

**TESIS**

**KARAKTERISASI DAN UJI KINERJA BIODIESEL DARI PROSES  
PLASMA, OZONISASI, DAN IONISASI *CRUDE PALM OIL* (CPO)**

**Characterization and Performance of Biodiesel from Plasma, Ozonation, and  
Ionization Processes of Crude Palm Oil (CPO)**

**DIAN KUSUMAWATI**

**D022212004**



**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU TEKNIK MESIN**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2024**



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

**PENGAJUAN TESIS**

**KARAKTERISASI DAN UJI KINERJA BIODIESEL DARI PROSES  
PLASMA, OZONISASI, DAN IONISASI CRUDE PALM OIL (CPO)**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Ilmu Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

ttd

**DIAN KUSUMAWATI**

**D022212004**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**



# LEMBAR PENGESAHAN

## KARAKTERISASI DAN UJI KINERJA BIODIESEL DARI PROSES PLASMA, OZONISASI, DAN IONISASI CRUDE PALM OIL (CPO)

Disusun dan diajukan oleh

**DIAN KUSUMAWATI**

**D022212004**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin  
pada tanggal 30 Juli 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui  
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



**Prof. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT**  
NIP. 197112211998021001

Pembimbing Pendamping



**Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST, MT**  
NIP. 197911122008122002

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



**Ir. Muhammad Isran Ramli,**  
**,,IPM.,ASEAN. Eng**  
9730926 2000121002

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



**Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST, MT**  
NIP. 197911122008122002



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Dian Kusumawati

Nomor mahasiswa : D022212004

Program studi : Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Karakterisasi Dan Uji Kinerja Biodiesel Dari Proses Plasma, Ozonisasi, Dan Ionisasi *Crude Palm Oil* (CPO)” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT sebagai Pembimbing Utama dan Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding (International Conference on Research in Engineering and Science Technology 2023) sebagai artikel dengan judul “*Characterization of Biodiesel and Analysis of Chemical Compounds from The Ozonization Process of Crude Palm Oil* (CPO).”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 30 Juli 2024

Yang menyatakan



  
Dian Kusumawati



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul Karakterisasi dan Uji Kinerja Biodiesel dari Proses Plasma, Ozonisasi, dan Ionisasi Crude Palm Oil (CPO).

Penyelesaian tesis ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan penghargaan, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, saudara dan keluarga besar yang selalu mendoakan, mendampingi dan memberikan dukungan baik secara moril dan materi.
2. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT, sebagai Dosen Pembimbing I dan Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT, sebagai Dosen Pembimbing II sekaligus Ketua Program Studi S2 Teknik Mesin, yang telah memberikan waktu, arahan, dan saran selama proses pengerjaan tesis ini.
3. Prof. Dr-Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME, Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT dan Dr. Ir. Nasruddin Azis, M.Si selaku Dosen Penguji yang telah memberikan saran-saran selama proses pengerjaan tesis.
4. Bapak/Ibu Dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu, nasehat dan pengalaman kepada penulis selama menempuh pendidikan.
5. Seluruh staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Semua pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tesis ini, yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Akhir kata, semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam bidang energi terbarukan.

Gowa, 30 Juli 2024

Hormat saya,

Dian Kusumawati



## ABSTRAK

**DIAN KUSUMAWATI.** *Karakterisasi dan Uji Kinerja Biodiesel dari Proses Plasma, Ozonisasi, dan Ionisasi Crude Palm Oil (CPO) (dibimbing oleh Andi Erwin Eka Putra dan Novriany Amaliyah)*

Pembuatan biodiesel umumnya menggunakan proses transesterifikasi yang dipandang sebagai metode yang paling menguntungkan dalam memproduksi bahan bakar biodiesel dari minyak nabati namun kelemahan dari sistem pengolahan konvensional adalah waktu pengolahan yang lama dan membutuhkan lahan yang sangat luas. Untuk memberikan alternatif pengolahan limbah cair kelapa sawit dapat dilakukan dengan sistem plasma melalui metode *Dielectric Barrier Discharge* (DBD). Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik biodiesel, karakteristik pembakaran biodiesel, dan menganalisis konsumsi energi dari metode plasma, ozonisasi dan ionisasi dalam pembuatan biodiesel. Dalam penelitian ini, minyak kelapa sawit diberikan perlakuan yaitu plasma, ozonisasi, dan ionisasi dengan variasi waktu kemudian dicampur dengan dexlite dan metanol sehingga menjadi biodiesel 35% yaitu B35P6, B35O30, B35O60, B35O120, B35O180, B35I30, B35I60, B35I120, dan B35I180, setelah itu sampel dikarakterisasi dengan menggunakan *bom calorimeter* untuk mengidentifikasi *Higher Heating Value* (HHV), densitas (ASTM D1217), titik nyala (ASTM D93), viskositas (ASTM D445), *Fourier Transform InfraRed Method* (FT-IR), dan *Gas Chromatograph-Mass Spectrometer* (GC-MS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran bahan bakar B35I60 dengan nilai kalor tertinggi sebesar 35,282 kJ/kg, titik nyala tertinggi yaitu 118°C, viskositas kinematik 5,14 cSt serta densitas 835 kg/m<sup>3</sup>. Pada pengujian FTIR gugus fungsi ester (C=O) dengan intensitas 45,71 yang berada pada peak 1747,51 1/cm, sedangkan pada pengujian GCMS sampel tersebut memiliki kandungan sebesar 2,54% Dodecane dan 2,93% Tetradecane yang merupakan senyawa alkana yang terkandung dalam biodiesel. Metode ozonisasi memiliki karakteristik pembakaran biodiesel yang mendekati sampel solar sedangkan untuk data konsumsi energi terendah yaitu pada sampel B35I30 memerlukan 0,0003 kWh/L.

**Kata kunci:** biodiesel, plasma, ozonisasi, ionisasi



## ABSTRACT

**DIAN KUSUMAWATI.** *Characterization and Performance Test of Biodiesel from Plasma, Ozonization, and Ionization of Crude Palm Oil (CPO) Process (supervised by Andi Erwin Eka Putra and Novriany Amaliyah)*

The manufacture of biodiesel generally uses a transesterification process which is seen as the most profitable method of producing biodiesel fuel from vegetable oils but the disadvantages of conventional processing systems are long processing times and require very large areas of land. To provide an alternative to processing palm oil liquid waste, it can be done with a plasma system through the Dielectric Barrier Discharge (DBD) method. This study aims to analyze the characteristics of biodiesel, biodiesel combustion characteristics, and analyze the energy consumption of plasma, ozonization and ionization methods in making biodiesel. In this study, palm oil was treated with plasma, ozonization, and ionization with various times and then mixed with dextlite and methanol to make 35% biodiesel, namely B35P6, B35O30, B35O60, B35O120, B35O180, B35I30, B35I60, B35I120, and B35I180, after which the samples were characterized using a bomb calorimeter to identify Higher Heating Value (HHV), density (ASTM D1217), flash point (ASTM D93), viscosity (ASTM D445), Fourier Transform InfraRed Method (FT-IR), and Gas Chromatograph-Mass Spectrometer (GC-MS). The results showed that the B35I60 fuel mixture with the highest heating value of 35,282 kJ/kg, the highest flash point of 118°C, kinematic viscosity of 5.14 cSt and density of 835 kg/m<sup>3</sup>. In the FTIR test, the ester functional group (C=O) with an intensity of 45.71 was located at peak 1747.51 1/cm, while in the GCMS test the sample contained 2.54% Dodecane and 2.93% Tetradecane which are alkane compounds contained in biodiesel. The ozonation method has biodiesel combustion characteristics that are close to diesel samples, while the lowest energy consumption data for sample B35I30 requires 0.0003 kWh/L.

**Keywords:** biodiesel, plasma, ozonization, ionization



## DAFTAR ISI

|  |             |
|--|-------------|
| <b>PENGAJUAN TESIS</b> .....                                   | <b>ii</b>   |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....                                 | <b>iii</b>  |
| <b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA</b> .... | <b>iv</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....                                    | <b>v</b>    |
| <b>ABSTRAK</b> .....   | <b>vi</b>   |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....  | <b>viii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....                                      | <b>x</b>    |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....                                     | <b>xi</b>   |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....                                   | <b>xiii</b> |
| <b>DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN</b> .....                 | <b>xiv</b>  |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....                                 | <b>1</b>    |
| 1.1 Latar Belakang.....  | 1           |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                                      | 4           |
| 1.3 Tujuan Penelitian.....                                     | 5           |
| 1.4 Batasan Masalah.....                                       | 5           |
| 1.5 Manfaat Penelitian.....                                    | 5           |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....                           | <b>6</b>    |
| 2.1 Penelitian yang Relevan .....                              | 6           |
| 2.2 Crude Palm Oil.....  | 13          |
| 2.3 Biodiesel.....   | 16          |
| 2.4 Plasma.....  | 20          |
| 2.5 Ozon .....   | 22          |
| a. Interaksi Ozon-Hidro Karbon.....                            | 23          |
| b. Pengaruh Ozon Pada Karakteristik Pembakaran .....           | 23          |
| c. Dampak ozon pada pembakaran mesin IC .....                  | 24          |
| d. Generator Ozon.....   | 24          |
| 2.6 Ion.....   | 27          |
| 2.7 Fourier Transformed Infrared (FTIR) .....                  | 28          |
| 2.8 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) .....         | 29          |
| Perhitungan Konsumsi Energi.....                               | 31          |
| <b>METODE PENELITIAN</b> .....                                 | <b>32</b>   |
| Jenis Penelitian .....   | 32          |
| Waktu dan Tempat Penelitian .....                              | 32          |



