

**ANALISIS HASIL PURIFIKASI BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI KARBON  
MENGUNAKAN METODE FUZZY SUGENO**

**Tesis S-2**

**untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik  
Program Studi Magister Teknik Elektro**



**Diajukan oleh:  
Ariska Hendra Jaya  
20602000023**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG  
2025**

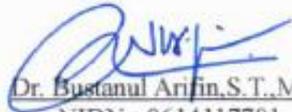
LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS HASIL PURIFIKASI BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI KARBON  
MENGUNAKAN METODE FUZZY SUGENO

Yang dipersiapkan dan disusun oleh  
Ariska Hendra Jaya  
20602000023

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
Pada tanggal 7 Maret 2025

Susunan Dewan Penguji  
Pembimbing

  
Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T.  
NIDN : 0614117701

Penguji Utama

Penguji Kedua

  
Dr. Eka Nuryanto Budisusila, S.T., M.T.  
NIDN : 0619107301

  
Ir. Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D.  
NIDN : 0628097501

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh gelar Magister Teknik  
Tanggal 7 Maret 2025

Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

  
  
Dr. H. Sri Amtini Dwi Prasetyowati, M.Si.  
NIDN : 0620026501

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ariska Hendra Jaya  
NIM : 20602000023  
Jurusan : Magister Teknik Elektro  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“ANALISIS HASIL PURIFIKASI BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI KARBON MENGGUNAKAN METODE FUZZY SUGENO”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 7 Maret 2025

Yang Menyatakan



Ariska Hendra Jaya

## **PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ariska Hendra Jaya  
NIM : 20602000023  
Program Studi : Magister Teknik Elektro  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir/Tesis dengan judul :

### **ANALISIS HASIL PURIFIKASI BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI KARBON MENGGUNAKAN METODE FUZZY SUGENO**

dan menyetujuinya menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dalam pangkalan data, dan dipublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 7 Maret 2025

Yang menyatakan,



Ariska Hendra Jaya

## KATA PENGANTAR

*Assalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah dan masih memberikan anugerah Iman dan Islam sehingga masih berkesempatan untuk menuntut ilmu dalam keadaan sehat wal'afiat di kampus yang penuh berkah ini. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada junjungan Rasulullah SAW yang selalu kita harapkan syafa'at dan pertolongannya di hari akhirat.

Penyusunan Tugas Akhir ini adalah merupakan salah satu syarat kelulusan pada Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam Penulisan Tugas Akhir ini, banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik moril maupun materiil. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan mensyukuri dengan doa Alhamdulillahijazakummullohukhoiran yang tiada hingganya kepada:

1. Dr. Ir. Novi Marlyna, S.T.,M.T., ASEAN Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Prof. Dr. Hj. Sri Arttini Dwi Prasetyowati, M.Si selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Dr. Bustanul Arifin, S.T.,M.T. selaku dosen pembimbing yang telah mengantarkan penulis sampai ke depan gerbang kelulusan.
4. Dr. Eka Nuryanto Budisusila, S.T.,M.T. selaku ketua dewan penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan pada tahap penyelesaian tugas akhir.
5. Ir. Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan pada tahap penyelesaian tugas akhir
6. Seluruh Dosen tetap dan tidak tetap Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
7. Staff Administrasi MTE periode 2021-2025 yang selalu sabar dan tulus memberikan pelayanan kepada para mahasiswa.
8. Kedua Orang Tua yang telah mencurahkan kehidupan dan penghidupannya untuk penulis, juga semua anggota keluarga besar tercinta
9. Dellia Nurariya Fara Dian istri saya dan anak-anak saya Ghaisan Alrafaeyza Jaya, Elmeera Naura Zunaira Jaya, Elmeira Noura Zunaira Jaya yang menjadi sumber motivasi dan selalu

mendukung dalam perjuangan kuliah saya dan menemani saya sampai akhir wisuda serta selalu mengawal dengan do'a.

10. Saudara kandung dan saudara ipar yang membantu dan ikut mendoakan dalam perjalanan Tugas Akhir saya.
11. Rekan-rekan mahasiswa Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri Universitas Islam Sultan Agung seperjuangan.
12. Rekan-rekan kerja di Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang yang selalu memberikan semangat

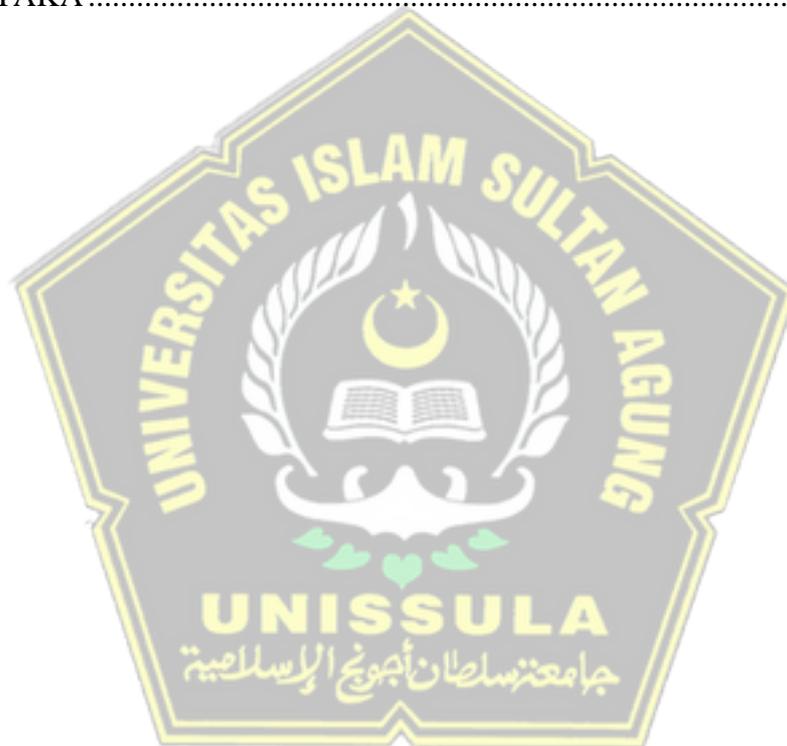
Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, baik dari segi materi maupun penyajiannya, untuk itu saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
ABSTRAK.....	ix
BAB I.....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Keaslian Penelitian.....	4
1.5 Tujuan Penelitian .....	4
1.6 Manfaat Penelitian .....	5
BAB II.....	6
TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1. Penelitian Terdahulu .....	6
2.2. Bahan Bakar Kapal .....	10
2.3. Regulasi Emisi karbonKapal.....	12
2.2.1 Regulasi 14 MARPOL Annex VI (SO <sub>x</sub> dan Partikulat).....	14
2.2.2 Regulasi 13 MARPOL Annex VI (NO <sub>x</sub> ).....	14
2.2.3 Regulasi Emission Control Areas (ECAs).....	15
2.2.4 Regulasi 18 MARPOL Annex VI (Kualitas Bahan Bakar) .....	15
2.2.5 Regulasi 19 MARPOL Annex VI (Efisiensi Energi).....	15
2.4. Dampak Emisi karbon terhadap Lingkungan dan Kesehatan.....	16
2.5. Spesifikasi bahan bakar.....	18
2.6. Metode Fuzzy Sugeno.....	19
2.4.1. Fungsi Keanggotaan.....	21
2.4.2. Fungsi Inferensi Fuzzy.....	26
2.4.3. Defuzzifikasi .....	26
BAB III .....	29

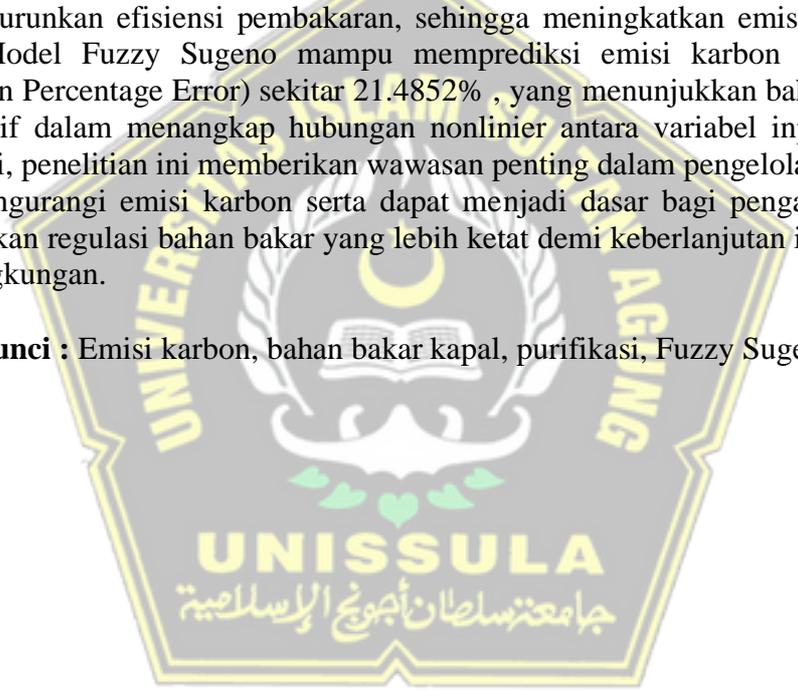
METHODOLOGI PENELITIAN.....	29
3.1. Derajat Keanggotaan Input .....	32
3.2. Inferenzi Fuzzy .....	40
a. Fungsi Keanggotaan Fuzzy.....	40
b. Basis Aturan Fuzzy (Fuzzy Rule Base).....	41
c. Aktivasi Aturan (Firing Strength).....	41
d. Output Sugeno pada Tiap Aturan .....	41
3.3. Defuzzifikasi.....	41
BAB IV .....	44
BAB V .....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	76



## ABSTRAK

Transportasi maritim memiliki peran penting dalam perdagangan global, tetapi penggunaan bahan bakar kapal masih menjadi tantangan utama terkait emisi karbon. Salah satu solusi yang digunakan untuk mengurangi dampak emisi adalah sistem purifikasi bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hasil purifikasi bahan bakar terhadap emisi karbon menggunakan metode Fuzzy Sugeno. Variabel yang diteliti meliputi kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan kandungan air, yang secara signifikan mempengaruhi tingkat emisi karbon. Metode yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan pemodelan dengan logika fuzzy di MATLAB, dengan input variabel kualitas bahan bakar dan output berupa prediksi emisi karbon. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kandungan sulfur yang tinggi berkontribusi terhadap peningkatan sulfur oksida (SO<sub>x</sub>), sedangkan viskositas dan kandungan air yang berlebihan menurunkan efisiensi pembakaran, sehingga meningkatkan emisi karbon secara keseluruhan. Model Fuzzy Sugeno mampu memprediksi emisi karbon dengan tingkat kesalahan (Mean Percentage Error) sekitar 21.4852% , yang menunjukkan bahwa pendekatan ini cukup efektif dalam menangkap hubungan nonlinier antara variabel input dan output. Dengan hasil ini, penelitian ini memberikan wawasan penting dalam pengelolaan bahan bakar kapal guna mengurangi emisi karbon serta dapat menjadi dasar bagi pengambil kebijakan dalam menerapkan regulasi bahan bakar yang lebih ketat demi keberlanjutan industri maritim yang ramah lingkungan.

**Kata Kunci :** Emisi karbon, bahan bakar kapal, purifikasi, Fuzzy Sugeno



## ABSTRACT

Maritime transportation plays a crucial role in global trade; however, the use of ship fuel remains a significant contributor to carbon emissions. Fuel purification systems are explored as a potential solution to mitigate these emissions. This research investigates the impact of fuel purification on carbon emissions utilizing the Fuzzy Sugeno method. The study examines the influence of key variables, namely sulfur content, fuel viscosity, and water content, which are known to significantly affect carbon emission levels. The methodology employs fuzzy logic modeling in MATLAB, where fuel quality variables serve as inputs and carbon emission predictions are generated as outputs. The test results demonstrate that high sulfur content contributes to increased sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), while excessive viscosity and water content decrease combustion efficiency, thereby increasing overall carbon emissions. The Fuzzy Sugeno model is able to predict carbon emissions with an error rate (Mean Percentage Error) of about 21.4852%, which indicates that this approach is quite effective in capturing the nonlinear relationship between input and output variables. These findings provide valuable insights into ship fuel management strategies aimed at reducing carbon emissions and can serve as a basis for policymakers to implement more stringent fuel regulations, promoting the sustainability of an environmentally friendly maritime industry

**Keywords:** Carbon emission, Ship Fuel, Purification, Fuzzy Sugeno



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Transportasi maritim memegang peranan krusial dalam perekonomian global, di mana kapal-kapal dagang bertanggung jawab atas sekitar 90% pergerakan barang internasional. Kapal merupakan salah satu alat transportasi laut yang paling banyak digunakan dalam perdagangan dan industri kelautan, berperan penting dalam menghubungkan wilayah yang [1].

Kualitas bahan bakar yang buruk dapat menghasilkan emisi gas beracun dan partikel-partikel berbahaya, seperti sulfur dioksida, nitrogen oksida, dan partikel halus, yang berdampak negatif pada kesehatan manusia, lingkungan, dan mesin kapal. Salah satu masalah utama dalam penggunaan bahan bakar kapal adalah tingginya kandungan sulfur. Sulfur dioksida yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar bersulfur tinggi berkontribusi terhadap polusi udara, hujan asam, serta meningkatkan risiko penyakit pernapasan. Untuk mengatasi hal ini, regulasi MARPOL Annex VI telah diterapkan secara global, membatasi kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal hingga 0,5% [2], [3], [4], [5], [6].

Selain kandungan sulfur, viskositas bahan bakar juga memainkan peran penting dalam proses pembakaran. Viskositas yang tepat memastikan atomisasi bahan bakar yang efektif dalam ruang bakar, sehingga mengoptimalkan pembakaran dan mengurangi pembentukan partikel halus serta emisi karbon. Jika viskositas terlalu tinggi, pembakaran menjadi tidak efisien dan konsumsi bahan bakar meningkat. Sebaliknya, viskositas yang terlalu rendah dapat merusak pompa bahan bakar dan injector [7], [8].

Konten air dalam bahan bakar, meskipun sering kali merupakan kontaminan yang tidak diinginkan, juga mempengaruhi kinerja pembakaran. Air dapat menyebabkan separasi fasa dalam bahan bakar, yang berujung pada korosi, pembentukan lumpur, dan penurunan nilai kalor bahan bakar, yang akhirnya berdampak pada efisiensi operasional kapal dan emisi karbon.

Salah satu solusi yang digunakan untuk mengurangi kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal adalah sistem purifikasi bahan bakar. Sistem ini berfungsi untuk membersihkan bahan bakar dari sulfur dan partikel berbahaya lainnya sebelum

digunakan pada mesin kapal. Dengan menggunakan sistem purifikasi bahan bakar, emisi gas berbahaya dari kapal dapat berkurang, sehingga kualitas udara di sekitar pelabuhan menjadi lebih baik. Viskositas bahan bakar juga memainkan peran penting dalam proses pembakaran. Bahan bakar dengan viskositas yang tepat memastikan atomisasi yang efektif dalam ruang bakar, mengoptimalkan pembakaran dan mengurangi pembentukan partikel halus dan emisi karbon. Viskositas yang terlalu tinggi dapat mengurangi efisiensi pembakaran dan meningkatkan konsumsi bahan bakar, sedangkan viskositas yang terlalu rendah dapat menyebabkan kerusakan pada pompa bahan bakar dan injektor. Konten air dalam bahan bakar, meskipun sering kali merupakan kontaminan yang tidak diinginkan, dapat mempengaruhi kinerja pembakaran. Air dapat menyebabkan separasi fasa dalam bahan bakar, mengakibatkan masalah seperti korosi, pembentukan lumpur, dan penurunan nilai kalor bahan bakar yang akhirnya mempengaruhi emisi karbon dan efisiensi operasional kapal.

Mengingat hubungan antara variabel-variabel ini dan emisi karbon, penelitian ini bertujuan untuk menggunakan metode Fuzzy Sugeno untuk menganalisis dan memprediksi dampak variabel-variabel input tersebut terhadap emisi karbon. Fuzzy Sugeno dipilih karena kemampuannya dalam menghandle ketidakpastian dan model nonlinear yang sering terjadi dalam data operasional kapal. Pendekatan ini memungkinkan untuk pembuatan keputusan yang lebih tepat dalam optimisasi bahan bakar dan strategi operasional kapal yang berkelanjutan.

Melalui analisis ini, Metode ini merupakan salah satu metode dalam teori logika fuzzy yang dapat digunakan untuk menentukan nilai variabel yang tidak pasti. Metode ini memiliki kelebihan dalam mengatasi permasalahan yang kompleks dan tidak dapat ditangani oleh metode matematika konvensional. Metode fuzzy Sugeno menggunakan aturan-aturan logika fuzzy untuk mengolah data dan memberikan hasil yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan [9], [10]. Metode fuzzy Sugeno telah banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk dalam analisis efisiensi sistem. Metode ini telah diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti analisis keandalan sistem, analisis keamanan sistem, dan analisis efisiensi mesin. Dalam bidang industri kelautan, metode fuzzy Sugeno dapat digunakan untuk menganalisis efektivitas dari sistem purifikasi bahan bakar pada kapal. Metode fuzzy Sugeno dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan yang kompleks dalam analisis efektivitas sistem purifikasi bahan bakar pada kapal [11], [12], [13].

## 1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini bertujuan untuk menjawab beberapa pertanyaan yang berkaitan dengan analisis bahan bakar kapal dan dampaknya terhadap emisi karbon:

1. Bagaimana kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air mempengaruhi emisi karbon yang dihasilkan oleh kapal?
2. Seberapa akurat metode Fuzzy Sugeno dalam memprediksi emisi karbon berdasarkan variabel kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air dalam bahan bakar kapal?
3. Bagaimana sensitivitas sistem fuzzy dalam menangani variasi kecil pada variabel input dibandingkan dengan model prediksi lainnya?
4. Bagaimana hasil analisis ini dapat digunakan untuk membantu operator kapal dalam memilih bahan bakar dan mengatur mesin guna mengurangi emisi karbon serta mendukung kebijakan lingkungan yang berkelanjutan?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat dilakukan dengan fokus dan hasil yang optimal, maka penulis menetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya akan membahas analisis kandungan bahan bakar pada kapal hasil sistem purifikasi menggunakan metode fuzzy sugeno. Penelitian tidak membahas sistem purifikasi bahan bakar lainnya atau metode analisis lainnya.
2. Penelitian akan terbatas pada jenis bahan bakar kapal konvensional, seperti bahan bakar berat (Heavy Fuel Oil - HFO) dan bahan bakar ringan (Marine Diesel Oil - MDO), dengan tidak memasukkan bahan bakar alternatif seperti LNG atau biofuel.
3. Analisis akan fokus pada bahan bakar dengan kandungan sulfur yang berada dalam batas yang ditetapkan oleh regulasi internasional terkini, yakni maksimal 0.5% massa.
4. Penelitian akan mengkaji viskositas dalam rentang nilai tertentu yang dianggap standar untuk operasional mesin kapal.
5. Akan dianalisis konten air dalam bahan bakar hingga batas maksimal yang diizinkan dalam spesifikasi bahan bakar standar internasional.

6. Analisis akan dibatasi pada emisi utama seperti sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), dan karbondioksida (CO<sub>2</sub>), tanpa memasukkan emisi lain seperti hidrokarbontak terbakar atau partikulat halus.

#### **1.4 Keaslian Penelitian**

Penelitian ini memiliki beberapa aspek kebaruan atau originalitas, di antaranya:

1. Penelitian ini menggunakan metode Fuzzy Sugeno, yang merupakan pendekatan relatif baru dan kurang dieksplorasi dalam analisis bahan bakar kapal dibandingkan dengan metode statistik tradisional. Inovasi ini memungkinkan model untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas yang sering ditemukan dalam data operasional kapal.
2. Dengan mempertimbangkan regulasi MARPOL Annex VI yang baru-baru ini diperbarui, penelitian ini sangat relevan dan memberikan insight terhadap aplikasi praktis regulasi ini dalam industri maritim.
3. Penelitian ini tidak hanya melihat satu variabel, melainkan mengintegrasikan analisis kandungan sulfur, viskositas, dan konten air dalam bahan bakar, serta dampak gabungan mereka terhadap emisi karbon. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih holistik tentang masalah tersebut.

Dengan adanya aspek-aspek kebaruan tersebut, diharapkan penelitian ini dapat memberikan sumbangan baru bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang kelautan dan perkapalan, serta memberikan informasi yang berguna bagi industri perkapalan di Indonesia dan dunia.

#### **1.5 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis pengaruh kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air terhadap emisi karbon yang dihasilkan oleh kapal.
2. Mengevaluasi akurasi metode Fuzzy Sugeno dalam memprediksi emisi karbon berdasarkan variabel kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air.
3. Menilai sensitivitas sistem fuzzy dalam menangani variasi kecil pada variabel input dibandingkan dengan model prediksi lainnya.

4. Menyediakan rekomendasi bagi operator kapal dalam pemilihan bahan bakar dan pengaturan mesin guna mengurangi emisi karbon serta mendukung kebijakan lingkungan yang berkelanjutan.

## 1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat yang dapat diperoleh, di antaranya:

- a. Teoritis

Menambah pengetahuan tentang kualitas bahan bakar dan efektivitas sistem purifikasi bahan bakar pada kapal. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi para pelaku industri perkapalan dalam memilih bahan bakar dan mengembangkan sistem purifikasi yang lebih efektif.

- b. Masyarakat

Meningkatkan kesadaran akan pentingnya menjaga kualitas lingkungan hidup. Dengan memperoleh informasi tentang kandungan sulfur dalam bahan bakar, diharapkan para pelaku industri perkapalan dapat lebih memperhatikan dampak emisi kapal terhadap lingkungan hidup.

- c. Lingkungan

Menunjang pencapaian standar emisi yang lebih ketat. Dalam rangka mengurangi dampak negatif kapal terhadap lingkungan hidup, pemerintah dan organisasi internasional telah menetapkan standar emisi yang semakin ketat. Dengan adanya hasil penelitian ini, diharapkan dapat membantu pencapaian standar emisi yang lebih ketat di masa depan.

- d. Teknologi dan Inovasi

Mendukung pengembangan teknologi dan inovasi di bidang perkapalan. Hasil penelitian ini dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pengembangan teknologi dan inovasi di bidang perkapalan, terutama dalam hal pemilihan bahan bakar dan pengembangan sistem purifikasi yang lebih efektif.

- e. Industri

Meningkatkan daya saing industri perkapalan Indonesia. Dengan memiliki informasi tentang kualitas bahan bakar dan efektivitas sistem purifikasi yang lebih baik, diharapkan industri perkapalan Indonesia dapat meningkatkan daya saingnya di pasar global

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Kandungan bahan bakar kapal hasil purifikasi dapat bervariasi, tergantung dari jenis sistem purifikasi yang digunakan dan kualitas bahan bakar yang diolah. Namun, umumnya kandungan bahan bakar kapal hasil purifikasi akan memiliki kandungan sulfur yang lebih rendah daripada bahan bakar asli sebelum diproses. Proses purifikasi biasanya dilakukan dengan menggunakan teknologi seperti scrubber atau catalyst, yang dapat mengurangi kandungan sulfur dan senyawa polutan lainnya dalam bahan bakar kapal. Selain itu, bahan bakar kapal hasil purifikasi juga dapat memiliki kandungan oksigen yang lebih tinggi, karena proses purifikasi dapat meningkatkan kadar oksigen dalam bahan bakar. Kandungan oksigen yang lebih tinggi dapat membantu meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi karbon. Secara umum, bahan bakar kapal hasil purifikasi memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan bahan bakar asli sebelum diproses [14]. Hal ini dapat membantu meningkatkan efisiensi mesin kapal, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan bahan bakar kapal. Selain itu, kandungan bahan bakar kapal hasil purifikasi juga dapat memiliki nilai kalor yang lebih tinggi, karena proses purifikasi dapat menghilangkan kandungan air dan senyawa lain yang tidak diperlukan dalam bahan bakar. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi konsumsi bahan bakar pada kapal. Jenis bahan bakar kapal hasil purifikasi yang paling umum adalah marine gas oil (MGO) dan marine diesel oil (MDO)[15]. Kedua jenis bahan bakar ini memiliki kandungan sulfur yang lebih rendah dan kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan bahan bakar asli sebelum diproses. Namun, biaya bahan bakar kapal hasil purifikasi cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar asli sebelum diproses, karena proses purifikasi yang rumit dan biaya teknologi yang digunakan.

