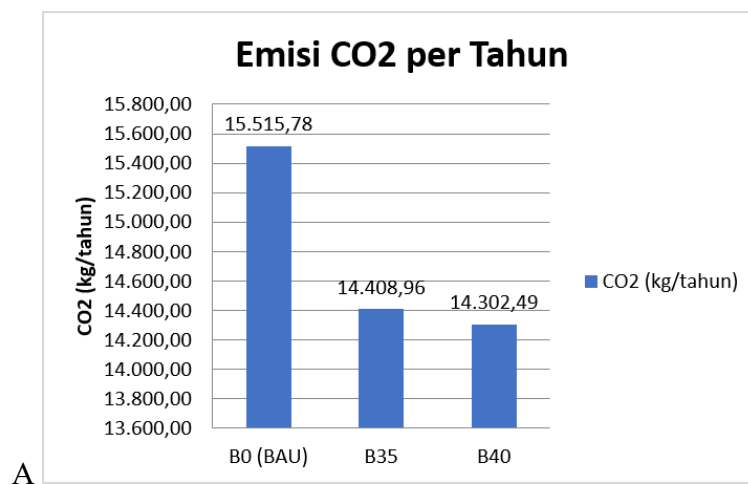
Tabel 4. 24 Emisi per Mode Operasi

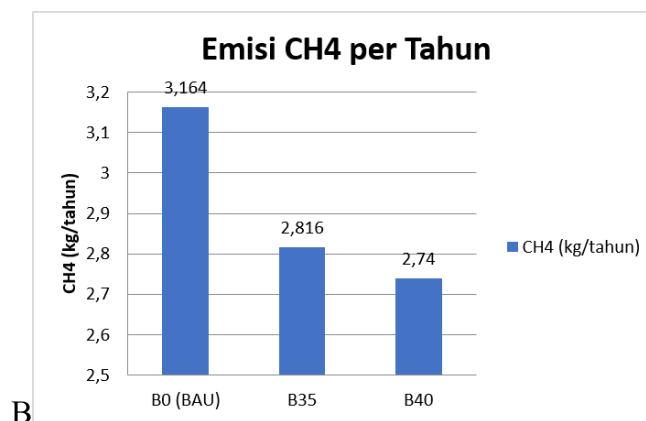
| Mode Operasi | Beban  | T (jam/trip) | Trip/tahun | CO <sub>2</sub> B0 (kg/th) | CO <sub>2</sub> B35 (kg/th) | CO <sub>2</sub> B40 (kg/th) | CH <sub>4</sub> B0 (kg/th) | CH <sub>4</sub> B35 (kg/th) | CH <sub>4</sub> B40 (kg/th) |
|--------------|--------|--------------|------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Akselerasi   | Medium | 1            | 1.872      | 2.304,36                   | 2.161,73                    | 2.133,72                    | 0,476                      | 0,427                       | 0,413                       |
| Pelayaran    | High   | 4            | 1.872      | 11.813,77                  | 10.895,95                   | 10.822,14                   | 2,372                      | 2,097                       | 2,041                       |
| Deselerasi   | Low    | 1            | 1.872      | 1.397,65                   | 1.351,28                    | 1.346,63                    | 0,317                      | 0,292                       | 0,285                       |
| Total        |        | 6 jam/trip   | 1.872      | 15.515,78                  | 14.408,96                   | 14.302,49                   | 3,164                      | 2,816                       | 2,74                        |

Selanjutnya dibandingkan emisi BAV dengan BBM lain dengan presentase

Tabel 4. 25 Perbandingan BAV Emisi Tahunan B0, B35, B40

| BBM      | CO <sub>2</sub> (kg/tahun) | CH <sub>4</sub> (kg/tahun) | Catatan                                                |
|----------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|
| B0 (BAU) | 15.515,78                  | 3,164                      | <i>Baseline</i>                                        |
| B35      | 14.408,96                  | 2,816                      | CO <sub>2</sub> -7,13% ; CH <sub>4</sub> -11,00% vs B0 |
| B40      | 14.302,49                  | 2,74                       | CO <sub>2</sub> -7,82% ; CH <sub>4</sub> -13,42% vs B0 |





Gambar 4. 20 Perbandingan Emisi Tahunan B0, B35, B40 A  $CO_2$  dan B  $CH_4$

Hasil perhitungan *Baseline Actual Value* (BAV) emisi tahunan menunjukkan bahwa skenario B0 (BAU) menghasilkan emisi  $CO_2$  tertinggi, yaitu sebesar 15.515,78 kg/tahun, dengan emisi  $CH_4$  sebesar 3,164 kg/tahun sebagai kondisi *baseline*. Peralihan ke bahan bakar campuran B35 mampu menurunkan emisi  $CO_2$  menjadi 14.408,96 kg/tahun, atau reduksi sebesar 7,13% terhadap B0, sementara emisi  $CH_4$  turun menjadi 2,816 kg/tahun (reduksi 11,00%). Peningkatan rasio campuran pada B40 memberikan hasil yang lebih baik, dengan emisi  $CO_2$  turun menjadi 14.302,49 kg/tahun (reduksi 7,82%) dan emisi  $CH_4$  menjadi 2,74 kg/tahun (reduksi 13,42%) dibandingkan B0. Pola ini konsisten untuk kedua jenis gas: semakin tinggi kandungan biodiesel dalam campuran, semakin rendah emisi  $CO_2$  maupun  $CH_4$  yang dihasilkan, dengan B40 secara konsisten mencatatkan reduksi terbesar pada kedua parameter. Penurunan emisi  $CH_4$  secara persentase lebih besar dibanding  $CO_2$  pada kedua skenario (B35 maupun B40), yang mengindikasikan bahwa penambahan biodiesel memberikan dampak relatif lebih signifikan terhadap penekanan emisi metana dibanding karbon dioksida. Hasil ini menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut dalam konteks Life Cycle Assessment (LCA) pada Sub-bab 4.7, di mana kedua gas akan dikonversi ke satuan  $CO_2$  ekuivalen ( $CO_2e$ ) menggunakan faktor Global Warming Potential (GWP).

#### 4.5 Hasil Pemilihan Bahan Bakar Rendah Emisi dengan AHP-TOPSIS

Pemilihan bahan bakar rendah emisi pada kapal non konvensional dilakukan menggunakan metode gabungan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dan *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), dengan tiga alternatif yang dievaluasi yakni B0, B35, dan B40. AHP digunakan untuk menetapkan bobot relatif dari lima kriteria keputusan berdasarkan penilaian dua responden yang memiliki kompetensi relevan di bidang operasional kapal dan energi, sedangkan TOPSIS digunakan untuk menghasilkan peringkat akhir alternatif berdasarkan kedekatan terhadap solusi ideal positif dan negatif. Integrasi kedua metode ini dipilih karena AHP unggul dalam pembobotan kriteria yang terstruktur dan transparan, sementara TOPSIS efektif dalam pemeringkatan alternatif secara kuantitatif dari data yang bersifat campuran antara kuantitatif dan kualitatif (Costa et al., 2023; Tran et al., 2024). Hasil akhir sub bab ini menunjukkan bahan bakar dengan skor *closeness coefficient* tertinggi sebagai rekomendasi operasional berbasis multi-kriteria.

#### 4.5.1 Hirarki AHP-TOPSIS

Struktur keputusan disusun dalam hierarki pada gambar 3.1 tiga level: tujuan, kriteria, dan alternatif. Tujuan yang ditetapkan adalah memilih bahan bakar yang paling optimal dari aspek emisi, ekonomi, dan operasional untuk kapal non konvensional mesin diesel di Pantai Kenjeran Surabaya. Lima kriteria yang digunakan mencakup dua kriteria *cost* (nilai lebih kecil lebih baik) dan tiga kriteria *benefit* (nilai lebih besar lebih baik), dipilih berdasarkan relevansinya terhadap konteks operasional kapal wisata skala kecil. Ketiga alternatif yang dievaluasi adalah B0 (solar murni), B35 (campuran 35% FAME), dan B40 (campuran 40% FAME), yang semuanya telah memiliki data emisi aktual dari pengukuran lapangan pada sub bab 4.4. Hierarki keputusan ini divisualisasikan pada Gambar 3.3 yang telah disusun pada bab metodologi.

Tabel 4. 26 Kriteria dan Tipe dalam AHP-TOPSIS

| Kode | Kriteria                  | Tipe    |
|------|---------------------------|---------|
| C1   | Emisi $CO_2$ (ton/tahun)  | Cost    |
| C2   | Biaya bahan bakar (Rp/L)  | Cost    |
| C3   | Ketersediaan              | Benefit |
| C4   | Kemudahan perawatan       | Benefit |
| C5   | Keselamatan dan keandalan | Benefit |

#### 4.5.2 Tahap AHP: Pembobotan Kriteria per Responden

Pengisian kuesioner AHP melibatkan responden yang dipilih berdasarkan kriteria inklusi yang telah ditetapkan pada Sub bab 3.9.2, yaitu memiliki pengalaman atau keterlibatan langsung pada bidang kapal, bahan bakar, mesin diesel, atau kebijakan maritim. Komposisi responden disajikan pada Tabel 4.27.

Tabel 4. 27 Profil Responden AHP

| No | Kategori Responden                  | Jumlah | Pengalaman Relevan             |
|----|-------------------------------------|--------|--------------------------------|
| 1  | Akademisi (Teknik Perkapalan/Mesin) | 1      | Dosen Teknik Sistem Perkapalan |
| 2  | Operator Kapal Kayu                 | 1      | Operasional kapal sehari-hari  |
|    | Total                               | 2      |                                |

Setiap responden diminta memberikan penilaian perbandingan antar pasangan kriteria menggunakan skala 1-9 Saaty pada Tabel 4.27. seluruh perhitungan ini sementara menggunakan responden 1 sebagai contoh

Tabel 4. 28 Matriks Penilaian Responden 1

| Kriteria        | C1 Emisi | C2 Biaya | C3 Ketersediaan | C4 Perawatan | C5 Keselamatan |
|-----------------|----------|----------|-----------------|--------------|----------------|
| C1 Emisi        | 1        | 1        | 1               | 1/3          | 1/5            |
| C2 Biaya        | 1        | 1        | 1/3             | 1            | 1/3            |
| C3 Ketersediaan | 1        | 3        | 1               | 3            | 1/3            |
| C4 Perawatan    | 3        | 1        | 1/3             | 1            | 1/3            |
| C5 Keselamatan  | 5        | 3        | 3               | 3            | 1              |
| Jumlah          | 11,00    | 9,00     | 5,67            | 8,33         | 2,20           |

Normalisasi dilakukan per responden untuk cek konsistensi CI dan CR nya dengan membagi setiap elemen dengan jumlah kolom masing-masing sesuai persamaan (3.6) dan (3.7) pada Tabel 4.29.

Tabel 4. 29 Normalisasi Matriks AHP dan Bobot Responden 1

| Kriteria | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | Bobot AHP |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| C1       | 0,091 | 0,111 | 0,176 | 0,040 | 0,091 | 0,091     |
| C2       | 0,091 | 0,111 | 0,059 | 0,120 | 0,152 | 0,091     |
| C3       | 0,091 | 0,333 | 0,176 | 0,360 | 0,152 | 0,091     |
| C4       | 0,273 | 0,111 | 0,059 | 0,120 | 0,152 | 0,273     |
| C5       | 0,455 | 0,333 | 0,529 | 0,360 | 0,455 | 0,455     |
| Jumlah   | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00      |

Bobot prioritas setiap kriteria dihitung sebagai rata-rata baris dari matriks ternormalisasi sesuai persamaan (3.8). Selanjutnya Konsistensi penilaian diuji menggunakan *Consistency Index* (CI) dan *Consistency Ratio* (CR) sesuai persamaan (3.9) pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 30 Vektor dan Hasil Uji Konsistensi (CI dan CR) Responden 1

| Weighted Sum | Consistency Vector | Konsistensi | Nilai     |
|--------------|--------------------|-------------|-----------|
| 0,564        | 5,533              | lambda max  | 5,447     |
| 0,567        | 5,330              | CI          | 0,112     |
| 1,214        | 5,459              | RI          | 1,120     |
| 0,771        | 5,399              | CR          | 0,0998    |
| 2,351        | 5,514              | Status      | Konsisten |

Berdasarkan tabel rangkuman uji konsistensi, hasil penilaian dari ketiga responden dinyatakan valid dan konsisten. Hal ini dibuktikan dengan perolehan nilai *Consistency Ratio* (CR) dari Responden 1 (0,094), Responden 2 (0,050), yang seluruhnya memenuhi syarat toleransi metode AHP, yakni di bawah batas maksimal 0,10 (10%). Dengan demikian, bobot prioritas kriteria yang dihasilkan dapat diandalkan dan layak digunakan untuk tahapan pengambilan keputusan selanjutnya.

Tabel 4. 31 Rangkuman Uji Konsistensi AHP Responden

| No | Nilai CI (Consistency Index) | Nilai CR (Consistency Ratio) | Status    |
|----|------------------------------|------------------------------|-----------|
| 1  | 0,112                        | 0,0998                       | Konsisten |
| 2  | 0,054                        | 0,048                        | Konsisten |

#### 4.5.3 Tahap AHP Perbandingan Berpasangan Kriteria Gabungan Responden

Pembobotan kriteria dilakukan melalui *pairwise comparison* oleh dua responden, yaitu. Karena terdapat lebih dari satu responden, nilai gabungan *pairwise comparison* dihitung menggunakan *geometric mean* agar tidak ada responden yang mendominasi hasil secara aritmetik dengan persamaan (3.5) dengan hasil pada tabel 4.32 sebagai berikut.

Tabel 4. 32 Perhitungan AHP dua Responden

| Pairwise        | C1 Emisi | C2 Biaya | C3 Ketersediaan | C4 Perawatan | C5 Keselamatan |
|-----------------|----------|----------|-----------------|--------------|----------------|
| C1 Emisi        | 1,000    | 0,333    | 0,333           | 0,258        | 0,258          |
| C2 Biaya        | 3,000    | 1,000    | 0,333           | 1,732        | 1,291          |
| C3 Ketersediaan | 3,000    | 3,000    | 1,000           | 3,000        | 1,528          |
| C4 Perawatan    | 3,873    | 0,577    | 0,333           | 1,000        | 1,000          |
| C5 Keselamatan  | 3,873    | 0,775    | 0,655           | 1,000        | 1,000          |

Proses normalisasi dihitung untuk setiap responden guna memeriksa nilai konsistensi CI dan CR. Langkah ini dikerjakan dengan membagi tiap elemen terhadap jumlah total kolomnya, sesuai dengan persamaan (3.6) dan (3.7) yang terdapat pada Tabel 4.33

Tabel 4. 33 Perhitungan AHP 2 Responden

| Kriteria | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | Bobot AHP |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| C1       | 0,068 | 0,059 | 0,126 | 0,037 | 0,051 | 0,068     |
| C2       | 0,203 | 0,176 | 0,126 | 0,248 | 0,254 | 0,201     |
| C3       | 0,203 | 0,528 | 0,377 | 0,429 | 0,301 | 0,368     |
| C4       | 0,263 | 0,102 | 0,126 | 0,143 | 0,197 | 0,166     |
| C5       | 0,263 | 0,136 | 0,247 | 0,143 | 0,197 | 0,197     |
| Jumlah   | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     |

Penentuan bobot prioritas untuk masing-masing kriteria didapatkan dengan menghitung nilai rata-rata baris pada matriks yang telah dinormalisasi, dengan mengacu pada persamaan (3.8). Setelah itu, untuk memastikan validitas hasil, dilakukan uji konsistensi penilaian melalui perhitungan *Consistency Index* (CI) dan *Consistency Ratio* (CR) berdasarkan persamaan (3.9) yang ditunjukkan pada Tabel 4.33

Tabel 4. 34 Hasil Uji Konsistensi AHP 2 Responden

| Konsistensi | Nilai     |
|-------------|-----------|
| Lambda max  | 5,251     |
| CI          | 0,0628    |
| RI          | 1,120     |
| CR          | 0,0561    |
| Status      | Konsisten |

Berdasarkan tabel hasil pengolahan agregasi data (penggabungan matriks penilaian dari seluruh responden), pembobotan kriteria menunjukkan tingkat konsistensi yang sangat baik. Hal ini dibuktikan dengan perolehan nilai *Consistency Index* (CI) sebesar 0,0628 dan *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,0561. Karena nilai CR tersebut berada jauh di bawah batas toleransi maksimal yang disyaratkan oleh metode AHP, yakni 0,10 (10%), maka dapat disimpulkan bahwa penilaian gabungan para responden bersifat konsisten dan valid. Dengan demikian, bobot prioritas kriteria yang dihasilkan dari penggabungan ini layak dan dapat diandalkan sebagai dasar perhitungan akhir.