|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 3.3                                     | Alat dan Bahan .....  | 32        |
| 3.3.1                                   | Alat.....   | 32        |
| 3.3.2                                   | Bahan .....   | 39        |
| 3.4                                     | Parameter Penting dalam Pengambilan Data .....                                | 41        |
| 3.5                                     | Skema Penelitian .....  | 47        |
| 3.5                                     | Diagram Alir Penelitian.....  | 48        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b> |   | <b>49</b> |
| 4.1.                                    | Karakteristik Bahan Bakar .....   | 49        |
| 4.2.                                    | Pengujian FTIR dan GCMS Bahan Bakar.....                                      | 51        |
| 4.2.1                                   | Analisis Fourier Transform Infrared (FTIR) Bahan Bakar.....                   | 51        |
| 4.2.2                                   | Analisis <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS) Bahan Bakar..... | 56        |
| 4.3                                     | Kinerja Pembakaran Mesin Diesel TV1 .....                                     | 60        |
| 4.3.1                                   | Analisis Pembakaran Bahan Bakar.....  | 60        |
| 4.3.2                                   | Analisis Tekanan Silinder.....  | 62        |
| 4.3.3                                   | Analisis Pelepasan Panas.....   | 64        |
| 4.4                                     | Data Konsumsi Energi.....   | 66        |
| <b>BAB V PENUTUP .....</b>              |   | <b>68</b> |
| 5.1                                     | Kesimpulan.....   | 68        |
| 5.2                                     | Saran .....   | 68        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>             |   | <b>69</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>                    |   | <b>73</b> |



## DAFTAR TABEL

| Nomor  | Halaman |
|--|---------|
| Tabel 1 Komposisi asam lemak pada minyak sawit ..... | 15      |
| Tabel 2 Standar SNI Mutu Minyak Kelapa Sawit .....   | 16      |
| Tabel 3 Syarat Mutu Biodiesel SNI 7182:2015 .....    | 17      |
| Tabel 4 Karakteristik Bahan Bakar .....              | 49      |
| Tabel 5 Hasil Pengujian FT-IR .....                  | 51      |
| Tabel 6 Hasil Pengujian GC-MS.....                   | 56      |
| Tabel 7 Data Perhitungan Konsumsi Energi .....       | 66      |



## DAFTAR GAMBAR

| Nomor     |  | Halaman |
|-----------|--|---------|
| Gambar 1  | Reaksi Pembentukan Trigliserida pada Minyak Kelapa Sawit .....   | 15      |
| Gambar 2  | Reaksi Esterifikasi.....   | 19      |
| Gambar 3  | Reaksi Penyabunan .....  | 19      |
| Gambar 4  | Reaksi Transesterifikasi .....   | 20      |
| Gambar 5  | Reaktor <i>Dielectric Barrier Discharge</i> (Foster et al., 2012).....   | 22      |
| Gambar 6  | Representasi skematis dari generator ozon yang bekerja berdasarkan prinsip <i>Dielectric Barrier Discharge</i> (DBD) .....                             | 25      |
| Gambar 7  | Mekanisme Criegee untuk Reaksi Ozonasi pada Ester Asam Lemak Tak Jenuh (Bismo, 2005) .....   | 26      |
| Gambar 8  | <i>Negative Ion Generator</i> .....  | 27      |
| Gambar 9  | Alat pembangkit plasma.....  | 33      |
| Gambar 10 | Reaktor .....  | 33      |
| Gambar 11 | Generator Ozon .....   | 34      |
| Gambar 12 | Generator ion negatif.....   | 34      |
| Gambar 13 | Timbangan skala 0,001 gram .....   | 35      |
| Gambar 14 | Stopwatch.....   | 35      |
| Gambar 15 | Calorimeter bomb.....  | 36      |
| Gambar 16 | Magnetic stirrer .....   | 36      |
| Gambar 17 | Viscometer ostwald .....   | 37      |
| Gambar 18 | Termokopel .....   | 37      |
| Gambar 19 | <i>Gas Chromatography Mass Spectroscopy</i> (GCMS) .....   | 38      |
| Gambar 20 | FTIR ( <i>Fourier Transform Infra Red</i> ).....   | 38      |
| Gambar 21 | Minyak kelapa sawit.....   | 39      |
| Gambar 22 | Teflon .....   | 39      |
| Gambar 23 | Elektroda tungsten.....  | 40      |
| Gambar 24 | Dexlite .....  | 40      |
| Gambar 25 | Tahapan Proses Produksi Biodiesel oleh Pertamina .....   | 43      |
| Gambar 26 | Skema Penelitian .....   | 47      |
| Gambar 27 | Diagram Alir Penelitian .....  | 48      |
| Gambar 28 | Perbandingan tekanan silinder terhadap sudut engkol dengan rasio kompresi 18:1 dan beban 9 kg pada bahan bakar dengan proses ozonisasi.....            | 60      |
| Gambar 29 | Tekanan silinder terhadap sudut engkol dengan rasio kompresi 18:1 beban 9 kg pada bahan bakar dengan proses ionisasi .....                             | 61      |
| Gambar 30 | Tekanan silinder terhadap sudut engkol dengan rasio kompresi 18:1 beban 9 kg pada bahan bakar dengan proses ozonisasi,ionisasi, plasma dan solar. .... | 61      |
| Gambar 31 | Perbandingan tekanan silinder terhadap volume silinder dengan rasio 18:1 beban 9 kg pada bahan bakar dengan proses ozonisasi.....                      | 63      |
| Gambar 32 | Perbandingan tekanan silinder terhadap volume silinder dengan rasio 18:1 beban 9 kg pada bahan bakar dengan proses ionisasi .....                      | 63      |



Gambar 33 Perbandingan tekanan silinder terhadap volume silinder dengan rasio kompresi 18:1 beban 9 kg pada bahan bakar biodiesel dengan proses ozonisasi, ionisasi, plasma dan solar ..... 64

Gambar 34 Perbandingan pelepasan panas (*net heat release*) terhadap sudut engkol pada beban 9 kg rasio kompresi 18 pada bahan bakar dengan proses ozonisasi .. 64

Gambar 35 Perbandingan pelepasan panas (*net heat release*) terhadap sudut engkol pada beban 9 kg rasio kompresi 18 pada bahan bakar dengan proses ionisasi ..... 65

Gambar 36 Perbandingan pelepasan panas (*net heat release*) terhadap sudut engkol pada beban 9 kg rasio kompresi 18 pada bahan bakar biodiesel dengan proses ozonisasi, ionisasi, plasma dan solar ..... 66



## DAFTAR LAMPIRAN

| Nomor   | Halaman |
|---|---------|
| Lampiran 1 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS Solar.....     | 74      |
| Lampiran 2 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS B35P6 .....    | 77      |
| Lampiran 3 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS B35O30.....    | 79      |
| Lampiran 4 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS B35O60.....    | 81      |
| Lampiran 5 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS B35O120.....   | 83      |
| Lampiran 6 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS B35O180.....   | 85      |
| Lampiran 7 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS B35I30 .....   | 87      |
| Lampiran 8 Hasil Pengujian FT-IR dan GCMS B35I60.....     | 89      |
| Lampiran 9 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS B35I120 .....  | 91      |
| Lampiran 10 Hasil Pengujian FT-IR dan GC-MS B35I180 ..... | 93      |



## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

| Lambang/singkatan | Arti dan keterangan                                  |
|-------------------|--|
| W                 | = Energi listrik yang dibutuhkan (kWh/L)             |
| V                 | = Tegangan Listrik (kV)                              |
| I                 | = Arus Listrik (Ampere)                              |
| cSt               | = Satuan viskositas kinematic (centistoke)           |
| $\mu$ L           | = Satuan volume yang sama dengan 1 / 1.000.000 liter |
| T                 | = Waktu (jam)  |
| Volume            | = Volume limbah cair kelapa sawit (L)                |
| CPO               | = <i>Crude Palm Oil</i>                              |
| COD               | = <i>Chemical Oxygen Demand</i>                      |
| BOD               | = <i>Biochemical Oxygen Demand</i>                   |
| FT-IR             | = <i>Fourier Transform Infrared</i>                  |
| GC-MS             | = <i>Gas Chromatography Mass Spectroscopy</i>        |
| DBD               | = <i>Dielectric Barrier Discharge</i>                |
| POME              | = <i>Palm Oil Mill Effluent</i>                      |
| BSFC              | = <i>Brake Specific Fuel Consumption</i>             |
| RBPO              | = <i>Refined Bleached Palm Oil</i>                   |
| ROHR              | = <i>Rate of Heat Release</i>                        |
| RBDPO             | = <i>Refined Bleached Deodorized Palm Oil</i>        |



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pembuatan biodiesel umumnya menggunakan proses transesterifikasi dengan metode *batch*, di mana proses tersebut terjadi pencampuran serta pengadukan antara bahan baku utama biodiesel dengan katalis secara bersamaan dan adanya proses pendiaman dalam selang waktu tertentu sampai terbentuk dua lapisan. Ada metode lain dalam pembuatan biodiesel, yaitu metode kontinyu dengan menggunakan *plug flow reaktor*. Metode kontinyu memiliki keuntungan dibandingkan dengan metode *batch* yaitu kemudahan pengendalian reaksinya, kekompakannya karena kebutuhan ruangan yang relatif kecil, serta kemudahan melakukan *scaling* untuk produksi berskala besar. (Yan et al., 2020).