#### **2.1. Penelitian Terdahulu**

Dalam rangka mengembangkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai analisis bahan bakar kapal, berikut ini adalah ringkasan dari tiga studi terdahulu yang signifikan dalam bidang ini. Studi-studi ini menyoroti berbagai aspek seperti efisiensi energi kapal, aplikasi pembelajaran mesin dalam prediksi konsumsi bahan bakar, dan pendekatan pembelajaran multitugas dalam konteks yang sama. Rincian ini diharapkan dapat memberikan wawasan berharga bagi peneliti dan praktisi dalam industri maritim.

**Tabel 1. Penelitian Terdahulu**

<b>No.</b>	<b>Penulis</b>	<b>Tahun</b>	<b>Judul Penelitian</b>	<b>Temuan Utama</b>
1	Çağlar Karatug et al.	2023	Strategi Efisiensi Energi Kapal	Penggunaan ANFIS untuk memprediksi dan meningkatkan efisiensi energi kapal.
2	Zhihui Hu et al.	2019	Prediksi Konsumsi Bahan Bakar untuk Kapal Berlayar	Metode pembelajaran mesin, termasuk BPNN dan GPR, efektif dalam memprediksi konsumsi bahan bakar kapal.
3	Loukas Ilias et al.	2023	Kerangka Kerja Pembelajaran Multitugas untuk Prediksi Konsumsi Bahan Bakar Minyak Kapal	Penggunaan pendekatan berbasis transformator dan pembelajaran multitugas untuk memprediksi konsumsi bahan bakar utama dan tambahan kapal.
4	Marcial de Araujo Pereira Babo Martins, Haryono Setiyo Huboyo, Budi	2022	Emisi Polutan Konvensional dari Aktivitas di Alur Pelayaran Pelabuhan Dili	Penelitian ini mengestimasi emisi polutan dari aktivitas pelayaran di

	Prasetyo Samadikun			<p>Pelabuhan Dili, Timor-Leste. Kapal Ro-Ro Cargo mendominasi lalu lintas pelabuhan (56%). Emisi utama berasal dari kapal tunda, dengan total emisi PM2.5, SO2, NOx, dan VOC masing-masing sebesar 0,348 g/tahun, 0,421 g/tahun, 4,842 g/tahun, dan 0,630 g/tahun. Efisiensi pengoperasian kapal tunda direkomendasikan sebagai strategi utama dalam pengurangan emisi.</p>
5	Ageng Arya Khryсна Dwipangga, Muh. Abdillah, Muhammad Fiqih Apriansyah,	2024	Implementasi Logika Fuzzy Mamdani untuk Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan	Penelitian ini menggunakan metode Fuzzy Mamdani untuk memonitor kualitas udara dalam ruangan

	Rizal Adi Saputra			<p>dengan variabel input karbon monoksida (CO), suhu, dan kelembapan.</p> <p>Hasil penelitian menunjukkan tingkat akurasi sistem sebesar 94,69%, dengan error rata-rata sebesar 5,31%.</p> <p>Model ini terbukti efektif dalam menangani data kualitas udara yang tidak pasti dan dapat dioptimalkan lebih lanjut dengan pendekatan fuzzy lainnya.</p>
--	----------------------	--	--	--

Ringkasan tabel ini memberikan gambaran tentang kemajuan terkini dalam penelitian terkait efisiensi bahan bakar kapal dan aplikasi teknologi canggih di bidang ini. Hasil dari studi-studi ini tidak hanya relevan untuk perkembangan teknologi maritim, tetapi juga penting dalam konteks pelestarian lingkungan dan pengurangan emisi. Penelitian lebih lanjut dan inovasi berkelanjutan diharapkan akan menghasilkan solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk industri maritim di masa depan.

## 2.2. Bahan Bakar Kapal



**Gambar 2.1 Bahan Bakar HFO dan MDO**

Bab ini mendalami ragam bahan bakar yang menggerakkan armada maritim global, yang merupakan tulang punggung perdagangan internasional. Bahan bakar kapal, yang dikenal juga sebagai bunker fuel, memiliki beberapa varian, dengan dua yang paling umum adalah Heavy Fuel Oil (HFO) dan Marine Diesel Oil (MDO). Bab ini menguraikan dua titan dunia bahan bakar maritim: Heavy Fuel Oil (HFO) dan Marine Diesel Oil (MDO), yang masing-masing memiliki karakteristik unik dan aplikasi yang beragam dalam armada perdagangan global. Keduanya memiliki peran yang tidak bisa diremehkan dalam memastikan roda ekonomi dunia terus berputar.

- a) **Heavy Fuel Oil (HFO)** adalah jenis bahan bakar yang paling sering digunakan dalam pelayaran internasional karena biayanya yang relatif murah. HFO dihasilkan dari residu pemurnian minyak bumi, memiliki kandungan sulfur yang tinggi, dan memerlukan pemanasan sebelum dapat digunakan karena viskositasnya yang tinggi. Viskositas ini penting karena mempengaruhi atomisasi bahan bakar saat injeksi ke dalam ruang bakar mesin, proses kritis yang menentukan efisiensi pembakaran dan emisi yang dihasilkan.
- b) **Marine Diesel Oil (MDO)** adalah bahan bakar yang lebih ringan dan lebih bersih, dengan kandungan sulfur yang lebih rendah dan viskositas yang lebih

kecil dibandingkan HFO. Ini membuat MDO lebih ramah lingkungan dan lebih mudah dalam penanganan. Meskipun lebih mahal, MDO sering digunakan di area yang memiliki regulasi ketat terhadap emisi, seperti Emission Control Areas (ECA).

Organisasi Maritim Internasional (IMO), lembaga khusus Perserikatan Bangsa-Bangsa yang bertanggung jawab atas keselamatan dan keamanan pelayaran serta pencegahan polusi laut oleh kapal, telah menetapkan standar kualitas bahan bakar yang ketat melalui regulasi MARPOL Annex VI. Regulasi ini secara spesifik membatasi kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal untuk mengurangi emisi sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), yang dapat menyebabkan hujan asam dan berkontribusi pada pembentukan partikel halus yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal menjadi sorotan penting dalam tinjauan ini. Dengan regulasi IMO 2020 yang mengharuskan bahan bakar kapal memiliki kandungan sulfur maksimal 0.5%, terjadi pergeseran besar dalam industri maritim.

**Tabel 2. Tabel Dampak Emisi Bahan Bakar Tahun 2022**

No	Bahan Bakar	NCV Nasional (MJ/Kg BB)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	NCV Nasional (MJ/Liter)	Faktor Emisi Nasional (Kg C/TJ)	Faktor Konversi (C --> CO <sub>2</sub> )	Faktor Emisi Nasional (Kg CO <sub>2</sub> /TJ)	Faktor Emisi Nasional (Kg CO <sub>2</sub> /Liter)
1	MDO	40	890	35.06	15	0,171527778	55.05	0,200
2	HFO	39.05	990	39.01	20	0,171527778	73.04	0,205

Dalam regulasi yang dikenal sebagai IMO 2020, ditetapkan batasan maksimum kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal sebesar 0,5%. Kebijakan ini menginduksi transisi substansial dalam industri maritim global, di mana adaptasi terhadap bahan bakar dengan spesifikasi yang lebih ramah lingkungan menjadi imperatif. Dalam Tabel 1 yang terlampir, dipresentasikan data empiris terkait dampak emisi bahan bakar untuk tahun 2022. Variabel yang dievaluasi meliputi Nilai Kalor Nasional (NCV) yang diukur dalam Mega Joule per kilogram dan per liter, kepadatan (Density) bahan bakar yang diukur dalam kilogram per meter kubik, serta konversi faktor emisi dari karbon menjadi dioksida karbon. Data tersebut mengindikasikan perbedaan dalam kontribusi emisi CO<sub>2</sub>

per unit volume bahan bakar, yang mencerminkan efisiensi relatif dan dampak lingkungan dari berbagai jenis bahan bakar yang digunakan dalam operasional kapal.

Faktor emisi nasional (Kg CO<sub>2</sub>/TJ) dan faktor emisi per liter (Kg CO<sub>2</sub>/Liter) yang ditetapkan dalam tabel tersebut, memberikan insight terhadap beban emisi yang dihasilkan per unit energi yang dikonsumsi. Hal ini memungkinkan pelaku industri dan regulator untuk mengkuantifikasi dampak lingkungan dari penggunaan bahan bakar tertentu dan mengevaluasi efektivitas kebijakan yang dirancang untuk mengurangi jejak karbon dalam sektor maritim.

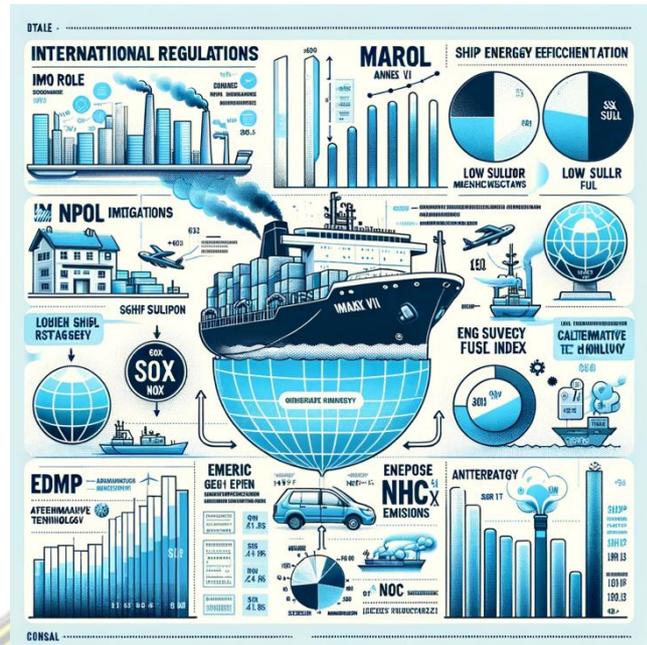
HFO dengan sulfur tinggi harus melalui proses desulfurisasi atau diganti dengan alternatif yang lebih bersih seperti MDO atau bahan bakar dengan kandungan sulfur sangat rendah (ULSFO). Viskositas bahan bakar juga merupakan aspek penting yang diulas. Viskositas yang optimal diperlukan untuk memastikan bahwa bahan bakar dapat disalurkan, disemprotkan, dan terbakar dengan efisien di dalam mesin.

Viskositas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan masalah seperti pembakaran yang tidak sempurna, yang meningkatkan emisi dan residu, sedangkan viskositas yang terlalu rendah dapat menyebabkan keausan yang berlebihan pada komponen mesin. Konten air dalam bahan bakar juga tidak boleh diabaikan. Air dapat masuk ke dalam bahan bakar selama berbagai tahap dari penyulingan hingga penyimpanan dan pengisian. Kehadiran air dalam bahan bakar dapat menyebabkan pembentukan emulsi, korosi, dan pertumbuhan mikroorganisme yang dapat merusak sistem bahan bakar dan mengurangi efisiensi pembakaran. Selain itu, air dapat menurunkan nilai kalor bahan bakar, yang mengurangi output daya mesin dan meningkatkan konsumsi bahan bakar.

### **2.3. Regulasi Emisi karbon Kapal**

Pada titik penting dalam sejarah maritim, komunitas internasional, melalui badan-badan seperti International Maritime Organization (IMO), telah mengambil langkah progresif untuk mengatasi tantangan lingkungan yang ditimbulkan oleh industri pelayaran. Regulasi ini berfungsi sebagai rambu-rambu yang mengarahkan kapal-kapal di lautan menuju praktik yang lebih berkelanjutan. MARPOL Annex VI, yang merupakan bagian dari International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, adalah regulasi komprehensif yang menetapkan batas atas untuk emisi utama dari kapal, termasuk sulfur oksida (SO<sub>x</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), dan partikel halus. Konvensi ini tidak hanya mengatur kualitas bahan bakar tetapi juga memperkenalkan

standar teknis untuk peralatan dan proses operasional kapal untuk meminimalisir pencemaran udara.



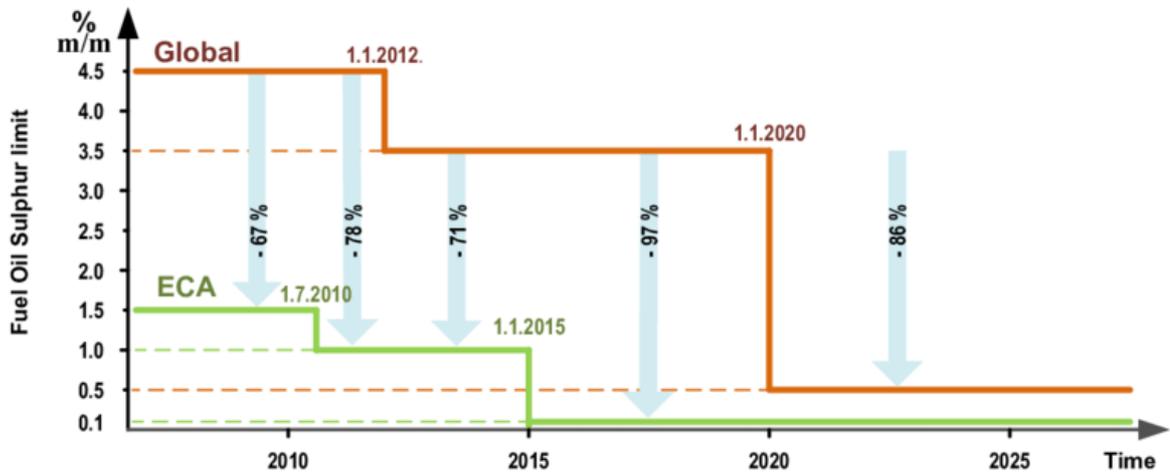
**Gambar 2.2 Regulasi Internasional tentang Emisi karbon Kapal**

Perubahan signifikan di bawah MARPOL Annex VI adalah pengenalan 'IMO 2020', yang secara efektif mengurangi batas maksimum kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal dari 3,5% menjadi 0,5% berat, dimulai pada 1 Januari 2020. Peraturan ini ditujukan untuk mengurangi jumlah sulfur dioksida yang berasal dari kapal, yang merupakan kontributor besar terhadap polusi udara dan berbagai masalah kesehatan serta lingkungan.

Dampak regulasi ini terhadap industri maritim adalah signifikan dan multifaset. Dari sudut pandang hukum, perusahaan pelayaran kini dihadapkan pada tuntutan untuk mematuhi standar yang lebih ketat, yang memerlukan penyesuaian dalam pemilihan bahan bakar dan kemungkinan modifikasi pada peralatan kapal. Pemilik kapal harus mempertimbangkan opsi seperti beralih ke bahan bakar dengan kandungan sulfur rendah, menggunakan scrubbers untuk mengurangi SOx dalam karbon, atau bahkan berinvestasi dalam teknologi bahan bakar alternatif seperti LNG.

Ekonomi industri pelayaran juga terpengaruh secara signifikan. Perubahan ke bahan bakar yang lebih mahal atau investasi dalam teknologi baru menghadirkan beban biaya yang substansial, yang mungkin diteruskan kepada pelanggan melalui biaya yang lebih tinggi. Namun, ini juga membuka peluang pasar bagi produsen bahan bakar alternatif

dan teknologi pembersihan emisi, serta menimbulkan pertanyaan kritis tentang efisiensi operasional dan keberlanjutan jangka panjang.



**Gambar 2.3 Grafik Batas Maksimum Kandungan Sulfur dalam Bahan Bakar Kapal Menurut Regulasi MARPOL Annex VI**

International Maritime Organization (IMO) telah menetapkan berbagai regulasi untuk mengendalikan emisi karbondioksida dari kapal, yang termasuk dalam MARPOL Annex VI. Regulasi ini dirancang untuk mengurangi dampak negatif operasional kapal terhadap lingkungan, khususnya pencemaran udara. Berikut adalah gambaran umum dari beberapa regulasi kunci yang ditetapkan oleh IMO:

### 2.2.1 Regulasi 14 MARPOL Annex VI (SO<sub>x</sub> dan Partikulat)

- Sebelum 1 Januari 2020, batas maksimum kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal adalah 3.50% massa.
- Dikenal sebagai "IMO 2020", batas ini telah dikurangi menjadi 0.50% massa mulai 1 Januari 2020 untuk perairan di luar Emission Control Areas (ECAs).
- Di dalam ECAs, batas sulfur telah lebih ketat lagi, yaitu 0.10% massa, berlaku sejak 1 Januari 2015.

### 2.2.2 Regulasi 13 MARPOL Annex VI (NO<sub>x</sub>)

- Standar emisi NO<sub>x</sub> berbeda tergantung pada tanggal pembangunan mesin dan area operasional kapal.
- Tier I, II, dan III NO<sub>x</sub> standards mewakili standar yang semakin ketat sejak regulasi diperkenalkan.

- Tier III yang merupakan standar terketat, berlaku di ECAs yang ditentukan untuk kontrol NOx.

### **2.2.3 Regulasi Emission Control Areas (ECAs)**

- ECAs ditetapkan untuk SOx dan NOx. Kapal yang beroperasi di ECAs harus mematuhi batasan emisi yang lebih ketat.

### **2.2.4 Regulasi 18 MARPOL Annex VI (Kualitas Bahan Bakar)**

- Menetapkan bahwa bahan bakar harus disediakan sesuai dengan spesifikasi yang tidak menyebabkan peningkatan emisi yang berlebihan dan harus mencakup informasi tentang kandungan sulfur.

### **2.2.5 Regulasi 19 MARPOL Annex VI (Efisiensi Energi)**

- Memperkenalkan Energy Efficiency Design Index (EEDI) untuk kapal baru dan Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) untuk semua kapal, yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi energi operasional kapal dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Selain aturan ini, IMO juga telah mengadopsi strategi awal untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari kapal dengan tujuan untuk mengurangi emisi tahunan total CO<sub>2</sub> secara minimal 40% pada tahun 2030, dan mengejar upaya untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> hingga 70% pada tahun 2050, dibandingkan dengan tingkat tahun 2008.

Data dan statistik terbaru seputar kepatuhan terhadap regulasi ini dan dampaknya terhadap industri maritim global bisa diperoleh melalui laporan tahunan IMO, publikasi industri, serta studi dan analisis akademis terkini. Namun, informasi spesifik mungkin memerlukan akses ke database IMO dan organisasi terkait lainnya yang melacak dan melaporkan tentang kepatuhan dan efektivitas regulasi ini.

Bagian ini dari penelitian tidak hanya akan menjelaskan ketentuan dan batasan regulasi tersebut tetapi juga akan mengeksplorasi bagaimana industri maritim menanggapi tantangan ini, baik dari perspektif teknologi maupun manajemen strategis.

Analisis ini akan memberikan wawasan tentang kecenderungan saat ini dan masa depan industri dalam menghadapi keharusan untuk mengurangi dampak lingkungan, serta membahas implikasi dari peraturan tersebut terhadap penelitian ini dalam konteks yang lebih luas dari keberlanjutan dan ekonomi global.

#### 2.4. Dampak Emisi karbon terhadap Lingkungan dan Kesehatan



**Gambar 2.4 Emisi Karbon dari Kapal Hasil Pembuangan Bahan Bakar**

Dampak emisi karbon kapal terhadap lingkungan dan kesehatan, kita perlu memahami bagaimana zat-zat yang dilepaskan ke udara sebagai hasil dari pembakaran bahan bakar dapat mempengaruhi biosfer kita dan kesejahteraan manusia. Emisi karbon dari kapal merupakan sumber signifikan dari polusi udara global, yang terdiri dari berbagai zat berbahaya termasuk sulfur oksida (SO<sub>x</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), partikel halus (PM), karbondioksida (CO<sub>2</sub>), dan hidrokarbon tak terbakar. Dampak dari emisi ini terhadap lingkungan dan kesehatan manusia adalah luas dan multidimensi.

- a) **Sulfur Oksida (SO<sub>x</sub>):** SO<sub>x</sub>, terutama sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), berasal dari pembakaran bahan bakar yang mengandung sulfur. Ketika SO<sub>2</sub> bereaksi dengan atmosfer, ia dapat membentuk hujan asam, yang memiliki kemampuan untuk merusak ekosistem akuatik, merusak tanaman, mengikis bangunan, dan mempercepat kerusakan benda-benda bersejarah. Hujan asam juga dapat

meresap ke dalam tanah, mengubah komposisi kimia dan merugikan kehidupan tanah.

- b) **Nitrogen Oksida (NO<sub>x</sub>):** NO<sub>x</sub> adalah kontributor utama terhadap pembentukan ozon troposfer, yang dikenal sebagai smog foto kimia. Ozon pada level tanah ini dapat menyebabkan atau memperparah masalah pernapasan, menurunkan fungsi paru-paru, dan meningkatkan respon alergi. NO<sub>x</sub> juga berkontribusi pada eutrofikasi, proses yang meningkatkan konsentrasi nutrisi di perairan dan menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan yang dapat merusak ekosistem air.
- c) **Partikel Halus (PM):** PM, terutama PM<sub>2.5</sub>, dapat menembus jauh ke dalam sistem respirasi, mencapai alveoli dan bahkan masuk ke dalam aliran darah. Ini dikaitkan dengan berbagai masalah kesehatan termasuk penyakit jantung, stroke, penyakit paru obstruktif kronis, dan kanker paru-paru. PM juga mengurangi visibilitas (haze) dan berkontribusi pada kerusakan lingkungan melalui deposisi zat-zat berbahaya.
- d) **KarbonDioksida (CO<sub>2</sub>):** CO<sub>2</sub> adalah gas rumah kaca utama yang dilepaskan oleh kapal. Akumulasi CO<sub>2</sub> di atmosfer adalah faktor utama perubahan iklim global, yang memiliki dampak luas, termasuk peningkatan suhu rata-rata global, perubahan pola cuaca, kenaikan permukaan laut, dan peristiwa cuaca ekstrem yang lebih sering.
- e) **HidrokarbonTak Terbakar:** Ketidaktepatan dalam proses pembakaran dapat menyebabkan emisi hidrokarbon yang tidak terbakar sepenuhnya. Senyawa ini berkontribusi pada pembentukan ozon troposfer dan memiliki efek merusak yang sama dengan NO<sub>x</sub>.

Dampak kesehatan dari polusi udara ini termasuk, tetapi tidak terbatas pada, penyakit kardiovaskular, gangguan pernapasan, dan penurunan kualitas hidup secara

umum. Populasi di daerah pelabuhan dan jalur pelayaran utama sering mengalami tingkat paparan yang lebih tinggi, yang mengarah pada disparitas kesehatan.

Dalam upaya mengurangi dampak ini, IMO telah mengadopsi regulasi seperti MARPOL Annex VI, yang bertujuan untuk mengurangi emisi berbahaya dari kapal. Langkah-langkah ini mencakup penggunaan bahan bakar dengan kandungan sulfur rendah, teknologi pembersihan emisi seperti scrubbers, dan strategi operasional yang lebih efisien seperti pengelolaan kecepatan.

Peningkatan kesadaran dan pengetahuan mengenai dampak emisi ini telah mendorong industri maritim untuk mencari solusi yang lebih berkelanjutan, yang dapat melindungi lingkungan dan kesehatan publik sambil mempertahankan efisiensi perdagangan global.