#### 4.5.4 Perangkingan dengan Metode TOPSIS

Matriks keputusan memuat nilai kinerja setiap alternatif bahan bakar terhadap masing-masing kriteria. Data kuantitatif (emisi dan biaya) bersumber dari hasil pengukuran dan perhitungan sebelumnya, sedangkan data kualitatif (ketersediaan, perawatan, keselamatan) diperoleh dari penilaian responden menggunakan skala Likert 1-5, kemudian diagregasi menggunakan *arithmetic mean* sesuai persamaan (3.10)

Tabel 4. 35 Nilai Matriks Keputusan Awal TOPSIS

| Alternatif             | Emisi CO2e<br>(g/MJ) | Biaya<br>(Rp/L) | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
|------------------------|----------------------|-----------------|--------------|-----------|-------------|
| B0                     | 68,897               | 27.900,000      | 4,000        | 5,000     | 5,000       |
| B35                    | 66,286               | 6.800,000       | 3,500        | 4,000     | 4,000       |
| B40                    | 65,894               | 6.800,000       | 4,500        | 4,500     | 4,500       |
| Pembagi<br>normalisasi | 116,115              | 29.510,845      | 6,964        | 7,826     | 7,826       |

Normalisasi dilakukan menggunakan normalisasi vektor untuk menyetarakan skala antar kriteria yang berbeda satuan. Pembagi normalisasi dihitung sebagai akar jumlah kuadrat nilai tiap kolom sesuai ai persamaan (3.11).

Tabel 4. 36 Pembagi Normalisasi per Kriteria

| Alternatif             | Emisi   | Biaya      | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
|------------------------|---------|------------|--------------|-----------|-------------|
| Pembagi<br>normalisasi | 116,115 | 29.510,845 | 6,964        | 7,826     | 7,826       |

Tabel 4. 37 Matriks Ternormalisasi Terbobot

| Alternatif | Emisi | Biaya | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
|------------|-------|-------|--------------|-----------|-------------|
| B0         | 0,593 | 0,945 | 0,574        | 0,639     | 0,639       |
| B35        | 0,571 | 0,230 | 0,503        | 0,511     | 0,511       |
| B40        | 0,567 | 0,230 | 0,646        | 0,575     | 0,575       |

$$y_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (4.8)$$

Matriks ternormalisasi kemudian dikalikan bobot AHP dengan persamaan berikut

Tabel 4. 38 Matriks Ternormalisasi Terbobot

| Alternatif | C1<br>(w=0,0680) | C2<br>(w=0,2014) | C3<br>(w=0,3676) | C4<br>(w=0,1660) | C5<br>(w=0,1971) |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| B0         | 0,040            | 0,190            | 0,211            | 0,106            | 0,126            |
| B35        | 0,039            | 0,046            | 0,185            | 0,085            | 0,101            |
| B40        | 0,039            | 0,046            | 0,238            | 0,095            | 0,113            |

Solusi ideal positif ( $A^+$ ) dan negatif ( $A^-$ ) ditentukan berdasarkan tipe kriteria nilai terbaik untuk *benefit* adalah maksimum, untuk *cost* adalah minimum dengan persamaan berikut

$$\begin{aligned} A^+ &= \left\{ \min_i y_{ij} \text{ (cost)}, \max_i y_{ij} \text{ (benefit)} \right\} \\ A^- &= \left\{ \max_i y_{ij} \text{ (cost)}, \min_i y_{ij} \text{ (benefit)} \right\} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Tabel 4. 39 Matriks Ternormalisasi Terbobot

| Solusi           | Emisi | Biaya | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
|------------------|-------|-------|--------------|-----------|-------------|
| A+ Ideal Positif | 0,039 | 0,046 | 0,238        | 0,106     | 0,126       |
| A- Ideal Negatif | 0,040 | 0,190 | 0,185        | 0,085     | 0,101       |

Selanjutnya menghitung Jarak setiap alternatif terhadap  $A^+$  dan  $A^-$  dihitung menggunakan persamaan (3.13) dan Closeness coefficient ( $V_i$ ) dihitung sebagai rasio jarak ke solusi ideal negatif terhadap total jarak, dengan nilai  $V_i$  mendekati 1 menunjukkan alternatif paling mendekati solusi ideal positif dengan persamaan (3.14).

Tabel 4. 40 Hasil Akhir TOPSIS Jarak dan Peringkat

| Alternatif | Di+   | Di-   | $V_i$ (Closeness Coefficient) | Peringkat |
|------------|-------|-------|-------------------------------|-----------|
| B0         | 0,146 | 0,042 | 0,224                         | 3         |
| B35        | 0,062 | 0,144 | 0,698                         | 2         |
| B40        | 0,016 | 0,154 | 0,904                         | 1         |

Hasil perhitungan menggunakan metode TOPSIS digunakan untuk menentukan peringkat prioritas dari tiga alternatif bahan bakar, yaitu B0, B35, dan B40. Berdasarkan nilai *closeness coefficient* ( $V_i$ ) tertinggi sebesar 0,904, bahan bakar B40 berhasil menduduki peringkat pertama sebagai alternatif terbaik. Posisi kedua ditempati oleh varian bahan bakar B35 yang memperoleh nilai  $V_i$  sebesar 0,698. Sementara itu, bahan bakar B0 berada pada peringkat ketiga atau terendah karena hanya mencatatkan nilai  $V_i$  terkecil, yakni sebesar 0,224.

Tabel 4. 41 Hasil Akhir TOPSIS Jarak dan Peringkat

| Skenario    | Kriteria Diubah | $\Delta$ Bobot | $V_i$ B0 | $V_i$ B35 | $V_i$ B40 | Rank B0 | Rank B35 | Rank B40 | Status |
|-------------|-----------------|----------------|----------|-----------|-----------|---------|----------|----------|--------|
| Baseline    | —               | 0%             | 0,2237   | 0,6983    | 0,9036    | 3       | 2        | 1        | Acuan  |
| Skenario 1  | C1              | +20%           | 0,2237   | 0,6983    | 0,9036    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 2  | C1              | -20%           | 0,2237   | 0,6983    | 0,9036    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 3  | C2              | +20%           | 0,1944   | 0,7353    | 0,9168    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 4  | C2              | -20%           | 0,2631   | 0,6494    | 0,8859    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 5  | C3              | +20%           | 0,2365   | 0,6686    | 0,9057    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 6  | C3              | -20%           | 0,2118   | 0,7290    | 0,9017    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 7  | C4              | +20%           | 0,2330   | 0,6931    | 0,8961    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 8  | C4              | -20%           | 0,2156   | 0,7028    | 0,9103    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 9  | C5              | +20%           | 0,2366   | 0,6909    | 0,8933    | 3       | 2        | 1        | Stabil |
| Skenario 10 | C5              | -20%           | 0,3289   | 0,6711    | 0,8142    | 3       | 2        | 1        | Stabil |



Berdasarkan 10 skenario pengujian, diperoleh stabilitas hasil sebesar 100% dengan formasi peringkat yang tidak bergeser, yakni B40 (1), B35 (2), dan B0 (3). Konsistensi ini membuktikan bahwa superioritas B40 berasal dari keunggulan komparatif alternatif itu sendiri, bukan sekadar efek sensitivitas dari variasi bobot kriteria. Temuan AHP-TOPSIS ini kemudian menjadi acuan dasar pada Sub-bab 4.7 untuk melakukan evaluasi *Life Cycle Assessment* (LCA), di mana emisi B40 akan dikomparasikan secara menyeluruh terhadap kondisi dasar (BAU) B0 menggunakan pendekatan *Tank to Wake*.

#### **4.6 Perbandingan LCA (Life Cycle Assesment) Emisi BAU (Business As Usual) dan Bahan Bakar Alternatif Terpilih**

Dalam memvalidasi rekomendasi AHP-TOPSIS dari sudut pandang lingkungan, tahap ini membandingkan dampak iklim skenario *Business-as-Usual* (B0) dengan alternatif B35 dan B40 menggunakan batasan *Tank to Wake* (TtW) dalam metode LCA. Emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  aktual dari Sub-bab 4.5 ditransformasikan menjadi  $CO_2e$  berlandaskan dua metrik waktu dari IPCC AR6: GWP20 dan GWP100. Pemisahan metrik ini diterapkan karena perbedaan kontribusi radikal gas metana antara rentang waktu 20 tahun ( $GWP = 81,2$ ) dan 100 tahun ( $GWP = 27,9$ ) sangat memengaruhi persentase emisi total (International Maritime Organization, 2024). Melalui analisis komparatif ini, tingkat efektivitas B35 dan B40 dalam menekan laju emisi dibandingkan kondisi BAU dapat dipetakan secara jelas.

##### **4.6.1 Batasan dan Metodologi LCA *Tank to Wake***

Konversi total emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  menjadi  $CO_2$  ekuivalen ( $CO_2e$ ) mengacu pada faktor *Global Warming Potential* (GWP) IPCC AR6 (Forster et al., 2021), dengan  $GWP_{20} CH_4$  sebesar 81,2 dan  $GWP_{100} CH_4$  sebesar 27,9, sementara  $CO_2$  ditetapkan sebagai gas referensi dengan nilai  $GWP = 1$ . Perhitungan dilakukan pada dua cakrawala waktu secara paralel:  $GWP_{20}$  digunakan untuk menilai dampak iklim jangka pendek mengingat umur atmosfer  $CH_4$  yang relatif singkat (~12 tahun), sementara  $GWP_{100}$  merupakan metrik standar dalam pelaporan NDC Indonesia dan inventarisasi GRK IMO. Meskipun nilai  $GWP CH_4$  jauh lebih tinggi dibanding  $CO_2$ , kontribusinya terhadap total  $CO_2e$  tetap kecil karena massa emisi  $CH_4$  tahunan (57–63 kg) jauh lebih rendah dibanding  $CO_2$  (14.300–15.500 kg), sehingga  $CO_2$  menyumbang lebih dari 99% total  $CO_2e$ . Nilai  $CO_2e$  dinyatakan dalam satuan g  $CO_2e$  per MJ energi bahan bakar (g/MJ fuel), diperoleh dari hasil kali massa emisi dengan faktor GWP masing-masing gas, dibagi terhadap *Lower Calorific Value* (LCV) bahan bakar sehingga merepresentasikan intensitas emisi karbon per satuan energi sesuai pendekatan *Tank to Wake*, bukan emisi absolut per tahun. Pendekatan dual cakrawala waktu ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap potensi pemanasan global dari operasional kapal pada berbagai skenario bahan bakar yang diuji.

Tabel 4. 42 Hasil Konversi  $CO_2e$  per BBM GWP20 dan GWP100

| BBM | Faktor<br>$CO_2$ GWP20 | Faktor $CH_4$<br>GWP20 | Faktor $CO_2$<br>GWP100 | Faktor<br>$CH_4$ GW 100 | $CO_2e$<br>GWP20<br>(g/MJ<br>fuel) | $CO_2e$<br>GWP100<br>(g/MJ fuel) |
|-----|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| B0  | 1                      | 81,2                   | 1                       | 27,9                    | 68,897                             | 68,343                           |
| B35 | 1                      | 81,2                   | 1                       | 27,9                    | 66,286                             | 65,737                           |
| B40 | 1                      | 81,2                   | 1                       | 27,9                    | 65,894                             | 65,346                           |

Hasil perbandingan menunjukkan B0 sebagai kondisi dasar (BAU) menghasilkan emisi tertinggi tanpa reduksi, yaitu 68,897 g/MJ fuel (GWP20) dan 68,343 g/MJ fuel (GWP100). Bahan bakar B35 menurunkan emisi menjadi 66,286 g/MJ fuel (GWP20, reduksi 3,79%) dan 65,737 g/MJ fuel (GWP100, reduksi 3,81%). Penurunan paling signifikan dicapai B40, dengan emisi 65,894 g/MJ fuel (GWP20, reduksi 4,36%) dan 65,346 g/MJ fuel (GWP100, reduksi 4,39%). Pada kedua horizon waktu baik jangka pendek (GWP20) maupun jangka panjang (GWP100) urutan performa emisi secara konsisten menempatkan B40 sebagai bahan bakar dengan dampak iklim paling rendah, diikuti B35, dan B0 sebagai yang tertinggi. Konsistensi pola ini memperkuat validitas rekomendasi B40 dari hasil AHP-TOPSIS pada sub-bab sebelumnya, kini dikonfirmasi pula dari perspektif dampak lingkungan siklus hidup.

#### 4.6.2 Perbandingan Reduksi Emisi $CO_2e$

Reduksi emisi  $CO_2e$  dihitung sebagai persentase penurunan terhadap nilai BAU (B0) untuk setiap bahan bakar alternatif, pada kedua horizon GWP dengan persamaan berikut

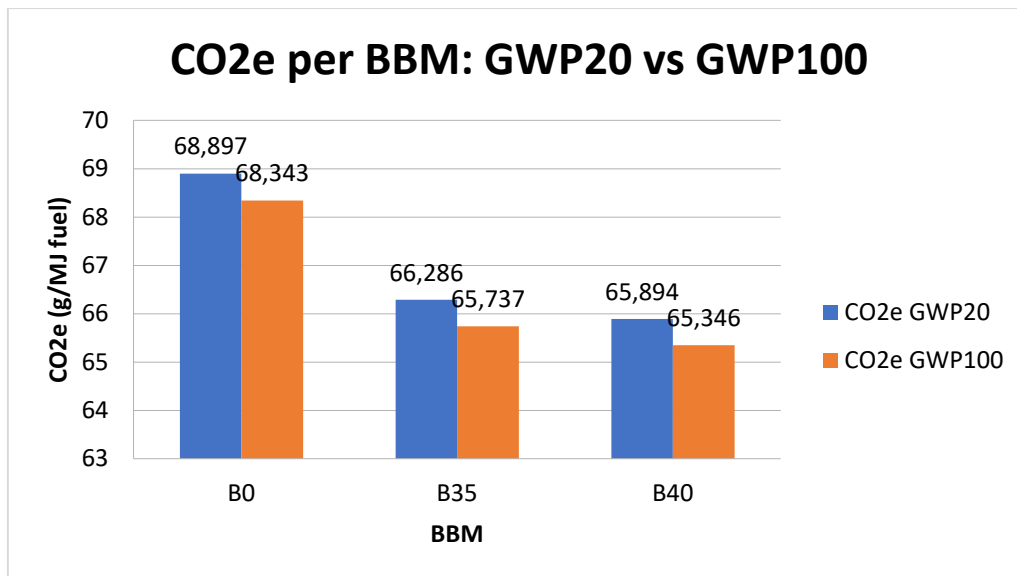
$$\text{Reduksi}(\%) = \frac{CO_2e_{B0} - CO_2e_{\text{alternatif}}}{CO_2e_{B0}} \times 100\% \quad (4.10)$$

Contoh Perhitungan (B40, GWP20;  $CO_2e_{B0} = 68,897$ ;  $CO_2e_{B40} = 65,894$  g  $CO_2e$ /MJ fuel):

$$\%Reduksi = \frac{68,897 - 65,894}{68,897} \times 100 = 4,36\%$$

Tabel 4. 43 Hasil Konversi  $CO_2e$  per BBM GWP20 dan GWP100

| BBM | $CO_2e$ GWP20 (g/MJ<br>fuel) | Reduksi GWP20<br>(%) | $CO_2e$ GWP100 (g/MJ<br>fuel) | Reduksi GWP100<br>(%) |
|-----|------------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|
| B0  | 68,897                       | 0,00%                | 68,343                        | 0,00%                 |
| B35 | 66,286                       | 3,79%                | 65,737                        | 3,81%                 |
| B40 | 65,894                       | 4,36%                | 65,346                        | 4,39%                 |



Gambar 4. 21 Perbandingan Emisi dan  $CO_2e$  Reduksi Bahan Bakar Biodiesel.