Ada empat metode yang sudah banyak dikembangkan dalam memproduksi biodiesel, yaitu: penggunaan langsung (*direct use*) dan pencampuran (*blending*), mikroemulsi, pirolisis (*thermal cracking*), dan transesterifikasi (alkoholisis). Transesterifikasi yang juga disebut alkoholisis adalah reaksi antara lemak atau minyak dengan alkohol sehingga dihasilkan ester dan gliserol. Sampai saat ini metode ini dipandang sebagai metode yang paling menguntungkan dalam memproduksi bahan bakar biodiesel dari minyak nabati. Beberapa alkohol yang dapat digunakan dalam reaksi transesterifikasi adalah metanol, etanol, propanol, butanol dan amil alkohol. Di antara alkohol tersebut yang paling sering digunakan adalah metanol dan etanol, terutama metanol, karena murah dan rantai karbonnya lebih pendek. Transesterifikasi minyak nabati dengan metanol dapat dilakukan dengan menggunakan katalis homogen (asam atau basa) maupun heterogen (asam, basa atau enzimatik) (Setyopratomo et al., 2008).

Kelemahan dari sistem pengolahan konvensional adalah waktu pengolahan yang lama (10-90 hari) dan membutuhkan lahan yang sangat luas ( $\pm 6$  kali dari luas area pabrik). Untuk memberikan alternatif pengolahan limbah cair kelapa sawit dapat dilakukan dengan sistem plasma melalui metoda *Dielectric Barrier*



D). Berbagai jenis penelitian dilaksanakan selain bertujuan untuk dampak negatif limbah terhadap manusia dan lingkungan, juga agar limbah dapat dimanfaatkan secara maksimal dan tidak menimbulkan

sampah (*the zero waste concept*) sehingga memberikan nilai tambah (Hazmi & Desmiarti, 2013).

Dalam meningkatkan kinerja dan mengurangi emisi gas buang pada mesin pembakaran, penambahan ozon ke udara yang dipasok di ruang pembakaran dipelajari. Dalam hal ini, ozon dapat diproduksi menggunakan teknologi plasma (plasma-ozon) yang merupakan teknologi sederhana dan ramah lingkungan. Plasma-ozon dihasilkan menggunakan metode *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) (Insani et al., 2021).

Dampak biodiesel teroksidasi pada performa mesin belum banyak diketahui. Suatu penelitian pada biodiesel dari minyak kedelai menunjukkan bahwa nilai kalor biodiesel dan biodiesel teroksidasi adalah 12,7% dan 14,7% lebih rendah daripada solar. Sedangkan biodiesel dan biodiesel teroksidasi mempunyai *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) 13,8% dan 15,1% lebih tinggi daripada solar. Alasan BSFC biodiesel lebih tinggi adalah biodiesel memiliki kemungkinan perubahan waktu pembakaran karena bilangan setana biodiesel lebih tinggi (Ariwibowo et al., 2011). Sintesis biodiesel ozonida dianggap sebagai alternatif yang lebih baik, yaitu aplikasi reaksi ozonolisis secara kuasi paralel dalam reaksi transesterifikasi tersebut menggunakan etanol, sehingga dihasilkan biodiesel atau etil-ester ozonida. Dari hasil uji kinerja produk biodiesel ozonidanya, didapatkan informasi tentang indeks setana, daya, dan torsi yang lebih baik dari minyak solar di Indonesia (Bismo, 2005).

Salah satu teknologi yang dapat digunakan adalah teknologi ozonasi. Hal ini dilakukan dengan menggunakan *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dengan ozon. Ozon dihasilkan dari generator ozon dengan daya 18 watt, dengan konsentrasi 0,1068 mg/detik. Ozon berfungsi untuk mengurangi kebutuhan oksigen kimia (COD), minyak, dan total padatan dalam minyak sawit mentah dari pabrik. Penelitian ini dilakukan dengan variasi pH 8,10, dan 12 dengan NaOH penambahan dan variasi waktu 10, 20, 30, 40 menit. Hasil penelitian diperoleh bahwa efisiensi oksigen kimia (COD) dapat mencapai maksimum 90%, dengan pH 8 ) menit (Novermen et al., 2014).



Satu teknologi terbaru adalah sintesa biodiesel dengan proses *ozonasi criegee* adalah reaksi ozon terhadap campuran hasil pada reaksi transesterifikasi menghasilkan senyawa ozonida dan campurannya. Hasil ini memiliki karakteristik pembakaran lebih baik pada motor diesel merupakan proses alternatif yang menarik. Reaksi ozonolisis pada produk etil-ester secara kuasiparalel menggunakan pelarut yang membebaskan proton (larutan protik) (Schumacher, 2001).

Penelitian tentang teknologi proses *ozonasi criegee* dalam memproduksi biodiesel bermutu tinggi ini telah dilakukan di beberapa negara maju (McKee, dkk., US Patent) dan telah dipatenkan, sedangkan di Indonesia baru dilakukan oleh Setijo Bismo tetapi baru menggunakan metode “*ventury bubling injection*” yang biasanya digunakan untuk produksi dengan kapastasi kecil. Untuk mendukung produksi biodiesel buatan dalam negeri dan paten milik bangsa Indonesia penelitian tentang teknologi produksi biodiesel dengan *ozonasi criegee* ini masih sangat relevan. Masalah utama dalam teknologi proses ini adalah efektivitas dari reaksi ozonasi terutama jika menggunakan reaktor *catalized bed* yang memiliki kelebihan dalam kapasitas yang besar, seperti: laju alir ozon, laju alir *recycle* dan komposisi katalis ozonolisis yang tepat dan juga waktu reaksi ozonasi masih belum dapat diprediksi dengan tepat (Purwanto & Kafidhu, 2021). Mekanisme reaksi ozonasi dari ester asam-asam lemak dalam penelitian-penelitian yang ada sampai saat ini, semuanya didasarkan oleh mekanisme reaksi adisi ozon yang diperkenalkan oleh Criegee (Diaz, 2003).

Molekul hidrokarbon merupakan unsur penyusun utama bensin, cenderung untuk saling tertarik satu sama lain, membentuk gugus molekul (*clustering*). Pemberian suatu medan magnet pada molekul hidrokarbon tersebut menyebabkan penolakan-penolakan antar molekul hidrokarbon (*declustering*) sehingga terbentuk jarak yang optimal antara molekul hidrokarbon dan melemahkan ikatan antara atom H-C dan mudah tertarik dengan oksigen pada proses pembakarannya. Dengan adanya hal tersebut di atas, bahan bakar yang terkena efek kemagnetan akan lebih reaktif dalam proses pembakaran yang sempurna di ruang mesin sehingga akan mempengaruhi unjuk kerja mesin yang semakin optimal dengan jumlah oksigen yang tepat dengan jumlah bahan bakar di dalam ruang mesin. Hal ini dapat memungkinkan terjadinya pembakaran yang sempurna. Atau



dengan kata lain apabila campuran bahan bakar dengan udara masuk ke dalam silinder mempunyai campuran yang sesuai antara jumlah hidrokarbon dengan jumlah oksigen dan campurannya homogen akan dimungkinkan pembakaran yang normal dan sempurna. Ionisasi bahan bakar diesel menyebabkan ikatan ion akan semakin renggang, akibatnya ketika berinteraksi dengan udara lebih mudah berikatan dengan oksigen. Dampak tersebut menyebabkan proses pembakaran lebih sempurna sehingga diprediksi menghasilkan kerja yang lebih besar. Ionisasi tersebut digunakan perangkat elektromagnetik, dimana efek gaya magnet yang dihasilkan oleh arus listrik DC dari ACU mengikat ion-ion di dalam bahan bakar khusus kendaraan diesel. Proses ionisasi bahan bakar tidak dapat diamati secara visualisasi namun dievaluasi berdasarkan karakteristik kinerja mesin diesel melalui dinamometer. Ionisasi yang paling baik selalu ditunjukkan dengan kinerja motor diesel yang lebih baik (Winarto et al., 2016).

Banyak cara yang dapat dilakukan untuk optimalisasi kinerja motor diesel, hal ini dilakukan dalam rangka untuk menaikkan kinerjanya. Pemasangan solenoid penghasil medan magnet merupakan salah satu solusi yang tepat melalui proses ionisasi. Unjuk kerja motor diesel sangat bergantung pada sempurnanya pembakaran campuran bahan bakar dan udara. Proses ini berkaitan dengan ionisasi bahan bakar dengan menggunakan medan magnet yang akan memastikan pembakaran yang sempurna. Upaya dilakukan dalam penelitian ini untuk meningkatkan efisiensi pembakaran mesin diesel dengan mengadopsi metode ionisasi bahan bakar magnetik di mana bahan bakar terionisasi karena medan magnet. Metode ionisasi bahan bakar magnetik menetapkan kriteria pembakaran bahan bakar yang ditingkatkan efisiensi termal, pengurangan tingkat emisi, sifat ramah lingkungan (Vijaya Kumar et al., 2014). Berdasarkan penelitian di atas sehingga peneliti membahas karakteristik bahan bakar dan karakteristik pembakaran biodiesel (B35) dan melakukan penelitian yang berjudul **Karakterisasi Dan Uji Kinerja Biodiesel Dari Proses Plasma, Ozonisasi, Dan Ionisasi Crude Palm Oil (CPO)**



#### Masalah

arkan latar belakang di atas, maka peneliti dapat merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik biodiesel yang dihasilkan dari metode plasma, ozonisasi, dan ionisasi?
2. Bagaimana karakteristik pembakaran biodiesel yang dihasilkan dari metode plasma, ozonisasi dan ionisasi?
3. Bagaimana analisis konsumsi energi dari metode plasma, ozonisasi dan ionisasi dalam pembuatan biodiesel?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yang ingin dicapai adalah untuk mengetahui:

1. Menganalisis karakteristik biodiesel yang dihasilkan dari metode plasma, ozonisasi, dan ionisasi.
2. Menganalisis karakteristik pembakaran biodiesel yang dihasilkan dari metode plasma, ozonisasi, dan ionisasi.
3. Menganalisis konsumsi energi dari metode plasma, ozonisasi dan ionisasi dalam pembuatan biodiesel.