## **2.5. Spesifikasi bahan bakar**

Spesifikasi bahan bakar sangat penting untuk memastikan kinerja optimal mesin kapal serta kepatuhan terhadap peraturan lingkungan serta berbagai karakteristik bahan bakar yang perlu diperhatikan oleh pemilik dan operator kapal. Berikut adalah beberapa aspek utama yang dijelaskan dalam dokumen tersebut:

### **a. Kandungan Sulfur**

Kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal menjadi perhatian utama karena berkaitan dengan emisi gas buang yang dapat mencemari lingkungan. IMO melalui regulasi MARPOL Annex VI telah membatasi kadar sulfur dalam bahan bakar laut menjadi maksimum 0,50% m/m sejak 1 Januari 2020, dengan batasan yang lebih ketat 0,10% m/m di wilayah Emission Control Areas (ECA) seperti Amerika Utara dan Eropa Utara. Penggunaan bahan bakar dengan kandungan sulfur yang lebih tinggi memerlukan sistem Scrubber (Exhaust Gas Cleaning System, EGCS) untuk mengurangi emisi SO<sub>x</sub> sebelum dilepaskan ke atmosfer.

### **b. Viskositas**

Viskositas bahan bakar mempengaruhi proses atomisasi dan pembakaran dalam mesin kapal. Bahan bakar dengan viskositas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan masalah dalam pengaliran bahan bakar dan pembakaran tidak sempurna, sedangkan viskositas yang terlalu rendah bisa menyebabkan kebocoran dalam sistem bahan bakar. Pengelolaan

viskositas yang tepat sangat penting untuk memastikan bahan bakar tetap dalam kondisi optimal saat digunakan di mesin.

#### **c. Residu Karbon Mikro (Micro Carbon Residue / MCR)**

MCR adalah ukuran kandungan karbon yang tersisa setelah bahan bakar diuji dalam kondisi tertentu, mencerminkan kecenderungan bahan bakar untuk meninggalkan deposit dalam mesin dan sistem pembakaran. MCR yang tinggi menunjukkan potensi pembentukan kerak karbon dalam ruang bakar dan saluran buang, yang dapat mengurangi efisiensi mesin dan meningkatkan kebutuhan pemeliharaan. ISO 8217 menetapkan batas maksimum MCR untuk memastikan kualitas bahan bakar tetap sesuai standar.

#### **d. Stabilitas dan Kompatibilitas Bahan Bakar**

Stabilitas bahan bakar mengacu pada kemampuannya untuk tetap homogen dan tidak mengalami pemisahan atau pembentukan endapan selama penyimpanan. Kompatibilitas menjadi penting saat mencampur bahan bakar dari sumber yang berbeda, karena ketidakcocokan dapat menyebabkan pemisahan fase dan pembentukan lumpur yang dapat menyumbat sistem bahan bakar kapal. Pengujian kompatibilitas sebelum pencampuran bahan bakar sangat disarankan untuk menghindari potensi gangguan operasional.

#### **e. Kandungan Air dan Kontaminasi**

Bahan bakar laut sebaiknya memiliki kandungan air yang sangat rendah, karena keberadaan air dapat menyebabkan korosi pada sistem bahan bakar dan mengganggu proses pembakaran. Kontaminasi lain seperti logam berat (vanadium, nikel), asphaltenes, atau sedimen juga dapat mempengaruhi performa bahan bakar dan menyebabkan masalah teknis pada mesin kapal. Filtrasi dan pemisahan air serta pengelolaan penyimpanan bahan bakar sangat penting untuk menjaga kualitas bahan bakar tetap optimal.

## **2.6. Metode Fuzzy Sugeno**

Metode Fuzzy Sugeno, sering juga disebut sebagai metode Sugeno atau pendekatan Sugeno, adalah salah satu cara untuk melaksanakan inferensi dalam sistem logika fuzzy yang dikembangkan oleh Michio Sugeno pada tahun 1985. Pendekatan ini secara umum

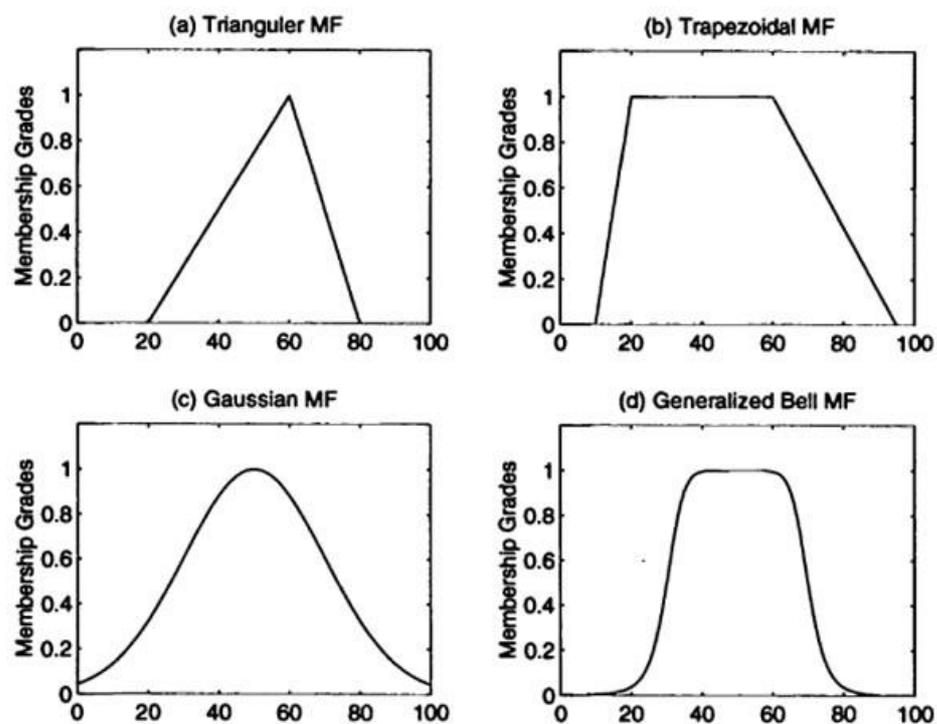
digunakan dalam pengendalian fuzzy dan berbagai aplikasi sistem keputusan karena efisiensinya dalam perhitungan dan kemudahan dalam pembentukan model matematik yang integratif. Fuzzy sets atau himpunan fuzzy merupakan konsep dasar dalam Fuzzy Logic yang diusulkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965. Berbeda dengan himpunan klasik yang anggotanya memiliki batasan yang jelas dan tegas (misalnya suatu anggota bisa sepenuhnya termasuk atau tidak dalam himpunan), himpunan fuzzy mengizinkan anggota untuk memiliki tingkat keanggotaan yang beragam antara 0 dan 1. Hal ini memungkinkan penanganan ketidakpastian dan ambiguitas yang sering dijumpai dalam kehidupan nyata. Pendekatan Sugeno menonjol karena kemampuannya dalam mengatasi masalah yang kompleks dengan mengintegrasikan logika yang bersifat fuzzy ke dalam algoritma yang dapat diaplikasikan dalam keadaan yang tidak pasti atau tidak linear. Ini memungkinkan pengembangan sistem-sistem yang dapat meniru pengambilan keputusan manusia dalam kondisi yang tidak jelas atau saat data yang tersedia tidak lengkap.

Dengan demikian, sebelum memproses fuzzifikasi secara detail, penting untuk memahami bahwa metode Fuzzy Sugeno dan konsep himpunan fuzzy menjadi kunci dalam menerjemahkan kondisi ambiguitas yang ada di dunia nyata ke dalam sistem yang dapat memodelkan dan menyelesaikan masalah dengan cara yang serupa dengan logika manusia, meskipun dihadapkan pada ketidakpastian. Fuzzifikasi merupakan proses mengkonversi input sistem yang memiliki nilai tegas menjadi nilai fuzzy yang dapat diolah dalam logika fuzzy. Proses ini mendasar dalam sistem logika fuzzy, termasuk metode Fuzzy Sugeno. Secara spesifik, fungsi keanggotaan ( $\mu$ ) dalam logika fuzzy berfungsi untuk menguantifikasi seberapa kuat keterkaitan atau keanggotaan suatu elemen terhadap himpunan fuzzy tertentu. Dalam hal ini, nilai keanggotaan diukur dalam rentang kontinu dari 0 hingga 1, di mana 0 menunjukkan tidak ada keanggotaan sama sekali, dan 1 menunjukkan keanggotaan penuh. Untuk memahami lebih jauh, mari kita tinjau beberapa konsep utama yaitu (1) Himpunan Fuzzy: Koleksi objek dengan derajat keanggotaan yang berkelanjutan. Berbeda dengan himpunan tegas di mana elemen hanya bisa menjadi anggota atau tidak sama sekali, himpunan fuzzy memungkinkan elemen memiliki derajat keanggotaan antara 0 dan 1. (2) Fungsi Keanggotaan: Ini adalah fungsi matematika yang mendefinisikan bagaimana nilai input dikonversi menjadi nilai keanggotaan fuzzy. Beberapa jenis fungsi keanggotaan yang sering digunakan adalah fungsi segitiga, trapesium, dan bel. (3) Metode Fuzzy Sugeno: Salah satu metode

inferensi dalam logika fuzzy yang menggunakan fungsi keanggotaan untuk menghasilkan suatu output berdasarkan aturan fuzzy dan dapat digunakan untuk kontroler atau sistem prediksi.

### 2.4.1. Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan merupakan salah satu komponen fundamental dalam sistem logika fuzzy, termasuk dalam metode Fuzzy Sugeno. Fungsi ini mengukur derajat kebenaran suatu argumen yang terdefinisi dalam ruang fuzzy, yang memungkinkan objek untuk memiliki nilai keanggotaan yang berkelanjutan dalam rentang antara 0 (sama sekali tidak termasuk dalam himpunan) hingga 1 (sepenuhnya termasuk dalam himpunan).



Gambar 2.5 Grafik pada Fungsi Keanggotaan

#### a) Fungsi Keanggotaan Segitiga

Fungsi keanggotaan segitiga adalah jenis fungsi keanggotaan yang digunakan dalam logika fuzzy untuk merepresentasikan nilai-nilai keanggotaan himpunan fuzzy secara grafis. Fungsi ini didefinisikan dengan bentuk geometris segitiga, dimana setiap titik pada segitiga merepresentasikan sebuah nilai keanggotaan dari elemen tertentu terhadap himpunan fuzzy yang bersangkutan. Karakteristik utama dari fungsi keanggotaan segitiga adalah kesederhanaannya.

Karakteristik utama dari fungsi keanggotaan segitiga adalah kesederhanaannya. Fungsi ini diwakili oleh tiga poin yang menentukan basis dan puncak segitiga:

- **a:** Titik awal di mana fungsi keanggotaan mulai meningkat dari 0.
- **b:** Titik puncak di mana fungsi keanggotaan mencapai 1, menunjukkan keanggotaan penuh dalam himpunan.
- **c:** Titik akhir di mana fungsi keanggotaan turun kembali ke 0.

Nilai keanggotaan untuk suatu nilai  $x$  dihitung dengan mempertimbangkan posisi  $x$  relatif terhadap titik-titik  $a$ ,  $b$ , dan  $c$ .

Secara matematik, fungsi keanggotaan segitiga dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu_A(x) = \max(\min((x - a)/(b - a), 1, (c - x)/(c - b)), 0)$$

Di mana  $\mu_A(x)$  adalah nilai keanggotaan dari elemen  $x$  dalam himpunan fuzzy  $A$ . Secara visual, fungsi keanggotaan ini dapat dilihat sebagai sebuah segitiga dengan alas horizontal dan satu titik tajam yang mengarah ke atas. Ini memudahkan visualisasi derajat keanggotaan elemen terhadap himpunan fuzzy. Keuntungan utama dari fungsi keanggotaan segitiga adalah kesederhanaan perhitungannya dan kemudahan dalam penggunaan serta interpretasi. Namun, kekurangannya terletak pada ketidakmampuannya untuk menangkap nuansa lebih kompleks yang mungkin diwakili oleh fungsi keanggotaan lain yang lebih halus seperti Gaussian atau bell-shaped. Dalam konteks metode Fuzzy Sugeno, fungsi keanggotaan segitiga sering digunakan karena kemudahan pengintegrasian dengan metode ini yang menekankan pada output fungsi yang linear atau konstan. Fungsi keanggotaan segitiga dapat membantu dalam pembentukan aturan fuzzy dengan cara yang lebih intuitif dan langsung.

#### **b) Fungsi Keanggotaan Trapesium**

Fungsi keanggotaan trapesium adalah bentuk lain dari fungsi keanggotaan dalam logika fuzzy, yang memperluas konsep fungsi keanggotaan segitiga dengan menyediakan rentang di mana nilai keanggotaan dapat tetap konstan sebelum

menurun. Fungsi ini cocok untuk menggambarkan situasi di mana terdapat ambiguitas atau ketidakpastian dalam rentang nilai yang lebih luas.

Fungsi keanggotaan trapesium ditandai oleh empat parameter yang menentukan bentuknya:

- **a:** Titik awal di mana fungsi keanggotaan mulai meningkat dari 0.
- **b:** Titik di mana fungsi keanggotaan naik menjadi 1, menandai awal dari bagian atas trapesium.
- **c:** Titik di bagian atas trapesium di mana fungsi keanggotaan mulai menurun dari 1.
- **d:** Titik akhir di mana fungsi keanggotaan turun kembali ke 0.

Bagian 'atap' dari trapesium, antara titik b dan c, merepresentasikan rentang di mana elemen memiliki keanggotaan penuh dalam himpunan fuzzy.

Secara matematis, fungsi keanggotaan trapesium dapat dijelaskan melalui kombinasi dari fungsi linear sebagai berikut:

$$\mu_A(x) = \max(\min(\min((x - a)/(b - a), 1), (d - x)/(d - c)), 0)$$

Di mana  $\mu_A(x)$  adalah nilai keanggotaan dari elemen  $x$  dalam himpunan fuzzy A. Dalam representasi grafis, fungsi keanggotaan trapesium dapat dilihat sebagai bentuk trapesium dengan atap yang datar. Ini mengindikasikan bahwa ada rentang nilai yang semuanya memiliki tingkat keanggotaan yang maksimum. Keuntungan dari fungsi keanggotaan trapesium adalah kemampuannya untuk merepresentasikan kondisi di mana sebuah elemen bisa sepenuhnya termasuk dalam himpunan fuzzy untuk rentang nilai tertentu, bukan hanya pada satu titik spesifik. Namun, ini juga bisa menjadi lebih kompleks untuk dihitung dan diimplementasikan dibandingkan dengan fungsi keanggotaan segitiga. Dalam metode Fuzzy Sugeno, fungsi keanggotaan trapesium memberikan keuntungan dalam merepresentasikan aturan yang mengakomodasi interval input yang lebar, dimana input-input tersebut memiliki konsekuensi atau output yang serupa. Hal ini sering terjadi dalam kasus kontrol proses atau sistem keputusan di mana respon yang sama diinginkan dalam rentang kondisi yang tidak tajam atau crisp. Fungsi keanggotaan trapesium mendukung pendekatan ini dengan menyediakan transisi yang lebih lembut antara berbagai tingkat keanggotaan.

### c) Fungsi Keanggotaan Gaussian

Fungsi keanggotaan Gaussian merupakan salah satu jenis fungsi keanggotaan dalam logika fuzzy yang mengambil bentuk kurva Gaussian atau kurva lonceng. Karakteristik utama dari fungsi ini adalah simetrinya dan transisi yang halus antara nilai-nilai keanggotaan, yang merefleksikan distribusi normal dalam statistika. Fungsi keanggotaan Gaussian ditandai oleh dua parameter utama:

- **c**: Pusat dari kurva Gaussian, yang juga merupakan nilai dimana fungsi keanggotaan mencapai nilai maksimum (1).
- **σ (sigma)**: Standar deviasi yang mengontrol lebar dari kurva, menentukan seberapa cepat nilai keanggotaan menurun dari pusat.

Fungsi ini memiliki simetri terhadap titik pusat dan tidak pernah benar-benar mencapai 0, yang mengindikasikan bahwa setiap elemen memiliki derajat keanggotaan terhadap himpunan fuzzy, tidak peduli seberapa jauh mereka dari pusat.

Fungsi keanggotaan Gaussian dijelaskan oleh persamaan berikut:

$$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{(x - c)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Di mana  $\mu_A(x)$  adalah nilai keanggotaan dari elemen  $x$  dalam himpunan fuzzy  $A$ . Secara grafis, fungsi keanggotaan Gaussian dapat dilihat sebagai kurva lonceng yang mulus, tanpa sudut atau titik tajam. Ini menyediakan transisi yang sangat halus antara nilai keanggotaan yang berbeda, memungkinkan model fuzzy untuk menggambarkan fenomena dengan ketidakpastian yang terdistribusi secara alami.

Keuntungan utama dari fungsi keanggotaan Gaussian adalah kemampuannya untuk menangkap perubahan yang halus dan bergradasi dalam keanggotaan, yang sangat bermanfaat dalam situasi yang memerlukan model yang lebih realistis dan alamiah. Kekurangannya adalah bahwa perhitungannya dapat lebih intensif secara komputasi dibandingkan dengan fungsi keanggotaan linear seperti segitiga atau trapesium.

Dalam konteks metode Fuzzy Sugeno, fungsi keanggotaan Gaussian sangat berguna untuk menggambarkan variabel yang memiliki ketidakpastian yang terdistribusi secara normal atau saat model perlu sensitif terhadap perubahan kecil pada input. Karena metode Sugeno sering menggunakan model output yang berbasis matematis atau fungsi linear, kombinasi fungsi keanggotaan Gaussian dengan output

linear ini dapat menghasilkan sistem fuzzy yang sangat efektif dalam menangani data dan situasi yang kompleks dan bergradasi.

#### d) Fungsi Keanggotaan Generalized Bell

Fungsi keanggotaan Generalized Bell adalah salah satu tipe fungsi keanggotaan dalam logika fuzzy yang menggabungkan sensitivitas fungsi Gaussian dengan kepraktisan fungsi polinomial. Fungsi ini memiliki bentuk lonceng yang umum dan dapat disesuaikan, membuatnya sangat berguna untuk berbagai aplikasi yang memerlukan pendekatan yang lebih dinamis dan adaptif.

Fungsi keanggotaan Generalized Bell memiliki tiga parameter yang menentukan bentuknya:

- **a:** Parameter yang menentukan lebar kurva lonceng.
- **b:** Parameter yang menentukan kecuraman dari sisi kurva.
- **c:** Pusat kurva yang juga merupakan titik di mana fungsi keanggotaan mencapai nilai maksimumnya.

Kurva Generalized Bell tidak simetris kecuali dalam kasus khusus, dan hal ini memungkinkan representasi yang lebih akurat dari fenomena yang tidak terdistribusi secara simetris.

Fungsi keanggotaan Generalized Bell dapat dijelaskan oleh persamaan berikut:

$$\mu_A(x) = 1 / (1 + |((x - c)/a)|^{(2b)})$$

Di mana  $\mu_A(x)$  adalah nilai keanggotaan dari elemen  $x$  dalam himpunan fuzzy  $A$ . Secara grafis, fungsi keanggotaan Generalized Bell terlihat seperti kurva lonceng yang dapat memiliki sisi yang lebih curam atau lebih landai tergantung pada parameter yang digunakan. Ini memberikan sensitivitas yang signifikan dalam modelisasi nilai keanggotaan. Keuntungan dari fungsi keanggotaan Generalized Bell adalah kemampuannya untuk menyesuaikan bentuk kurva sesuai dengan kebutuhan khusus dari data atau fenomena yang dimodelkan. Fungsi ini dapat mengakomodasi asimetri dalam data yang tidak mungkin dilakukan dengan fungsi keanggotaan simetris seperti Gaussian.

Namun, kompleksitas perhitungannya bisa menjadi kekurangan, terutama jika model harus dijalankan secara real-time atau pada perangkat dengan sumber daya

terbatas. Dalam metode Fuzzy Sugeno, fungsi keanggotaan Generalized Bell sangat berguna ketika perlu untuk menangkap perilaku yang sangat spesifik dari variabel atau ketika respon sistem harus sangat sensitif terhadap perubahan pada input. Kombinasi antara parameter a, b, dan c memungkinkan pembentuk aturan fuzzy yang sangat kustomisasi, yang dapat menghasilkan sistem kontrol atau inferensi yang presisi dan responsif.

#### 2.4.2. Fungsi Inferensi Fuzzy

Proses inferensi fuzzy dimulai dengan fuzzifikasi input, di mana nilai crisp (tegas) dikonversi menjadi nilai fuzzy melalui fungsi keanggotaan. Setelah nilai fuzzy diperoleh, aturan-aturan fuzzy yang telah ditetapkan digunakan untuk menghasilkan output fuzzy yang sesuai. Dalam metode Fuzzy Sugeno, setiap aturan memiliki bentuk:

$$\text{Jika } x \text{ adalah } A \text{ dan } y \text{ adalah } B, \text{ maka } z = f(x, y)$$

Dimana A dan B adalah label dari himpunan fuzzy yang didefinisikan oleh fungsi keanggotaan mereka pada variabel input x dan y, dan f(x, y) adalah fungsi output, yang seringkali merupakan fungsi linear atau nilai konstan. Fungsi output f(x, y) dalam metode Sugeno biasanya adalah fungsi linear seperti:

$$f(x, y) = p * x + q * y + r$$

Di mana p, q, dan r adalah koefisien yang ditentukan berdasarkan data atau pengetahuan pakar. Jika output adalah konstan, fungsi f(x, y) akan sederhana:

$$f(x, y) = c$$

Dimana c adalah nilai konstan yang ditentukan oleh aturan tersebut.

#### 2.4.3. Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi yang dijalankan setelah agregasi aturan dalam metode Fuzzy Sugeno mengambil nilai-nilai crisp yang dihasilkan oleh setiap aturan dan mengombinasikannya untuk menghasilkan satu nilai keluaran tegas akhir. Langkah ini adalah langkah terakhir dalam inferensi fuzzy dan berfungsi untuk mengkonversi nilai fuzzy yang dihasilkan dari proses agregasi menjadi nilai numerik yang tegas, yang dapat dengan mudah diinterpretasikan dan diaplikasikan dalam pengambilan keputusan atau aksi kontrol. Proses agregasi aturan dalam inferensi fuzzy adalah

tahap dimana output dari setiap aturan fuzzy individu digabungkan untuk membentuk satu output fuzzy keseluruhan. Ini merupakan langkah penting yang memungkinkan sistem untuk mempertimbangkan semua aturan yang berlaku sebelum menghasilkan keputusan akhir atau output. Berikut ini adalah penjelasan lebih lanjut mengenai proses ini, khususnya dalam konteks metode Fuzzy Sugeno. Rumus agregasi untuk metode Sugeno biasanya adalah rata-rata tertimbang dari output aturan:

$$Output\ Agregat = (\sum (Bobot\ Aturan\ i * Output\ Aturan\ i)) / \sum Bobot\ Aturan\ i$$

Dimana Bobot Aturan  $i$  adalah tingkat kebenaran dari premis aturan ke- $i$ , dan Output Aturan  $i$  adalah output yang dihasilkan oleh aturan ke- $i$ . Dalam metode Sugeno, langkah agregasi seringkali diikuti langsung oleh defuzzifikasi, karena output dari aturan adalah nilai crisp yang telah tertimbang. Oleh karena itu, output agregat sudah berupa nilai crisp, yang memudahkan proses defuzzifikasi. Proses agregasi aturan dalam metode Fuzzy Sugeno adalah elemen kunci yang memungkinkan sistem logika fuzzy untuk menghasilkan output yang berdasarkan pada berbagai aturan dan kondisi input, menghasilkan sistem yang fleksibel dan dapat menangani kekompleksan dari dunia nyata dengan efektif. Dalam metode Fuzzy Sugeno, agregasi aturan dilakukan menggunakan pendekatan rata-rata tertimbang atau "weighted average". Ini adalah metode untuk menggabungkan output dari berbagai aturan fuzzy menjadi satu nilai skalar yang akan menjadi output akhir dari sistem.