Perbandingan tingkat emisi karbon ekuivalen dan persentase reduksi pada penggunaan bahan bakar B0, B35, dan B40 dilakukan berdasarkan parameter *Global Warming Potential* 20 tahun (GWP20) dan 100 tahun (GWP100), sebagaimana disajikan pada Tabel 4.42. Bahan bakar B0 sebagai kondisi dasar (BAU) menghasilkan intensitas emisi tertinggi tanpa reduksi, yaitu 68,897 g  $CO_2e$ /MJ fuel untuk GWP20 dan 68,343 g  $CO_2e$ /MJ fuel untuk GWP100. Peralihan ke bahan bakar B35 menurunkan emisi menjadi 66,286 g  $CO_2e$ /MJ fuel (GWP20, reduksi 3,79%) dan 65,737 g  $CO_2e$ /MJ fuel (GWP100, reduksi 3,81%). Penurunan emisi paling signifikan dicapai oleh varian B40, dengan intensitas emisi terendah sebesar 65,894 g  $CO_2e$ /MJ fuel (GWP20, reduksi 4,36%) dan 65,346 g  $CO_2e$ /MJ fuel (GWP100, reduksi 4,39%).

#### 4.6.3 Ringkasan Perbandingan LCA dan Implikasi Mitigasi

Penggantian bahan bakar B0 ke B40 menurunkan emisi GRK kapal sebesar 4,36% (GWP20). Angka ini masih jauh dari dua target besar: target IMO 2030 yang menetapkan penurunan  $\geq 20\%$  untuk sektor pelayaran internasional (IMO, 2023), dan target NDC Indonesia yang menetapkan penurunan 31,89% secara nasional (Republic of Indonesia, 2022). Terhadap target IMO saja, masih ada *gap* sekitar 15,64 %. Meski begitu, hasil ini wajar mengingat penelitian hanya menguji satu kapal kecil dengan satu jenis intervensi, yaitu ganti bahan bakar. Jika diterapkan ke seluruh armada nasional, dampaknya berpotensi jauh lebih besar. Perhitungan ini juga baru mencakup *Tank to Wake* (emisi dari tangki ke knalpot), belum menghitung potensi tambahan dari *Well-to-Tank* misalnya kredit karbon dari fotosintesis sawit sebagai bahan baku biodiesel.

Tabel 4. 44 Hasil Konversi  $CO_2e$  per BBM GWP20 dan GWP100

| Parameter                    | B0 (BAU)               | B35                    | B40                    | Satuan    |
|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| $CO_2$ tahunan               | 15.515,78              | 14.408,96              | 14.302,49              | kg/tahun  |
| $CH_4$ tahunan               | 3,164                  | 2,816                  | 2,740                  | kg/tahun  |
| $CO_2e$ GWP20                | 68,897                 | 66,286                 | 65,894                 | g/MJ fuel |
| $CO_2e$ GWP100               | 68,343                 | 65,737                 | 65,346                 | g/MJ fuel |
| Reduksi $CO_2e$ GWP20 vs B0  |                        | 3,79%                  | 4,36%                  | %         |
| Reduksi $CO_2e$ GWP100 vs B0 |                        | 3,81%                  | 4,39%                  | %         |
| EF $CO_2$ aktual             | 2,9059                 | 2,7947                 | 2,7780                 | g/g fuel  |
| EF $CH_4$ aktual             | $5,955 \times 10^{-4}$ | $5,482 \times 10^{-4}$ | $5,342 \times 10^{-4}$ | g/g fuel  |
| Rekomendasi                  | <i>Baseline</i>        | Alternatif 2           | Alternatif Terbaik     | -         |

#### 4.6.4 Saran Propulsi untuk mencapai target penurunan emisi 2030 dan 2050

Hasil analisis Life Cycle Assessment *Tank to Wake* pada penelitian ini menunjukkan bahwa substitusi bahan bakar dari B0 menuju B40 hanya menghasilkan penurunan emisi  $CO_2e$  sebesar 4,36% pada metrik GWP20 dan 4,39% pada GWP100 terhadap kondisi Business-as-Usual (BAU), jauh di bawah target *Nationally Determined Contribution* (NDC) Indonesia 2030 sebesar 31,89% secara *unconditional* maupun target IMO 2030 yang mensyaratkan pengurangan intensitas karbon pelayaran minimal 20% dibandingkan level 2008 (Republic of Indonesia, 2022; IMO, 2023). *Gap* sebesar 15,64 persentase poin yang tersisa membuktikan bahwa intervensi pada sisi bahan bakar saja tidak memadai, dan karakteristik struktural lambung kayu kapal objek penelitian ini secara teknis membatasi kelayakan *retrofitting* sistem propulsi hybrid maupun elektrik yang memerlukan fondasi struktural lebih kuat untuk menanggung beban baterai dan sistem kelistrikan (Ma'arif et al., 2025). Oleh karena itu, rekomendasi strategis penelitian ini diarahkan pada dua jalur paralel: optimasi operasional jangka pendek pada kapal *existing*, dan perencanaan armada pengganti yang dirancang sejak awal (*by design*) untuk mengakomodasi sistem propulsi rendah emisi generasi berikutnya.

Tabel 4. 45 Hasil Konversi  $CO_2e$  per BBM GWP20 dan GWP100

| Fase   | Periode   | Sasaran                    | Intervensi                                             | Estimasi<br>Reduksi Emisi<br>$CO_2$ | Referensi                |
|--------|-----------|----------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Fase 1 | 2026–2027 | Kapal eksisting (kayu)     | B40 + optimasi kecepatan operasi + perawatan lambung   | ~4,39% (TtW)                        |                          |
| Fase 2 | 2026–2030 | kapal diganti              | Sistem <i>hybrid</i> diesel-elektrik + <i>Solar PV</i> | ~23%                                | (Ma'arif et al., 2025)   |
| Fase 3 | 2030–2050 | Kapal eksisting (retrofit) | Propulsi <i>full</i> elektrik + <i>Solar PV</i>        | 100%                                | (Octaviani et al., 2023) |

Dengan catatan Fase 1 diterapkan pada kapal kayu existing. Fase 2 dan 3 ditujukan pada armada pengganti yang dibangun baru dengan material dan desain yang kompatibel dengan sistem propulsi rendah emisi. Estimasi reduksi bersifat indikatif berdasarkan studi pada kapal dengan karakteristik serupa di perairan Indonesia. jalan mutlak untuk mewujudkan target Net-Zero Emission maritim pada tahun 2050 (IMO, 2023).

#### 4.7 Perbandingan Alat Uji emisi Prototipe dan Alat Uji Emisi Profesional

Pembuatan prototipe dilakukan dengan membandingkannya terhadap Testo 350 MARITIME V2, sebuah *flue gas analyzer* portabel kelas profesional yang telah tersertifikasi MARPOL 73/78 Annex VI, DNV GL, dan Class NK, sehingga menjadikannya standar acuan yang sah dalam pengukuran emisi gas buang mesin diesel kapal (Testo, 2020). Prototipe yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan sensor NDIR untuk  $CO_2$  dan sensor MOS MQ-4 untuk  $CH_4$  berbasis *platform* mikrokontroler ESP32, yang dirancang sebagai solusi pengukuran berbiaya rendah yang dapat diterapkan pada kapal non-konvensional berskala kecil yang selama ini tidak terjangkau oleh instrumen profesional komersial (de Marinho et al., 2024). Perbandingan antara keduanya tidak dimaksudkan untuk menyatakan kesetaraan teknis, melainkan untuk mengidentifikasi secara transparan posisi kapabilitas prototipe, batas operasionalnya, serta potensi pengembangannya dalam konteks inventarisasi emisi GRK kapal. Dimensi perbandingan mencakup parameter gas yang dapat diukur, rentang dan akurasi pengukuran, status sertifikasi, portabilitas, antarmuka data, dan kesesuaian penggunaan untuk tujuan penelitian ini.

Tabel 4. 46 Perbandingan Prototipe dan Alat Profesional

| No | Kategori    | Parameter                                         | Testo 350 MARITIME V2      | Prototipe                        |
|----|-------------|---------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 1  | Gas Terukur | $CO_2$                                            | IR (0–40 vol%)             | NDIRGSS WF100 (0–100 vol%)       |
|    |             | $CH_4$                                            | Tidak ada                  | MOS/MQ-4 (0–10.000 ppm)          |
|    |             | $O_2$ ,<br>$CO$ ,<br>$NO$ ,<br>$NO_2$ ,<br>$SO_2$ | Elektrokimia               | Tidak ada                        |
|    |             | Total Gas                                         | 6 gas                      | 2 gas                            |
|    |             |                                                   |                            |                                  |
| 2  | Akurasi     | $CO_2$ (terukur)                                  | Standar MARPOL Annex VI    | Selisih 1,26–1,89% vs. referensi |
|    |             | $CH_4$ (terukur)                                  | Tidak ada                  | Perlu pengembangan lebih lanjut  |
|    |             | Laju Alir Sampel                                  | 1 L/min ( $\pm 0,1$ L/min) | ~1 L/min (tidak otomatis)        |

Tabel 4. 44 Lanjutan Perbandingan Prototipe dan Alat Profesional

| No | Kategori     | Parameter                    | Testo 350 MARITIME V2     | Prototipe              |
|----|--------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|
| 3  | Portabilitas | Konfigurasi Fisik            | 2 unit terpisah (~5,3 kg) | 1 unit terintegrasi    |
|    |              | Catu Daya                    | Li-ion + 100–240V AC      | Li-ion 12V + BMS       |
|    |              | Koneksi Data                 | USB 2.0 + IrDA            | SD Card                |
|    |              | Protection Class             | IP40                      | Tidak dispesifikasikan |
| 4  | Biaya        | Estimasi Harga               | ~Rp100–200 juta+          | ~ 12 Juta +            |
| 5  | Kesesuaian   | Inventarisasi GRK ( $CO_2$ ) | ✓                         | ✓                      |
|    |              | Inventarisasi GRK ( $CH_4$ ) |                           | ✓ (Catatan koreksi)    |
|    |              | Kapal Kecil Non-konv.        | Memadai                   | Lebih sesuai           |

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe *gas analyzer* berbasis ESP32 untuk mengukur emisi  $CO_2$  dan  $CH_4$  gas buang mesin kapal non konvensional, menyusun *Baseline Actual Value* (BAV) pada kondisi *Business as Usual* (BAU), memilih bahan bakar alternatif melalui pendekatan AHP-TOPSIS, dan membandingkan emisi antar skenario bahan bakar menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA) *Tank to Wake* (TtW). Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada Bab 4, kesimpulan disusun untuk menjawab setiap rumusan masalah sebagai berikut:

1. Prototipe *gas analyzer* berbasis mikrokontroler ESP32 berhasil dirancang dan direalisasikan menggunakan sensor NDIR untuk  $CO_2$  dan sensor MOS MQ-4 untuk  $CH_4$ , dilengkapi sistem pengambilan sampel gas, pompa udara, LCD, dan catu daya. Hasil kalibrasi terhadap alat uji emisi profesional di Laboratorium Marine Power Plant ITS menunjukkan bahwa pembacaan  $CO_2$  prototipe memiliki deviasi akurasi sebesar 1,26–1,89% dan selisih *emission factor* terhadap nilai teoritis sebesar 8,16–11,01%, pembacaan  $CH_4$  menunjukkan selisih *error* melebihi 10% berkisar 21,69–34,09% terhadap nilai teoritis pada seluruh varian bahan bakar, sehingga bagian rancangan ini belum sepenuhnya menjawab tujuan penelitian: prototipe layak dipakai untuk  $CO_2$
2. Metode pengukuran dan perhitungan emisi aktual kapal non konvensional pada kondisi BAU dilakukan dengan memetakan profil operasi kapal ke dalam tiga fase beban (akselerasi/*medium load*, pelayaran/*high load*, deselerasi/*low load*) sebanyak 1.872 trip per tahun (11.232 jam operasi/tahun), lalu mengalikan *emission factor* terukur tiap fase dengan durasi dan frekuensi operasinya. Metode ini menghasilkan BAV yang valid sebagai dasar inventarisasi, yaitu emisi  $CO_2$  sebesar 15.515,78 kg/tahun dan  $CH_4$  sebesar 3,164 kg/tahun untuk bahan bakar B0 (BAU). Nilai BAV ini konsisten menjadi acuan pembanding bagi skenario bahan bakar alternatif pada rumusan masalah berikutnya, sehingga tujuan penelitian pada poin ini tercapai sepenuhnya untuk parameter  $CO_2$ , dengan catatan tingkat keandalan  $CH_4$  tetap mengikuti keterbatasan sensor yang telah disebutkan pada poin pertama.
3. Riset operasi pemilihan bahan bakar B0, B35, dan B40 dilakukan melalui integrasi metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) untuk pembobotan lima kriteria (emisi  $CO_2$ e, biaya bahan bakar, ketersediaan, kemudahan perawatan, serta keselamatan dan keandalan) dan *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) untuk pemeringkatan alternatif. Hasil akhir menunjukkan bahan bakar B40 memperoleh *closeness coefficient* ( $V_i$ ) tertinggi sebesar 0,904 (peringkat 1), diikuti B35 sebesar 0,698 (peringkat 2), dan B0 sebesar 0,224 (peringkat 3). Uji sensitivitas pada 10 skenario perubahan bobot kriteria ( $\pm 20\%$ ) menghasilkan stabilitas peringkat 100%, membuktikan bahwa keunggulan B40 bersifat *robust* dan bukan artefak dari

pembobotan yang kebetulan sesuai. Dengan demikian, B40 direkomendasikan sebagai bahan bakar operasional terbaik berdasarkan pendekatan multi-kriteria.

4. Perbandingan emisi antara kondisi BAU dan bahan bakar alternatif dengan pendekatan LCA *Tank to Wake* menunjukkan bahwa peralihan ke B35 menurunkan intensitas emisi  $CO_2$  e sebesar 3,79% (GWP20) dan 3,81% (GWP100) terhadap B0, sedangkan B40 memberikan reduksi terbesar yaitu 4,36% (GWP20) dan 4,39% (GWP100), dengan intensitas emisi B40 sebesar 65,894 g  $CO_2$  e/MJ fuel (GWP20) dan 65,346 g  $CO_2$  e/MJ fuel (GWP100). Hasil LCA ini konsisten dan memperkuat hasil AHP-TOPSIS pada poin sebelumnya B40 unggul dari sisi teknis ekonomis maupun dari sisi dampak lingkungan siklus hidup.