### 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini proses produksi biodiesel dengan metode plasma, ozonisasi, dan ionisasi yang akan dibatasi sebagai berikut:

1. Bahan bakar yang digunakan adalah minyak kelapa sawit (*crude palm oil*) yang dibuat B35.
2. Menggunakan mesin diesel tipe TV1.
3. Waktu plasma adalah 6 menit.
4. Variasi waktu ozonisasi bahan bakar adalah 30 menit, 1 jam, 2 jam dan 3 jam
5. Variasi waktu ionisasi bahan bakar adalah 30 menit, 1 jam, 2 jam dan 3 jam

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah:

1. Untuk memberi informasi tentang karakteristik biodiesel dengan menggunakan metode plasma, ozonisasi dan ionisasi.



Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk penelitian lebih lanjut yang berkaitan dengan produksi biodiesel.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian yang Relevan

Di antara berbagai pilihan bahan bakar alternatif untuk diesel, biodiesel telah muncul sebagai bahan bakar yang paling menjanjikan karena asalnya yang terbarukan, ketersediaan, biodegradabilitas, efisiensi pembakaran yang tinggi, dan emisi yang lebih rendah (Krishnasamy & Bukkarapu, 2021). Generasi kedua bioenergi: studi tentang teknologi produksi biodiesel berbasis limbah cair CPO telah dilakukan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh biodiesel dari limbah cair industri pengolahan CPO dan untuk mengidentifikasi jenis senyawa metil ester biodiesel. Produksi biodiesel diterapkan dalam dua langkah reaksi; reaksi esterifikasi menggunakan  $H_2SO_4$  dan transesterifikasi menggunakan katalis  $CaO$  pada suhu  $60^\circ C$  selama 2 jam. Hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa metil ester dari limbah cair CPO mengandung metil heksadekanat 12,87%, metil 9-oktadekanat 19,98%, metil oktadecenoat 5,71%, dan metil 8,11-oktadekanat 10,22% (Maulidiyah et al., 2017).

Produksi biodiesel menggunakan sisa minyak dari limbah pabrik kelapa sawit dan lipase mentah dari buah kelapa sawit sebagai substrat dan katalis memiliki hasil biodiesel yang tinggi ( $92,07 \pm 1,04\%$ ) dalam kondisi optimal. POME dianggap sebagai sumber alternatif minyak karena mengandung kandungan minyak dan lemak yang tinggi (5569,82 mg/L). Minyak diekstraksi dari POME dengan metode *soxhlet* menggunakan campuran heksana, metanol dan aseton. Delapan puluh persen sisa minyak (4455 mg/L) ditemukan dari POME. Produksi biodiesel dari katalis lipase mentah merupakan metode alternatif yang mudah dilakukan dan dapat dilakukan dengan biaya investasi yang rendah. Selain itu, biodiesel dari sisa minyak menggunakan katalis lipase mentah dikarakterisasi sesuai dengan standar ASTM. Sebagian besar sifat biodiesel dari lipase mentah dapat diterima, sesuai dengan standar biodiesel dan ASTM Thailand. Kandungan asam lemak bebas rendah (0,07%) diamati pada biodiesel enzimatis. Titik awan tinggi ( $10-13^\circ C$ ) dan angka cetane ( $59.0-60.0$ ) juga diilustrasikan karena angka cetane yang tinggi ini penting yang digunakan untuk memenuhi syarat biodiesel yang tinggi, biodiesel POME mungkin dapat digunakan sebagai biofuel campuran dengan bahan bakar fosil (Suwanno et al., 2017).



Sebuah proyek industri dikembangkan untuk mengoptimalkan produksi biodiesel dari minyak sawit mentah. Proses ini dikembangkan untuk aplikasi skala satu ton pada fasilitas produksi minyak sawit di Afrika khatulistiwa, yang akan digunakan di perkebunan untuk menyediakan bahan bakar bagi armada perusahaan. Karena kondisi spesifik (minyak sawit mentah sebagai bahan awal, aplikasi dalam kondisi teknologi yang sulit), sangat penting bagi prosedur yang dikembangkan untuk menjadi kuat dan sederhana, dan untuk menggunakan jumlah minimum bahan kimia. Proses ini dioptimalkan pada skala laboratorium pada tahun 2005 dan 2006, ditingkatkan pada tahun berikutnya, dan sejak itu berhasil diterapkan sebagaimana dimaksud di perkebunan kelapa sawit. Biodiesel yang diproduksi digunakan murni, tanpa dicampur dengan bahan bakar diesel dan tanpa aditif. Setelah beberapa tahun digunakan terus menerus, tidak ada efek negatif yang terlihat pada mesin. Oleh karena itu, efisiensi dan daya tahan proses dikonfirmasi (Cukalovic et al., 2013).

Dalam penyelidikan analitis ini, minyak sawit yang dipanaskan sebelumnya digunakan dalam mesin diesel injeksi langsung dengan berbagai metode optimasi. Tujuan utama dari optimasi adalah untuk mendapatkan hasil yang lebih baik daripada mesin konvensional. Minyak sawit mentah dipanaskan menggunakan proses pertukaran panas untuk mengurangi kepadatan dan viskositas. Hubungan antara proses *output* dan respon faktor dievaluasi dalam desain metode eksperimen. Metode Taguchi adalah metode penting untuk optimalisasi kinerja respons output dan karakteristik emisi mesin diesel. Dua faktor penting—*output* dan *input*—dihitung. Faktor *input* yang dipertimbangkan adalah campuran biodiesel sawit yang dipanaskan sebelumnya, torsi, tekanan injeksi, rasio kompresi, dan waktu injeksi. Faktor *output* yang dihitung adalah opasitas asap, emisi karbon monoksida, dan konsumsi bahan bakar spesifik rem dengan menggunakan rasio *signal-to-noise* (S/N) dan analisis varian. Karbon monoksida paling dipengaruhi oleh kondisi torsi melalui waktu injeksi dan tekanan injeksi, dan opasitas emisi asap. Di antara mereka, waktu injeksi memiliki dampak yang lebih tinggi. Campuran biodiesel



siapkan: B10 (90% diesel + 10% minyak), B20 (80% diesel + 20% 70% diesel + 30% minyak) dan B40 (60% diesel + 40% minyak). erak (50 ppm) terus-menerus dicampur dengan berbagai campuran

biodiesel. Emisi opasitas asap untuk campuran biodiesel B30+ 50 ppm nanopartikel perak menunjukkan rasio S/N terendah dan mencapai hasil optimal yang lebih baik dibandingkan dengan campuran lainnya. Campuran B30+50 ppm nanopartikel perak menunjukkan nilai rasio S/N terendah sebesar 9,7 dibandingkan dengan campuran lainnya. Opasitas asap, emisi karbon monoksida, dan konsumsi bahan bakar spesifik rem dari semua faktor optimal respons ditemukan masing-masing sebesar 46,77 ppm, 0,32%, dan 0,288 kg/kWh (Mohamed et al., 2022).

Biodiesel terutama diproduksi dari sumber daya alam yang tidak terbatas melalui proses transesterifikasi. Ini menyajikan berbagai keunggulan dibandingkan petro-diesel; misalnya, tidak beracun, dapat terurai secara hayati, dan mengandung lebih sedikit polutan udara per energi bersih yang dihasilkan dengan kandungan sulfur dan aromatik yang rendah, selain aman. Mempertimbangkan pentingnya topik ini, penelitian ini berfokus pada penggunaan minyak sawit, produk sampingannya, dan limbah pabrik untuk produksi biodiesel. Minyak kelapa sawit dikenal sebagai bahan baku yang sangat baik karena biodiesel memiliki sifat yang mirip dengan petro-diesel biasa. Karena perdebatan tentang penggunaan minyak sawit sebagai makanan versus bahan bakar, penelitian ekstensif telah dilakukan untuk memanfaatkan produk sampingan dan limbah pabrik sebagai bahan baku. Tulisan ini juga membahas sifat-sifat biodiesel, perbedaan antara biodiesel sawit dengan sumber biodiesel lainnya, serta kelayakan penggunaan minyak sawit sebagai sumber utama energi alternatif dan berkelanjutan di masa depan (Zahan and Kano, 2018).