Rumus untuk menghitung weighted average dalam konteks agregasi aturan Fuzzy Sugeno adalah sebagai berikut:

$$Output\ Akhir = \frac{\sum_{i=1}^n (Bobot\ Aturan_i \cdot Output\ Aturan_i)}{\sum_{i=1}^n Bobot\ Aturan_i}$$

dimana,

- $Bobot\ Aturan_i$  adalah bobot atau tingkat kebenaran dari aturan ke- $i$ , yang dihitung dari evaluasi kondisi fuzzy.
- $Output\ Aturan_i$  adalah output yang dihasilkan oleh aturan ke- $i$ .
- $n$  adalah jumlah total aturan yang berkontribusi pada proses inferensi.

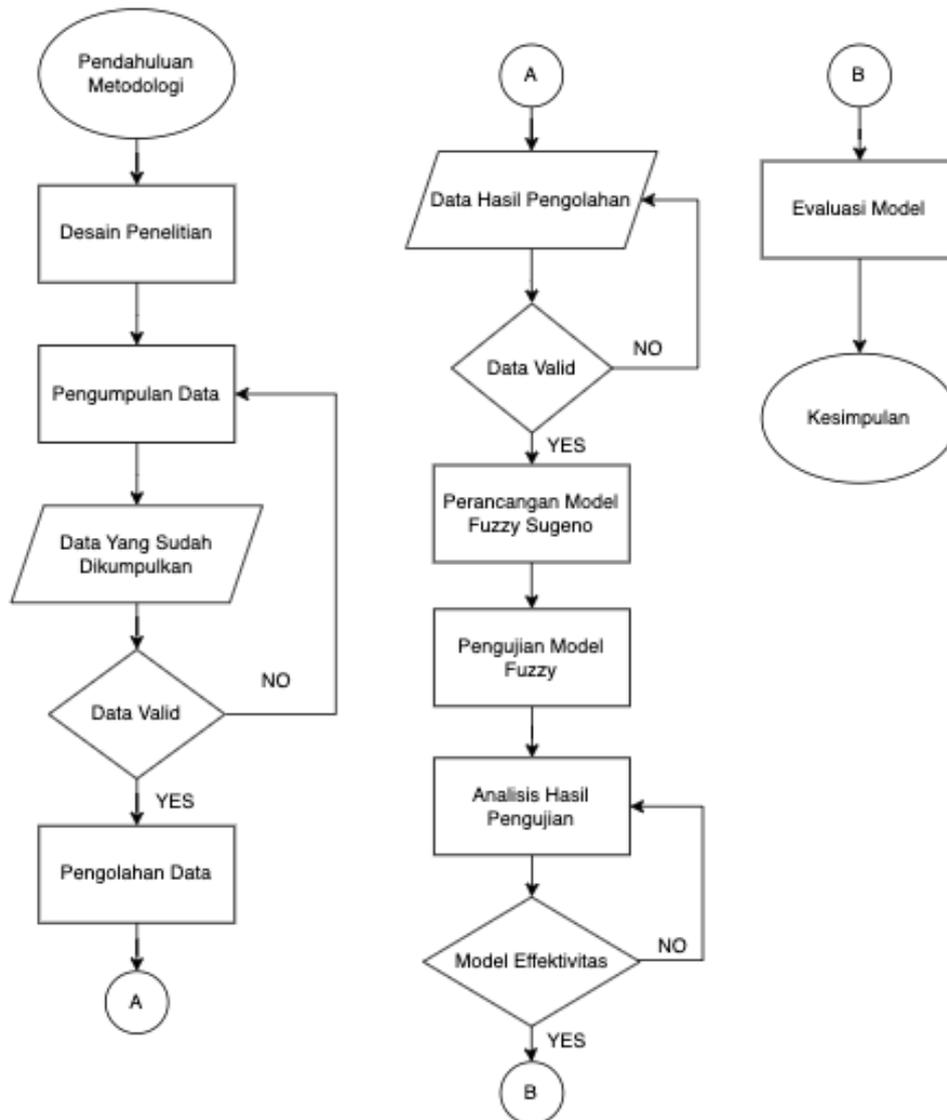
Karena dalam metode Sugeno, output dari aturan biasanya sudah dalam bentuk nilai crisp, proses agregasi dan defuzzifikasi ini dapat dilakukan hampir bersamaan, dengan output akhir yang dihasilkan langsung siap untuk digunakan sebagai

keputusan akhir sistem. Metode ini efektif dan efisien, terutama dalam kasus di mana sistem harus cepat dalam merespons dan mengambil tindakan berdasarkan kondisi yang dinamis dan sering berubah. Dengan demikian, dalam aplikasi praktis, metode Fuzzy Sugeno menyediakan kerangka kerja yang kuat untuk menggabungkan logika yang berbasis pada aturan dengan kemampuan untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas, menghasilkan sistem yang mampu memodelkan perilaku manusia dan memproses informasi dengan cara yang mirip dengan proses berpikir manusia.



### BAB III METHODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini, kita akan menyelami lebih dalam tentang rancangan metodologi yang digunakan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan penelitian yang telah diuraikan pada Bab I. Metode Fuzzy Sugeno akan menjadi pilar utama dalam analisis ini, memungkinkan kita untuk meramalkan dan memahami pengaruh variabel bahan bakar terhadap emisi karbonkapal.



**Gambar 3.1 FlowChart Penelitian**

Membuat flowchart untuk metodologi penelitian dapat membantu memvisualisasikan langkah demi langkah proses penelitian yang akan dilakukan. Berikut

adalah deskripsi langkah-langkah yang bisa dijadikan dasar untuk membuat flowchart berdasarkan metodologi yang telah disusun:

**1. Desain Penelitian:**

- Menentukan pendekatan kuantitatif dengan fokus pada variabel tertentu dari data operasional kapal.

**2. Pengumpulan Data:**

- Mengumpulkan data historis operasional kapal dan data eksperimental dari pengujian laboratorium.

**3. Pengolahan Data:**

- Membersihkan data dari outlier dan kesalahan.
- Normalisasi data untuk konsistensi.

**5. Pembangunan Model Fuzzy Sugeno:**

- Melakukan fuzzifikasi input.
- Membentuk aturan fuzzy.
- Melakukan proses inferensi.
- Defuzzifikasi output fuzzy menjadi nilai tegas.

**6. Pengujian Model:**

- Mengujikan model terhadap data yang tidak termasuk dalam pembangunan model (data uji) untuk evaluasi.

**7. Analisis Hasil:**

- Menganalisis hasil pengujian model.
- Membandingkan hasil prediksi dengan data aktual.

**8. Evaluasi dan Penyempurnaan Model:**

- Menilai efektivitas model.
- Melakukan penyempurnaan jika diperlukan.

**9. Kesimpulan Metodologi:**

- Menarik kesimpulan dari hasil analisis dan pengujian model.

Setiap langkah ini akan diwakili oleh sebuah simbol dalam flowchart dengan panah yang mengarah dari satu langkah ke langkah berikutnya untuk menunjukkan alur proses penelitian. Penelitian ini akan mengadopsi pendekatan kuantitatif dengan menggunakan data operasional kapal yang telah terkumpul. Data ini meliputi kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air yang terdapat dalam bahan bakar kapal. Data yang

akan digunakan dalam analisis ini berasal dari dua sumber utama: data historis operasional kapal dan data eksperimental yang diperoleh melalui pengujian laboratorium. Data historis akan memberikan wawasan tentang pola konsumsi bahan bakar dan emisi sebelumnya, sementara data eksperimental akan digunakan untuk menguji dan mengkalibrasi model Fuzzy Sugeno. Sebelum dilakukan analisis, data akan dibersihkan dari outlier dan kesalahan pengukuran. Selanjutnya, normalisasi data akan dilakukan untuk memastikan bahwa model Fuzzy Sugeno dapat bekerja dengan data yang konsisten. Model Fuzzy Sugeno akan dibangun berdasarkan data yang telah diproses. Langkah-langkah dalam pembangunan model ini mencakup:



**Gambar 3.2 Model Fuzzifikasi**

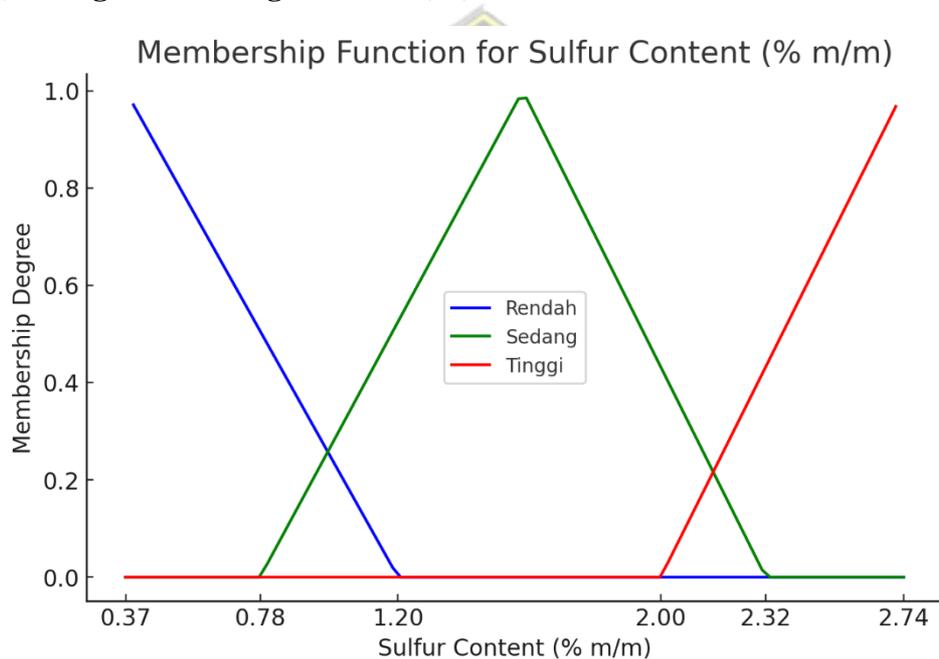
- Fuzzifikasi Input: Mengubah data input menjadi nilai fuzzy.
- Pembentukan Aturan Fuzzy: Mengembangkan aturan-aturan berdasarkan logika fuzzy yang akan mengatur bagaimana input dikonversi menjadi output.
- Inferensi: Menggunakan aturan-aturan fuzzy untuk menghasilkan output fuzzy berdasarkan input yang diberikan.
- Defuzzifikasi: Mengkonversi output fuzzy menjadi nilai tegas untuk membuat prediksi yang dapat diinterpretasikan.

Setelah model dibangun, pengujian akan dilakukan untuk mengevaluasi keakuratan dan efektivitasnya dalam memprediksi emisi karbonkapal. Pengujian ini akan melibatkan perbandingan antara hasil prediksi model dengan data emisi yang sebenarnya. Hasil pengujian model akan dianalisis untuk menentukan seberapa baik model Fuzzy Sugeno dalam memprediksi emisi karbonkapal. Analisis ini akan

mencakup evaluasi dari error prediksi, seperti mean squared error (MSE) dan mean absolute percentage error (MAPE). Berdasarkan hasil analisis, model akan dievaluasi dan disempurnakan untuk meningkatkan keakuratan prediksi. Penyempurnaan ini dapat meliputi penyesuaian pada fungsi keanggotaan, aturan fuzzy, atau proses defuzzifikasi. Metodologi yang dijelaskan di atas dirancang untuk memastikan bahwa penelitian ini dapat menghasilkan prediksi yang akurat dan bermanfaat untuk industri maritim. Dengan memahami pengaruh variabel kualitas bahan bakar terhadap emisi, kita dapat bergerak menuju pengoperasian kapal yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

### 3.1. Derajat Keanggotaan Input

#### a) Tingkat kandungan Sulfur (%)



**Gambar 3.3.** Grafik *Membership Function* Kandungan Sulfur

Dalam konteks sistem fuzzy, derajat keanggotaan menggambarkan tingkat asosiasi sebuah nilai input dengan set kategori linguistik yang telah ditetapkan. Untuk variabel "Tingkat kandungan Sulfur (%)", derajat keanggotaan mengukur kesesuaian kandungan sulfur dalam bahan bakar terhadap klasifikasi fuzzy yang ditentukan—yakni, rendah, sedang, dan tinggi. Mengacu pada praktik standar dalam pengaturan fuzzy, range untuk tingkat kandungan sulfur dapat didefinisikan sebagai berikut:

- Kategori Rendah mencakup kandungan sulfur antara 0.01 hingga 1.2% m/m, dengan pusat keanggotaan di 0.37% m/m. Kandungan sulfur yang rendah

menunjukkan bahan dengan kadar sulfur minimal, yang di industri bahan bakar dan minyak bumi sering dikaitkan dengan kualitas yang lebih baik karena menghasilkan emisi lebih bersih dan mengurangi polusi udara. Bahan bakar dengan sulfur rendah sangat diinginkan karena dapat mengurangi pembentukan gas sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) yang menyebabkan hujan asam. Dalam fungsi keanggotaan fuzzy, nilai sulfur  $\leq 0.01\%$  tidak termasuk dalam kategori ini, sedangkan sulfur antara  $0.01\%$  dan  $0.37\%$  memiliki keanggotaan yang meningkat hingga mencapai 1 pada  $0.37\%$ , kemudian berkurang kembali hingga 0 pada  $1.2\%$ , menunjukkan transisi ke kategori sedang. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk kategori rendah didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_{\text{rendah}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.01 \\ \frac{1.2-x}{1.2-0.37}, & 0.37 < x \leq 1.2 \\ 0, & x \geq 1.2 \end{cases} \quad (1)$$

- Kategori Sedang mencakup kandungan sulfur dalam rentang  $0.78$  hingga  $2.32\%$  m/m, dengan pusat di  $1.58\%$  m/m. Kandungan sulfur dalam kisaran ini masih tergolong cukup signifikan tetapi belum mencapai tingkat tinggi. Dalam industri, sulfur dalam jumlah sedang ditemukan pada bahan bakar yang masih dapat digunakan tanpa pemrosesan tambahan yang kompleks, namun tetap memerlukan pengendalian karena dapat berkontribusi terhadap polusi. Pada fungsi keanggotaan fuzzy, sulfur  $\leq 0.78\%$  memiliki keanggotaan nol dalam kategori ini, kemudian meningkat hingga 1 pada  $1.58\%$ , dan menurun kembali menjadi 0 pada  $2.32\%$ , di mana kandungan sulfur mulai masuk ke kategori tinggi. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk kategori sedang didefinisikan sebagai berikut:

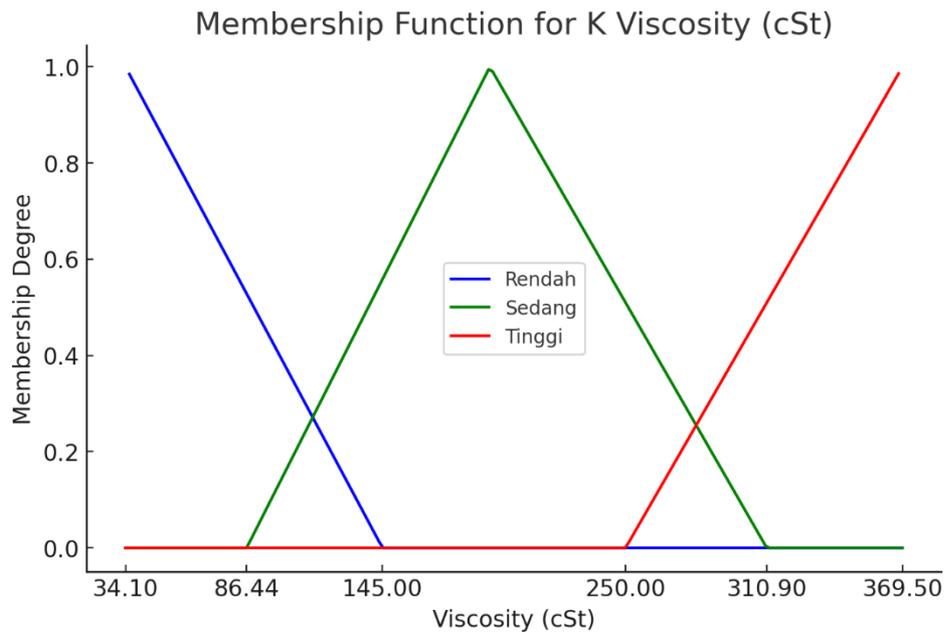
$$\mu_{\text{sedang}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.78 \\ \frac{x-0.78}{1.58-0.78}, & 0.78 < x < 1.58 \\ 1, & x = 1.58 \\ \frac{2.32-x}{2.32-1.58}, & 1.58 < x \leq 2.32 \\ 0, & x \geq 2.32 \end{cases} \quad (2)$$

- Kategori Tinggi mencakup kandungan sulfur antara 2.0 hingga 4.0% m/m, dengan pusat di 2.74% m/m. Bahan dengan kandungan sulfur tinggi sering kali memerlukan pemrosesan lebih lanjut sebelum digunakan karena dapat menyebabkan masalah teknis seperti korosi pada peralatan dan pencemaran lingkungan. Dalam industri minyak, minyak mentah dengan kandungan sulfur tinggi dikenal sebagai "sour crude oil", yang memerlukan pengolahan tambahan untuk menghilangkan sulfur sebelum dapat digunakan sebagai bahan bakar. Pada fungsi keanggotaan fuzzy, sulfur  $\leq 2.0\%$  tidak masuk dalam kategori ini, tetapi ketika kadar sulfur meningkat dari 2.0% ke 2.74%, derajat keanggotaan naik hingga mencapai 1. Setelah 2.74%, keanggotaan mulai menurun hingga mencapai 0 pada 4.0%, yang menunjukkan bahwa kadar sulfur sangat tinggi dan mungkin melebihi batas yang dapat diterima dalam banyak aplikasi industri. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk kategori tinggi didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_{tinggi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 2.0 \\ \frac{x-2.0}{2.74-2.0}, & 2.0 < x \leq 2.74 \end{cases} \quad (3)$$

Nilai-nilai spesifik ini dipilih berdasarkan pengetahuan industri dan batasan yang ditetapkan oleh regulasi atau standar emisi yang relevan. Pada visualisasi fungsi keanggotaan, nilai kandungan sulfur akan ditampilkan pada sumbu horizontal, sedangkan derajat keanggotaan masing-masing kategori akan diwakili pada sumbu vertikal. Grafik ini akan menunjukkan relasi antara kandungan sulfur dan kategori keanggotaan yang sesuai.

#### b) Viskositas Bahan Bakar



**Gambar 3.4.** Grafik *Membership Function* Viskositas

Untuk variabel "Viskositas Bahan Bakar," yang biasanya diukur dalam centiStokes (cSt), derajat keanggotaan pada fungsi fuzzy menentukan relasi antara nilai viskositas aktual dan kategori kualitatif yang didefinisikan. Grafik yang diberikan menampilkan tiga kategori keanggotaan:

- Kategori Rendah mencakup viskositas dalam rentang 11.5 hingga 145 cSt, dengan pusat keanggotaan di 34.1 cSt. Bahan bakar dengan viskositas rendah memiliki sifat yang lebih encer, sehingga lebih mudah mengalir dalam sistem bahan bakar. Hal ini umumnya diinginkan dalam aplikasi mesin yang membutuhkan pembakaran yang lebih efisien dan distribusi bahan bakar yang lebih merata. Viskositas yang terlalu rendah dapat menyebabkan masalah seperti keausan berlebih pada komponen mesin karena pelumasan yang tidak mencukupi. Dalam fungsi keanggotaan fuzzy, viskositas  $\leq 11.5$  cSt tidak termasuk dalam kategori ini, sementara viskositas antara 11.5 dan 34.1 cSt memiliki derajat keanggotaan yang meningkat hingga mencapai 1 di 34.1 cSt, lalu berkurang kembali hingga 0 di 145 cSt, menandakan peralihan ke kategori sedang. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk kategori rendah didefinisikan sebagai:

$$\mu_{rendah}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 11.5 \\ \frac{145 - x}{145 - 34.1}, & 34.1 < x \leq 145 \\ 0, & x \geq 145 \end{cases}$$

(4)

- Kategori Sedang memiliki rentang viskositas 86.44 hingga 310.9 cSt, dengan pusat keanggotaan di 191.4 cSt. Bahan bakar dengan viskositas sedang memiliki keseimbangan antara kemampuan aliran dan sifat pelumasan yang cukup. Jenis bahan bakar ini sering digunakan dalam aplikasi industri dan transportasi yang memerlukan stabilitas termal dan pelumasan yang lebih baik dibandingkan bahan bakar dengan viskositas rendah. Jika viskositas berada dalam kisaran ini, bahan bakar memiliki karakteristik yang masih dapat diterima untuk berbagai mesin, tetapi pada nilai mendekati batas atas, dapat menyebabkan peningkatan konsumsi energi akibat resistansi aliran yang lebih tinggi. Dalam fungsi keanggotaan fuzzy, viskositas  $\leq 86.44$  cSt tidak masuk kategori ini, tetapi antara 86.44 hingga 191.4 cSt, derajat keanggotaan meningkat hingga 1, kemudian menurun kembali menjadi 0 pada 310.9 cSt, di mana bahan bakar mulai masuk ke kategori tinggi. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk kategori sedang adalah:

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 86.44 \\ \frac{x - 86.44}{191.4 - 86.44}, & 86.44 < x < 191.4 \\ 1, & x = 191.4 \\ \frac{310.9 - x}{310.9 - 191.4}, & 191.4 < x \leq 310.9 \\ 0, & x \geq 310.9 \end{cases} \quad (5)$$

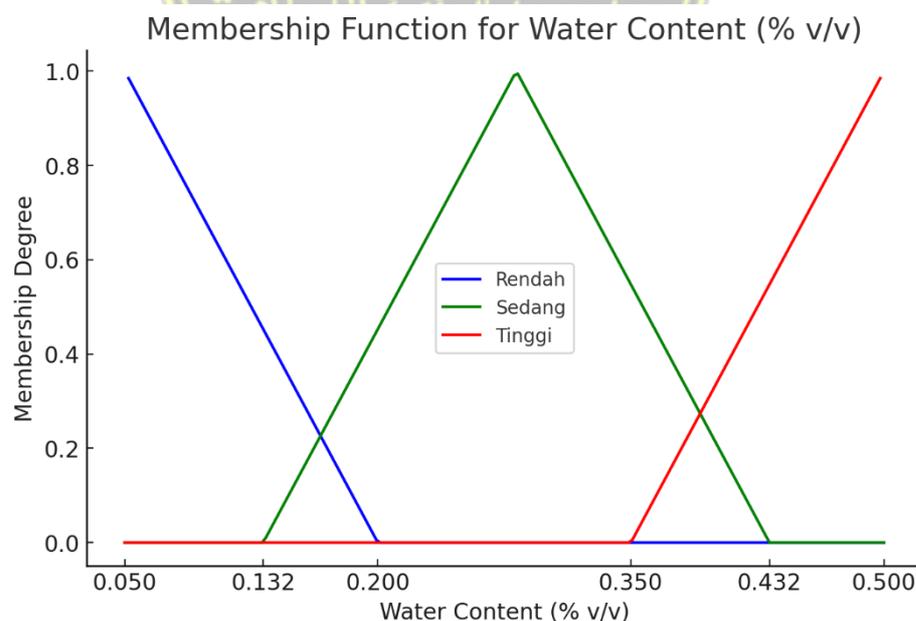
- Kategori Tinggi mencakup viskositas dalam rentang 250 hingga 448 cSt, dengan pusat keanggotaan di 369.5 cSt. Bahan bakar dengan viskositas tinggi lebih kental dan memiliki sifat pelumasan yang lebih baik, tetapi pada saat yang sama dapat menyebabkan masalah dalam distribusi bahan bakar dan efisiensi pembakaran. Bahan bakar dengan viskositas tinggi sering digunakan dalam aplikasi industri berat, seperti pembangkit listrik dan kapal laut, di mana mesin dirancang untuk menangani bahan bakar yang lebih kental.