## 5.2 Saran

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian ini, beberapa saran diajukan untuk pengembangan lebih lanjut:

1. Mengingat *error* pembacaan MQ-4 melebihi 10% (hingga 34,09%) pada, penelitian lanjutan disarankan mengganti sensor MQ-4 dengan sensor resolusi 1-100.000 ppm deteksinya yang dikalibrasi khusus untuk gas buang, agar hasil pengukuran  $CH_4$  memenuhi kriteria akurasi yang sama seperti  $CO_2$  dan dapat digunakan langsung untuk inventarisasi emisi tanpa faktor koreksi manual.
2. Sensor  $CH_4$  dan  $CO_2$  terpapar langsung partikulat dan uap air dari gas buang, sehingga cepat kotor dan sering perlu dibersihkan Filter dengan porti keci (pori 2–10  $\mu$ m) menahan partikulat kasar/jelaga, dipasang setelah *probe*
3. Dalam Kalibrasi  $CH_4$  Lebih baik membandingkan dengan alat uji emisi professional dengan prototipe dalam mengukur satu gas yang sama



## DAFTAR PUSTAKA

- AFDC. (2024). Fuel properties comparison. Alternative Fuels Data Center, U.S. Department of Energy.
- Amin, M., Syahril, S., Rona, R., & Syaiful, S. (2024). Use of biodiesel B35 in direct injection diesel engine with load variation. Atlantis Press.
- AOAC INTERNATIONAL. (2016). Appendix F: Guidelines for standard method performance requirements. In Official methods of analysis of AOAC INTERNATIONAL.
- Ariyanto, Y., & Soedarto, T. (2025). Benefits of biogas as a renewable energy source in supporting Sustainable Development Goals (SDGs) in the KPSP Setia Kawan Region, Pasuruan, Indonesia. *Agricultural Science*, 8(2), 170–198. <https://doi.org/10.55173/agriscience.v8i2.155>
- Asahi Kasei Microdevices (AKM). (n.d.). What is NDIR? Retrieved February 10, 2026, from <https://www.akm.com/eu/en/products/co2-sensor/tutorial/what-is-ndir/>
- Bai, C., Li, Y., Liu, B., Zhang, Z., & Wu, P. (2020). Gaseous emissions from a seagoing ship under different operating conditions in the coastal region of China. *Atmosphere*, 11(3), 305. <https://doi.org/10.3390/atmos11030305>
- Brunelli, M., Canal, L., & Fedrizzi, M. (2024). Consistency improvement in the analytic hierarchy process. *Mathematics*, 12(6), 828.
- Bucher, E., Millet, G. P., Wehrlin, J. P., & Steiner, T. (2023). Test-retest reliability of ski-specific aerobic, sprint, and neuromuscular performance tests in highly trained cross-country skiers. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 33, 2482–2498. <https://doi.org/10.1111/sms.14473>
- Chaube, S., Pant, S., Kumar, A., Uniyal, S., Singh, M. K., Kotecha, K., & Kumar, A. (2024). An overview of multi-criteria decision analysis and the applications of AHP and TOPSIS methods. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 9(3), 581–615. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2024.9.3.030>
- Chu-Van, T., Ristovski, Z., Pourkhesalian, A. M., Rainey, T., Garaniya, V., Abbassi, R., Jahangiri, S., Enshaei, H., Kam, U.-S., Kimball, R., Yang, L., Zare, A., Bartlett, H., & Brown, R. J. (2018). On-board measurements of particle and gaseous emissions from a large cargo vessel at different operating conditions. *Environmental Pollution*, 237, 832–841. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.008>

- Costa, D. S., Mamede, H. S., & da Silva, M. M. (2023). A method for selecting processes for automation with AHP and TOPSIS. *Heliyon*, 9(3), e13683. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13683>
- de Marinho, P. F. C., Santana, G. M., Felix, M. L., Morais, R. de M., Santos, A. A., & de Jesus, R. M. (2024). Intelligent, low-cost, high-performance system for environmental air quality monitoring through integrated gas, temperature, and humidity analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21, 4881–4898.
- Dettner, F., & Hilpert, S. (2023). Emission inventory for maritime shipping emissions in the North and Baltic Sea. *Data*, 8(5), 85. <https://doi.org/10.3390/data8050085>
- Dey, A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 229, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036>
- Dinh, T.-V., Choi, I.-Y., Son, Y.-S., & Kim, J.-C. (2016). A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040>
- DNV GL. (2016). DNV GL handbook for maritime and offshore battery systems (Report No. 2016-1056, V1.0).
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296.
- Eurachem. (2018). Setting target measurement uncertainty. Eurachem Information Leaflet.
- European Maritime Safety Agency. (2020). Study on electrical energy storage for ships. <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/3895-study-on-electrical-energy-storage-for-ships.html>
- Galindo Talhami, E. A., Aguiluz, O., & Martínez-Rangel, M. G. (2024). Low cost CO2 sensor prototype with IoT [Conference paper]. Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC).
- Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019>
- Honeycutt, W. T., Ley, M. T., & Materer, N. F. (2019). Precision and limits of detection for selected commercially available, low-cost carbon dioxide and methane gas sensors. *Sensors*, 19(14), 3157. <https://doi.org/10.3390/s19143157>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1980). TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution): A multiple attribute decision making method [Lecture notes/handout].

- Inal, O. B., Charpentier, J.-F., & Deniz, C. (2022). Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111965>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis* (AR6 Working Group I). IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2024). *Seventh Assessment Report (AR7)*. Retrieved February 17, 2026, from <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar7/>
- International Council on Clean Transportation. (2023, June). *Global update on scrubber bans and restrictions* (Policy update). ICCT.
- International Maritime Organization. (2020). *Fourth IMO greenhouse gas study 2020* (Key findings). International Maritime Organization.
- International Maritime Organization. (2020). *IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions*.
- International Maritime Organization. (2021). *Resolution MEPC.340(77): 2021 guidelines for exhaust gas cleaning systems (EGCS)* (Adopted 26 November 2021).
- International Maritime Organization. (2023, July 7). *Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted*.
- International Maritime Organization. (2024). *2024 guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (2024 LCA Guidelines)* (Resolution MEPC.391(81)).
- International Maritime Organization. (2025). *MEPC.402(83): Guidelines for test-bed and onboard measurements of methane (CH<sub>4</sub>) and/or nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from marine diesel engines*.
- International Organization of Legal Metrology. (2008). *Instruments for measuring vehicle exhaust emissions Part 1: Metrological and technical requirements; Part 2: Metrological controls and performance tests* (OIML R 99-1 & R 99-2:2008, Reconfirmed 2024).
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change* (AR6 WGIII), Chapter 10: Transport. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jalilibal, Z., Amiri, A., Castagliola, P., & Khoo, M. B. C. (2021). Monitoring the coefficient of variation: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107600. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107600>
- Jo, K.-S., Kong, K.-J., & Han, S.-H. (2025). Optimizing fuel efficiency and emissions of marine diesel engines when using biodiesel mixtures under diverse load/temperature conditions: Predictive model and comprehensive life cycle analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(6), 1192. <https://doi.org/10.3390/jmse13061192>

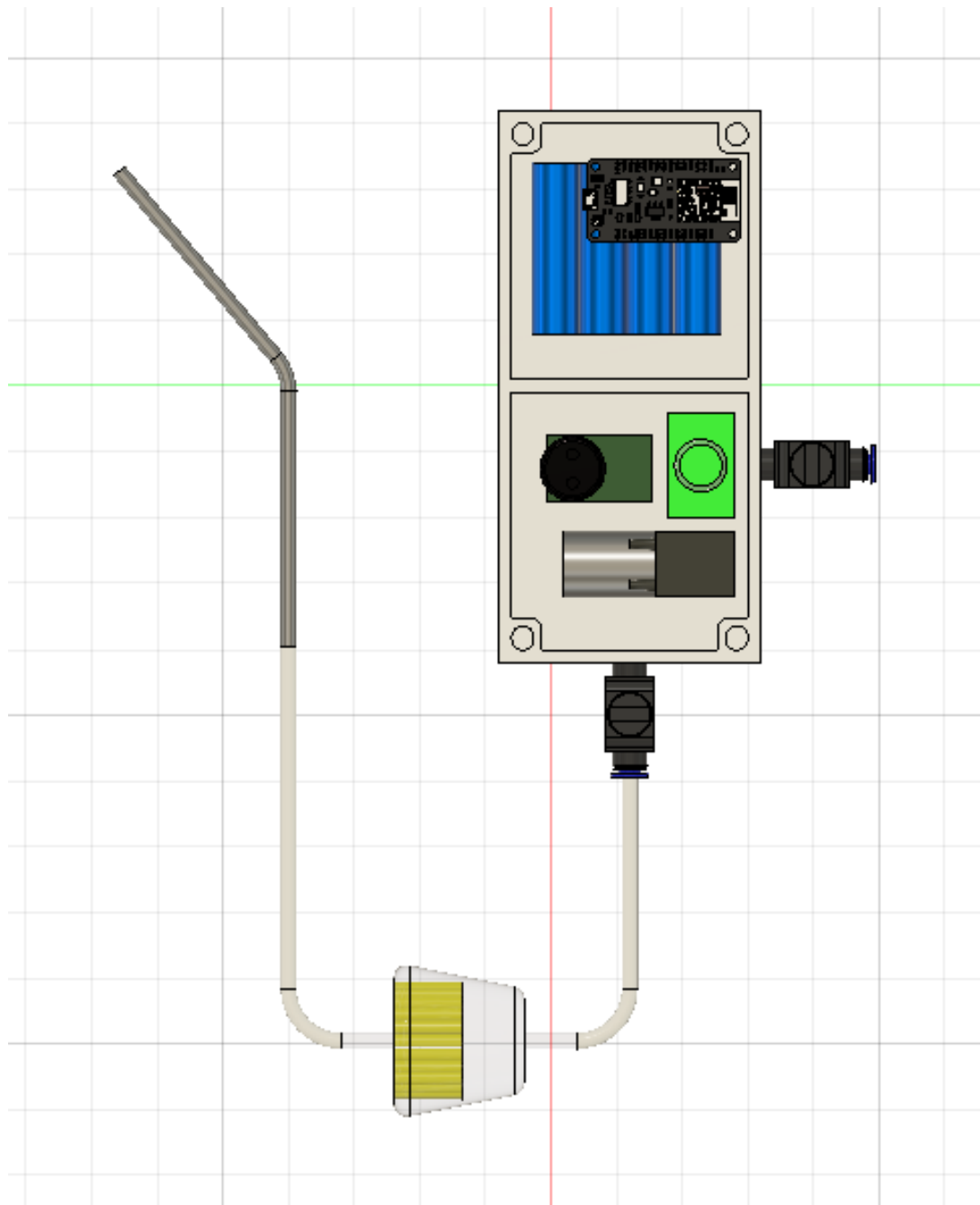
- Korean Register. (2023). Guidelines on using biofuel on ships (Technical Information No. 2023-IMO-02). Korean Register. [https://www.krs.co.kr/TECHNICAL\\_FILE/2023-IMO-02%20\(E\).pdf](https://www.krs.co.kr/TECHNICAL_FILE/2023-IMO-02%20(E).pdf)
- Kou, G., Ergu, D., Chen, Y., & Lin, C. (2016). Pairwise comparison matrix in multiple criteria decision making. *Technological and Economic Development of Economy*, 22(5), 738–765. <https://doi.org/10.3846/20294913.2016.1210694>
- Ma'arif, S., Sunaryo, & Budiyo, M. A. (2025). Energy saving potential of hybrid propulsion system for fishing vessels in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 621, 03012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562103012>
- MAN Energy Solutions. (2022). Operational guidelines for biofuels.
- MAN Energy Solutions. (2023). Service Letter SL2023-741.
- Mao, R., Qian, Y., Liu, K., Li, Y., Li, G., & Zhang, H. (2025). A comprehensive survey of battery energy in maritime transportation: Trends, challenges, and future perspectives. *Ocean Engineering*, 337, 121881. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121881>
- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Govindan, K., Amat Senin, A., & Jusoh, A. (2019). Applications in decision-making: Analytic hierarchy process AHP. In [Springer chapter on AHP applications and theory].
- Martin, C. R., Zeng, N., Karion, A., Dickerson, R. R., Ren, X., Turpie, B. N., & Weber, K. J. (2017). Evaluation and environmental correction of ambient CO<sub>2</sub> measurements from a low-cost NDIR sensor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(7), 2383–2395. <https://doi.org/10.5194/amt-10-2383-2017>
- Mirzaei, A., Ansari, H. R., Shahbaz, M., Kim, J.-Y., Kim, H. W., & Kim, S. S. (2022). Metal oxide semiconductor nanostructure gas sensors with different morphologies. *Chemosensors*, 10(7), 289. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10070289>
- Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK). (2023). Handling of IMO interim guidance on the use of biofuels under IMO-DCS and CII regulation (Technical Information No. TEC-1307). ClassNK. [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/tech\\_info/tech\\_img/T1307e.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/tech_info/tech_img/T1307e.pdf)
- Octaviani, N. S., Waskito, D. H., Iskendar, Muis, A., Fuadi, N. M. R., Muhajirin, Palebangan, H., Ismoyo, K., Kartikasari, D., Gutami, N. I., & Ajidarmo, K. (2023). The influence of battery-powered engine on the reduction of carbon dioxide production from fishing boats. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 14(2), 208–214. <https://dx.doi.org/10.14203/j.mev.2023.v14.208-214>
- Pang, K., Zhang, K., & Ma, S. (2021). Tailpipe emission characterizations of diesel-fueled forklifts under real-world operations using a portable emission measurement system. *Journal of Environmental Sciences*, 100, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.07.011>

- Pant, S., Kumar, A., Ram, M., Klochkov, Y., & Sharma, H. K. (2022). Consistency indices in analytic hierarchy process: A review. *Mathematics*, 10(8), 1206. <https://doi.org/10.3390/math10081206>
- Republic of Indonesia. (2021). Indonesia long-term strategy for low carbon and climate resilience 2050 (LTS-LCCR 2021). UNFCCC.
- Republic of Indonesia. (2022). Enhanced nationally determined contribution: Republic of Indonesia. UNFCCC.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.01759>
- South Coast Air Quality Management District. (2021). Rule 218.2 — Continuous Emission Monitoring System: General Provisions (Adopted March 5, 2021). South Coast AQMD. <https://www.aqmd.gov/docs/default-source/rule-book/reg-ii/r218-2.pdf>
- Testo. (2020). Testo 350 MARITIME V2: Flue gas analyzer – Instruction manual (Document No. 0970 3509 en 045). Testo SE & Co. KGaA. <https://www.testo.com/en-AU/testo-350/p/0632-3510>.
- Tran, N.-T., Trinh, V.-L., & Chung, C.-K. (2024). An integrated approach of fuzzy AHP-TOPSIS for multi-criteria decision-making in industrial robot selection. *Processes*, 12(8), 1723. <https://doi.org/10.3390/pr12081723>
- United Nations Conference on Trade and Development. (2025). Data insights: Global merchant fleet (start of 2025). UNCTADstat Data Hub.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2020). Port emissions inventory guidance: Methodologies for estimating port-related and goods movement mobile source emissions (EPA-420-B-20-046).
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025). EMC: Continuous emission monitoring systems (CEMS). U.S. EPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025, January 15). Emission factors for greenhouse gas inventories. U.S. Environmental Protection Agency.
- Wardana, R. W., Garside, A. K., & Anggara, A. T. (2022). Integrated analytic hierarchy process and preference ranking organization method for enrichment evaluation II for supplier selection. *AIP Conference Proceedings*, 2453(1), 020049. <https://doi.org/10.1063/5.0094738>
- Zhang, X., Cheng, S., Wu, F., Yue, M., Liu, X., Zhao, D., & Yan, X. (2025). Characterization of pollutant discharges from ships within 100 nautical miles of China's coastline and certain inland river ports, 2022. *Marine Pollution Bulletin*, 215, 117876. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117>

Zhou, F., Fan, Y., Zou, J., & An, B. (2022). Ship emission monitoring sensor web for research and application. *Ocean Engineering*, 249, 110980.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110980>