Proses transesterifikasi konvensional tidak hanya membutuhkan metanol dan katalis dalam jumlah besar tetapi juga memakan waktu dan beroperasi pada suhu tinggi. Metode lanjutan seperti plasma non-termal telah dipelajari untuk produksi biodiesel karena mereka terutama mengurangi suhu serta waktu reaksi. Dalam studi ini, reaktor plasma pelepasan kapiler fase cair dikembangkan untuk produksi biodiesel dari minyak bunga matahari secara kontinu pada suhu dan t. Empat parameter operasional utama diperiksa masing-masing variabel, termasuk rasio molar (4, 6, 8), konsentrasi katalis (0,5, 1, 1,5% n yang diberikan (10, 15, 20 kV), dan laju alir reaktan (2, 4, 6 mode permukaan respons digunakan untuk mengoptimalkan konten



FAME. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaktor pelepasan kapiler memungkinkan untuk terus menghasilkan 95,9% kandungan metil ester (kandungan FAME) dalam rasio molar MeOH/minyak 6,2:1, konsentrasi katalis 1,2% berat, tegangan yang diberikan 18 kV dan laju alir sebesar 4,6 ml/detik. Daya yang dikonsumsi pada proses ini adalah 46,16 kJ/lit. Hasil ini menunjukkan bahwa teknologi yang dipelajari mampu menghasilkan metil ester secara terus menerus dengan efisiensi konversi yang tinggi pada suhu rendah dan dengan jumlah input yang minimal dibandingkan dengan metode umum (Asghari et al., 2023).

Proses pengolahan kelapa sawit menjadi minyak sawit mentah atau *Crude Palm Oil* (CPO) menghasilkan limbah cair sawit sebanyak 2500 l/ton CPO. Limbah cair kelapa sawit ini mengandung *Chemical Oxygen Demand* (COD) rata-rata sebesar 21.280 mg/l, *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) rata-rata sebesar 34.720 mg/l, minyak lemak rata-rata sebesar 3.075 mg/l dan pH rata-rata sebesar 4. Sistem pengolahan limbah cair kelapa sawit di industri adalah dengan kombinasi proses fisik seperti sedimentasi dan proses biologi, baik secara anaerob atau aerob. Kelemahan dari sistem pengolahan konvensional adalah waktu pengolahan yang lama (10-90 hari) dan membutuhkan lahan yang sangat luas ( $\pm 6$  kali dari luas areal pabrik). Penelitian ini bertujuan untuk memberikan alternatif pengolahan limbah cair kelapa sawit dengan sistem plasma melalui metoda *Dielectric Barrier Discharge* (DBD). Hasil penelitian menunjukkan efisiensi penghilangan COD sebesar 53%, BOD sebesar 55% dan minyak lemak 40% dengan waktu pengolahan 4 (empat) jam. Konsumsi energi yang dibutuhkan 7,2 kWh/l untuk tegangan pembangkitan 19 kV (Hazmi & Desmiarti, 2013).

Penelitian ini membuat biodiesel secara kontinyu menggunakan model reaktor alir berisian (*fixed bed reaktor*). Model reaktor alir berisian (*fixed bed reaktor*) dirancang untuk membuat permukaan kontak antara reaktan dengan katalis terjadi pada tahap homogenisasi. Untuk mengevaluasi kinerja reaktor dilanjutkan dengan percobaan, minyak sawit direaksikan dengan metanol yang dikatalis oleh

ida pada suhu 60°C, rasio mol minyak sawit dengan metanol adalah 1, sedangkan persentase berat katalis terhadap minyak sawit adalah 6; dan 2%. Karakteristik terbaik diperoleh pada rasio mol 7:1 dengan 2%, yaitu densitas 0,864 g/cm<sup>3</sup>, titik nyala 120°C, viskositas 4,82 cSt,



titik tuang 13°C, CCI (*Calculated Cetane Index*) 48,28, dan presentase FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) 98,14% (Yan et al., 2020).

Dalam meningkatkan kinerja dan mengurangi emisi gas buang pada mesin pembakaran, penambahan ozon ke udara yang dipasok di ruang pembakaran dipelajari. Dalam penelitian ini, ozon dapat diproduksi menggunakan teknologi plasma (plasma-ozon) yang merupakan teknologi sederhana dan ramah lingkungan. Plasma-ozon dihasilkan menggunakan metode *Dielectric Barrier Discharge* (DBD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ozon dapat mengontrol waktu pembakaran, sehingga berpengaruh pada penurunan konsumsi bahan bakar spesifik, peningkatan perbandingan udara dan bahan bakar, peningkatan efisiensi volumetrik, peningkatan tekanan silinder dan penurunan pelepasan panas. Namun, penambahan ozon lebih efektif pada rasio kompresi rendah yaitu rasio kompresi 14. Penambahan ozon juga mengurangi opasitas emisi gas buang pada mesin diesel TV1 menjadi lebih ramah lingkungan (Insani et al., 2021).

Pada bagian pertama pekerjaan, efek ozon pada autoignisi bensin diselidiki sementara awal injeksi bahan bakar bervariasi antara 60 CAD dan 24 CAD sebelum TDC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan waktu injeksi sebelumnya meningkatkan efek promosi ozon pada autoignisi bensin terutama karena perpanjangan waktu tinggal bahan bakar-ozon. Analisis menunjukkan bahwa sementara ozon digunakan untuk mengurangi suhu asupan, pembakaran dimulai dan dikembangkan pada suhu yang lebih rendah dengan keuntungan dalam hal emisi NOx. Untuk memanfaatkan efek ozon, strategi injeksi harus disesuaikan: injeksi pertama selama stroke intake diperlukan untuk mendapatkan efek promosi ozon sementara injeksi kedua selama *stroke* kompresi digunakan untuk menginduksi stratifikasi bahan bakar yang diperlukan untuk mengendalikan pentahapan pembakaran dan untuk menghindari laju pelepasan panas yang berlebihan (Pinazzi and Foucher, 2017)

Dalam meningkatkan kinerja dan mengurangi emisi gas buang pada mesin dilakukan penambahan ozon ke udara yang disuplai di ruang bakar. Dalam penelitian ini, ozon dapat diproduksi dengan menggunakan teknologi plasma (plasma-ozon) yang merupakan teknologi sederhana dan ramah lingkungan.



Plasma-ozon dihasilkan menggunakan metode *Dielectric Barrier Discharge* (DBD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ozon pada suplai udara tidak berpengaruh signifikan terhadap daya rem namun mampu meningkatkan konsumsi bahan bakar spesifik, meningkatkan tekanan silinder, mempersingkat proses pembakaran, dan mengurangi nilai pelepasan panas. Penambahan ozon mengurangi opasitas emisi gas buang pada mesin diesel TV-1 menjadi lebih ramah lingkungan (Insani et al., 2021).

Penelitian ini merupakan studi awal dari proses-proses penjenhuan senyawa-senyawa etil ester dari beberapa jenis minyak nabati, yang sangat potensial untuk digunakan sebagai komplemen bahan-bakar mesin-mesin diesel (diesel engines). Minyak-minyak nabati yang digunakan dipilih berdasarkan beberapa faktor, seperti ketersediaan sumber-sumber dayanya, sifat kimia dan fisiknya, juga sifat-sifat mekaniknya untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar ataupun aditif bahan bakar mesin diesel, seperti: minyak sawit (palm oil), minyak kelapa (coconut oil), minyak kedelai (soyabean oil) dan minyak bunga matahari (sunflower oil). Reaksi ozonasi yang diterapkan pada ke empat jenis etil ester di atas memberikan gambaran dan prospek yang sangat jelas untuk mengubah sifat-sifat dan atau karakteristik dari ester yang berasal dari minyak-minyak nabati kelapa sawit, kedele, dan bunga matahari. Adanya konfirmasi terjadinya reaksi ozonasi tersebut berarti juga adanya reaksi pemutusan ikatan rangkap, terutama ikatan rangkap tunggal, yang pada akhirnya akan dihasilkan senyawa-senyawa dengan rantai karbon yang lebih sederhana dibandingkan senyawa asalnya. Senyawa-senyawa hidrokarbon yang terbentuk tersebut diharapkan dapat juga memperbaiki karakteriskik ester-ester tersebut jika digunakan sebagai bahan bakar ataupun juga sebagai aditif bahan bakar mesin diesel (Bismo,2004).

Sintesis biodiesel ozonida dianggap sebagai alternatif yang lebih baik, yaitu aplikasi reaksi ozonolisis secara kuasi paralel dalam reaksi transesterifikasi tersebut menggunakan etanol, sehingga dihasilkan biodiesel atau etil-ester ozonida. Ozon merupakan produk in situ dari ozonator dengan bahan baku udara, aksi ozon sekitar 5,5 gram/jam dengan alir udara umpan 400-800 biodiesel ozonida ini lebih menyukai etanol (96% -v) sebagai pelarut agkan dengan metanol, baik menggunakan katalis (zeolit/GAC)



maupun tanpa katalis, pada suhu 55-72°C dan tekanan atmosferik. Penggunaan etanol dapat dihemat sampai sekitar 31,15-39,85 %-mol dari jumlah yang diperlukan untuk sintesis biodiesel konvensional. Dari hasil uji kinerja produk biodiesel ozonidanya, didapatkan informasi tentang indeks setana, daya, dan torsi yang lebih baik dari minyak solar di Indonesia (Bismo, 2005).