Namun, viskositas yang terlalu tinggi dapat menghambat aliran bahan bakar, menyebabkan masalah penyumbatan pada sistem injeksi, serta meningkatkan konsumsi energi karena pompa bahan bakar harus bekerja lebih keras. Dalam fungsi keanggotaan fuzzy, viskositas  $\leq 250$  cSt tidak masuk kategori ini, tetapi ketika viskositas meningkat dari 250 hingga 369.5 cSt, derajat keanggotaan naik hingga 1. Setelah 369.5 cSt, keanggotaan mulai menurun hingga mencapai 0 pada 448 cSt, yang menunjukkan bahwa nilai viskositas sangat tinggi dan mungkin memerlukan pemanasan atau pengenceran sebelum digunakan dalam mesin. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk kategori tinggi adalah:

$$\mu_{tinggi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 250 \\ \frac{x-250}{369.5-250}, & 250 < x \leq 369.5 \end{cases} \quad (6)$$

Berdasarkan deskripsi ini dengan menggunakan matlab *fuzzy logic designer* untuk menentukan range yang tepat untuk setiap kategori dalam konteks fungsi keanggotaan yang ditunjukkan perlu diperhatikan bahwa terdapat tumpang tindih antara kategori, yang mencerminkan transisi yang halus antara viskositas rendah, sedang, dan tinggi dalam konteks praktik industri maritim. Tumpang tindih ini memungkinkan penggunaan logika fuzzy untuk menangani ketidakpastian dan gradasi dalam properti fisik bahan bakar.

### c) Konten Air



### Gambar 3.5. Grafik *Membership Function* Konten Air

Dalam fungsi keanggotaan untuk variabel "Konten Air" yang diukur dalam persentase (%), kita mengamati tiga kategori keanggotaan: Rendah, Sedang, dan Tinggi. Berdasarkan grafik yang disediakan:

- Kategori Rendah mencakup kadar air dalam rentang 0.01 hingga 0.2% v/v, dengan titik pusat keanggotaan di 0.05% v/v. Kadar air yang rendah dalam bahan bakar atau minyak umumnya diinginkan karena dapat menjaga kualitas bahan tersebut, mencegah korosi pada sistem perpipaan, dan mengurangi risiko pembentukan emulsi yang dapat mengganggu performa mesin atau proses industri. Fungsi keanggotaan fuzzy menunjukkan bahwa untuk kadar air  $\leq 0.01\%$  v/v, keanggotaan adalah 0, kemudian meningkat hingga 1 pada 0.05% v/v, lalu menurun kembali hingga 0 di 0.2% v/v, di mana bahan mulai masuk ke kategori sedang.

$$\mu_{rendah}(x) = \left\{ \begin{array}{l} 0, x \leq 0.01 \\ \frac{0.2-x}{0.2-0.05}, 0.05 < x \leq 0.2 \\ 0, x \geq 0.2 \end{array} \right\} \quad (7)$$

- Kategori Sedang mencakup kadar air dalam rentang 0.1321 hingga 0.4321% v/v, dengan titik pusat keanggotaan di 0.2821% v/v. Pada rentang ini, kandungan air masih dapat ditoleransi dalam beberapa aplikasi industri, tetapi bisa mulai menyebabkan permasalahan seperti penurunan efisiensi pembakaran pada bahan bakar atau perubahan sifat pelumasan pada minyak. Dalam fungsi keanggotaan fuzzy, kadar air  $\leq 0.1321\%$  v/v tidak termasuk dalam kategori ini, tetapi antara 0.1321 hingga 0.2821% v/v, derajat keanggotaan meningkat hingga 1, lalu menurun kembali menjadi 0 pada 0.4321% v/v, di mana bahan mulai masuk ke kategori tinggi.

$$\mu_{sedang}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 0.1321 \\ \frac{x-0.1321}{0.2821-0.1321}, & 0.1321 < x < 0.2821 \\ 1, & x = 0.2821 \\ \frac{0.4321-x}{0.4321-0.2821}, & 0.2821 < x \leq 0.4321 \\ 0, & x \geq 0.4321 \end{array} \right\} \quad (8)$$

- Kategori Tinggi mencakup kadar air dalam rentang 0.35 hingga 0.8% v/v, dengan titik pusat keanggotaan di 0.5% v/v. Kadar air yang tinggi dalam bahan cair umumnya sangat tidak diinginkan karena dapat menyebabkan berbagai masalah serius, seperti korosi pada tangki penyimpanan, pembentukan lumpur atau emulsi dalam sistem bahan bakar, serta penurunan kinerja mesin atau reaktor industri. Jika kadar air terlalu tinggi, bahan cair sering kali memerlukan proses pemurnian atau penghilangan air sebelum dapat digunakan. Dalam fungsi keanggotaan fuzzy, kadar air  $\leq 0.35\%$  v/v tidak masuk kategori ini, tetapi mulai masuk ketika kadar air meningkat dari 0.35 hingga 0.5% v/v, dengan derajat keanggotaan mencapai 1 pada 0.5% v/v, kemudian menurun kembali menjadi 0 pada 0.8% v/v, di mana kadar air sudah sangat tinggi dan mungkin tidak lagi dapat digunakan tanpa pemrosesan lebih lanjut.

$$\mu_{tinggi}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 0.35 \text{ atau } x \geq 0.8 \\ \frac{x-0.35}{0.5-0.35}, & 0.35 < x \leq 0.5 \end{array} \right\} \quad (9)$$

Sama seperti dengan variabel lain, ada tumpang tindih antara kategori, yang memungkinkan sistem fuzzy untuk mengakomodasi gradasi yang halus dalam nilai konten air dan memungkinkan interpretasi yang lebih fleksibel dan realistis terhadap data yang diperoleh.

Sebagai konklusi Bab III, telah diuraikan secara mendetail alur metodologis yang akan dipergunakan dalam penelitian ini, yang diilustrasikan melalui flowchart metodologis. Pendekatan ini mengintegrasikan penggunaan metode Fuzzy Sugeno sebagai kerangka kerja analitik untuk mengkaji dan memproyeksikan pengaruh variabel-variabel bahan bakar terhadap emisi karbonkapal. Setiap tahapan, mulai dari desain penelitian hingga evaluasi dan penyempurnaan model, telah disusun untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh tidak hanya akurat dan dapat dipercaya tetapi juga memiliki relevansi praktis yang tinggi dalam konteks industri maritim. Pembangunan model Fuzzy Sugeno, yang meliputi proses fuzzifikasi, formulasi aturan, inferensi, dan defuzzifikasi,

merupakan pusat dari analisis ini dan dirancang untuk menangkap kompleksitas fenomena yang diteliti dengan presisi yang lebih tinggi. Pengujian model yang rigor dan analisis hasil yang sistematis akan menginformasikan evaluasi kritis terhadap model, memfasilitasi peningkatan berkelanjutan atas keakuratan prediktifnya.

### 3.2. Inferenzi Fuzzy

Dalam sistem ini, proses inferensi fuzzy menggunakan metode Sugeno untuk menentukan output berupa *Micro Carbon Residue (MCR)* berdasarkan tiga input, yaitu kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan kandungan air. Setiap input dikategorikan ke dalam tiga tingkat keanggotaan fuzzy, yaitu rendah, sedang, dan tinggi, dengan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Langkah pertama dalam inferensi adalah fuzzifikasi, di mana nilai numerik dari setiap input dikonversi menjadi nilai derajat keanggotaan dalam masing-masing kategori. Setelah itu, sistem mengevaluasi aturan fuzzy dalam bentuk "IF-THEN", yang mendefinisikan hubungan antara input dan output. Setiap aturan memiliki bobot yang dihitung berdasarkan nilai keanggotaan dari input menggunakan operator fuzzy MIN (untuk AND) atau MAX (untuk OR).

Selanjutnya, nilai output dari setiap aturan tidak berbentuk himpunan fuzzy, tetapi berupa nilai numerik dalam bentuk konstanta atau persamaan linear sesuai dengan metode Sugeno. Output ini kemudian dikombinasikan menggunakan metode *weighted average*, yaitu dengan menghitung rata-rata berbobot dari semua aturan yang aktif. Dengan cara ini, sistem dapat menghasilkan nilai akhir yang mewakili tingkat *Micro Carbon Residue* berdasarkan kondisi kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan kandungan air. Metode Sugeno dipilih karena menghasilkan output yang lebih cepat dihitung dibandingkan metode Mamdani, menjadikannya lebih efisien untuk aplikasi kontrol dan pengambilan keputusan berbasis logika fuzzy.

Langkah-langkah dalam inferensi dijelaskan sebagai berikut:

#### a. Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Setiap variabel input memiliki tiga kategori fuzzy: rendah, sedang, dan tinggi. Fungsi keanggotaan biasanya berbentuk *Triangular Membership Function (Trimf)*. Secara umum, fungsi keanggotaan segitiga dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (10)$$

di mana:

a,b,c adalah parameter yang menentukan bentuk segitiga

x adalah nilai crisp input, dan

$\mu_A(x)$  adalah derajat keanggotaan.

### b. Basis Aturan Fuzzy (Fuzzy Rule Base)

Sistem fuzzy Sugeno menggunakan aturan berbentuk IF-THEN, seperti:

Contoh aturan:

IF Kandungan Sulfur rendah AND Viskositas sedang AND Kandungan Air tinggi

THEN MCR = aS + bV + cW + d

di mana a,b,c,d adalah parameter yang diperoleh melalui pemodelan atau data eksperimen. Sedangkan S adalah kandungan sulfur, V adalah viskositas bahan bakar dan W adalah kandungan air.

### c. Aktivasi Aturan (Firing Strength)

Derajat kebenaran suatu aturan dihitung dengan menggunakan operasi minimum atau produk:

Metode Minimum:

$$\alpha_i = \min(\mu_A(S), \mu_B(V), \mu_C(W)) \quad (11)$$

Metode Produk:

$$\alpha_i = \mu_A(S) \times \mu_B(V) \times \mu_C(W) \quad (12)$$

dengan  $\alpha_i$  sebagai nilai firing strength dari aturan ke-i.

### d. Output Sugeno pada Tiap Aturan

Pada model Sugeno, outputnya berupa fungsi linear terhadap input atau nilai konstanta:

$$z_i = aS + bV + cW + d \quad (13)$$

## 3.3. Defuzzifikasi

Dalam sistem ini, defuzzifikasi merupakan tahap akhir dari proses inferensi fuzzy yang mengubah hasil dari sistem fuzzy menjadi nilai numerik yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan. Sistem ini menggunakan metode Sugeno, di mana output dari setiap aturan fuzzy berupa nilai numerik, bukan himpunan fuzzy seperti pada metode Mamdani. Proses ini dimulai setelah tahap inferensi, di mana nilai derajat keanggotaan dari tiga input utama, yaitu kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan kandungan air, telah dihitung berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan sebelumnya. Setiap input diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu rendah, sedang, dan tinggi, sehingga memungkinkan adanya kombinasi aturan yang mencakup berbagai kondisi input.

Setiap aturan fuzzy dalam sistem ini memiliki bentuk "IF-THEN", misalnya: "Jika kandungan sulfur rendah, viskositas bahan bakar sedang, dan kandungan air tinggi, maka Micro Carbon Residue sedang." Output dalam metode Sugeno direpresentasikan sebagai konstanta atau persamaan linier yang diperoleh dari aturan yang aktif. Setelah mendapatkan hasil inferensi dari semua aturan yang berlaku, langkah selanjutnya adalah menggabungkan hasil tersebut menjadi satu nilai numerik menggunakan metode Weighted Average (Rata-rata Tertimbang). Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan rumus:

$$Z = \frac{\sum(\alpha_i \cdot z_i)}{\alpha_i} \quad (14)$$

di mana:

$\alpha_i$  adalah firing strength dari aturan ke- $i$

$z_i$  adalah nilai output yang diberikan oleh aturan ke- $i$

Karena metode Sugeno menggunakan nilai numerik sebagai output, proses defuzzifikasi dalam sistem ini lebih sederhana dan lebih cepat dibandingkan metode Mamdani, yang memerlukan proses pencarian titik pusat dari kurva hasil agregasi. Dalam konteks sistem ini, nilai akhir dari *Micro Carbon Residue (MCR)* akan bergantung pada tingkat kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan kandungan air, di mana kandungan sulfur yang tinggi, viskositas bahan bakar yang tinggi, dan kandungan air yang tinggi cenderung meningkatkan nilai MCR, yang dapat berdampak negatif terhadap performa bahan bakar. Sebaliknya, kombinasi nilai input yang lebih rendah dapat menghasilkan nilai MCR yang lebih rendah, yang umumnya

lebih diinginkan dalam penggunaan bahan bakar yang lebih bersih dan efisien. Dengan demikian, defuzzifikasi dalam sistem ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih akurat dan terstruktur berdasarkan data yang diinputkan, sehingga membantu dalam pengelolaan kualitas bahan bakar secara optimal.



## **BAB IV**

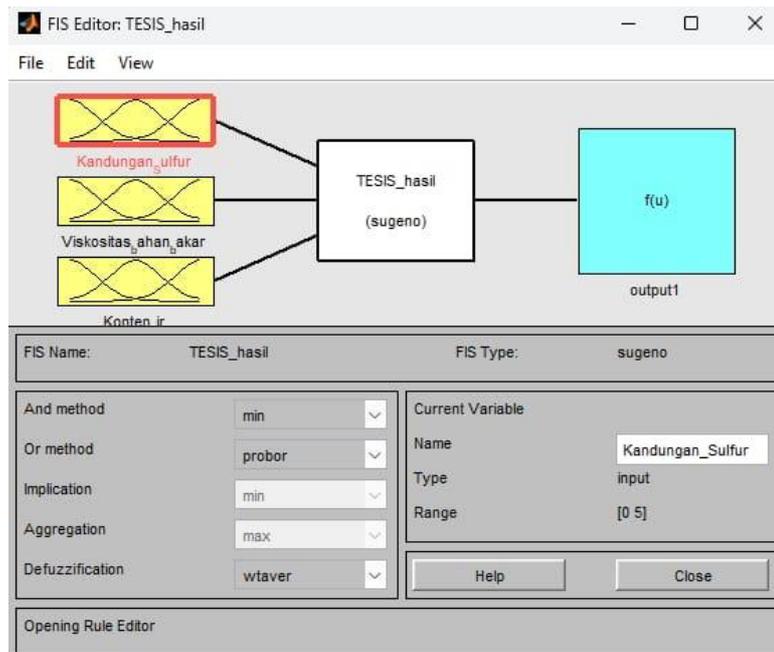
### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Hasil**

Pada subbab ini, akan disajikan hasil dari penelitian yang dilakukan berdasarkan pengukuran dan simulasi yang melibatkan tiga variabel utama, yaitu kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air, serta dampaknya terhadap emisi karbon. Hasil yang diperoleh dipresentasikan dalam bentuk tabel dan grafik yang menggambarkan hubungan antara masing-masing variabel input dan output emisi karbon yang diukur, serta hasil prediksi yang dihasilkan melalui metode Fuzzy Sugeno. Penelitian ini menggunakan data dari bahan bakar kapal dengan variasi kandungan sulfur, viskositas, dan konten air yang diolah melalui sistem purifikasi. Pengukuran emisi karbon dilakukan dengan mengikuti standar internasional yang ditetapkan oleh International Maritime Organization (IMO). Selain itu, prediksi emisi karbon dilakukan menggunakan metode Fuzzy Sugeno untuk mengetahui akurasi model dalam memperkirakan emisi karbon berdasarkan variabel yang ada. Pada bagian ini, hasil yang diperoleh dari penelitian meliputi:

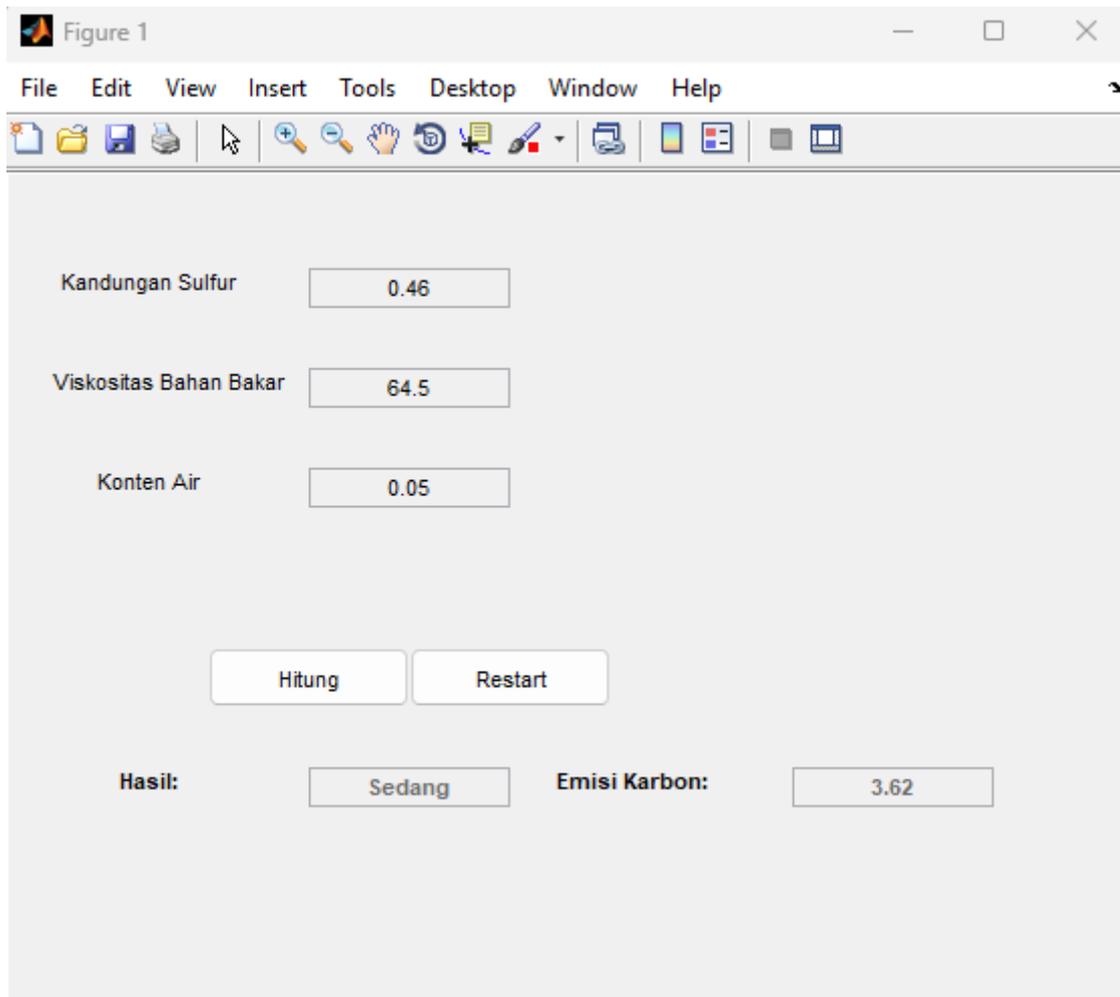
- a. Deskripsi variabel input, seperti kandungan sulfur, viskositas, dan konten air.
- b. Nilai emisi karbon yang diukur dari bahan bakar dengan berbagai komposisi.
- c. Hasil prediksi emisi karbon dari sistem Fuzzy Sugeno yang dibandingkan dengan data aktual.

Pengujian terhadap variabel input—kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air—telah dilakukan menggunakan pendekatan simulasi berbasis metode Fuzzy Logic di MATLAB. Pendekatan ini digunakan karena metode Fuzzy Logic dapat menangani ketidakpastian dan hubungan non-linear yang kompleks antara variabel input dan output, yaitu emisi karbon.



**Gambar 4.1** Simulasi pengujian Data menggunakan Fuzzy Logic Designer matlab

Dengan menggunakan MATLAB Fuzzy Logic Designer, setiap variabel input dikategorikan dalam rentang rendah, sedang, dan tinggi, dan hasil simulasi memetakan bagaimana perubahan pada masing-masing variabel mempengaruhi tingkat emisi karbon yang dihasilkan. Simulasi ini memungkinkan prediksi yang lebih akurat dan lebih mudah dimengerti dibandingkan dengan metode analisis konvensional, karena sistem fuzzy dapat mengadaptasi model sesuai dengan perubahan kecil dalam variabel. Hasil dari simulasi ini memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai hubungan antara input bahan bakar dan output emisi karbon, serta memberikan wawasan tentang bagaimana kontrol terhadap kualitas bahan bakar dapat membantu mengurangi emisi yang dihasilkan.



**Gambar 4.2** Ujicoba menggunakan Program Matlab

Dengan menggunakan MATLAB Fuzzy Logic Designer, proses pemrograman dilakukan untuk mengkategorikan variabel input seperti kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air dalam tiga rentang utama, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Dalam tahap pemrograman ini, MATLAB digunakan untuk membangun sistem fuzzy yang dapat mengolah dan memetakan variabel input tersebut terhadap output berupa emisi karbon. Melalui antarmuka Fuzzy Logic Designer, setiap variabel dikonfigurasi dengan himpunan fuzzy dan aturan-aturan yang mewakili hubungan antara input dan output. Pemrograman dilakukan dengan mendefinisikan fungsi keanggotaan (membership functions) untuk setiap variabel input, yang selanjutnya digunakan dalam simulasi untuk mengevaluasi efek perubahan variabel input terhadap keluaran emisi karbon. Simulasi ini memungkinkan prediksi yang lebih akurat karena sistem fuzzy yang dirancang dalam MATLAB mampu menyesuaikan dan memodelkan hubungan non-linear yang rumit antara variabel input dan output. Keunggulan pemrograman dengan MATLAB dalam konteks ini terletak pada sensitivitas dalam mengubah dan

memodifikasi parameter input, serta kemampuan untuk memvisualisasikan hasil simulasi dalam bentuk grafik yang mudah dipahami. Sebagai contoh, ketika kandungan sulfur atau viskositas bahan bakar meningkat, program secara otomatis memperhitungkan bagaimana kombinasi variabel tersebut akan mempengaruhi emisi karbon yang dihasilkan.

MATLAB juga menyediakan alat untuk melakukan iterasi simulasi secara otomatis, yang memungkinkan pengujian berbagai skenario berdasarkan perubahan kecil dalam variabel. Hal ini sangat penting untuk memberikan gambaran yang lebih detail tentang bagaimana variabel-variabel ini berinteraksi dalam sistem nyata, serta menyediakan landasan ilmiah untuk pengambilan keputusan terkait pengelolaan emisi. Gambar 4.2 menunjukkan hasil dari uji coba menggunakan program MATLAB, di mana hasil simulasi memberikan gambaran visual mengenai hubungan antara variabel input dan output, memudahkan analisis lebih lanjut untuk mengoptimalkan proses dan mengurangi emisi karbon.