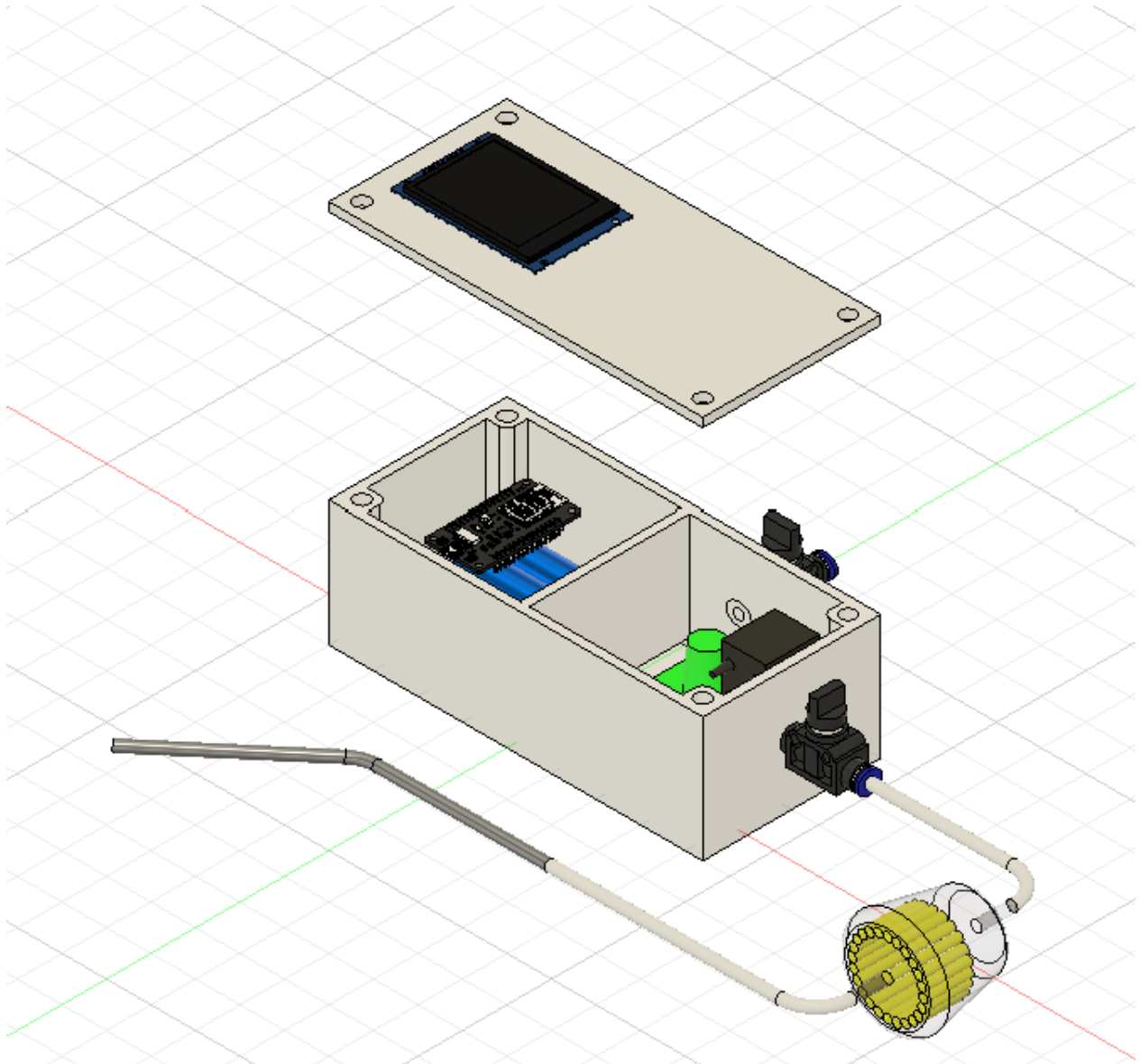
## **LAMPIRAN**

**Gambar Desain 3D Prototipe Tampak Atas**

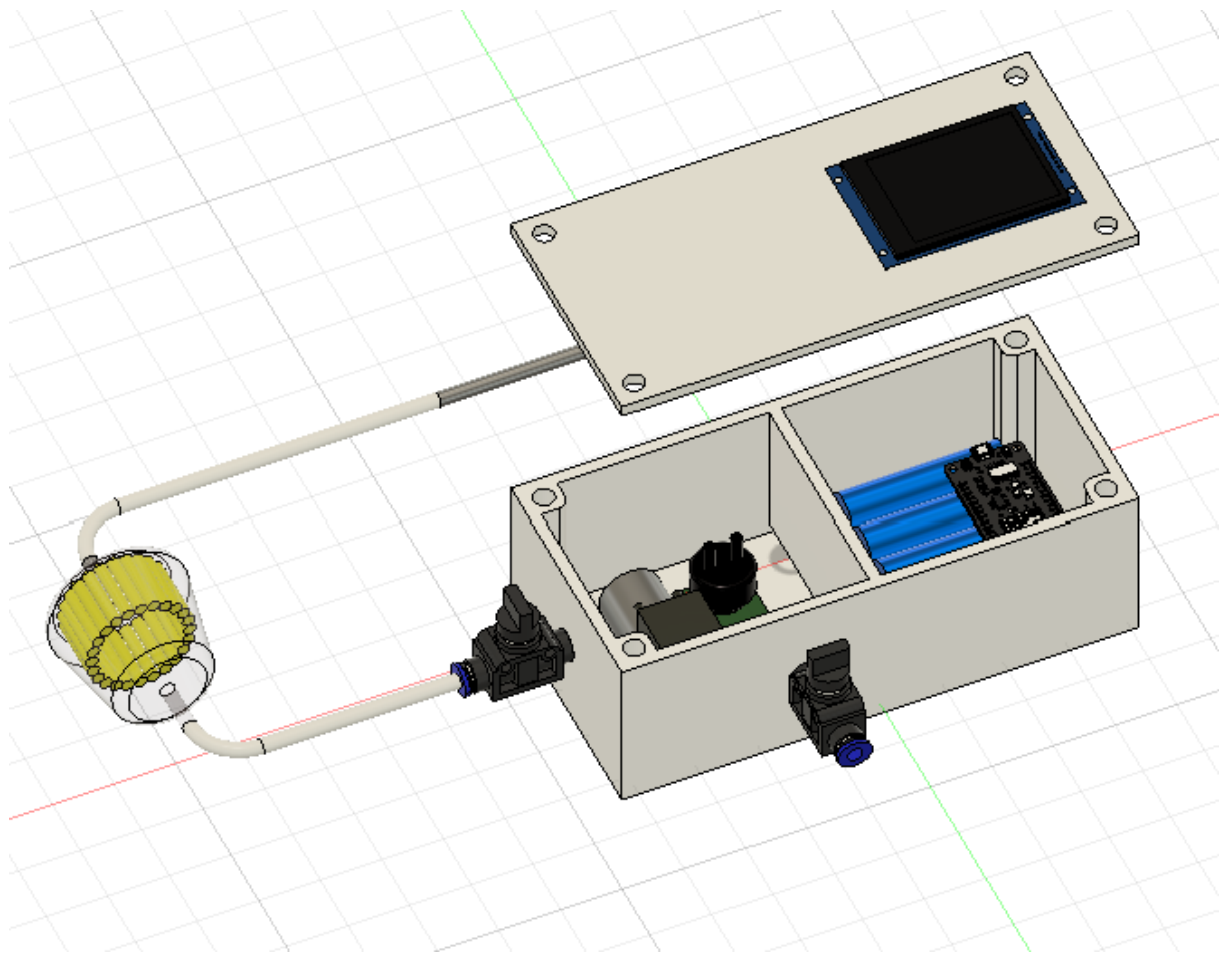




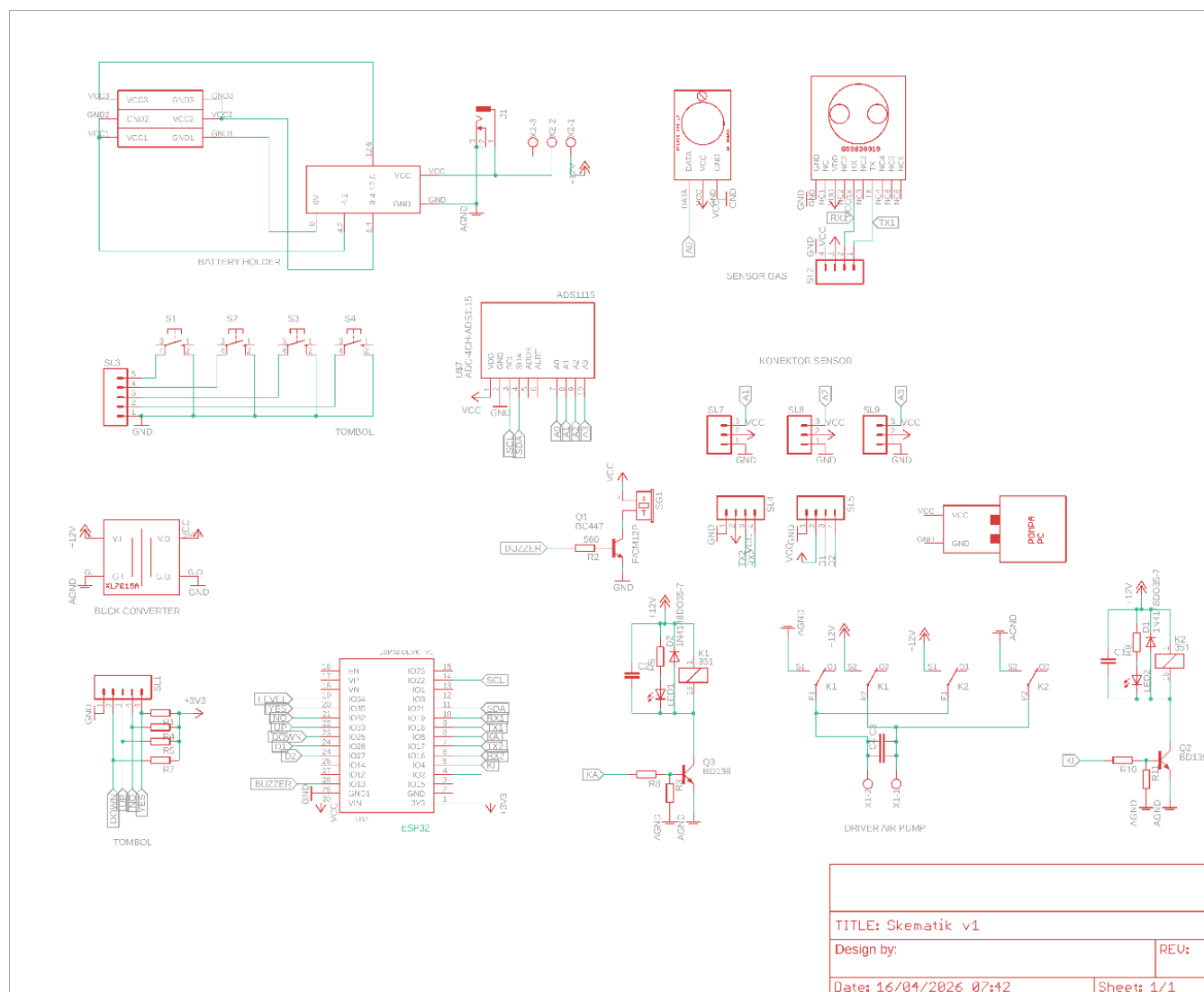
## Gambar Desain 3D Prototipe Tampak Isometrik



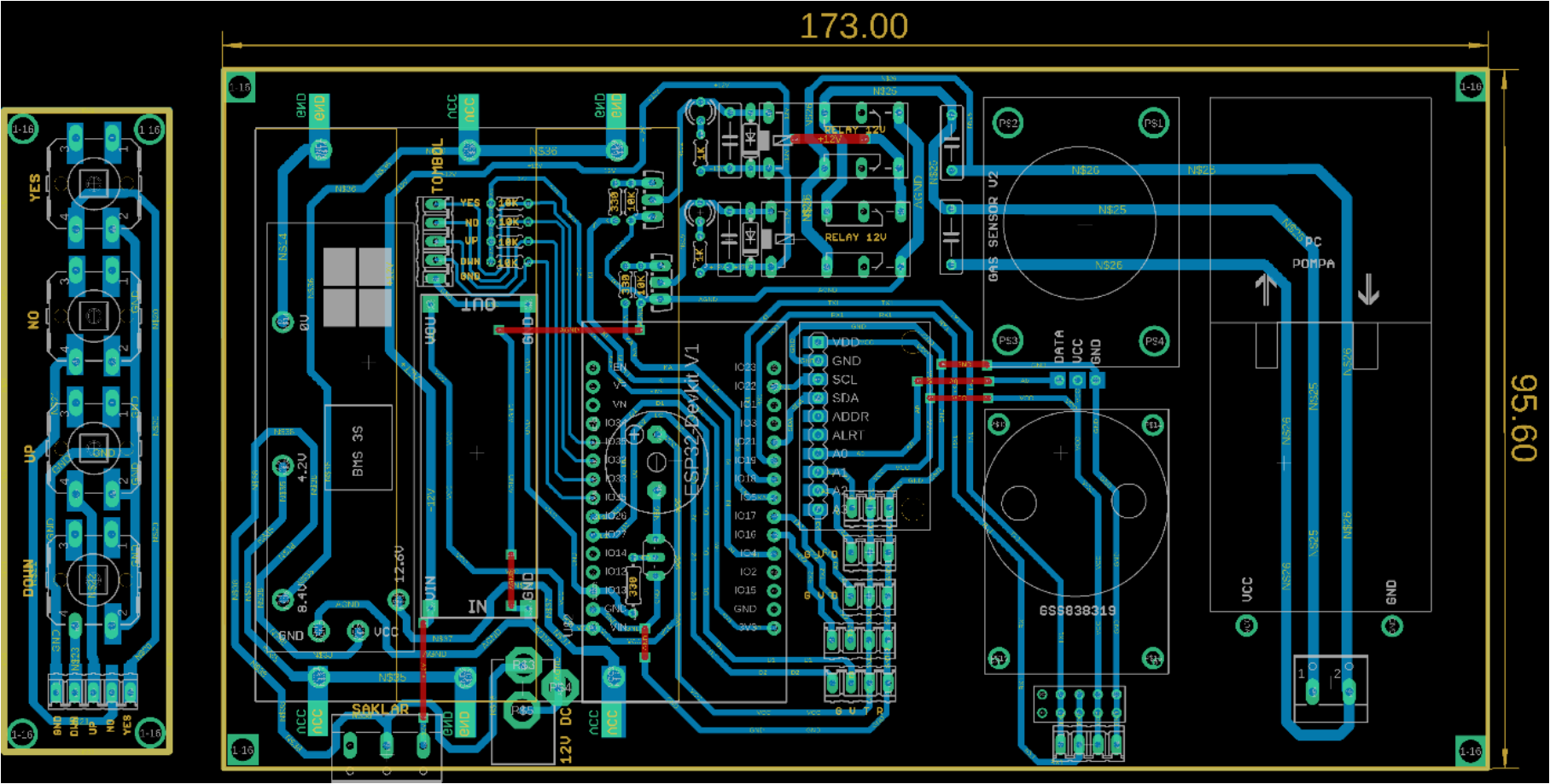
**Gambar Desain 3D Prototipe Tampak Isometrik 2**



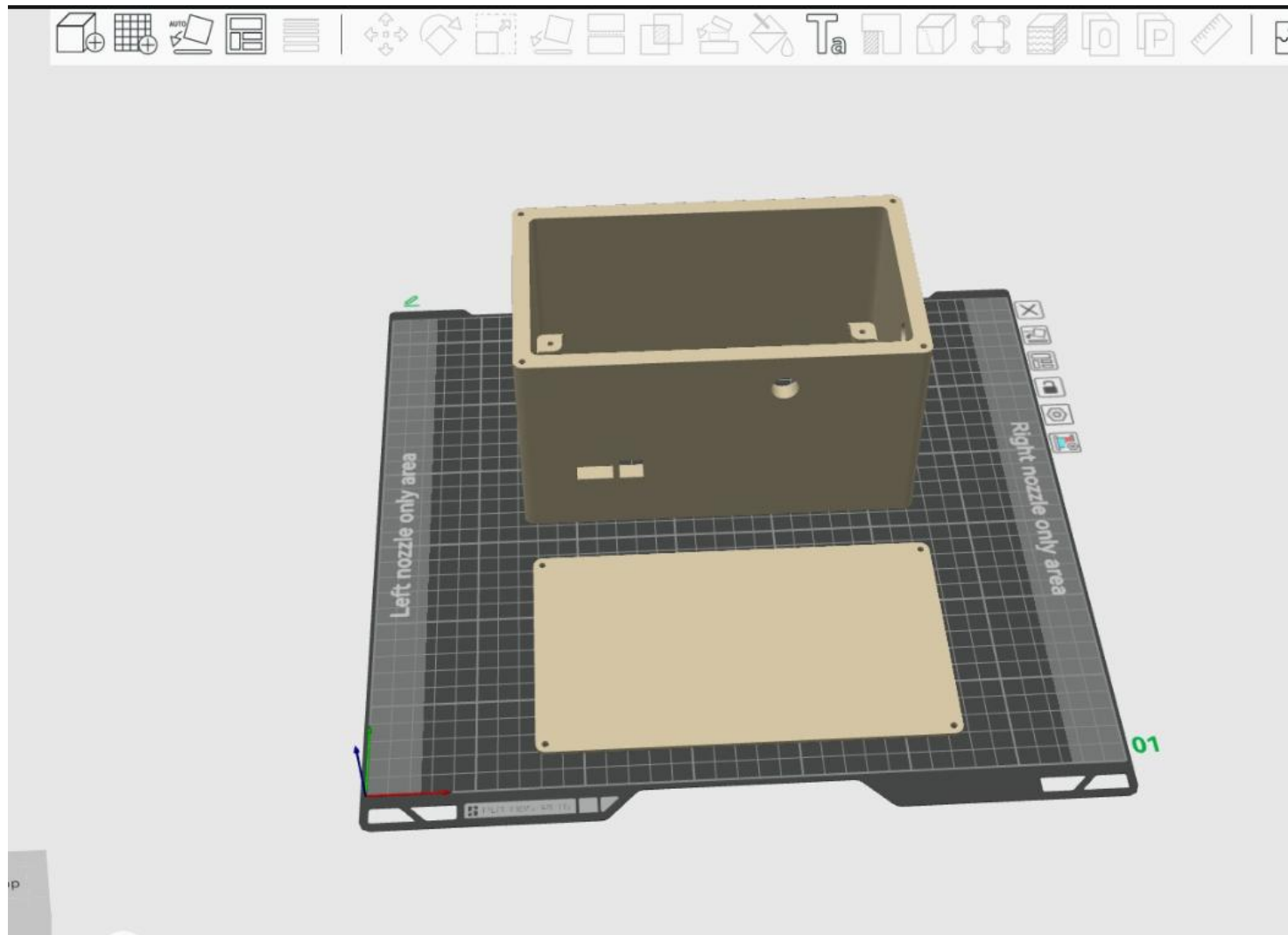
### Gambar Desain Skematik



Gambar Desain 3D PCB



## Gambar Desain 3D Prit Casig



**Gambar Desain 3D Prit Casig**



## Koding sensor *CH<sub>4</sub>*

```
float KalibrasiMQ4(){
  const float RL_VALUE = 10.0;
  const float RO_CLEAN_AIR_RATIO = 4.4;

  const float MQ4_SLOPE = -0.38;
  const float MQ4_INTERCEPT = 1.14;

  Serial.println("--- MEMULAI KALIBRASI MQ-4 ---");
  Serial.println("Pastikan sensor di udara bersih selama proses...");

  float sensor_volt = getVoltage(ADS1115_CHANNEL0);
  float rs = ((5.0 * RL_VALUE) / sensor_volt) - RL_VALUE;

  float R0 = rs / RO_CLEAN_AIR_RATIO;

  Serial.print("Vout: "); Serial.print(sensor_volt);
  Serial.print("V | RS: "); Serial.print(rs);
  Serial.print(" | Hasil R0: "); Serial.println(R0);

  return R0;
}

float ReadMQ4(){
  const float RL_VALUE = 10.0;
  const float RO_CLEAN_AIR_RATIO = 4.4;

  const float MQ4_SLOPE = -0.38;
  const float MQ4_INTERCEPT = 1.14;

  float vOut = getVoltage(ADS1115_CHANNEL0);
  float rs_gas = ((5.0 * RL_VALUE) / vOut) - RL_VALUE;
  float ratio = rs_gas / Ro_MQ4;

  float log_ppm = (log10(ratio) - MQ4_INTERCEPT) / MQ4_SLOPE;
  float ppm_CH4 = pow(10, log_ppm);

  // ppm_CH4 = 21.43;

  // Serial.print("Vout: "); Serial.print(vOut);
  // Serial.print(" | CH4: "); Serial.print(ppm_CH4);
  // Serial.println(" ppm");

  return ppm_CH4;
}
```