Kinerja mesin IC sangat tergantung pada pembakaran sempurna bahan bakar udara campuran yang berarti lebih sedikit gas yang tidak terbakar dan karenanya menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi, lebih sedikit emisi. Pekerjaan ini berkaitan dengan ionisasi bahan bakar dengan menggunakan medan magnet yang akan memastikan lengkap pembakaran campuran bahan bakar udara. Biasanya injektor bahan bakar mengubah bahan bakar cair menjadi partikel halus (atomisasi dan penguapan). Upaya dilakukan dalam pekerjaan ini untuk meningkatkan pembakaran efisiensi mesin pembakaran internal dengan mengadopsi metode ionisasi bahan bakar magnetik di mana bahan bakar terionisasi karena medan magnet. Medan magnet diciptakan oleh magnet daya tinggi, yang dipasang di atas saluran pipa pembawa bahan bakar sebelum bahan bakar dibiarkan masuk ke dalam pembakaran ruang. Metode ionisasi bahan bakar magnetik tidak menetapkan kriteria pembakaran bahan bakar yang lebih baik hanya memastikan peningkatan efisiensi termal dan pengurangan tingkat emisi dalam mesin I.C tetapi juga sifat mesin I.C yang ramah lingkungan dengan eksperimen lebih lanjut dalam waktu dekat. Percobaan telah dilakukan pada mesin diesel empat langkah dengan penggabungan magnet metode ionisasi bahan bakar. Hasil yang dihasilkan dari percobaan menunjukkan bahwa efisiensi termal meningkat sebesar 2% dan emisi berkurang menjadi 5% (Vijaya Kumar et al., 2014).

Banyak cara yang dapat dilakukan untuk optimalisasi kinerja motor diesel, hal ini dilakukan dalam rangka untuk menaikkan kinerjanya. Pemasangan solenoid penghasil medan magnet merupakan salah satu solusi yang tepat melalui proses ionisasi. Eksperimen ini bertujuan untuk mengetahui jumlah lilitan terbaik terhadap



diesel. Dalam eksperimen ini menggunakan metode studi dengan menggunakan Solenoid elektro magnet dibuat dengan pipa elang) dengan ukuran 5/16 inch, panjang lilitan 22 cm, diameter 20 mm, dengan jumlah 2.500 lilitan, 5.000 lilitan, dan 7.500 lilitan

yang dipasang pada motor diesel satu silinder putaran stasioner. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi standar tanpa solenoid Torsi 21,401 Nm, Daya 3,360 kW, SFC 0,210 kg/kWh. Pada penggunaan solenoid 2.500 lilitan menghasilkan unjuk kerja motor terbaik, torsi 21,911 Nm, Daya 3.440 kW, SFC 0,210 kg/kWh, penggunaan solenoid 5.000 lilitan menghasilkan Torsi 22,790 Nm, Daya 3,578 kW, Sfc 0,196 kg/kWh, dan pada penggunaan solenoid 7.500 lilitan 41,987 Nm, Daya 6,592 kW, SFC 0,122 kg/kWh. Jumlah lilitan solenoid sebagai penghasil medan magnet terbaik pada penelitian ini adalah untuk lilitan kawat email 7.500 lilitan yang menghasilkan peningkatan torsi 46,25 %, daya 46,25%, dan SFC 22,97 % (Prabowo et al. 2020).

Medan magnet dapat membantu proses ionisasi pada bahan bakar, sehingga bahan bakar saat proses pembakaran dapat mudah mengikat oksigen. Pengikatan oksigen pada bahan bakar secara stoikiometri menyebabkan pembakaran lebih sempurna, sehingga torsi dan daya pada mesin dapat meningkat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemasangan magnet 800 gauss terhadap torsi, daya, dan konsumsi bahan bakar spesifik motor bensin 150 CC. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan prestasi mesin motor bensin merk Honda Verza CW 150 CC yang dipasang magnet 800 Gauss merk X-Power pada saluran bahan bakar dengan tanpa dipasang magnet 800 Gauss merk X-Power. Setiap pengujian dilakukan pada putaran mesin 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm, 6000 rpm, dan 7000 rpm. Metode yang digunakan adalah secara eksperimen di Laboratorium Efisiensi dan Konversi Energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan magnet 800 gauss terjadi peningkatan torsi maksimal sebesar 0,59%, dan peningkatan daya maksimal sebesar 1% (Harianto et al., 2015).

## 2.2 Crude Palm Oil

*Crude palm oil* (CPO) merupakan produk baku dasar yang diperoleh melalui ekstraksi buah kelapa sawit. Minyak kelapa sawit, sebagai minyak nabati, tidak banyak digunakan sebagai bahan awal untuk produksi biodiesel karena mengandung asam lemak jenuh dan tak jenuh tunggal, yang menghasilkan minyak yang tinggi (33-39°C) dan metil ester yang sesuai: sudah diketahui bahwa pengendapan ester terjadi pada suhu 8°C. Masalah ini dapat diatasi dengan menambahkan aditif bahan bakar yang akan mencegah presipitasi,



atau dengan menggunakan biodiesel berbasis kelapa sawit dalam campuran dengan bahan bakar fosil (campuran umum yang mengandung 2,5 dan 20% biodiesel, masing-masing B2, B5 dan B20).Selanjutnya, CPO mengandung sejumlah senyawa yang biasanya dihilangkan selama proses pemurnian dan yang setelahnya dapat digunakan untuk berbagai aplikasi (terutama fosfatides, tetapi juga glikolipid, tokoferol, tokotrienol dan karotenoid); untuk produksi biodiesel senyawa ini, bagaimanapun, tidak diinginkan. Kelemahan lain dari CPO sebagai bahan baku biodiesel adalah kandungan asam lemak bebas yang biasanya tinggi; Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa selama ekstraksi minyak, enzim lipolitik dari *mesocarp* buah dipindahkan ke minyak (ini tergantung pada kondisi penyimpanan dan cara ekstraksi) (Singh et al., 2020).

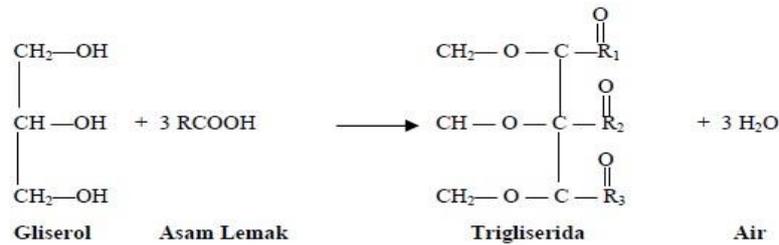
*Crude Palm Oil* (CPO) atau minyak mentah kelapa sawit merupakan hasil proses pengepressan buah sawit (*mesocarp*) yang berwarna kuning jingga berbentuk cair. Sifat fisik CPO pada suhu 25°C memiliki densitas antara 0,909-0,917 g/mL dan untuk suhu 55°C densitas CPO sebesar 0,888-0,892 g/mL (Wulandari dkk, 2011). CPO memiliki karakteristik (Ketaren S, 1986) sebagai berikut:

|                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| Rumus Kimia             | : $C_{3}H_{5}(COOR)_{3}$  |
| Berat Molekul           | : 847.28 g/mol            |
| Titik Didih             | : 298°C                   |
| Titik Beku              | : 5°C                     |
| <i>Specific Gravity</i> | : 0.9                     |
| Densitas                | : 0.895 g/cm <sup>3</sup> |
| Panas Jenis             | : 0.497 kal/g°C           |
| Kenampakan              | : cairan kuning jingga    |
| Kemurnian               | : 98%                     |
| Impuritas               | : air 2 %                 |

Minyak kelapa sawit memiliki susunan kimia stabil yaitu unsur C, H, dan O terdiri dari solid dan liquid/cairan. Fasa solid terdiri dari *saturated fatty* (lemak jenuh) dan fasa cair terdiri *unsaturated fatty* (lemak tak jenuh). Lemak jenuh pada minyak kelapa sawit adalah asam miristat (1%), asam palmitat dan stearat. Sedangkan fasa cair terdiri dari asam oleat (39%) dan asam



linoleat (11%). Kandungan lainnya kurang lebih 1% yang terdiri dari karoten, tokoferol, sterol, alkohol, triterpen, dan fosfolipida (Hudaya, 2010). Minyak sawit mengandung trigliserida, yang terbentuk dari ester dan asam lemak, reaksi kimianya dapat dilihat sebagai berikut :



**Gambar 1** Reaksi Pembentukan Trigliserida pada Minyak Kelapa Sawit

Pembentukan trigliserida adalah sama, dengan memiliki pengertian bahwa trigliserida yang sederhana. Pada pembentukan terdapat rantai rangkap, maka asam lemak yang terbentuk adalah asam lemak tak jenuh, apabila tidak ada rangkap maka akan terjadi sebaliknya. (Hudaya, 2010).

**Tabel 1** Komposisi asam lemak pada minyak sawit

| Jenis asam lemak    | Komposisi (%) |
|---------------------|---------------|
| Laurat (C12:0)      | < 1,2         |
| Miristat (C14:0)    | 0,5 – 5,9     |
| Palmitat (C16:0)    | 32 – 59       |
| Palmitoleat (C16:1) | < 0,6         |
| Stearat (18:0)      | 1,5 – 8       |
| Oleat (18:1)        | 27 – 52       |
| Linoleat (C18:2)    | 5,0 – 14      |
| Linolenat (C18:3)   | < 1,5         |

Sumber: Sulastri (2010)

Minyak kelapa sawit yang dihasilkan haruslah memenuhi standar mutu yang telah ditetapkan. Standar mutu merupakan hal yang penting untuk menentukan bahwa minyak tersebut bermutu baik. Oleh karena itu perlunya pengawasan mutu produk untuk menekan atau mengurangi volume kesalahan dan perbaikan, menjaga atau menaikkan kualitas sesuai standar. Beberapa faktor yang menentukan standar

itu produk pabrik minyak kelapa sawit yaitu kandungan ALB, (*moisture*) dalam minyak, dan kandungan kotoran (*dirt*) dalam 3). Kandungan ALB pada minyak kelapa sawit mentah digunakan



sebagai parameter utama dalam menentukan proses yang akan dilakukan pada saat konversi CPO menjadi metil ester. Jika ALB 2%, harus dilakukan proses esterifikasi terlebih dahulu sebelum transesterifikasi karena jika tidak akan terjadi penyabunan (Budhi Rahardja and Ilmar Ramadhan, 2019)