#### **4.1.1 Pembentukan Himpunan Fuzzy (Fuzzifikasi)**

Aturan-aturan fuzzy terdiri dari premis dan konklusi. Premis adalah bagian dari aturan yang mendefinisikan kondisi-kondisi yang harus dipenuhi berdasarkan variabel input, seperti K Viscosity pada 50°C (cSt), Kandungan Air (% v/v), dan Kandungan Sulfur (% m/m). Konklusi adalah bagian dari aturan yang menentukan tindakan atau hasil yang akan diambil, yaitu Micro Carbon Residue (% m/m), jika kondisi-kondisi tersebut terpenuhi. Aturan-aturan fuzzy ini dapat dirancang secara manual atau dengan bantuan algoritma tertentu yang tersedia pada perangkat lunak simulasi, seperti Matlab. Matlab adalah aplikasi yang sering digunakan untuk simulasi sistem kontrol berbasis logika fuzzy. Setelah aturan-aturan fuzzy dibuat, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi menggunakan Matlab. Dalam simulasi ini, aturan-aturan fuzzy yang telah dibuat akan diimplementasikan dalam sistem kontrol dengan memanfaatkan fungsi-fungsi fuzzy yang tersedia pada Matlab. Dengan aturan-aturan tersebut, kita dapat memprediksi nilai output Micro Carbon Residue berdasarkan kondisi variabel input yang ada. Setelah memasukkan aturan-aturan tersebut ke dalam Matlab Fuzzy Logic Designer dengan sejumlah aturan yang sesuai dengan data yang diperoleh, dilakukan pengujian untuk memastikan aturan tersebut bekerja dengan baik dan sesuai yang diharapkan. Hasil dari aturan-aturan fuzzy yang telah dirancang dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 4.1** Tabel Semesta Pembicaraan dari semua variabel

Fungsi	Nama Variabel	Semesta Pembicaraan
Input	K Viscosity pada 50°C (cSt)	(34.1 – 369.5)
	Kandungan Air (% v/v)	(0.05 – 0.5)
	Kandungan Sulfur (% m/m)	(0.37 – 2.74)
Output	Micro Carbon Residue (% m/m)	(2.36 – 12.79)

Dalam sistem fuzzy ini, terdapat empat variabel utama yang digunakan: tiga variabel input yaitu K Viscosity pada 50°C (cSt), Kandungan Air (% v/v), dan Kandungan Sulfur (% m/m), serta satu variabel output yaitu Micro Carbon Residue (% m/m). Masing-masing variabel ini memiliki semesta pembicaraan yang menunjukkan rentang nilai yang diambil berdasarkan data yang ada. Tabel Semesta Pembicaraan berikut menampilkan rentang nilai setiap variabel:

- K Viscosity pada 50°C (cSt) memiliki rentang nilai dari 34.1 hingga 369.5, yang mewakili nilai kekentalan cairan pada suhu 50°C.
- Kandungan Air (% v/v) memiliki rentang nilai dari 0.05 hingga 0.5, yang menggambarkan persentase volume air dalam sampel.
- Kandungan Sulfur (% m/m) memiliki rentang nilai dari 0.37 hingga 2.74, yang menunjukkan kadar sulfur dalam sampel.
- Micro Carbon Residue (% m/m) sebagai output memiliki rentang nilai dari 2.36 hingga 12.79, yang merupakan ukuran residu karbon dalam sampel.

**Tabel 4.2** Tabel Domain Fuzzy untuk tiap variabel

Fungsi	Nama Variabel	Semesta Pembicaraan	Domain Fuzzy
Input	K Viscosity pada 50°C (cSt)	(34.1 – 369.5)	Rendah (34.1 – 145), Sedang (86.44 – 310.9), Tinggi (250 – 369.5)
	Kandungan Air (% v/v)	(0.05 – 0.5)	Rendah (0.05 – 0.2), Sedang (0.1321 – 0.4321), Tinggi (0.35 – 0.5)
	Kandungan Sulfur (% m/m)	(0.37 – 2.74)	Rendah (0.37 – 1.2), Sedang (0.78 – 2.32), Tinggi (2.0 – 2.74)

Output	Micro Carbon Residue (% m/m)	(2.36 – 12.79)	Rendah (2.36 – 5), Sedang (5 – 8), Tinggi (8 – 12.79)
--------	------------------------------	----------------	---

Selanjutnya, Tabel Domain membagi setiap variabel ke dalam tiga kategori atau tingkat keanggotaan fuzzy: rendah, sedang, dan tinggi. Pembagian ini memungkinkan sistem untuk mengelompokkan nilai variabel dengan lebih terperinci, sebagai berikut:

- Variabel Viscosity pada 50°C (cSt):

⇒ Rendah: nilai dari 34.1 hingga 145

⇒ Sedang: nilai dari 86.44 hingga 310.9

⇒ Tinggi: nilai dari 250 hingga 369.5

- Variabel Kandungan Air (% v/v):

⇒ Rendah: nilai dari 0.05 hingga 0.2

⇒ Sedang: nilai dari 0.1321 hingga 0.4321

⇒ Tinggi: nilai dari 0.35 hingga 0.5

- Variabel Kandungan Sulfur (% m/m):

⇒ Rendah: nilai dari 0.37 hingga 1.2

⇒ Sedang: nilai dari 0.78 hingga 2.32

⇒ Tinggi: nilai dari 2.0 hingga 2.74

- Variabel output Micro Carbon Residue (% m/m):

⇒ Rendah: nilai dari 2.36 hingga 5

⇒ Sedang: nilai dari 5 hingga 8

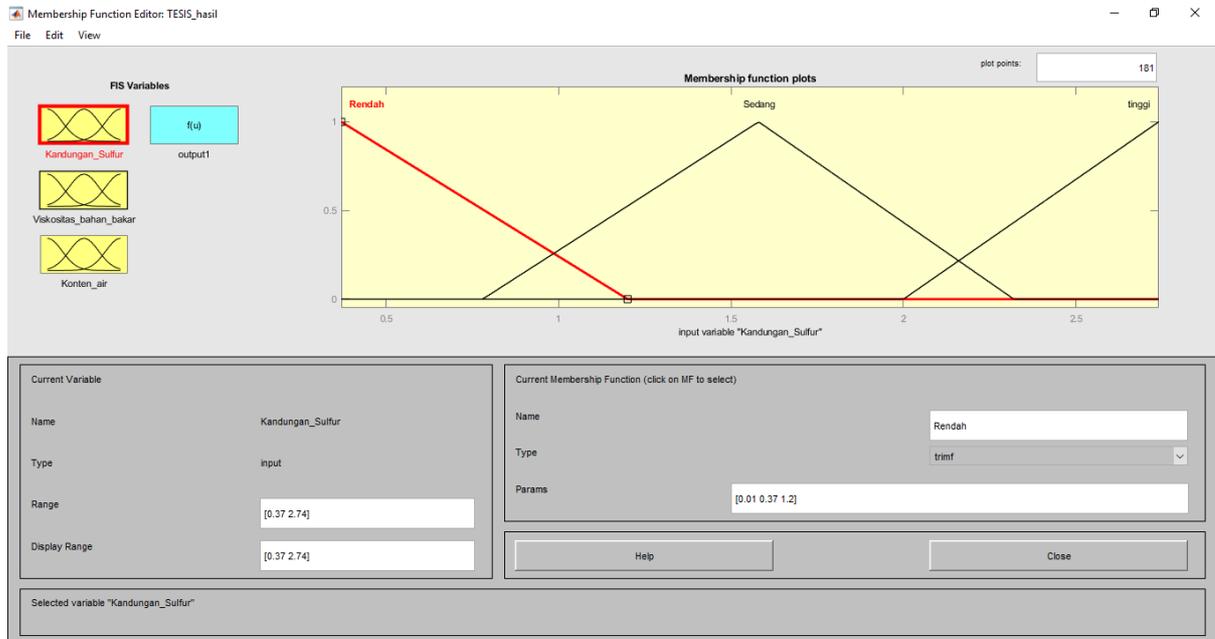
⇒ Tinggi: nilai dari 8 hingga 12.79

Pembagian domain ini dirancang agar sistem fuzzy dapat mengenali kondisi input dalam kategori tertentu (rendah, sedang, tinggi) dan menghasilkan keputusan atau prediksi yang sesuai pada output Micro Carbon Residue. Dengan menggunakan aturan-aturan fuzzy

yang dibuat berdasarkan kategori ini, sistem dapat mengoptimalkan pengambilan keputusan dan meningkatkan ketepatan prediksi hasil.

#### 4.1.2 Analisis Data Himpunan Variabel

##### a. Kandungan Sulfur (%):



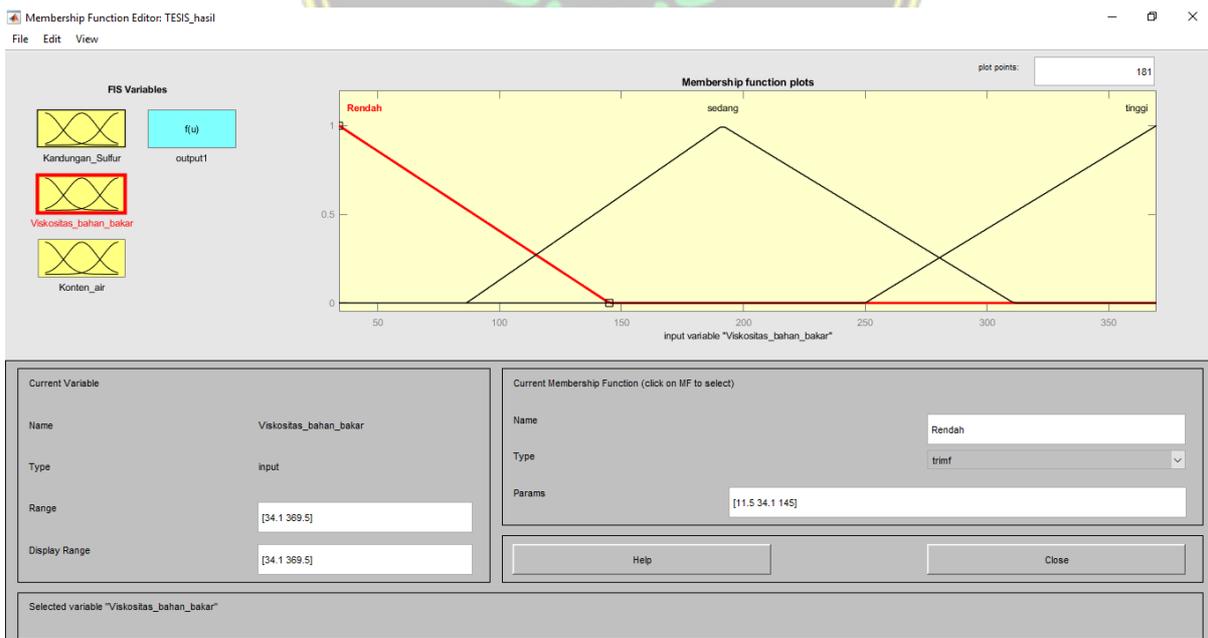
**Gambar 4.3** Membership Function Kandungan Sulfur

- Keanggotaan Rendah: Kategori rendah mencakup kandungan sulfur dalam rentang 0.01 hingga 1.2% m/m, dengan titik pusat keanggotaan pada 0.37% m/m. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk kategori ini memiliki nilai 0 ketika kandungan sulfur berada di bawah 0.01%, kemudian meningkat secara linear hingga mencapai 1 pada 0.37%. Setelah itu, keanggotaan mulai menurun hingga mencapai 0 di 1.2%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai sulfur 0.37% sepenuhnya dianggap sebagai kategori rendah, sedangkan nilai mendekati 1.2% dapat memiliki keanggotaan sebagian dalam kategori rendah dan sedang.
- Keanggotaan Sedang: Kategori sedang mencakup rentang 0.7799 hingga 2.32% m/m, dengan titik pusat keanggotaan pada 1.58% m/m. Untuk kandungan sulfur di bawah 0.7799%, nilai keanggotaan dalam kategori ini adalah 0. Namun, ketika sulfur

meningkat antara 0.7799% hingga 1.58%, keanggotaan naik secara linear hingga mencapai 1 pada 1.58%. Setelah itu, keanggotaan mulai menurun secara bertahap hingga mencapai 0 di 2.32%. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan sulfur 1.58% sepenuhnya dikategorikan sebagai sedang, sementara nilai mendekati 0.7799% atau 2.32% dapat memiliki keanggotaan dalam dua kategori sekaligus, baik rendah maupun tinggi.

- Keanggotaan Tinggi: Kategori tinggi mencakup kandungan sulfur dalam rentang 2.0 hingga 4.0% m/m, dengan titik pusat keanggotaan pada 2.74% m/m. Kandungan sulfur di bawah 2.0% tidak termasuk dalam kategori tinggi, dengan nilai keanggotaan 0. Namun, ketika kadar sulfur berada di antara 2.0% dan 2.74%, keanggotaan meningkat secara linear hingga mencapai 1 pada 2.74%. Setelah itu, keanggotaan menurun hingga mencapai 0 pada 4.0%. Dengan demikian, kandungan sulfur 2.74% sepenuhnya dikategorikan sebagai tinggi, sementara nilai mendekati 2.0% masih memiliki keanggotaan dalam kategori sedang.

b. Viskositas (cSt):



Gambar 4.4 Membership Function Viskositas

- Keanggotaan Rendah: Kategori rendah mencakup viskositas dalam rentang 11.5 hingga 145 cSt, dengan titik pusat keanggotaan pada 34.1 cSt. Fungsi keanggotaan fuzzy memiliki nilai 0 untuk viskositas di bawah 11.5 cSt, kemudian meningkat secara linear hingga mencapai 1 pada 34.1 cSt. Setelah itu, keanggotaan menurun hingga 0 pada 145 cSt. Hal ini menunjukkan bahwa bahan bakar dengan viskositas sekitar 34.1 cSt sepenuhnya dikategorikan sebagai rendah, sementara nilai mendekati 145 cSt mulai memasuki kategori sedang.
- Keanggotaan Sedang: Kategori sedang mencakup rentang viskositas 86.44 hingga 310.9 cSt, dengan titik pusat keanggotaan pada 191.4 cSt. Untuk viskositas di bawah 86.44 cSt, keanggotaan dalam kategori ini adalah 0. Namun, ketika viskositas berada antara 86.44 hingga 191.4 cSt, keanggotaan meningkat secara linear hingga mencapai 1 pada 191.4 cSt. Setelah itu, keanggotaan mulai menurun hingga mencapai 0 pada 310.9 cSt. Ini berarti bahan bakar dengan viskositas 191.4 cSt sepenuhnya dikategorikan sebagai sedang, sementara viskositas yang mendekati 86.44 cSt atau 310.9 cSt masih memiliki keanggotaan sebagian dalam dua kategori sekaligus.
- Keanggotaan Tinggi: Kategori tinggi mencakup viskositas dalam rentang 250 hingga 448 cSt, dengan titik pusat keanggotaan pada 369.5 cSt. Untuk viskositas di bawah 250 cSt, nilai keanggotaan dalam kategori ini adalah 0. Namun, jika viskositas meningkat antara 250 hingga 369.5 cSt, keanggotaan naik secara linear hingga mencapai 1 pada 369.5 cSt, lalu menurun kembali hingga 0 di 448 cSt. Ini menunjukkan bahwa bahan bakar dengan viskositas 369.5 cSt sepenuhnya dikategorikan sebagai tinggi, sedangkan bahan bakar dengan viskositas mendekati 250 cSt masih memiliki keanggotaan dalam kategori sedang.

c. Konten Air (%):



**Gambar 4.5** Membership Function Konten Air

- Keanggotaan Rendah: Kategori rendah mencakup kandungan air dalam rentang 0.01 hingga 0.2% v/v, dengan titik pusat keanggotaan pada 0.05% v/v. Fungsi keanggotaan fuzzy memiliki nilai 0 ketika kandungan air berada di bawah 0.01%, kemudian meningkat secara linear hingga mencapai 1 pada 0.05%. Setelah itu, keanggotaan menurun hingga 0 di 0.2%. Ini berarti bahan bakar dengan kandungan air sekitar 0.05% v/v sepenuhnya termasuk dalam kategori rendah, sedangkan nilai mendekati 0.2% v/v mulai memasuki kategori sedang.
- Keanggotaan Sedang: Kategori sedang mencakup kandungan air dalam rentang 0.1321 hingga 0.4321% v/v, dengan titik pusat keanggotaan pada 0.2821% v/v. Untuk kadar air di bawah 0.1321%, keanggotaan dalam kategori ini adalah 0. Namun, ketika kadar air berada antara 0.1321 hingga 0.2821%, keanggotaan meningkat secara linear hingga mencapai 1 pada 0.2821%. Setelah itu, keanggotaan mulai menurun hingga mencapai 0 pada 0.4321%. Ini menunjukkan bahwa kandungan air 0.2821% v/v sepenuhnya dikategorikan sebagai sedang,

sementara kandungan air yang mendekati 0.1321% atau 0.4321% masih memiliki keanggotaan dalam dua kategori sekaligus.

- Keanggotaan Tinggi: Kategori tinggi mencakup kandungan air dalam rentang 0.35 hingga 0.8% v/v, dengan titik pusat keanggotaan pada 0.5% v/v. Untuk kadar air di bawah 0.35%, nilai keanggotaan dalam kategori ini adalah 0. Namun, ketika kadar air meningkat antara 0.35 hingga 0.5%, keanggotaan naik secara linear hingga mencapai 1 pada 0.5%, lalu menurun kembali hingga 0 di 0.8%. Ini menunjukkan bahwa bahan bakar dengan kadar air 0.5% v/v sepenuhnya dikategorikan sebagai tinggi, sedangkan kandungan air mendekati 0.35% masih memiliki keanggotaan dalam kategori sedang.

#### d. Emisi Karbon

- Keanggotaan Rendah: Fungsi keanggotaan "rendah" untuk output Micro Carbon Residue berlaku pada rentang 2.36 hingga 5% m/m. Nilai pada 2.36 atau kurang memiliki derajat keanggotaan 1, menunjukkan bahwa nilai tersebut dianggap rendah. Ketika nilai antara 2.36 dan 5, derajat keanggotaan menurun secara linear dari 1 hingga 0. Nilai di atas 5 tidak dianggap rendah.
- Keanggotaan Sedang: Fungsi keanggotaan "sedang" untuk output Micro Carbon Residue berlaku dari 5 hingga 8% m/m. Pada nilai 5, derajat keanggotaan adalah 0, tetapi mulai meningkat secara linear hingga mencapai 1 pada 8. Nilai di atas 8 tidak lagi dianggap sedang.
- Keanggotaan Tinggi: Fungsi keanggotaan "tinggi" untuk output Micro Carbon Residue beroperasi pada rentang 8 hingga 12.79% m/m. Nilai di bawah 8 tidak memiliki derajat keanggotaan dalam kategori tinggi, tetapi dari 8 hingga 12.79, derajat keanggotaan meningkat secara linear hingga mencapai 1 pada 12.79, di mana nilai tersebut sepenuhnya dianggap tinggi.

Klasifikasi ini digunakan untuk mengelompokkan hasil pengujian dalam dataset dan membantu dalam analisis pengaruh masing-masing variabel terhadap emisi karbon.

#### **4.1.3 Pembentukan rules fuzzy**

Dalam pembentukan rules atau aturan fuzzy, kita berusaha menciptakan hubungan logika antara variabel input dan output menggunakan konsep fuzzy logic. Rules fuzzy memungkinkan kita untuk memodelkan sistem yang kompleks dan nonlinear dengan menggabungkan pengetahuan kualitatif dari para ahli atau data historis ke dalam bentuk aturan-aturan yang mudah diinterpretasikan. Pada dasarnya, setiap aturan fuzzy terdiri dari dua komponen utama: premis dan konklusi. Premis adalah bagian dari aturan yang menggambarkan kondisi tertentu yang harus dipenuhi, sedangkan konklusi adalah hasil atau tindakan yang diambil ketika kondisi tersebut terpenuhi.

Dalam penelitian ini, variabel-variabel input yang dipertimbangkan adalah K Viscosity pada 50°C, Kandungan Air, dan Kandungan Sulfur. Output yang diharapkan adalah Micro Carbon Residue. Masing-masing variabel input dibagi menjadi tiga tingkatan fuzzy, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Pembagian ini memungkinkan kita untuk menggambarkan kondisi-kondisi fisik pada setiap variabel dengan lebih fleksibel, dan menangkap ketidakpastian atau ketidaktepatan dalam data yang digunakan. Aturan fuzzy ini disusun dengan mempertimbangkan semua kemungkinan kombinasi dari tingkatan setiap variabel input, yang kemudian dipetakan ke dalam tingkatan variabel output. Dengan demikian, aturan-aturan fuzzy dapat diuraikan dalam bentuk pernyataan seperti:

- Jika K Viscosity pada 50°C adalah rendah, Kandungan Air adalah rendah, dan Kandungan Sulfur adalah rendah, maka Micro Carbon Residue adalah rendah.
- Jika K Viscosity pada 50°C adalah sedang, Kandungan Air adalah tinggi, dan Kandungan Sulfur adalah rendah, maka Micro Carbon Residue adalah sedang.

- Jika K Viscosity pada 50°C adalah tinggi, Kandungan Air adalah sedang, dan Kandungan Sulfur adalah tinggi, maka Micro Carbon Residue adalah tinggi.

Pembentukan aturan ini bertujuan untuk meniru proses berpikir manusia dalam menghadapi ketidakpastian. Dengan menggunakan aturan-aturan tersebut, kita dapat memprediksi atau mengestimasi output berdasarkan kondisi input yang diberikan seperti pada **Tabel 4.3**.

**Tabel 4.3** Tabel Aturan Fuzzy (*Rules Fuzzy*)

<b>K Viscosity at 50°C</b>	<b>Kandungan Air</b>	<b>Kandungan Sulfur</b>	<b>Output: Micro Carbon Residue</b>
Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Rendah	Sedang	Rendah	Rendah
Sedang	Rendah	Rendah	Sedang
Rendah	Rendah	Rendah	Sedang
Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Rendah	Rendah	Rendah	Sedang
Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Tinggi	Rendah	Rendah	Tinggi
Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Tinggi	Sedang	Tinggi	Tinggi
Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Rendah	Rendah	Rendah	Sedang
Sedang	Rendah	Rendah	Sedang
Sedang	Rendah	Rendah	Sedang
Sedang	Sedang	Rendah	Tinggi
Rendah	Rendah	Rendah	Sedang

Rendah	Sedang	Rendah	Sedang
Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Sedang	Rendah	Rendah	Sedang
Sedang	Rendah	Rendah	Sedang
Tinggi	Rendah	Rendah	Sedang
Rendah	Rendah	Rendah	Sedang

Merujuk pada Tabel 4.3, aturan fuzzy ini dibentuk untuk memprediksi nilai Micro Carbon Residue (MCR) berdasarkan tiga variabel input: K Viscosity at 50°C, Kandungan Air, dan Kandungan Sulfur. Setiap variabel input memiliki tiga tingkatan: Rendah, Sedang, dan Tinggi. Kombinasi dari nilai input ini memberikan keputusan atau prediksi mengenai tingkat Micro Carbon Residue, yang juga dikategorikan ke dalam tiga tingkatan: Rendah, Sedang, dan Tinggi. Berikut adalah narasi dari aturan-aturan fuzzy tersebut:

1. K Viscosity at 50°C Rendah:

- ⇒ Ketika K Viscosity, Kandungan Air, dan Kandungan Sulfur berada pada level Rendah, maka Micro Carbon Residue diprediksi Rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi ideal di mana viskositas dan kandungan zat lain berada pada level minimal, sisa karbon yang terbentuk juga rendah.
- ⇒ Saat Kandungan Sulfur mulai meningkat ke Sedang atau Tinggi, maka Micro Carbon Residue akan meningkat menjadi Sedang, menandakan bahwa peningkatan sulfur memiliki dampak terhadap pembentukan residu karbon.
- ⇒ Dengan Kandungan Air yang semakin tinggi, residu karbon juga diprediksi akan semakin meningkat, sehingga pada kasus di mana K Viscosity rendah, namun Kandungan Air dan Kandungan Sulfur tinggi, maka residu karbon mencapai level Tinggi.

2. K Viscosity at 50°C Sedang:

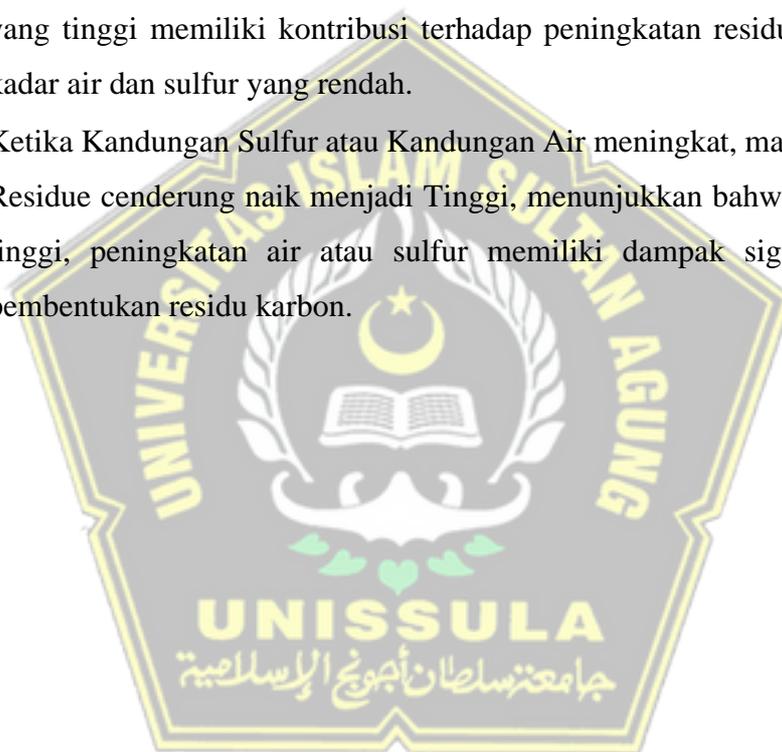
- ⇒ Pada level viskositas sedang, apabila Kandungan Air dan Kandungan Sulfur rendah, maka Micro Carbon Residue tetap Rendah, menunjukkan pengaruh viskositas yang tidak signifikan selama air dan sulfur juga rendah.