## Koding sensor

```
void ReadCO2(){
  // Membaca data jika tersedia
  if (CO2Serial.available() > 0) {
    String rawData = CO2Serial.readStringUntil('\n');
    rawData.trim();

    if (rawData.startsWith("Z")) {
      String rawValue = rawData.substring(2);
      long zValue = rawValue.toInt();

      // Hitung %vol (Multiplier untuk seri 100 adalah 100)
      float co2Percent = (float)zValue / 100.0;
      // float co2Percent = (float)(zValue * multiplier) / 10000.0;

      // Serial.print("Data Raw Z: "); Serial.print(zValue);
      // Serial.print(" | Konsentrasi CO2: ");
      // Serial.print(co2Percent, 3);
      // Serial.println(" %vol");
      co2Percent = co2Percent - 0.0; // UBAH NOL SESUAI TOLERANSI
    }
  }
}
```



## Koding Kontrol Prototipe CO<sub>2</sub>

```
167 void LogikaHandler(){
168   if (Serial2.available()) {
169     String rcve = Serial2.readStringUntil('\n'); // Asumsi Nextion kirim "start" atau "stop"
170     rcve.trim();
171     Serial.println("Data Masuk: " + rcve);
172
173     if (rcve.endsWith("btn_start") && systemState == IDLE) {
174       systemState = STARTING;
175       previousMillis = millis();
176       countdown = 10;
177       // digitalWrite(RELAY_START, HIGH);
178       RELAY_1_ON;
179       sendNextion("t3", "Status: Menyalakan Pompa...");
180     }
181     else if (rcve.endsWith("btn_stop") && systemState == RUNNING) {
182       systemState = STOPPING;
183       previousMillis = millis();
184       countdown = 10;
185       isDetecting = false; // Berhenti baca sensor
186       // digitalWrite(RELAY_STOP, HIGH);
187       RELAY_2_ON;
188       sendNextion("t3", "Status: Proses Berhenti...");
189     }
190
191     else if (rcve.endsWith("btn_skip") && systemState == IDLE) {
192       float ppmCH4 = ReadMQ4();
193       Serial.print(F("CH4: ")); Serial.print(ppmCH4);
194       Serial.print(F(" | CO2: ")); Serial.println(ppmCO2);
195       sendNextion("t0", String(ppmCO2));
196       delay(1000);
197       sendNextion("t1", String(ppmCH4));
198     }
199   }
200 }
```

## Koding Kontrol Prototipe 2

```
switch (systemState) {
  case STARTING:
    if (currentMillis - previousMillis >= 1000) {
      previousMillis = currentMillis;
      countdown--;
      sendNextion("t4", String(countdown) + "s"); // Tampilkan detik di Nextion

      if (countdown <= 0) {
        // digitalWrite(RELAY_START, LOW);
        RELAY_1_OFF;
        systemState = RUNNING;
        isDetecting = true; // Mulai baca sensor
        sendNextion("t3", "Status: Operasi Berjalan");
        sendNextion("t4", "0s");
      }
    }
    break;

  case RUNNING:
    if (isDetecting) {
      if (millis() - ReadMillis > 1000) {
        float ppmCH4 = ReadMQ4();
        Serial.print(F("CH4: ")); Serial.print(ppmCH4);
        Serial.print(F(" | CO2: ")); Serial.println(ppmCO2);
        sendNextion("t0", String(ppmCO2));
        sendNextion("t1", String(ppmCH4));
        ReadMillis = millis();
      }
    }
    break;

  case STOPPING:
    if (currentMillis - previousMillis >= 1000) {
      previousMillis = currentMillis;
      countdown--;
      sendNextion("t4", String(countdown) + "s");

      if (countdown <= 0) {
        // digitalWrite(RELAY_STOP, LOW);
        RELAY_2_OFF;
        systemState = IDLE;
        sendNextion("t4", "---");
      }
    }
}
```

## Pengambilan Data SFOC

B0

| No | Load                      | Bahan Bakar Minyak (mL) | Waktu (s) |
|----|---------------------------|-------------------------|-----------|
| 1  | Low Load (<25%)           | 100                     | 20:07:43  |
| 2  | Medium Load (25%-50%)     |                         | 12:11:11  |
| 3  | High Load (50%-75%)       |                         | 9:10:55   |
| 4  | Full Near Load (75%-100%) |                         | 7:41:03   |

B35

| No | Load                      | Bahan Bakar Minyak (mL) | Waktu (s) |
|----|---------------------------|-------------------------|-----------|
| 1  | Low Load (<25%)           | 100                     | 20:08:51  |
| 2  | Medium Load (25%-50%)     |                         | 12:34:38  |
| 3  | High Load (50%-75%)       |                         | 9:58:18   |
| 4  | Full Near Load (75%-100%) |                         | 7:14:32   |

B40

| No | Load                      | Bahan Bakar Minyak (mL) | Waktu (s) |
|----|---------------------------|-------------------------|-----------|
| 1  | Low Load (<25%)           | 100                     | 20:06:59  |
| 2  | Medium Load (25%-50%)     |                         | 12:40:47  |
| 3  | High Load (50%-75%)       |                         | 9:54:03   |
| 4  | Full Near Load (75%-100%) |                         | 7:15:42   |

Menit: detik: milidetik

## Kalkulasi Emisi Faktor Teoritis

| 1. Data spek kebutuhan perhitungan |             |             |                                |
|------------------------------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Parameter                          | Diesel      | FAME        | Keterangan                     |
| Density                            | 860,0000    | 875,0000    | kg/m <sup>3</sup>              |
| Density                            | 0,8600      | 0,8750      | kg/L                           |
| NCV                                | 42,7000     | 27,0000     | TJ/Gg                          |
| NCV                                | 42,7000     | 27,0000     | MJ/kg; 1<br>TJ/Gg = 1<br>MJ/kg |
| CO <sub>2</sub> emission factor    | 74.100,0000 | 70.800,0000 | kg/TJ                          |
| CH <sub>4</sub> emission factor    | 10,4000     | 10,0000     | kg/TJ                          |

| 2. Komposisi bahan bakar |                     |                   |
|--------------------------|---------------------|-------------------|
| Fuel                     | Diesel volume share | FAME volume share |
| B0 Diesel                | 100%                | 0%                |
| B35                      | 65%                 | 35%               |
| B40                      | 60%                 | 40%               |

| 3. Perhitungan massa dan energi per 1 liter fuel |             |           |                   |                 |                  |                    |                  |                   |
|--------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------------|-----------------|------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Fuel                                             | Diesel vol. | FAME vol. | Massa diesel kg/L | Massa FAME kg/L | Total massa kg/L | Energi diesel MJ/L | Energi FAME MJ/L | Total energi MJ/L |
| B0 Diesel                                        | 100%        | 0%        | 0,8600            | 0,0000          | 0,8600           | 36,7220            | 0,0000           | 36,7220           |
| B35                                              | 65%         | 35%       | 0,5590            | 0,3063          | 0,8653           | 23,8693            | 8,2688           | 32,1381           |
| B40                                              | 60%         | 40%       | 0,5160            | 0,3500          | 0,8660           | 22,0332            | 9,4500           | 31,4832           |

| 4. NCV blend dan energy share |                 |                      |                     |                   |
|-------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| Fuel                          | NCV blend MJ/kg | NCV blend kWh/g fuel | Energy share diesel | Energy share FAME |
| B0 Diesel                     | 42,700000       | 0,011861             | 100,00%             | 0,00%             |
| B35                           | 42,700000       | 0,011861             | 74,27%              | 25,73%            |
| B40                           | 42,700000       | 0,011861             | 69,98%              | 30,02%            |

| 5. Perhitungan emission factor blend dalam kg/TJ |                             |                       |                                   |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Fuel                                             | CO <sub>2</sub> total kg/TJ | CH <sub>4</sub> kg/TJ | CO <sub>2</sub> fossil-only kg/TJ |
| B0 Diesel                                        | 74.100,000                  | 10,400                | 74.100,000                        |
| B35                                              | 73.250,948                  | 10,297                | 55.034,924                        |
| B40                                              | 73.109,472                  | 10,280                | 51.858,138                        |

| 6. Konversi kg/TJ ke g/kWh |                 |                 |           |           |                       |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------------------|
| Fuel                       | CO2 total kg/TJ | CO2 total g/kWh | CH4 kg/TJ | CH4 g/kWh | CO2 fossil-only g/kWh |
| B0 Diesel                  | 74.100,00       | 266,76          | 10,400    | 0,03744   | 266,76                |
| B35                        | 73.250,95       | 263,70          | 10,297    | 0,03707   | 198,13                |
| B40                        | 73.109,47       | 263,19          | 10,280    | 0,03701   | 186,69                |

| 7. Tabel akhir rangkuman kg/TJ ke g/kWh ke g/g fuel |           |            |           |                |
|-----------------------------------------------------|-----------|------------|-----------|----------------|
| Fuel                                                | Emisi     | kg/TJ      | g/kWh     | g emisi/g fuel |
| B0 Diesel                                           | CO2 total | 74.100,000 | 266,76000 | 3,164070       |
| B0 Diesel                                           | CH4       | 10,400     | 0,03744   | 0,000444       |
| B35                                                 | CO2 total | 73.250,948 | 263,70341 | 3,127815       |
| B35                                                 | CH4       | 10,297     | 0,03707   | 0,000440       |
| B40                                                 | CO2 total | 73.109,472 | 263,19410 | 3,121774       |
| B40                                                 | CH4       | 10,280     | 0,03701   | 0,000439       |

## Pengukuran emisi dari prototipe BBM B0

| Perhitungan Daya Mesin dari RPM  |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
|----------------------------------|---------------------------|--------------|------------|----------------|-------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------|
| No                               | Load                      | RPM          | Daya HP    | Daya kW        | Load Factor       | BBM (ml)              | Waktu (s)    | Fuel (ml/s)  | Fuel g/h     | Fuel Kg/h      |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 600,000      | 0,374      | 0,279          | 4,40%             | 100                   | 1207         | 0,083        | 256,504      | 0,257          |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 1200,000     | 2,990      | 2,229          | 35,17%            |                       | 731          | 0,137        | 423,529      | 0,424          |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 1500,000     | 5,839      | 4,354          | 68,70%            |                       | 570          | 0,175        | 543,158      | 0,543          |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 1700,000     | 8,500      | 6,338          | 100,00%           |                       | 461          | 0,217        | 671,584      | 0,672          |       |
|                                  |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| Pengukuran Emisi pada Kapal      |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | Daya kW      | CO2 X1 (%) | CO2 X2 (%)     | CO2 X3 (%)        | CO2 Mean (%)          | CH4 X1 (ppm) | CH4 X2 (ppm) | CH4 X3 (ppm) | CH4 Mean (ppm) |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 0,279        | 3,08       | 3,16           | 3,20              | 3,146                 | 17,34        | 19,87        | 21,43        | 19,547         |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 3,49       | 3,56           | 3,61              | 3,552                 | 17,91        | 20,23        | 22,18        | 20,107         |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 3,69       | 3,75           | 3,82              | 3,752                 | 18,47        | 20,89        | 22,64        | 20,667         |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 4,07       | 4,15           | 4,24              | 4,155                 | 19,12        | 21,54        | 22,93        | 21,197         |       |
|                                  |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| Validasi Hasil Data              |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | Mean CO2     | SD CO2     | CV CO2         | Mean CH4          | SD CH4                | CV CH4       | Z            | Galat r      | n CO2          | n CH4 |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 3,146        | 0,058      | 1,85%          | 19,547            | 2,064                 | 10,56%       | 1,960        |              |                |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 3,552        | 0,063      | 1,78%          | 20,107            | 2,138                 | 10,63%       | 1,960        |              |                |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 3,752        | 0,068      | 1,81%          | 20,667            | 2,094                 | 10,13%       | 1,960        |              |                |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 4,155        | 0,085      | 2,05%          | 21,197            | 1,928                 | 9,10%        | 1,960        |              |                |       |
|                                  |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| Konversi CO2 ke Exhaust Gas Flow |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | CO2 Mean (%) | Fuel kg/h  | Carbon Content | Density CO2 kg/m3 | Exhaust Gas Flow m3/h |              |              |              |                |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 3,146        | 0,257      | 0,861          | 1,977             | 13,187                |              |              |              |                |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 3,552        | 0,424      | 0,861          | 1,977             | 19,257                |              |              |              |                |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 3,752        | 0,543      | 0,861          | 1,977             | 23,366                |              |              |              |                |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 4,155        | 0,672      | 0,861          | 1,977             | 26,061                |              |              |              |                |       |

| Komponen CH4                 |                           |              |           |              |             |                       |                     |                |                 |              |              |
|------------------------------|---------------------------|--------------|-----------|--------------|-------------|-----------------------|---------------------|----------------|-----------------|--------------|--------------|
| No                           | Load                      | CH4 Mean ppm | MW CH4    | Molar Volume | CH4 g/m3    | Exhaust Gas Flow m3/h | CH4 g/h             |                |                 |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 19,547       | 16,040    | 24,450       | 0,013       | 13,187                | 0,169               |                |                 |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 20,107       | 16,040    | 24,450       | 0,013       | 19,257                | 0,254               |                |                 |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 20,667       | 16,040    | 24,450       | 0,014       | 23,366                | 0,317               |                |                 |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 21,197       | 16,040    | 24,450       | 0,014       | 26,061                | 0,362               |                |                 |              |              |
| Emission Factor CO2          |                           |              |           |              |             |                       |                     |                |                 |              |              |
| No                           | Load                      | Daya kW      | EGF m3/h  | CO2 %        | MW CO2      | Molar Volume          | SFOC (g/fuel/k.w/h) | EF CO2 g/k.w/h | EF CO2 g/g fuel |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 0,279        | 13,187    | 3,146        | 44,000      | 24,450                | 920,457             | 2679,184       | 2,9107          |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 19,257    | 3,552        | 44,000      | 24,450                | 189,978             | 552,158        | 2,9064          |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 23,366    | 3,752        | 44,000      | 24,450                | 124,743             | 362,337        | 2,9047          |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 26,061    | 4,155        | 44,000      | 24,450                | 105,954             | 307,440        | 2,9016          |              |              |
|                              |                           |              |           |              |             |                       |                     |                | 2,9059          |              |              |
| Emission Factor CH4          |                           |              |           |              |             |                       |                     |                |                 |              |              |
| No                           | Load                      | Daya kW      | EGF m3/h  | CH4 ppm      | MW CH4      | Molar Volume          | SFOC (g/fuel/k.w/h) | EF CH4 g/k.w/h | EF CH4 g/g fuel |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 0,279        | 13,187    | 19,547       | 16,040      | 24,450                | 920,457             | 0,607          | 0,000659        |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 19,257    | 20,107       | 16,040      | 24,450                | 189,978             | 0,114          | 0,000600        |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 23,366    | 20,667       | 16,040      | 24,450                | 124,743             | 0,073          | 0,000583        |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 26,061    | 21,197       | 16,040      | 24,450                | 105,954             | 0,057          | 0,000540        |              |              |
|                              |                           |              |           |              |             |                       |                     |                | 0,0005955       |              |              |
| Baseline BAU Tank-to-Wake    |                           |              |           |              |             |                       |                     |                |                 |              |              |
| Mode Operasi                 | Load                      | Jam/trip     | Trip/hari | Hari/bulan   | Bulan/tahun | Daya kW               | Load Factor         | EF CO2         | EF CH4          | CO2 kg/tahun | CH4 kg/tahun |
| Akselerasi / keluar dermaga  | Medium Load (25%-50%)     | 1,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 2,229                 | 0,352               | 552,158        | 0,114           | 2304,356     | 0,476        |
| Pelayaran / touring          | High Load (50%-75%)       | 4,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 4,354                 | 0,687               | 362,337        | 0,073           | 11813,770    | 2,372        |
| Deakselerasi / masuk dermaga | Low Load (<25%)           | 1,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 0,279                 | 0,044               | 2679,184       | 0,607           | 1397,650     | 0,317        |
| TOTAL Emisi                  |                           |              |           |              |             |                       |                     |                |                 | 15515,777    | 3,164        |