**Tabel 2** Standar SNI Mutu Minyak Kelapa Sawit

| No. | Uji Kuantitatif        | SNI     |
|-----|------------------------|---------|
| 1   | Asam Lemak Bebas (ALB) | < 5 %   |
| 2   | Kadar Air              | < 0,5 % |
| 3   | Kadar Kotoran          | < 0,5%  |

Sumber: SNI, 2006

### 2.3 Biodiesel

Biodiesel sebagai sumber daya terbarukan terus menjadi minat penelitian untuk mencapai ekonomi energi yang berkelanjutan serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, permintaan biodiesel di seluruh dunia sebagai bahan bakar alternatif meningkat karena krisis sumber energi. Biodiesel merupakan bahan bakar yang ramah lingkungan, yang merupakan salah satu sumber daya energi bersih dan terbarukan. Bahan bakar biodiesel biasanya terbuat dari lemak hewani atau trans-esterifikasi pendapatan minyak nabati reaksi. Pengembangan untuk transformasi minyak sawit mentah (CPO) menjadi biodiesel meningkat terutama karena CPO sudah tersedia, aman untuk disimpan dan ditangani, dan yang paling penting, itu benar-benar terbarukan. Kandungan sulfur biodiesel CPO dapat diabaikan dibandingkan dengan diesel yang menghasilkan lebih sedikit kemungkinan hujan asam yang disebabkan oleh emisi sulfur dioksida (Khalid et al., 2017).

Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar alternatif pengganti solar yang menggunakan minyak nabati atau hewani dengan menggunakan proses fisika serta bahan kimia yang dicampurkan dengan komposisi yang tepat, sehingga menjadi bahan bakar yang ramah lingkungan, mempunyai emisi yang industri biodiesel dapat menggunakan lemak ataupun minyak yang telah daur ulang, biodiesel tidak

ada cetana biodiesel diatas 100, penggunaan biodiesel dapat memperpanjang umur mesin karena biodiesel lebih licin, aroma gas buang dari biodiesel tidak menyengat. Apabila memberikan tambahan BBN biodiesel sebesar



0,4% - 5% pada minyak solar dapat meningkatkan daya pelumasan bahan bakar. Biodiesel memiliki rasio keseimbangan energi yang baik, yaitu minimum 1 – 2.5, dengan pengertian bahwa setiap satu unit energi yang digunakan pada pupuk, minimum terdapat 2.5 unit energi pada biodiesel (Alamsyah, 2006).

Pengujian mesin diesel dengan bahan bakar biodiesel memperoleh efisiensi dan daya mesin yang lebih besar dibandingkan dengan minyak diesel, dikarenakan temperatur gas buang yang dihasilkan lebih rendah, namun terjadi penurunan kualitas nilai kalor rata-rata 2%, angka cetana yang lebih tinggi, sehingga memperoleh waktu penyalaan yang lebih pendek (Murayama dkk, 2002). Tingginya viskositas biodiesel akan mengurangi atomisasi bahan bakar dan meningkatkan penetrasi bahan bakar semprot, yang akan mengakibatkan deposito (pemeliharaan) mesin tinggi dan penebalan minyak pelumas yang menyebabkan injeksi kokas dan cincin sticking mesin, serta menurunkan efisiensi mesin (Alamu dkk, 2007). Nilai pembakaran yang terjadi pada bahan bakar (lilin cair) serta memberikan komposisi Oksigen dan Nitrogen yang tetap, maka nilai produk hasil pembakaran nitrogen yang terjadi adalah tetap (Rahardja dkk, 2019). Syarat mutu biodiesel menurut SNI 7182:2015 adalah sebagai berikut:

**Tabel 3** Syarat Mutu Biodiesel SNI 7182:2015

| No | Parameter Uji   | Satuan, min/maks         | Persyaratan | Metode Uji Alternatif        |
|----|---|--------------------------|-------------|------------------------------|
| 1  | Massa jenis pada 40°C                                       | kg/m <sup>3</sup>        | 850 - 890   | ASTM D 1298 atau ASTM D 4052 |
| 2  | Viskositas Kinematik pada 40°C                              | mm <sup>2</sup> /s (cSt) | 2,3 - 6,0   | ASTM D 445                   |
| 3  | Angka setana  | Min                      | 51          | ASTM D 613 atau ASTM D 6890  |
| 4  | Titik nyala (mangkok tertutup)                              | °C, min                  | 100         | ASTM D 93                    |
| 5  | Titik kabut   | °C, maks                 | 18          | ASTM D 2500                  |
| 6  | Korosi lempeng tembaga (3 jam pada 50°C)                    |                          | nomor 1     | ASTM D 130                   |
| 7  | Residu karbon   | %-massa, maks            |             | ASTM D 4530 atau ASTM D 189  |
|    | Residu karbon dalam per contoh asli, atau 10% ampas stilasi |                          | 0,05        |                              |
|    | Residu karbon dalam per contoh asli, atau 10% ampas stilasi |                          | 0,3         |                              |
|    | Residu karbon dalam per contoh asli, atau 10% ampas stilasi | %-vol, maks              | 0,05        | ASTM D 2709                  |



|    |   |                                      |      |  |
|----|---|--------------------------------------|------|--|
| 9  | Temperatur distilasi 90%                | °C, maks                             | 360  | ASTM D 1160  |
| 10 | Abu tersulfatkan                        | %-massa, maks                        | 0,02 | ASTM D 874   |
| 11 | Belerang                                | mg/kg, maks                          | 100  | ASTM D 5453 atau ASTM D 1266 atau ASTM D 4294 atau ASTM D 2622 |
| 12 | Fosfor                                  | mg/kg, maks                          | 10   | AOCS Ca 12-55  |
| 13 | Angka asam                              | mg-KOH/g, maks                       | 0,5  | AOCS Cd 3d-63 atau ASTM D 664                                  |
| 14 | Gliserol bebas                          | %-massa, maks                        | 0,02 | AOCS Ca 14-56 atau ASTM D 6584                                 |
| 15 | Gliserol total                          | %-massa, maks                        | 0,24 | AOCS Ca 14-56 atau ASTM D 6584                                 |
| 16 | Kadar ester metil                       | %-massa, min                         | 96,5 |  |
| 17 | Angka iodium                            | %-massa(gI <sub>2</sub> /100g), maks | 115  | AOCS Cd 1-25   |
| 18 | Kadar monogliserida                     | %-massa, maks                        | 0,8  | ASTM D 6584  |
| 19 | Kestabilan oksidasi                     | Menit                                |      |  |
|    | - Periode induksi metode rancimat, atau |                                      | 360  | EN 15751   |
|    | - Periode induksi metode petro oksidasi |                                      | 27   | ASTM D 7545  |

Sumber: SNI 7182:2015

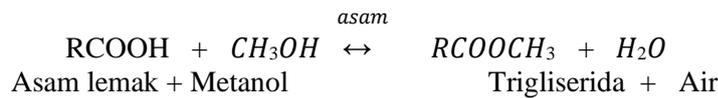
Empat teknik digunakan untuk menghasilkan biodiesel, yaitu, transesterifikasi, penggunaan dan pencampuran langsung, mikroemulsi, dan pirolisis. Namun, transesterifikasi trigliserida (TGA) telah dilaporkan sebagai teknik yang paling banyak digunakan dalam produksi biodiesel. Transesterifikasi telah dipelajari secara luas dalam beberapa dekade terakhir karena memiliki keunggulan spesifik, seperti keserbagunaan bahan bakunya, kesederhanaan, kondisi reaksi ringan, ramah lingkungan, dan investasi yang lebih rendah, dan biaya energi. Transesterifikasi trigliserida dapat dilakukan dalam mode katalitik dan non-katalitik. Mode katalitik dapat dilakukan oleh katalis homogen atau heterogen, dan biokatalis menggunakan enzim spesifik. (Cahyo Kumoro & Saeed, 2022).

Dalam proses pembentukan bahan bakar biodiesel, menggunakan dua tahapan yaitu esterifikasi (penurunan *Free Fatty Acid*/Asam Lemak Bebas) dan transesterifikasi (pembentukan biodiesel menggunakan alkohol dan katalis). Transesterifikasi adalah proses yang sangat dibutuhkan dalam pembentukan biodiesel. Untuk penurunan asam lemak bebas (FFA), karena adanya FFA biodiesel tidak sempurna dan berubah menjadi pembentukan sabun.



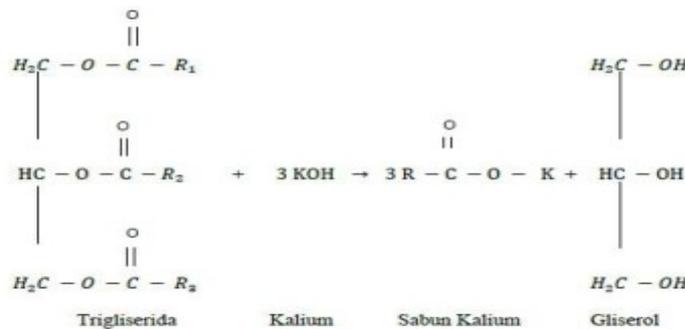
Biodiesel dapat dibentuk apabila FFA di bawah 2% (Kurniasih, 2013). Reaksi ini mengubah asam karboksilat dan alkohol menjadi ester menggunakan katalis (asam), misalnya  $H_2SO_4$ . Katalis asam sangat cocok digunakan untuk bahan yang mengandung asam lemak bebas yang tinggi, biasanya digunakan untuk bahan baku yang mutunya sangat rendah, misal CPO off-grade (Freedman, dkk. 1984).