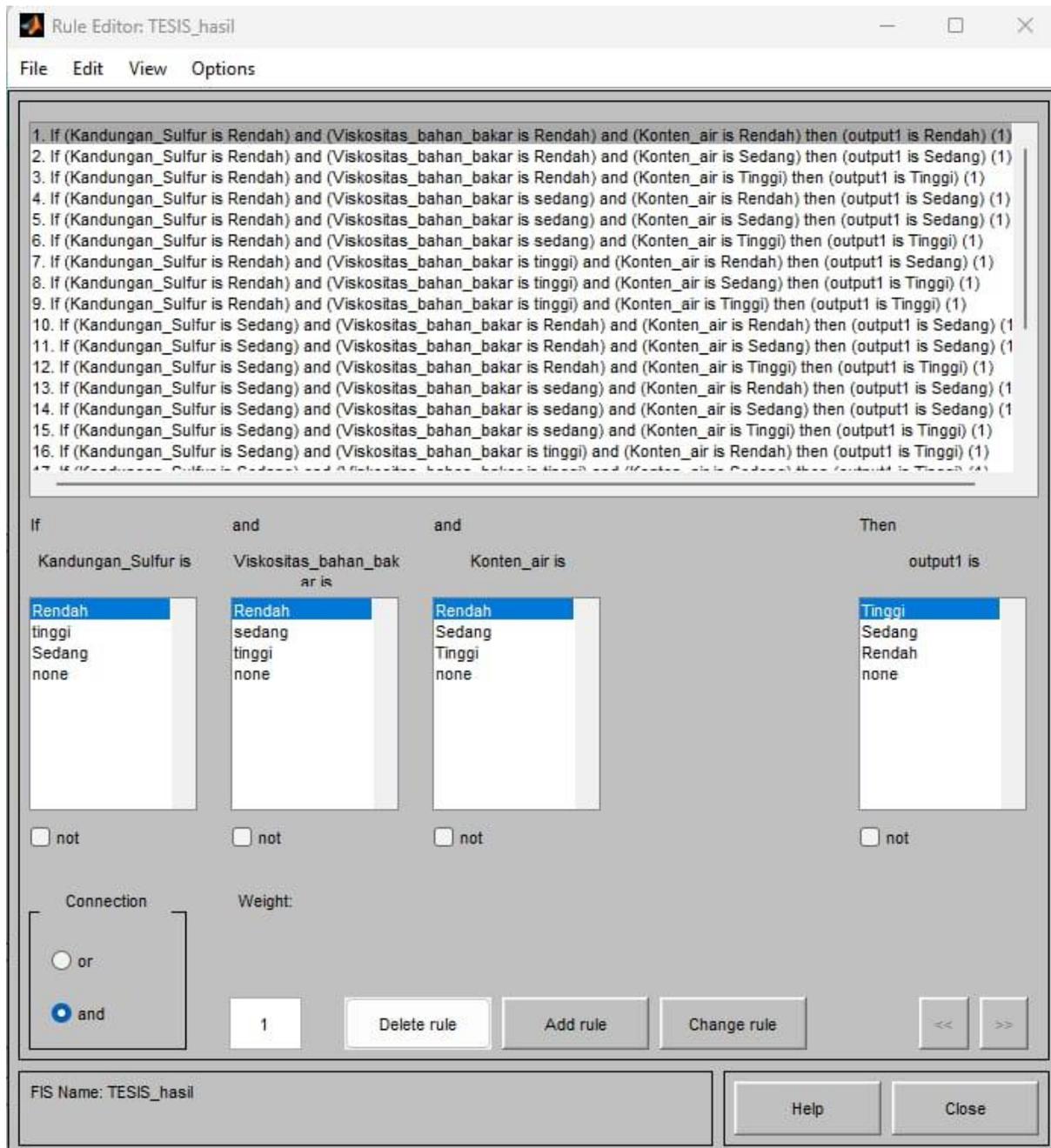
⇒ Dengan peningkatan level Kandungan Sulfur ke Sedang atau Tinggi, atau peningkatan Kandungan Air, maka Micro Carbon Residue cenderung meningkat menjadi Sedang atau bahkan Tinggi, tergantung pada level sulfur dan air. Hal ini mengindikasikan bahwa ketika viskositas berada pada tingkat sedang, kadar air dan sulfur yang lebih tinggi meningkatkan residu karbon secara bertahap.

### 3. K Viscosity at 50°C Tinggi:

⇒ Pada kondisi viskositas tinggi, jika Kandungan Air dan Kandungan Sulfur rendah, maka residu karbon diprediksi Sedang, mencerminkan bahwa viskositas yang tinggi memiliki kontribusi terhadap peningkatan residu meskipun pada kadar air dan sulfur yang rendah.

⇒ Ketika Kandungan Sulfur atau Kandungan Air meningkat, maka Micro Carbon Residue cenderung naik menjadi Tinggi, menunjukkan bahwa pada viskositas tinggi, peningkatan air atau sulfur memiliki dampak signifikan terhadap pembentukan residu karbon.





**Gambar 4.6** Pembentukan Rules Fuzzy menggunakan *fuzzy logic designer*

Proses penentuan aturan dilakukan secara sistematis dan biasanya melibatkan analisis data yang tersedia, konsultasi dengan ahli, atau penggunaan teknik optimasi untuk memperbaiki akurasi prediksi. Selanjutnya, aturan fuzzy yang telah dibentuk dapat diuji dan divalidasi menggunakan simulasi komputer, seperti di Matlab Fuzzy Logic Designer. Dengan simulasi ini, aturan-aturan yang telah dibuat dapat diuji efektivitasnya, serta dilihat apakah hasil prediksi sesuai dengan yang diharapkan. Jika diperlukan, aturan fuzzy dapat disesuaikan atau dioptimalkan lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi sistem secara keseluruhan.

#### 4.1.4 Visualisasi Hasil

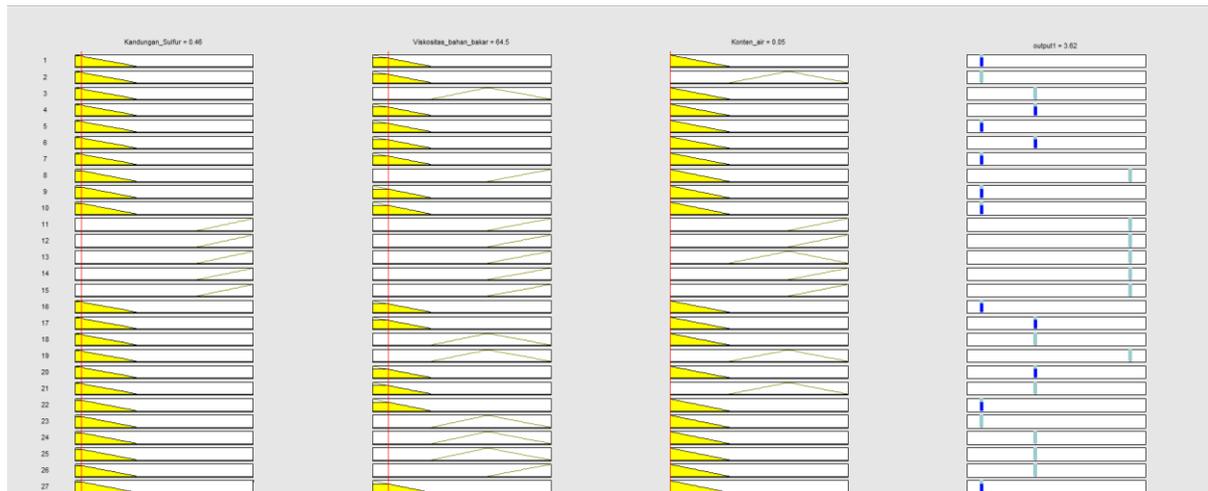
Selanjutnya, tabel hasil penelitian disajikan untuk mempermudah interpretasi dan analisis lebih lanjut terkait hubungan antara variabel input dan output emisi karbon.

**Tabel 4.4** Data hasil pengujian Berdasarkan data *fuel report* kapal

No	Viskositas (cSt)	Konten Air (%)	Kandungan Sulfur (%)	Emisi Karbon (kg CO <sub>2</sub> /TJ)
1	64.5	0.05	0.46	3.34
2	115.3	0.25	0.48	4.37
3	145.3	0.15	0.49	6.82
4	103.1	0.05	0.46	5.14
5	34.1	0.05	0.41	2.36
6	128.3	0.05	0.44	6.31
7	48.4	0.05	0.47	3.1
8	339.3	0.05	0.37	8.19
9	45.6	0.05	0.44	2.74
10	64.5	0.05	0.46	3.34
11	369.5	0.5	2.74	12.79
12	366.4	0.4	2.61	12.35
13	366.3	0.3	2.53	11.32
14	369.5	0.5	2.74	12.79
15	366.4	0.4	2.61	12.35
16	132.7	0.05	0.46	5
17	34.1	0.05	0.41	2.36
18	128.3	0.05	0.44	6.31
19	250.2	0.05	0.49	6.14
20	126.4	0.15	0.47	6.22
21	163.1	0.05	0.49	6.85
22	155.6	0.15	0.45	10.7
23	93.6	0.25	0.47	5.7
24	68.8	0.15	0.48	5.03
25	65.2	0.15	0.49	5.43

26	80.8	0.1	0.46	4.51
27	281.7	0.15	0.49	7.03

Pengujian dilakukan sebanyak 27 kali untuk mengamati pengaruh variabel input—kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air—terhadap output emisi karbon dalam satuan kg CO<sub>2</sub>/TJ. Setiap kombinasi variabel diuji dalam rentang rendah, sedang, dan tinggi dengan menggunakan MATLAB Fuzzy Logic Designer.



**Gambar 4.7** Uji Coba menggunakan *rules analyst* matlab

Simulasi ini bertujuan untuk memetakan bagaimana perubahan pada setiap variabel input berkontribusi terhadap peningkatan atau penurunan emisi karbon yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa emisi karbon meningkat seiring dengan bertambahnya kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air. Variabel-variabel ini memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pembakaran bahan bakar, di mana sulfur yang lebih tinggi menyebabkan emisi sulfur oksida (SO<sub>x</sub>) lebih besar, dan viskositas serta kandungan air yang lebih tinggi dapat menurunkan efisiensi pembakaran, yang pada akhirnya meningkatkan emisi karbon. Simulasi dengan sistem fuzzy memungkinkan pemodelan yang lebih fleksibel, karena sistem fuzzy dapat mengakomodasi variasi kecil dalam variabel input. Hal ini memberikan prediksi yang lebih presisi mengenai bagaimana kombinasi variabel input tertentu dapat mempengaruhi emisi karbon yang dihasilkan.

## Fuzzifikasi

Berikut adalah perhitungan manual untuk mendapatkan nilai output *Micro Carbon Residue (MCR)* dengan metode **Fuzzy Sugeno** berdasarkan input:

Viskositas (cSt)	Konten Air (%)	Kandungan Sulfur (%)
366.4	0.40	2.61

### 1.1. Membership Function Kandungan Sulfur

Diketahui rentang dan fungsi keanggotaan untuk masing-masing variabel:

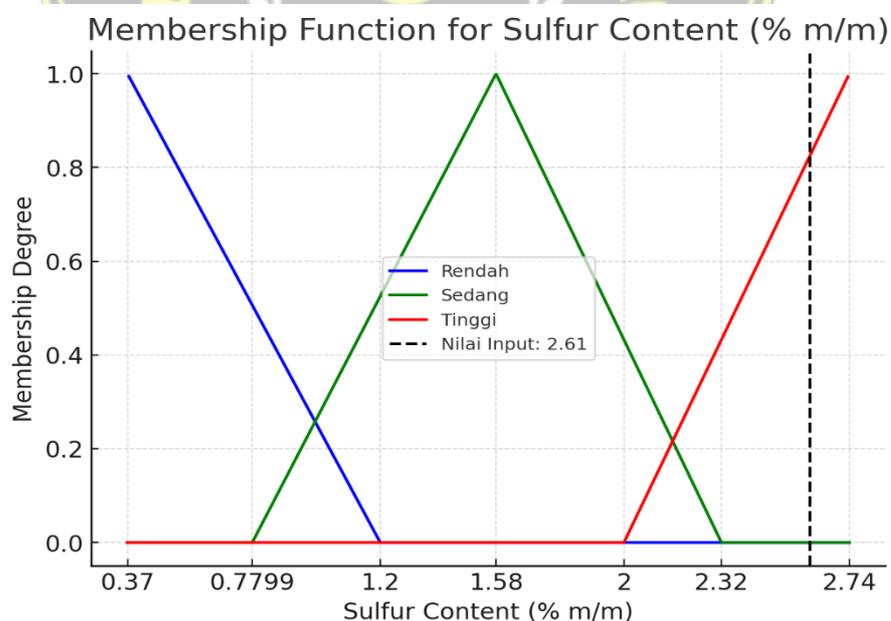
Kandungan Sulfur (Range: [0.37, 2.74])

Rendah: [0.01, 0.37, 1.2]

Sedang: [0.78, 1.58, 2.32]

Tinggi: [2, 2.74, 4]

Berikut adalah grafik fungsi keanggotaan untuk kandungan sulfur dengan nilai input = 2.61.



**Gambar 1.** Grafik fungsi keanggotaan untuk kandungan sulfur dengan nilai input = 2.61

Dengan input sulfur = 2.61, maka nilai keanggotaan untuk setiap kategori adalah sebagai berikut:

$$\mu_{rendah}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.01 \text{ atau } x \geq 1.2 \\ \frac{1.2 - x}{1.2 - 0.37}, & 0.37 < x < 1.2 \end{cases}$$

$$\mu_{rendah} = \frac{1.2 - x}{1.2 - 0.37}$$

$$\mu_{rendah} = \frac{1.2 - 2.61}{1.2 - 0.37} = 0 \text{ (karena } 2.61 > 1.2, \text{ di luar fungsi keanggotaan)}$$

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.78 \\ \frac{x - 0.78}{1.58 - 0.78}, & 0.78 < x < 1.58 \\ 1, & x = 1.58 \\ \frac{2.32 - x}{2.32 - 1.58}, & 1.58 < x \leq 2.32 \end{cases}$$

$$\mu_{sedang} = \frac{x - 0.78}{1.58 - 0.78}$$

$$\mu_{sedang} = \frac{2.61 - 0.78}{2.32 - 0.78} = 0 \text{ (karena } 2.61 > 2.32, \text{ di luar fungsi keanggotaan)}$$

$$\mu_{tinggi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 2.0 \text{ atau } x \geq 4 \\ \frac{x - 2.0}{2.74 - 2.0}, & 2.0 < x \leq 2.74 \end{cases}$$

$$\mu_{tinggi} = \frac{x - 2.0}{2.74 - 2.0}$$

$$\mu_{tinggi} = \frac{2.61 - 2}{2.74 - 2} = 0.824$$

Sehingga, kategori dominan adalah Tinggi dengan  $\mu = 0.824$ .

## 1.2. Membership Function Viskositas Bahan Bakar

Diketahui rentang dan fungsi keanggotaan untuk masing-masing variabel:

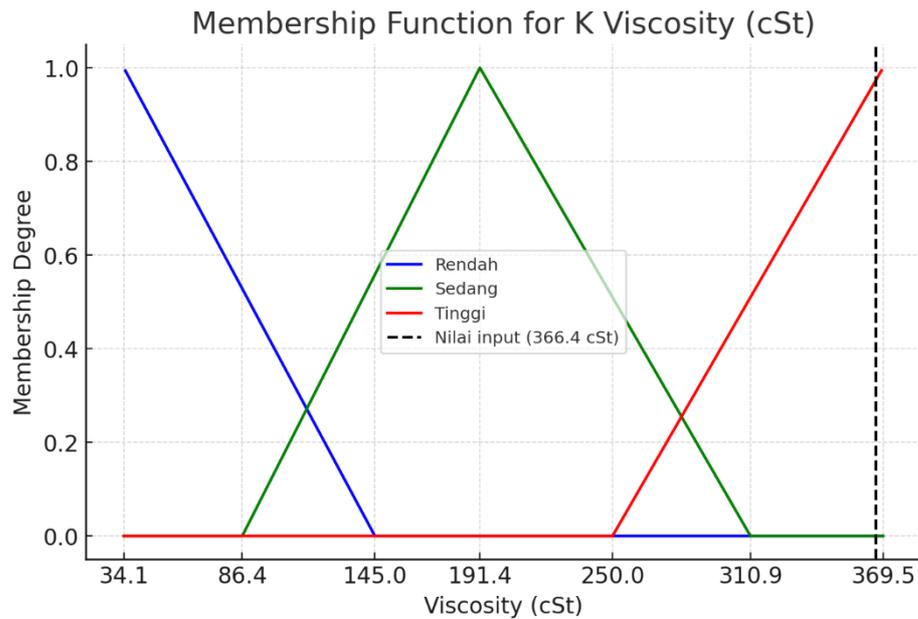
Viskositas Bahan Bakar (Range: [34.1, 369.5])

Rendah: [11.5, 34.1, 145]

Sedang: [86.44, 191.4, 310.9]

Tinggi: [250, 369.5, 448]

Berikut adalah grafik fungsi keanggotaan untuk viskositas bahan bakar dengan nilai input = 366.4.



**Gambar 2.** Grafik fungsi keanggotaan untuk viskositas bahan bakar dengan nilai input = 366.4

Dengan input viskositas = 366.4, maka nilai keanggotaan untuk setiap kategori adalah sebagai berikut:

$$\mu_{rendah}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 11.5 \text{ atau } x \geq 145 \\ \frac{145 - x}{145 - 34.1}, & 34.1 < x < 145 \end{cases}$$

$$\mu_{rendah} = \frac{145 - x}{145 - 34.1}$$

$$\mu_{rendah} = \frac{145 - 366.4}{145 - 34.1} = 0 \text{ (karena } 366.4 > 145, \text{ di luar fungsi keanggotaan)}$$

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 86.44 \\ \frac{x - 86.44}{191.4 - 86.44}, & 86.44 < x < 191.4 \\ 1, & x = 191.4 \\ \frac{310.9 - x}{310.9 - 191.4}, & 191.4 < x \leq 310.9 \end{cases}$$

$$\mu_{sedang} = \frac{310.9 - x}{310.9 - 191.4}$$

$$\mu_{sedang} = \frac{310.9 - 366.4}{310.9 - 191.4} = 0 \text{ (karena } 366.4 > 310.9, \text{ di luar fungsi keanggotaan)}$$

$$\mu_{tinggi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 250 \text{ atau } x \geq 448 \\ \frac{x - 250}{369.5 - 250}, & 250 < x \leq 369.5 \end{cases}$$

$$\mu_{tinggi} = \frac{x - 250}{369.5 - 250}$$

$$\mu_{tinggi} = \frac{366.4 - 250}{369.5 - 250} = 0.026$$

Sehingga, kategori dominan adalah Rendah dengan  $\mu = 0.026$ .

### 1.3. Membership Function Konten Air

Diketahui rentang dan fungsi keanggotaan untuk masing-masing variabel:

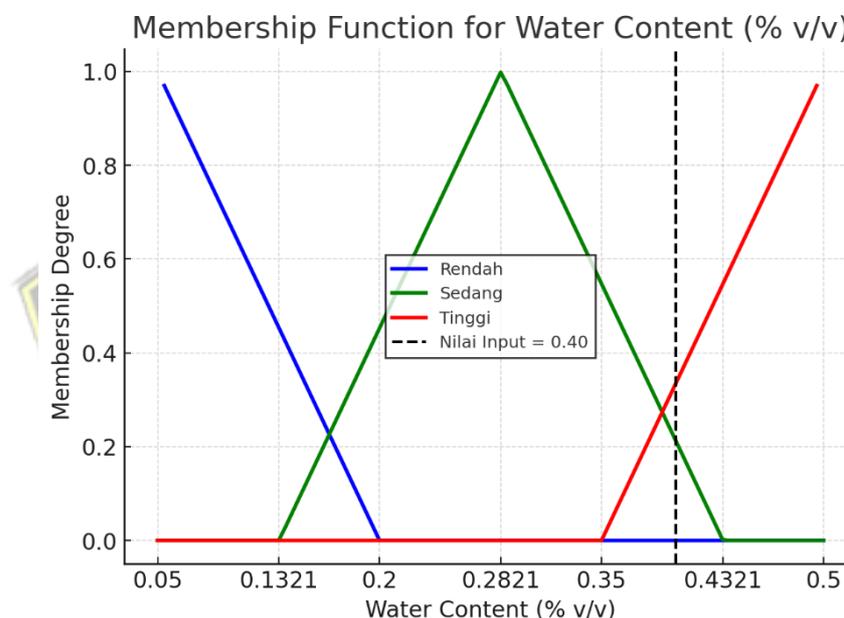
Kandungan Air (Range: [0.05, 0.5])

Rendah: [0.01, 0.05, 0.2]

Sedang: [0.133, 0.283, 0.433]

Tinggi: [0.35, 0.5, 0.8]

Berikut adalah grafik fungsi keanggotaan untuk konten air dengan nilai input = 0.40.



**Gambar 3.** Grafik fungsi keanggotaan untuk konten air dengan nilai input = 0.40

Dengan input konten air = 0.40, maka nilai keanggotaan untuk setiap kategori adalah sebagai berikut:

$$\mu_{rendah}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.01 \text{ atau } x \geq 0.2 \\ \frac{0.2 - x}{0.2 - 0.05}, & 0.05 < x \leq 0.2 \end{cases}$$

$$\mu_{rendah} = \frac{0.2 - x}{0.2 - 0.05}$$

$$\mu_{rendah} = \frac{0.2 - 0.40}{0.2 - 0.05} = 0 \text{ (karena } 0.40 > 0.2, \text{ di luar fungsi keanggotaan)}$$

$$\mu_{\text{sedang}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 0.1321 \text{ atau } x \geq 0.4321 \\ \frac{x - 0.1321}{0.2821 - 0.1321}, & 0.1321 < x < 0.2821 \\ 1, & x = 0.2821 \\ \frac{0.4321 - x}{0.4321 - 0.2821}, & 0.2821 < x \leq 0.4321 \end{array} \right\}$$

$$\mu_{\text{sedang}} = \frac{0.4321 - x}{0.4321 - 0.2821}$$

$$\mu_{\text{sedang}} = \frac{0.4321 - 0.40}{0.4321 - 0.2821} = 0.214$$

$$\mu_{\text{tinggi}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 0.35 \text{ atau } x \geq 0.8 \\ \frac{x - 0.35}{0.5 - 0.35}, & 0.35 < x \leq 0.5 \end{array} \right\}$$

$$\mu_{\text{tinggi}} = \frac{x - 0.35}{0.5 - 0.35}$$

$$\mu_{\text{tinggi}} = \frac{0.40 - 0.35}{0.5 - 0.35} = 0.333$$

Sehingga, kategori dominan adalah Rendah dengan  $\mu = 0.333$ .

## 2. Inferensi Fuzzy (Sugeno)

Menentukan aturan yang aktif berdasarkan nilai keanggotaan tertinggi.