## Pengukuran emisi dari prototipe BBM 35

| Perhitungan Daya Mesin dari RPM  |                           |              |           |                |                   |                       |             |              |              |                |       |
|----------------------------------|---------------------------|--------------|-----------|----------------|-------------------|-----------------------|-------------|--------------|--------------|----------------|-------|
| No                               | Load                      | RPM          | Daya HP   | Daya kW        | Load Factor       | BBM (ml)              | Waktu (s)   | Fuel (ml/s)  | Fuel g/h     | Fuel Kg/h      |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 600,000      | 0,374     | 0,279          | 4,40%             | 100                   | 1208        | 0,083        | 257,856      | 0,258          |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 1200,000     | 2,990     | 2,229          | 35,17%            |                       | 754         | 0,133        | 413,117      | 0,413          |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 1500,000     | 5,839     | 4,354          | 68,70%            |                       | 598         | 0,167        | 520,886      | 0,521          |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 1700,000     | 8,500     | 6,338          | 100,00%           |                       | 434         | 0,230        | 717,719      | 0,718          |       |
|                                  |                           |              |           |                |                   |                       |             |              |              |                |       |
| Pengukuran Emisi pada Kapal      |                           |              |           |                |                   |                       |             |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | Daya kW      | CO2 X1(%) | CO2 X2 (%)     | CO2 X3 (%)        | CO2 Mean (%)          | CH4 X1(ppm) | CH4 X2 (ppm) | CH4 X3 (ppm) | CH4 Mean (ppm) |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 0,279        | 3,06      | 3,14           | 3,18              | 3,126                 | 16,34       | 18,87        | 20,43        | 19             |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 3,47      | 3,53           | 3,59              | 3,527                 | 16,91       | 19,23        | 21,18        | 19             |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 3,66      | 3,73           | 3,79              | 3,726                 | 17,47       | 19,89        | 21,64        | 20             |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 4,05      | 4,13           | 4,21              | 4,127                 | 18,12       | 20,54        | 21,93        | 20             |       |
|                                  |                           |              |           |                |                   |                       |             |              |              |                |       |
| Validasi Hasil Data              |                           |              |           |                |                   |                       |             |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | Mean CO2     | SD CO2    | CV CO2         | Mean CH4          | SD CH4                | CV CH4      | Z            | Galat r      | n CO2          | n CH4 |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 3,126        | 0,060     | 1,91%          | 18,547            | 2,064                 | 11,13%      | 1,960        | 0,100        | 1,000          | 5,000 |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 3,527        | 0,060     | 1,70%          | 19,107            | 2,138                 | 11,19%      | 1,960        | 0,100        | 1,000          | 5,000 |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 3,726        | 0,064     | 1,71%          | 19,667            | 2,094                 | 10,65%      | 1,960        | 0,100        | 1,000          | 5,000 |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 4,127        | 0,080     | 1,94%          | 20,197            | 1,928                 | 9,55%       | 1,960        | 0,100        | 1,000          | 4,000 |
|                                  |                           |              |           |                |                   |                       |             |              |              |                |       |
| Konversi CO2 ke Exhaust Gas Flow |                           |              |           |                |                   |                       |             |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | CO2 Mean (%) | Fuel kg/h | Carbon Content | Density CO2 kg/m3 | Exhaust Gas Flow m3/h |             |              |              |                |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 3,126        | 0,258     | 0,828          | 1,977             | 12,831                |             |              |              |                |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 3,527        | 0,413     | 0,828          | 1,977             | 18,193                |             |              |              |                |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 3,726        | 0,521     | 0,828          | 1,977             | 21,701                |             |              |              |                |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 4,127        | 0,718     | 0,828          | 1,977             | 26,968                |             |              |              |                |       |



| Komponen CH4                 |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
|------------------------------|---------------------------|--------------|-----------|--------------|-------------|-----------------------|------------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
| No                           | Load                      | CH4 Mean ppm | MW CH4    | Molar Volume | CH4 g/m3    | Exhaust Gas Flow m3/h | CH4 g/h          |              |                 |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 18,547       | 16,040    | 24,450       | 0,012       | 12,831                | 0,156            |              |                 |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 19,107       | 16,040    | 24,450       | 0,013       | 18,193                | 0,228            |              |                 |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 19,667       | 16,040    | 24,450       | 0,013       | 21,701                | 0,280            |              |                 |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 20,197       | 16,040    | 24,450       | 0,013       | 26,968                | 0,357            |              |                 |              |              |
|                              |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
| Emission Factor CO2          |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
| No                           | Load                      | Daya kW      | EGF m3/h  | CO2 %        | MW CO2      | Molar Volume          | SFOC (gfuel/kwh) | EF CO2 g/kwh | EF CO2 g/g fuel |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 0,279        | 12,831    | 3,126        | 44,000      | 24,450                | 925,310          | 2590,294     | 2,7994          |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 18,193    | 3,527        | 44,000      | 24,450                | 185,307          | 517,983      | 2,7953          |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 21,701    | 3,726        | 44,000      | 24,450                | 119,628          | 334,187      | 2,7935          |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 26,968    | 4,127        | 44,000      | 24,450                | 113,233          | 315,988      | 2,7906          |              |              |
|                              |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 | 2,7947       |              |
| Emission Factor CH4          |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
| No                           | Load                      | Daya kW      | EGF m3/h  | CH4 ppm      | MW CH4      | Molar Volume          | SFOC (gfuel/kwh) | EF CH4 g/kwh | EF CH4 g/g fuel |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 0,279        | 12,831    | 18,547       | 16,040      | 24,450                | 925,310          | 0,560        | 0,000605        |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 18,193    | 19,107       | 16,040      | 24,450                | 185,307          | 0,102        | 0,000552        |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 21,701    | 19,667       | 16,040      | 24,450                | 119,628          | 0,064        | 0,000538        |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 26,968    | 20,197       | 16,040      | 24,450                | 113,233          | 0,056        | 0,000498        |              |              |
|                              |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 | 0,0005482    |              |
| Baseline BAU Tank-to-Wake    |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
| Mode Operasi                 | Load                      | Jam/trip     | Trip/hari | Hari/bulan   | Bulan/tahun | Daya kW               | Load Factor      | EF CO2       | EF CH4          | CO2 kg/tahun | CH4 kg/tahun |
| Akselerasi / keluar dermaga  | Medium Load (25%-50%)     | 1,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 2,229                 | 0,352            | 517,983      | 0,102           | 2161,728     | 0,427        |
| Pelayaran / touring          | High Load (50%-75%)       | 4,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 4,354                 | 0,687            | 334,187      | 0,064           | 10895,952    | 2,097        |
| Deakselerasi / masuk dermaga | Low Load (<25%)           | 1,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 0,279                 | 0,044            | 2590,294     | 0,560           | 1351,279     | 0,292        |
| TOTAL Emisi                  |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 | 14408,959    | 2,816        |

## Pengukuran emisi dari prototipe BBM B40

| Perhitungan Daya Mesin dari RPM  |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
|----------------------------------|---------------------------|--------------|------------|----------------|-------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------|
| No                               | Load                      | RPM          | Daya HP    | Daya kW        | Load Factor       | BBM (ml)              | Waktu (s)    | Fuel (ml/s)  | Fuel g/h     | Fuel Kg/h      |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 600,000      | 0,374      | 0,279          | 4,40%             | 100                   | 1206         | 0,083        | 258,507      | 0,259          |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 1200,000     | 2,990      | 2,229          | 35,17%            |                       | 760          | 0,132        | 410,211      | 0,410          |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 1500,000     | 5,839      | 4,354          | 68,70%            |                       | 599          | 0,167        | 520,467      | 0,520          |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 1700,000     | 8,500      | 6,338          | 100,00%           |                       | 435          | 0,230        | 716,690      | 0,717          |       |
| Pengukuran Emisi pada Kapal      |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | Daya kW      | CO2 X1 (%) | CO2 X2 (%)     | CO2 X3 (%)        | CO2 Mean (%)          | CH4 X1 (ppm) | CH4 X2 (ppm) | CH4 X3 (ppm) | CH4 Mean (ppm) |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 0,279        | 3,05       | 3,11           | 3,16              | 3,105                 | 15,84        | 18,37        | 19,93        | 18,047         |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 3,44       | 3,52           | 3,55              | 3,504                 | 16,41        | 18,73        | 20,68        | 18,607         |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 3,65       | 3,70           | 3,76              | 3,704                 | 16,97        | 19,39        | 21,14        | 19,167         |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 4,02       | 4,11           | 4,18              | 4,104                 | 17,62        | 20,04        | 21,43        | 19,697         |       |
| Validasi Hasil Data              |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | Mean CO2     | SD CO2     | CV CO2         | Mean CH4          | SD CH4                | CV CH4       | Z            | Galat r      | n CO2          | n CH4 |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 3,105        | 0,054      | 1,75%          | 18,047            | 2,064                 | 11,44%       | 1,960        | 0,100        | 1,000          | 6,000 |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 3,504        | 0,056      | 1,59%          | 18,607            | 2,138                 | 11,49%       | 1,960        | 0,100        | 1,000          | 6,000 |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 3,704        | 0,058      | 1,55%          | 19,167            | 2,094                 | 10,92%       | 1,960        | 0,100        | 1,000          | 5,000 |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 4,104        | 0,080      | 1,94%          | 19,697            | 1,928                 | 9,79%        | 1,960        | 0,100        | 1,000          | 4,000 |
| Konversi CO2 ke Exhaust Gas Flow |                           |              |            |                |                   |                       |              |              |              |                |       |
| No                               | Load                      | CO2 Mean (%) | Fuel kg/h  | Carbon Content | Density CO2 kg/m3 | Exhaust Gas Flow m3/h |              |              |              |                |       |
| 1                                | Low Load (<25%)           | 3,105        | 0,259      | 0,823          | 1,977             | 12,874                |              |              |              |                |       |
| 2                                | Medium Load (25%-50%)     | 3,504        | 0,410      | 0,823          | 1,977             | 18,076                |              |              |              |                |       |
| 3                                | High Load (50%-75%)       | 3,704        | 0,520      | 0,823          | 1,977             | 21,682                |              |              |              |                |       |
| 4                                | Full Near Load (75%-100%) | 4,104        | 0,717      | 0,823          | 1,977             | 26,918                |              |              |              |                |       |

| Komponen CH4                 |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
|------------------------------|---------------------------|--------------|-----------|--------------|-------------|-----------------------|------------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
| No                           | Load                      | CH4 Mean ppm | MW CH4    | Molar Volume | CH4 g/m3    | Exhaust Gas Flow m3/h | CH4 g/h          |              |                 |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 18,047       | 16,040    | 24,450       | 0,012       | 12,874                | 0,152            |              |                 |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 18,607       | 16,040    | 24,450       | 0,012       | 18,076                | 0,221            |              |                 |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 19,167       | 16,040    | 24,450       | 0,013       | 21,682                | 0,273            |              |                 |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 19,697       | 16,040    | 24,450       | 0,013       | 26,918                | 0,348            |              |                 |              |              |
|                              |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
| Emission Factor CO2          |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
| No                           | Load                      | Daya kW      | EGF m3/h  | CO2 %        | MW CO2      | Molar Volume          | SFOC (gfuel/kwh) | EF CO2 g/kwh | EF CO2 g/g fuel |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 0,279        | 12,874    | 3,105        | 44,000      | 24,450                | 927,648          | 2581,384     | 2,7827          |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 18,076    | 3,504        | 44,000      | 24,450                | 184,004          | 511,271      | 2,7786          |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 21,682    | 3,704        | 44,000      | 24,450                | 119,532          | 331,923      | 2,7769          |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 26,918    | 4,104        | 44,000      | 24,450                | 113,070          | 313,646      | 2,7739          |              |              |
|                              |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 | 2,7780       |              |
| Emission Factor CH4          |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
| No                           | Load                      | Daya kW      | EGF m3/h  | CH4 ppm      | MW CH4      | Molar Volume          | SFOC (gfuel/kwh) | EF CH4 g/kwh | EF CH4 g/g fuel |              |              |
| 1                            | Low Load (<25%)           | 0,279        | 12,874    | 18,047       | 16,040      | 24,450                | 927,648          | 0,547        | 0,000590        |              |              |
| 2                            | Medium Load (25%-50%)     | 2,229        | 18,076    | 18,607       | 16,040      | 24,450                | 184,004          | 0,099        | 0,000538        |              |              |
| 3                            | High Load (50%-75%)       | 4,354        | 21,682    | 19,167       | 16,040      | 24,450                | 119,532          | 0,063        | 0,000524        |              |              |
| 4                            | Full Near Load (75%-100%) | 6,338        | 26,918    | 19,697       | 16,040      | 24,450                | 113,070          | 0,055        | 0,000485        |              |              |
|                              |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 | 0,0005342    |              |
| Baseline BAU Tank-to-Wake    |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 |              |              |
| Mode Operasi                 | Load                      | Jam/trip     | Trip/hari | Hari/bulan   | Bulan/tahun | Daya kW               | Load Factor      | EF CO2       | EF CH4          | CO2 kg/tahun | CH4 kg/tahun |
| Akselerasi / keluar dermaga  | Medium Load (25%-50%)     | 1,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 2,229                 | 0,352            | 511,271      | 0,099           | 2133,719     | 0,413        |
| Pelayaran / touring          | High Load (50%-75%)       | 4,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 4,354                 | 0,687            | 331,923      | 0,063           | 10822,145    | 2,041        |
| Deakselerasi / masuk dermaga | Low Load (<25%)           | 1,000        | 6,000     | 26,000       | 12,000      | 0,279                 | 0,044            | 2581,384     | 0,547           | 1346,631     | 0,285        |
| TOTAL Emisi                  |                           |              |           |              |             |                       |                  |              |                 | 14302,494    | 2,740        |

## Life Cycle Assesmet

| Simulasi LCA TtW B0, B35, B40 |                  |                  |                   |                   |            |             |               |                |
|-------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------|-------------|---------------|----------------|
| BBM                           | Faktor CO2 GWP20 | Faktor CH4 GWP20 | Faktor CO2 GWP100 | Faktor CH4 GW 100 | CO2e GWP20 | CO2e GWP100 | Reduksi GWP20 | Reduksi GWP100 |
| B0                            | 1                | 81,200           | 1                 | 27,900            | 68,897     | 68,343      | 0,00%         | 0,00%          |
| B35                           | 1                | 81,200           | 1                 | 27,900            | 66,286     | 65,737      | 3,79%         | 3,81%          |
| B40                           | 1                | 81,200           | 1                 | 27,900            | 65,894     | 65,346      | 4,36%         | 4,39%          |