Dari aturan fuzzy:

1. Jika Viscosity Tinggi, Water Content Tinggi, Sulfur Tinggi, maka MCR Tinggi
2. Jika Viscosity Tinggi, Water Content Sedang, Sulfur Sedang, maka MCR Tinggi

Bobot aturan dihitung dengan operator **min** (AND):

$$w_i = \min(\mu_{\text{sulfur}}, \mu_{\text{viskositas}}, \mu_{\text{konten air}})$$

Aturan yang aktif:

1. (Viscosity Tinggi, Water Content Tinggi, Sulfur Tinggi)  $\rightarrow$  MCR Tinggi  
 $w_1 = \min(0.824, 0.333, 0.974) = 0.333$  (MCR Tinggi)
2. (Viscosity Tinggi, Water Content Sedang, Sulfur Tinggi)  $\rightarrow$  MCR Tinggi  
 $w_2 = \min(0, 0.214, 0.974) = 0.026$  (MCR Tinggi)

## 3. Defuzzifikasi (Weighted Average - Sugeno Method)

Fungsi keluaran:

Rendah:  $z_1 = 2.36$  (tidak aktif)

Sedang:  $z_2 = 6.14$  (tidak aktif)

Tinggi:  $z_3 = 12.79$

Menggunakan metode rata-rata berbobot:

$$MCR = \frac{\sum(w_i \times z_i)}{\sum w_i}$$
$$MCR = \frac{(w_1 \times z_3) + (w_2 \times z_3)}{w_1 + w_2}$$
$$MCR = \frac{(0.026 \times 12.79) + (0.026 \times 12.79)}{0.026 + 0.026}$$
$$MCR = \frac{0.33254 + 0.33254}{0.052}$$
$$MCR = 12.79$$

Hasil Akhir: Micro Carbon Residue (MCR) = 12.79

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode Fuzzy Sugeno, diperoleh nilai Micro Carbon Residue (MCR) sebesar 12.79.

Nilai MCR ini merupakan hasil dari proses fuzzifikasi, evaluasi aturan, dan defuzzifikasi atas tiga parameter input, yaitu:

1. Kandungan Sulfur (2.61% m/m): masuk kategori Sedang ke Tinggi.
2. Viskositas (366.4 cSt): dominan masuk kategori Tinggi.
3. Konten Air (0.40% v/v): dominan masuk kategori Tinggi.

Karena sebagian besar input cenderung berada di kategori tinggi, maka aturan yang aktif cenderung mengarah ke hasil MCR kategori Tinggi (sesuai dengan aturan fuzzy yang diberlakukan).

Nilai MCR 12.79 menunjukkan bahwa bahan bakar tersebut memiliki residu karbon yang sangat tinggi, menandakan potensi pembentukan deposit karbon yang besar saat proses pembakaran.

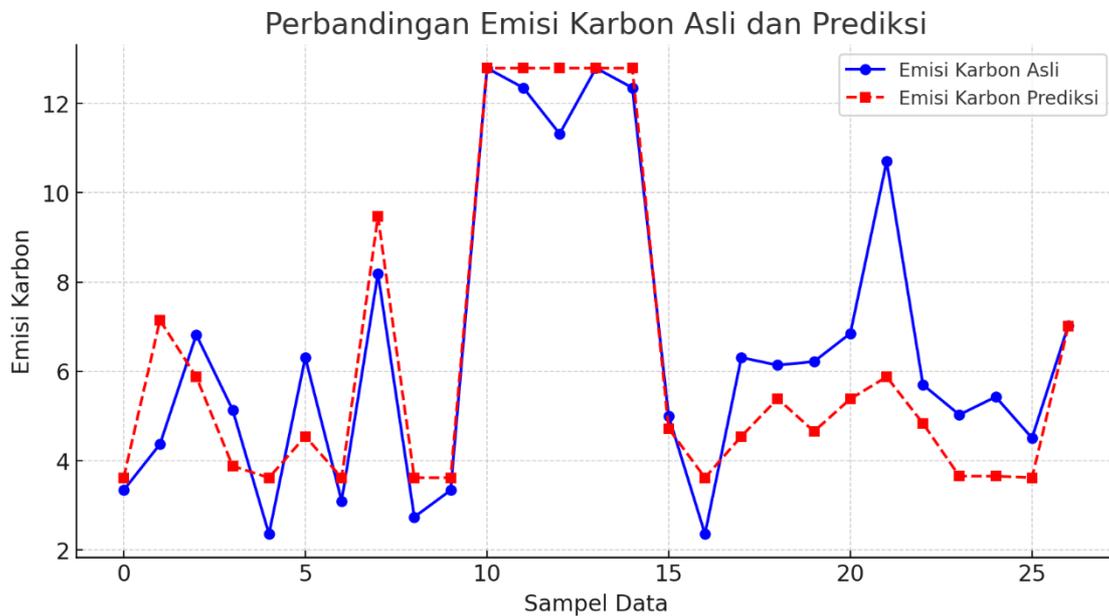
**Tabel 4.5** Tabel perbandingan hasil uji matlab dan hasil *fuel report* Kapal

Viskositas (cSt)	Konten Air (%)	Kandungan Sulfur (%)	Emisi Karbon Asli (kg CO <sub>2</sub> /TJ)	Emisi Karbon Prediksi (kg CO <sub>2</sub> /TJ)	Error (%)
64.5	0.05	0.46	3.34	3.62	8.383234

115.3	0.25	0.48	4.37	7.14631	63.53101
145.3	0.15	0.49	6.82	5.87773	13.81623
103.1	0.05	0.46	5.14	3.88273	24.4606
34.1	0.05	0.41	2.36	3.62	53.38983
128.3	0.05	0.44	6.31	4.54526	27.9674
48.4	0.05	0.47	3.10	3.62	16.77419
339.3	0.05	0.37	8.19	9.465	15.56777
45.6	0.05	0.44	2.74	3.62	32.11679
64.5	0.05	0.46	3.34	3.62	8.383234
369.5	0.50	2.74	12.79	12.79	0
366.4	0.40	2.61	12.35	12.79	3.562753
366.3	0.30	2.53	11.32	12.79	12.98587
369.5	0.50	2.74	12.79	12.79	0
366.4	0.40	2.61	12.35	12.79	3.562753
132.7	0.05	0.46	5.00	4.71964	5.607155
34.1	0.05	0.41	2.36	3.62	53.38983
128.3	0.05	0.44	6.31	4.54526	27.9674
250.2	0.05	0.49	6.14	5.38937	12.22527
126.4	0.15	0.47	6.22	4.65598	25.14501
163.1	0.05	0.49	6.85	5.384	21.40146
155.6	0.15	0.45	10.70	5.87773	45.06791
93.6	0.25	0.47	5.70	4.83533	15.16967
68.8	0.15	0.48	5.03	3.65539	27.32817
65.2	0.15	0.49	5.43	3.65539	32.68152
80.8	0.10	0.46	4.51	3.62	19.73392
281.7	0.15	0.49	7.03	7.01075	0.273775

Dalam lanjutan analisis dari hasil pengujian bahan bakar berdasarkan Fuel Analysis Report, dilakukan uji coba dengan menggunakan MATLAB dan aturan fuzzy yang telah diterapkan untuk menghitung output emisi karbon (dalam kg CO<sub>2</sub> per terajoule). Tabel diatas

menampilkan hasil perbandingan antara data hasil pengujian dan output yang dihasilkan oleh aturan fuzzy yang diimplementasikan di MATLAB.



**Gambar 4.8** Grafik Perbandingan hasil Uji coba menggunakan Matlab dan hasil *Fuel Report*

**Hasil Uji MATLAB dan Perbandingannya :**

Grafik 4.8 membandingkan hasil uji emisi karbon berbasis MATLAB dengan aturan fuzzy dan hasil pengukuran nyata dari fuel report kapal. Dalam pengujian ini, berbagai kombinasi kandungan sulfur, viskositas, dan konten air diuji untuk memahami pengaruhnya terhadap emisi karbon yang dihasilkan dalam satuan kg CO<sub>2</sub> per terajoule (TJ). Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk mengevaluasi keakuratan prediksi MATLAB dalam mereplikasi pola yang terlihat pada data hasil uji asli. Dari grafik tersebut, kita bisa mengamati bahwa prediksi emisi karbon oleh MATLAB cenderung mengikuti tren yang sama dengan hasil pengukuran asli. Secara umum, ketika kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, atau konten air meningkat, emisi karbon juga meningkat, baik pada data asli maupun prediksi fuzzy. Hal ini menunjukkan bahwa model fuzzy yang digunakan berhasil menangkap hubungan antara ketiga variabel input ini dan emisi karbon. Namun, terdapat variasi kecil antara prediksi MATLAB dan data asli, dengan rata-rata kesalahan sekitar 21.1294%. Kesalahan atau perbedaan ini bisa disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, aturan fuzzy yang diterapkan di MATLAB mungkin memiliki batasan dalam merepresentasikan kompleksitas seluruh proses pembakaran. Pada pembakaran aktual, berbagai faktor lain seperti suhu, tekanan, dan tingkat

oksigen juga dapat mempengaruhi efisiensi dan hasil emisi karbon, namun tidak seluruhnya terwakili dalam model fuzzy. Selain itu, pengaturan aturan fuzzy yang digunakan mungkin terlalu sederhana untuk mencerminkan variasi kecil dalam data asli, sehingga menghasilkan deviasi kecil pada beberapa titik data. Namun, kesalahan rata-rata yang dihasilkan masih dalam batas yang cukup baik, yaitu sekitar 21%, yang menunjukkan bahwa model fuzzy mampu memberikan gambaran prediktif yang cukup akurat untuk analisis ini. Lebih lanjut, grafik menunjukkan bahwa bahan bakar dengan kandungan sulfur tinggi (>2%) dan viskositas yang lebih besar cenderung menghasilkan emisi karbon yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan teori pembakaran, di mana sulfur tinggi menghasilkan emisi sulfur oksida (SO<sub>x</sub>) yang berkontribusi terhadap peningkatan total emisi karbon, sedangkan viskositas tinggi membuat bahan bakar lebih sulit terbakar dengan sempurna, sehingga meningkatkan emisi CO<sub>2</sub>. Konten air yang tinggi juga memberikan pengaruh serupa, di mana adanya air dalam bahan bakar mengurangi efisiensi pembakaran karena panas digunakan untuk menguapkan air, sehingga sisa pembakaran menghasilkan emisi karbon yang lebih tinggi. Model fuzzy di MATLAB mampu menyediakan prediksi yang fleksibel dalam memperkirakan emisi karbon, karena fuzzy logic dirancang untuk menangani ketidakpastian dan variasi kecil dalam data input. Dengan kemampuan ini, model fuzzy menjadi alat yang cocok untuk prediksi emisi pada sistem yang memiliki banyak variabel dengan hubungan non-linier. Dari segi aplikasi, model fuzzy seperti ini dapat membantu pengelola kapal dalam memilih bahan bakar dengan komposisi optimal untuk mengurangi emisi karbon, atau setidaknya memperingatkan akan potensi peningkatan emisi berdasarkan parameter bahan bakar. Secara keseluruhan, hasil analisis ini menunjukkan bahwa prediksi emisi karbon dari MATLAB menggunakan aturan fuzzy cukup akurat dalam meniru data asli dengan kesalahan yang relatif rendah. Meskipun terdapat beberapa perbedaan, model ini tetap efektif sebagai alat bantu untuk memodelkan dampak dari kandungan sulfur, viskositas, dan konten air terhadap emisi karbon, dan dapat dijadikan dasar untuk keputusan pengelolaan emisi pada kapal. Berikut adalah analisis kuantitatif dari perbandingan antara hasil uji asli dan prediksi emisi karbon dari MATLAB, termasuk perhitungan Mean Percentage Error (MPE) untuk mengevaluasi seberapa besar rata-rata kesalahan prediksi dalam bentuk persentase.

Untuk mendapatkan Mean Percentage Error (MPE), kita menghitung rata-rata dari semua nilai error dalam tabel. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Mean Percentage Error (MAPE) antara emisi karbon asli dan prediksi adalah sekitar 21.4852%. Nilai ini mencerminkan rata-rata kesalahan prediksi dalam perbandingan data uji asli dan hasil prediksi dari MATLAB.

Nilai Mean Percentage Error (MPE) sebesar 21.4852% menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara hasil prediksi sistem fuzzy dan data asli dari fuel report kapal. Tingginya nilai error ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah keterbatasan jumlah variabel input yang digunakan, yaitu hanya kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan kandungan air. Dalam kenyataannya, emisi karbon pada kapal dipengaruhi oleh berbagai faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model fuzzy ini, seperti kondisi mesin, beban kapal, kecepatan kapal, jenis bahan bakar yang digunakan, temperatur lingkungan, tekanan dalam ruang bakar, serta sistem pembuangan gas. Karena sebagai pelaksana kita tidak bisa mengubah atau menambahkan variabel dari data yang diberikan oleh penyedia data kapal, maka model fuzzy yang dikembangkan hanya dapat memprediksi emisi karbon berdasarkan keterbatasan informasi yang ada, sehingga tidak dapat menangkap kompleksitas nyata dari fenomena yang terjadi.

Selain itu, logika fuzzy bersifat aproksimasi, yang berarti model ini bekerja berdasarkan aturan linguistik yang telah ditentukan sebelumnya, bukan berdasarkan pemodelan matematis yang presisi. Jika aturan fuzzy yang dibuat tidak dapat mencakup seluruh variasi kondisi operasional kapal dengan baik, maka hasil prediksi bisa menjadi kurang akurat. Penggunaan metode Sugeno, meskipun lebih efisien dalam perhitungan, tetap memiliki keterbatasan dalam menangkap hubungan non-linear yang kompleks antara variabel input dan output. Jika ada faktor penting yang tidak dimasukkan ke dalam model, maka tingkat error prediksi dapat meningkat karena model hanya bekerja dengan informasi yang terbatas.

Selanjutnya, data yang digunakan untuk membangun sistem fuzzy mungkin memiliki keterbatasan dalam jumlah dan variasi sampel. Jika data yang tersedia tidak cukup representatif untuk menggambarkan semua kondisi kapal yang sebenarnya, maka aturan fuzzy yang dihasilkan juga bisa menjadi kurang optimal. Tingkat keanggotaan fuzzy yang ditentukan secara manual juga dapat mempengaruhi akurasi prediksi, terutama jika distribusi data dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi tidak benar-benar mencerminkan pola hubungan antara input dan output yang sebenarnya.

Karena variabel input yang digunakan dalam model ini hanya tiga, sistem fuzzy tidak dapat mempertimbangkan faktor eksternal lain yang juga berpengaruh terhadap emisi karbon kapal, sehingga nilai MPE sebesar 21.4852% masih tergolong tinggi. Jika lebih banyak variabel input bisa dimasukkan ke dalam model, kemungkinan besar tingkat akurasi prediksi bisa meningkat, karena model akan memiliki lebih banyak informasi untuk menangkap hubungan yang lebih

kompleks antara faktor-faktor yang mempengaruhi emisi karbon kapal. Namun, karena sebagai pelaksana kita tidak memiliki kebebasan untuk menambahkan variabel dari luar data yang diberikan oleh penyedia data kapal, maka langkah yang bisa dilakukan adalah mengoptimalkan aturan fuzzy, menyesuaikan fungsi keanggotaan, atau mengombinasikan metode fuzzy dengan teknik lain seperti machine learning untuk meningkatkan akurasi prediksi dalam keterbatasan variabel yang ada.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

1. Pengaruh Variabel Terhadap Emisi Karbon: Hasil pengujian menunjukkan bahwa tiga variabel utama—kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air—berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon. Peningkatan pada ketiga variabel ini secara konsisten berkorelasi dengan kenaikan emisi karbon. Kandungan sulfur yang tinggi menghasilkan lebih banyak sulfur oksida (SO<sub>x</sub>), sementara viskositas dan konten air yang lebih tinggi dapat menurunkan efisiensi pembakaran, yang pada akhirnya meningkatkan emisi karbon yang dihasilkan.
2. Akurasi Prediksi Menggunakan Logika Fuzzy: Implementasi logika fuzzy dalam MATLAB berhasil memprediksi nilai emisi karbon dengan Mean Percentage Error (MPE) sekitar 21.4852% dibandingkan data asli dari fuel report kapal. Tingkat kesalahan yang relatif konstan ini menunjukkan bahwa model fuzzy logic cukup efektif dalam menangkap pola dan hubungan antara variabel input dan emisi karbon. Meskipun ada deviasi, hasil prediksi ini dianggap cukup memadai untuk analisis tingkat lanjut.
3. Manfaat dan Sensitivitas Sistem Fuzzy: Sistem fuzzy yang digunakan dalam penelitian ini terbukti fleksibel dalam menangani variasi kecil pada variabel input. Hal ini memberikan keunggulan dibandingkan model linier atau model diskrit, karena sistem fuzzy mampu memberikan hasil prediksi yang lebih halus dan akurat dalam lingkungan dengan ketidakpastian. Dengan menggunakan aturan fuzzy, model ini juga dapat memetakan hubungan kompleks antara variabel input dan output tanpa memerlukan rumusan matematis yang terlalu kaku.
4. Implikasi Lingkungan: Hasil simulasi ini memberikan wawasan penting tentang pengelolaan bahan bakar kapal untuk mengurangi emisi karbon. Dengan memahami bagaimana kandungan sulfur, viskositas, dan konten air memengaruhi emisi, operator kapal dapat membuat keputusan yang lebih bijak terkait pemilihan bahan bakar dan pengaturan mesin untuk mencapai pembakaran yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

#### 5.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah diuraikan, berikut beberapa saran untuk penelitian lanjutan yang dapat dilakukan:

1. Pengembangan Model Prediksi yang Lebih Akurat

Meskipun model logika fuzzy telah menunjukkan efektivitas dalam memprediksi emisi karbon, tingkat error sebesar 21.4852% masih dapat ditingkatkan. Penelitian selanjutnya bisa mengintegrasikan metode lain seperti machine learning (misalnya, regresi linier, random forest, atau neural networks) sebagai pembanding untuk melihat apakah model tersebut dapat memberikan akurasi yang lebih tinggi.

2. Pengujian dengan Variabel Tambahan

Penelitian ini berfokus pada kandungan sulfur, viskositas bahan bakar, dan konten air sebagai variabel utama. Penelitian berikutnya dapat mempertimbangkan variabel tambahan seperti suhu pembakaran, jenis bahan bakar alternatif (biofuel), serta kecepatan dan beban mesin untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi emisi karbon.

3. Implementasi pada Kondisi Nyata

Untuk memvalidasi model yang telah dikembangkan, disarankan melakukan uji coba pada kondisi operasional nyata di kapal. Penggunaan data real-time dari sistem monitoring kapal dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai kinerja model prediksi di lapangan serta memungkinkan adanya penyesuaian yang lebih responsif.

4. Pengembangan Sistem Monitoring Berbasis IoT

Implementasi sistem berbasis IoT yang terhubung langsung dengan mesin kapal dapat menjadi solusi untuk mengukur dan memonitor variabel-variabel secara real-time. Dengan menggunakan perangkat IoT, data seperti kandungan sulfur, viskositas, dan kadar air dapat dipantau secara terus-menerus, yang selanjutnya dapat digunakan untuk memprediksi emisi karbon dan mengoptimalkan pengaturan mesin secara otomatis.

Dengan pengembangan lebih lanjut dalam aspek-aspek tersebut, diharapkan penelitian selanjutnya dapat memberikan kontribusi yang lebih besar dalam upaya mengurangi emisi karbon di industri maritim serta mendukung kebijakan lingkungan yang berkelanjutan.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Waworuntu and W. Wibowo, "Optimalisasi Perawatan Fuel Oil Purifier Untuk Menjaga Kualitas Bahan Bakar Dalam Proses Purifikasi Di Kapal Seroja XXI," *PROSIDING SEMINAR ...*, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.poltekpelsulut.ac.id/index.php/sipma/article/view/13>
- [2] H. THORIQUL, Optimalisasi Perawatan Fuel Oil Purifier Guna Meningkatkan Kualitas Bahan Bakar Di MT. Sepinggan. repository.pip-semarang.ac.id, 2018. [Online]. Available: <http://repository.pip-semarang.ac.id/573/>
- [3] A. Saleh, J. D. L. Tobing, and H. Pratama, "Peningkatan Persentase Metana Dalam Kualitas Biogas Sebagai Bahan Bakar Alternatif Menggunakan Membran Berbahan ...," *Jurnal Teknik Kimia*, 2015.
- [4] P. Y. SAMUDRA, *Optimalisasi Perawatan Fuel Oil Purifier Guna Mendapatkan Kualitas Bahan Bakar Untuk Pembakaran Yang Sempurna Pada ....* simdokumentasi.stipjakarta.ac.id, 2016. [Online]. Available: <http://simdokumentasi.stipjakarta.ac.id/bitstream/handle/123456789/2875/yudha%20p%20samudra.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] R. MAHERA, *Optimalisasi Kinerja Fuel Oil Purifier Guna Meningkatkan Kualitas Bahan Bakar Yang Baik Di Mv Tanto Bersama.* repository.pip-semarang.ac.id, 2022. [Online]. Available: <http://repository.pip-semarang.ac.id/3982/>
- [6] A. Saleh, J. D. L. Tobing, and H. Pratama, "Peningkatan Persentase Metana Dalam Kualitas Biogas Sebagai Bahan Bakar Alternatif Menggunakan Membran Berbahan Dasar Karbon Aktif," *Jurnal Teknik Kimia*, 2015, [Online]. Available: <http://ejournal.ft.unsri.ac.id/index.php/JTK/article/view/526>
- [7] R. Agustin, M. Muharom, M. H. Abdullah, and ..., "Rancang Bangun Alat Purifikasi Gas Buang Pirolisis Dengan Sistem Absorber Dan Adsorber Kontinyu," *Journal of System ...*, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.uwp.ac.id/ft/index.php/JISTI/article/view/29>
- [8] A. Arifin and T. Sundari, "... Sistem Purifikasi Air Kolam Dan Kanal Di Fasilitas Hubung–Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (Kh-Ipsb3)," *Prosiding Hasil Penelitian Dan Kegiatan PTLR ...*, 2018, [Online]. Available: [http://karya.brin.go.id/id/eprint/6970/1/PROSIDING%20K\\_ARIFIN\\_PTLR\\_2018.pdf](http://karya.brin.go.id/id/eprint/6970/1/PROSIDING%20K_ARIFIN_PTLR_2018.pdf)
- [9] J. Joh, Y. H. Chen, and R. Langari, "On the stability issues of linear Takagi-Sugeno fuzzy models," *IEEE Transactions on Fuzzy ...*, 1998, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/705508/>
- [10] P. Melin, A. Mancilla, M. Lopez, and O. Mendoza, "A Hybrid Modular Neural Network Architecture With Fuzzy Sugeno Integration For Time Series Forecasting," *Appl Soft Comput*, 2007, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494606000147>
- [11] J. Warmansyah and D. Hilpiah, "Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Untuk Prediksi Persediaan Bahan Baku," *Teknois: Jurnal ...*, 2019, [Online]. Available: <http://teknois.stikombinaniaga.ac.id/index.php/JBS/article/view/58>

- [12] G. E. Martínez, C. I. Gonzalez, O. Mendoza, and P. Melin, "General type-2 fuzzy sugeno integral for edge detection," *J Imaging*, 2019, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/516482>
- [13] A. H. Agustin, G. K. Gandhiadi, and T. B. Oka, "Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Untuk Menentukan Harga Jual Sepeda Motor Bekas," *E-Jurnal Matematika*, 2016, [Online]. Available: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/mtk/article/download/25341/16512>
- [14] M. RIZALDI, *Upaya Meningkatkan Perawatan Hfo Purifier Dalam Menunjang Pengoperasian Mesin Induk Di Kapal Mv. Ijsselborg*. SEKOLAH TINGGI ILMU ..., 2015.
- [15] I. H. PANGGABEAN, ... *Perawatan Terencana Pada Fuel Oil Purifier Guna Menghasilkan Bahan Bakar Yang Bersih Di Atas Kapal Mv Tangguh Sago*. SEKOLAH TINGGI ILMU ..., 2016.