## Data Kuisoner AHP dan TOPSIS

| Responden 1 Pak Taufik |    |    |    |  |
|------------------------|----|----|----|--|
| Alternatif             | C3 | C4 | C5 |  |
| B0                     | 4  | 5  | 5  |  |
| B35                    | 4  | 4  | 4  |  |
| B40                    | 4  | 4  | 4  |  |

| Responden 1 Pak Taufik |          |          |                 |              |                |
|------------------------|----------|----------|-----------------|--------------|----------------|
| Kriteria               | C1 Emisi | C2 Biaya | C3 Ketersediaan | C4 Perawatan | C5 Keselamatan |
| C1 Emisi               | 1        | 1        | 1               | 1/3          | 1/5            |
| C2 Biaya               | 1        | 1        | 1/3             | 1            | 1/3            |
| C3 Ketersediaan        | 1        | 3        | 1               | 3            | 1/3            |
| C4 Perawatan           | 3        | 1        | 1/3             | 1            | 1/3            |
| C5 Keselamatan         | 5        | 3        | 3               | 3            | 1              |
| Jumlah                 | 11,00    | 3,00     | 5,67            | 8,33         | 2,20           |

| Normalisasi Matriks AHP |       |       |       |       |       |           |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Kriteria                | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | Bobot AHP |
| C1                      | 0,091 | 0,111 | 0,176 | 0,040 | 0,091 | 0,102     |
| C2                      | 0,091 | 0,111 | 0,059 | 0,120 | 0,152 | 0,106     |
| C3                      | 0,091 | 0,333 | 0,176 | 0,360 | 0,152 | 0,222     |
| C4                      | 0,273 | 0,111 | 0,059 | 0,120 | 0,152 | 0,143     |
| C5                      | 0,455 | 0,333 | 0,529 | 0,360 | 0,455 | 0,426     |
| Jumlah                  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00      |
| Bobot AHP               | 0,102 | 0,106 | 0,222 | 0,143 | 0,426 |           |

| Weighted Sum | Consistency Vector | Konsistensi | Nilai     |
|--------------|--------------------|-------------|-----------|
| 0,564        | 5,533              | lambda max  | 5,447     |
| 0,567        | 5,330              | CI          | 0,112     |
| 1,214        | 5,459              | RI          | 1,120     |
| 0,771        | 5,399              | CR          | 0,0998    |
| 2,351        | 5,514              | Status      | Konsisten |

| Responden 1 Pak Syamsu Operator Kapal |    |    |    |  |
|---------------------------------------|----|----|----|--|
| Alternatif                            | C3 | C4 | C5 |  |
| B0                                    | 4  | 5  | 5  |  |
| B35                                   | 3  | 4  | 4  |  |
| B40                                   | 5  | 5  | 5  |  |

| Responden 1 Pak Syamsu Operator Kapal |          |          |                 |              |                |
|---------------------------------------|----------|----------|-----------------|--------------|----------------|
| Kriteria                              | C1 Emisi | C2 Biaya | C3 Ketersediaan | C4 Perawatan | C5 Keselamatan |
| C1 Emisi                              | 1        | 1/3      | 1/3             | 1/5          | 1/3            |
| C2 Biaya                              | 3        | 1        | 1/3             | 3            | 5              |
| C3                                    | 3        | 3        | 1               | 3            | 7              |
| C4 Perawatan                          | 5        | 1/3      | 1/3             | 1            | 3              |
| C5 Keselamatan                        | 3        | 1/5      | 1/7             | 1/3          | 1              |
| Jumlah                                | 27,00    | 4,44     | 1,32            | 7,53         | 16,33          |

| Normalisasi Matriks AHP |       |       |       |       |       |           |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Kriteria                | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | Bobot AHP |
| C1                      | 0,037 | 0,024 | 0,058 | 0,027 | 0,020 | 0,033     |
| C2                      | 0,333 | 0,215 | 0,174 | 0,398 | 0,306 | 0,285     |
| C3                      | 0,333 | 0,646 | 0,521 | 0,398 | 0,423 | 0,465     |
| C4                      | 0,185 | 0,072 | 0,174 | 0,133 | 0,184 | 0,149     |
| C5                      | 0,111 | 0,043 | 0,074 | 0,044 | 0,061 | 0,067     |
| Jumlah                  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00      |
| Bobot AHP               | 0,033 | 0,285 | 0,465 | 0,149 | 0,067 |           |

| Weighted Sum | Consistency Vector | Konsistensi | Nilai     |
|--------------|--------------------|-------------|-----------|
| 0,163        | 5,083              | lambda max  | 5,216     |
| 1,521        | 5,331              | CI          | 0,054     |
| 2,535        | 5,449              | RI          | 1,120     |
| 0,766        | 5,126              | CR          | 0,048     |
| 0,340        | 5,083              | Status      | Konsisten |

## Data Analisis CR Per Responden

| Normalisasi Matriks AHP |       |       |       |       |       |           |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Kriteria                | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | Bobot AHP |
| C1                      | 0,091 | 0,111 | 0,176 | 0,040 | 0,091 | 0,102     |
| C2                      | 0,091 | 0,111 | 0,059 | 0,120 | 0,152 | 0,106     |
| C3                      | 0,091 | 0,333 | 0,176 | 0,360 | 0,152 | 0,222     |
| C4                      | 0,273 | 0,111 | 0,059 | 0,120 | 0,152 | 0,143     |
| C5                      | 0,455 | 0,333 | 0,529 | 0,360 | 0,455 | 0,426     |
| Jumlah                  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00      |
| Bobot AHP               | 0,102 | 0,106 | 0,222 | 0,143 | 0,426 |           |

| Weighted Sum | Consistency Vector | Konsistensi | Nilai     |
|--------------|--------------------|-------------|-----------|
| 0,564        | 5,533              | lambda max  | 5,447     |
| 0,567        | 5,330              | CI          | 0,112     |
| 1,214        | 5,459              | RI          | 1,120     |
| 0,771        | 5,399              | CR          | 0,0998    |
| 2,351        | 5,514              | Status      | Konsisten |

| Normalisasi Matriks AHP |       |       |       |       |       |           |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Kriteria                | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | Bobot AHP |
| C1                      | 0,067 | 0,077 | 0,051 | 0,143 | 0,053 | 0,078     |
| C2                      | 0,200 | 0,231 | 0,356 | 0,143 | 0,158 | 0,217     |
| C3                      | 0,467 | 0,231 | 0,356 | 0,429 | 0,474 | 0,391     |
| C4                      | 0,067 | 0,231 | 0,119 | 0,143 | 0,158 | 0,143     |
| C5                      | 0,200 | 0,231 | 0,119 | 0,143 | 0,158 | 0,170     |
| Jumlah                  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00      |
| Bobot AHP               | 0,078 | 0,217 | 0,391 | 0,143 | 0,170 |           |

| Weighted Sum | Consistency Vector | Konsistensi | Nilai     |
|--------------|--------------------|-------------|-----------|
| 0,406        | 5,211              | lambda max  | 5,261     |
| 1,156        | 5,315              | CI          | 0,085     |
| 2,095        | 5,356              | RI          | 1,120     |
| 0,739        | 5,156              | CR          | 0,058     |
| 0,895        | 5,265              | Status      | Konsisten |

| Normalisasi Matriks AHP |       |       |       |       |       |           |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Kriteria                | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | Bobot AHP |
| C1                      | 0,037 | 0,024 | 0,058 | 0,027 | 0,020 | 0,033     |
| C2                      | 0,333 | 0,215 | 0,174 | 0,398 | 0,306 | 0,285     |
| C3                      | 0,333 | 0,646 | 0,521 | 0,398 | 0,429 | 0,465     |
| C4                      | 0,185 | 0,072 | 0,174 | 0,133 | 0,184 | 0,149     |
| C5                      | 0,111 | 0,043 | 0,074 | 0,044 | 0,061 | 0,067     |
| Jumlah                  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00      |
| Bobot AHP               | 0,033 | 0,285 | 0,465 | 0,149 | 0,067 |           |

| Weighted Sum | Consistency Vector | Konsistensi | Nilai     |
|--------------|--------------------|-------------|-----------|
| 0,169        | 5,089              | lambda max  | 5,216     |
| 1,521        | 5,331              | CI          | 0,054     |
| 2,535        | 5,449              | RI          | 1,120     |
| 0,766        | 5,126              | CR          | 0,048     |
| 0,340        | 5,083              | Status      | Konsisten |

## Perhitungan Geomean AHP

| Perhitungan AHP         |          |          |                 |              |                |           |  |             |           |              |                    |
|-------------------------|----------|----------|-----------------|--------------|----------------|-----------|--|-------------|-----------|--------------|--------------------|
| Pairwise                | C1 Emisi | C2 Biaya | C3 Ketersediaan | C4 Perawatan | C5 Keselamatan | Bobot     |  | Konsistensi | Nilai     | Weighted Sum | Consistency Vector |
| C1 Emisi                | 1,000    | 0,333    | 0,333           | 0,258        | 0,258          | 0,068     |  | lambda max  | 5,251     | 0,351        | 5,170              |
| C2 Biaya                | 3,000    | 1,000    | 0,333           | 1,732        | 1,291          | 0,201     |  | CI          | 0,063     | 1,070        | 5,312              |
| C3 Ketersediaan         | 3,000    | 3,000    | 1,000           | 3,000        | 1,528          | 0,368     |  | RI          | 1,120     | 1,975        | 5,372              |
| C4 Perawatan            | 3,873    | 0,577    | 0,333           | 1,000        | 1,000          | 0,166     |  | CR          | 0,056     | 0,865        | 5,213              |
| C5 Keselamatan          | 3,873    | 0,775    | 0,655           | 1,000        | 1,000          | 0,197     |  | Status      | Konsisten | 1,023        | 5,190              |
| Jumlah kolom            | 14,746   | 5,685    | 2,655           | 6,990        | 5,077          |           |  |             |           |              |                    |
| Normalisasi Matriks AHP |          |          |                 |              |                |           |  |             |           |              |                    |
| Kriteria                | C1       | C2       | C3              | C4           | C5             | Bobot AHP |  |             |           |              |                    |
| C1                      | 0,068    | 0,053    | 0,126           | 0,037        | 0,051          | 0,068     |  |             |           |              |                    |
| C2                      | 0,203    | 0,176    | 0,126           | 0,248        | 0,254          | 0,201     |  |             |           |              |                    |
| C3                      | 0,203    | 0,528    | 0,377           | 0,429        | 0,301          | 0,368     |  |             |           |              |                    |
| C4                      | 0,263    | 0,102    | 0,126           | 0,143        | 0,197          | 0,166     |  |             |           |              |                    |
| C5                      | 0,263    | 0,136    | 0,247           | 0,143        | 0,197          | 0,197     |  |             |           |              |                    |
|                         | 1,000    | 1,000    | 1,000           | 1,000        | 1,000          | 1,000     |  |             |           |              |                    |

## Kalkulasi Topsis

| Matriks Keputusan TOPSIS |                               |            |              |           |             |
|--------------------------|-------------------------------|------------|--------------|-----------|-------------|
| Alternatif               | Emisi CO2e<br>GWP20 ton/tahun | Biaya Rp/L | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
| B0                       | 68,897                        | 27.900     | 4,33         | 5,00      | 5,00        |
| B35                      | 66,286                        | 6.800      | 3,33         | 3,33      | 3,67        |
| B40                      | 65,894                        | 6.800      | 4,33         | 4,00      | 3,67        |

| Perhitungan TOPSIS  |         |           |              |           |             |
|---------------------|---------|-----------|--------------|-----------|-------------|
| Alternatif          | Emisi   | Biaya     | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
| B0                  | 68,897  | 27900,000 | 4,000        | 5,000     | 5,000       |
| B35                 | 66,286  | 6800,000  | 3,500        | 4,000     | 4,000       |
| B40                 | 65,894  | 6800,000  | 4,500        | 4,500     | 4,500       |
| Pembagi normalisasi | 116,115 | 29510,845 | 6,364        | 7,826     | 7,826       |

| Matriks Normalisasi TOPSIS |       |       |              |           |             |
|----------------------------|-------|-------|--------------|-----------|-------------|
| Alternatif                 | Emisi | Biaya | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
| B0                         | 0,593 | 0,345 | 0,574        | 0,639     | 0,639       |
| B35                        | 0,571 | 0,230 | 0,503        | 0,511     | 0,511       |
| B40                        | 0,567 | 0,230 | 0,646        | 0,575     | 0,575       |

| Matriks Ternormalisasi Terbobot |       |       |              |           |             |
|---------------------------------|-------|-------|--------------|-----------|-------------|
| Alternatif                      | Emisi | Biaya | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
| B0                              | 0,040 | 0,190 | 0,211        | 0,106     | 0,126       |
| B35                             | 0,039 | 0,046 | 0,185        | 0,085     | 0,101       |
| B40                             | 0,039 | 0,046 | 0,238        | 0,095     | 0,113       |

| Solusi Ideal TOPSIS |       |       |              |           |             |
|---------------------|-------|-------|--------------|-----------|-------------|
| Solusi              | Emisi | Biaya | Ketersediaan | Perawatan | Keselamatan |
| A+ Ideal Positif    | 0,039 | 0,046 | 0,238        | 0,106     | 0,126       |
| A- Ideal Negatif    | 0,040 | 0,190 | 0,185        | 0,085     | 0,101       |

| Hasil Ranking TOPSIS |       |       |       |         |
|----------------------|-------|-------|-------|---------|
| Alternatif           | D+    | D-    | Ci    | Ranking |
| B0                   | 0,146 | 0,042 | 0,224 | 3       |
| B35                  | 0,062 | 0,144 | 0,698 | 2       |
| B40                  | 0,016 | 0,154 | 0,304 | 1       |

| Ringkasan Hasil    |           |
|--------------------|-----------|
| Parameter          | Nilai     |
| Alternatif terbaik | B40       |
| Nilai Ci tertinggi | 0,304     |
| CR AHP             | 0,056     |
| Status konsistensi | Konsisten |

Halaman ini sengaja dikosongkan



## BIODATA PENULIS



Rezza Ramadhan Tamam, lahir di Banyuwangi, Kabupaten Banyuwangi, pada tanggal 17 Nopember 2003.. Menempuh pendidikan sekolah dasar formal di SDN Model Banyuwangi, melanjutkan di SMPN 1 Giri, dan melanjutkan ke tingkat menengah akhir di SMAN 1 Glagah Banyuwangi. Penulis mulai diterima di Departemen Teknik Sistem Perkapalan (Marine Engineering), Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2022. Selama berkuliah menjadi mahasiswa sarjana Departemen Teknik Sistem Perkapalan, penulis memiliki cukup banyak pengalaman. Penulis berkesempatan menjadi bagian dari organisasi Banyubramata ITS

Team di bagian *Head of Mechanical* untuk divisi *Autonomous Underwater Vehicle (AUV)* dan *Remotely Operated Vehicle (ROV)*, serta berkesempatan untuk menjadi bagian dari Laboratorium *Reliability, Availability, Maintainability, and Safety (RAMS)* sebagai *Head of Training*. Penulis juga mendapatkan kesempatan untuk mengikuti berbagai lomba dan kompetisi keilmiahan serta desain kelautan, dan mendapatkan penghargaan. Penghargaan terbesar yang didapatkan yaitu meraih Juara 1 pada Kontes Robot Indonesia (KRI) Divisi Robot Bawah Air dari Kementerian Pendidikan Tinggi (KEMENDIKTI) pada tahun 2024, serta menjadi Finalis pada Singapore Autonomous Underwater Vehicle Competition (SAUVC) tahun 2025. Penulis juga cukup aktif menerbitkan publikasi ilmiah, di antaranya publikasi berjudul *Conceptual Design of Mini FSRU Utilizing An Intermediate Fluid Vaporizer as The Regasification System in The Kolaka Sea* pada ajang Indonesian Petroleum Association (IPA) tahun 2025. Selain itu, penulis juga berkesempatan untuk melaksanakan Kerja Praktik di PT Adiluhung Saranasegara Indonesia dan PT Nusantara Regas.