Reaksi Esterifikasi dengan katalis asam dapat dilihat di bawah ini (Aditya, 2009).



**Gambar 2** Reaksi Esterifikasi

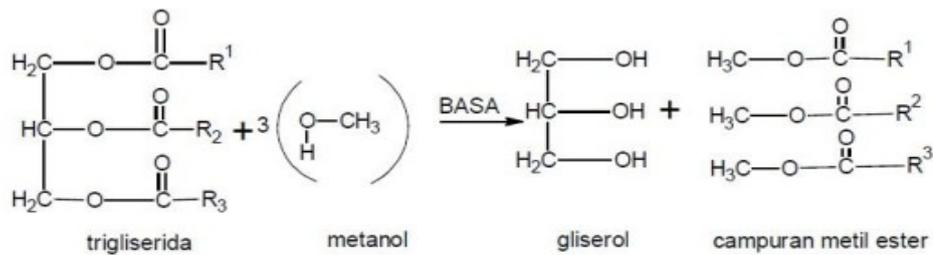
Apabila tidak dilakukan reaksi esterifikasi terlebih dahulu pada bahan baku yang mempunyai FFA yang tinggi akan terjadi reaksi penyabunan, seperti reaksi kimia berikut ini (Budiman, 2014).



**Gambar 3** Reaksi Penyabunan

Tahapan transesterifikasi adalah proses pembentukan biodiesel, yang menggunakan alkohol dibantu katalis mengubah trigliserida yang mempunyai viskositas yang tinggi menjadi FAME, yang alkohol ini berganti dengan gliserin (Wilhelm dan Hermann, 2005). Reaksi transesterifikasi dapat dilihat di bawah ini (Tahir dan Yoewono, 2009).





**Gambar 4** Reaksi Transesterifikasi

Reaksi transesterifikasi mempunyai dua cara, menggunakan katalis dan tanpa menggunakan katalis. Katalis yang digunakan adalah katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis merupakan suatu zat untuk mempercepat laju reaksi itu sendiri. Apabila tidak menambahkan katalis, reaksi akan membutuhkan suhu, tekanan yang tinggi dan tentu memakan waktu yang lama (Budhi Rahardja & Ilmar Ramadhan, 2019).

*Glycerol* (gliserin) dibentuk sebagai produk selama proses transesterifikasi. Umumnya metanol digunakan untuk memproduksi biodiesel karena biaya rendah dan ketersediaan yang mudah. Istilah B100 berarti 100% dari FAME, sementara jumlah yang lebih rendah, seperti B20 menunjuk sebagai 'campuran biodiesel'. Produksi biodiesel tergantung pada energi matahari dan merupakan basis bioekonomi berkelanjutan. Terutama di sektor transportasi biodiesel masih memiliki signifikansi utama dalam masyarakat saat ini (terlepas dari kronologi untuk mengubah energi matahari menjadi *tricity elec* dengan sel fotovoltaik) (Singh et al., 2020).

## 2.4 Plasma

Plasma merupakan gas terionisasi yang terdiri dari partikel bermuatan positif, negatif dan netral dimana energi potensial antara partikelnya lebih kecil dibanding energi kinetik antara partikel tersebut (Nicholson, D.R, 1983). Derajat ionisasi bisa dikontrol dengan tegangan yang diaplikasikan. Plasma bisa dinyatakan sebagai fase keempat selain cairan, padat dan gas (Putut, 2008). Variabel tegangan listrik dengan banyaknya elektron berenergi yang dihasilkan reaktor plasma, tegangan listrik yang diberikan pada elektroda maka semakin banyak



ion dan elektron bebas yang terbentuk (A.R, Tuhu, 2010). Dengan membuat plasma dalam air akan dihasilkan berbagai macam spesies aktif seperti  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}_3$  dan  $\text{H}_2\text{O}_2$  (menurut Joshi. dkk., 1995, dari Hariadi dkk., 2012). Hampir seluruh spesies aktif ini memiliki tingkat oksidasi potensial yang tinggi yang berpotensi dalam menguraikan kandungan senyawa organik dalam air. Disamping itu, plasma juga menghasilkan sinar ultraviolet dan gelombang kejut yang juga berpotensi menguraikan kandungan senyawa organik dalam air secara signifikan (menurut Robinson dkk., 1973, dari Hazmi, A. dkk, 2012).

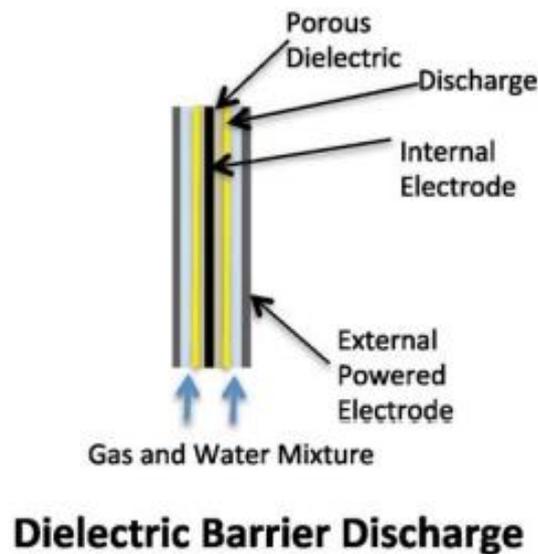
Plasma dapat terbentuk akibat perbedaan muatan listrik yang sangat tinggi antara elektrodanya dan muatan listrik tersebut mengalir melalui gas yang menyebabkan energi yang dimiliki gas berhamburan sehingga gas menjadi panas. Partikel dalam gas akan bertumbukan dengan partikel di sekitarnya dan mempengaruhi medan magnetik di sekitarnya (Moustakas, et al., 2005). Panas yang terus meningkat menyebabkan adanya joule heating dan mengakibatkan pelarut di sekitar elektroda membentuk lapisan gas tipis, kemudian pada lapisan tipis tersebut terbentuk plasma (Saito, et al., 2015).

Teknologi plasma *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) ini dapat digunakan untuk pengolahan limbah cair, padat dan gas (Aguierre, P., 1998). Teknologi plasma DBD mampu menurunkan warna, COD dan TSS pada limbah cair tekstil sebesar 48%, 77% dan 71% (Hadiwidodo, dkk., 2009). Teknologi plasma merupakan teknologi yang ramah lingkungan dan dapat melakukan degradasi senyawa racun (R.C, Daniel, 1996). Proses ini merupakan alternatif pengolahan untuk mengurangi lahan, memperpendek waktu pengolahan dan mengurangi bau. (Hazmi & Desmiarti, 2013).

*Dielectric Barrier Discharge* (DBD) dapat dibuat dalam beberapa konfigurasi diantaranya tipe planar dengan plat paralel terpisah dengan sebuah der, dan planar dengan plat koaksial dengan dielektrik tabung nya. Elektroda positif merupakan elektroda jarum dan elektroda logam berbentuk silinder tabung dan *dielectric* berupa tabung



berbahan kaca *pyrex* yang berfungsi sebagai penghalang *discharge*. Kondisi jarak elektroda pada reaktor DBD sangat berpengaruh terhadap kualitas proses pengolahan limbah cair (Khoiriyah,A,dkk., 2012). Di sini plasma dekat ke permukaan cairan sehingga spesies aktif yang dihasilkan bisa berinteraksi dengan cairan. Interaksi plasma dengan cairan yang menghasilkan peluahan dengan cairan itu sendiri, metoda ini sangat cepat (Brugmann,P,dkk., 2009). Reaktor ini ditunjukkan dengan gambar 5.



**Gambar 5** Reaktor *Dielectric Barrier Discharge*(Foster et al., 2012)

## 2.5 Ozon

Ozon dihasilkan dari  $O_2$  atau udara dengan pelepasan yang dihasilkan pada permukaan elemen pelepasan ditempatkan di reaktor pelepasan (W. Sun, 2019). Sebagian besar reaksi dengan senyawa anorganik, ozon bereaksi dengan partisipasi satu atom oksigen dan dua lainnya terpisah sebagai  $O_2$ . Biasanya, unsur-unsur dioksidasi ke tingkat oksidasi tertingginya. Ketika konsentrasi ozon melebihi 15 - 20% memiliki efek warna biru. Pada tekanan atmosfer dan suhu 161,3 K, ozon menjadi cair dan berwarna biru tua (Wubin Weng, 2015).

Karena sifat ozon yang akan berubah menjadi  $O_2$  setelah mengoksidasi maka ozon tidak memberikan kontribusi terhadap endapan yang dihasilkan, dan atau lumpur yang dihasilkan yang biasanya menjadi masalah pengkungan berikutnya menjadi relatif sedikit dari pada metode lainnya. Faktor penentu keberhasilan ozonasi adalah kontak yang baik



antara fasa gas dan fasa cair, di mana dua jenis kontraktor yang umum digunakan dan tidak memerlukan peralatan tambahan adalah sistem *injector* dan gelembung (*bubble diffuser*) (Wijaya Hendra et al., 2009).

a. Interaksi Ozon-Hidro Karbon

Ozon adalah molekul anorganik dengan rumus kimia  $O_3$ . Ozon adalah alotrop oksigen yang jauh lebih stabil dibandingkan dengan alotrop diatomik  $O_2$ . Ozon adalah oksidan kuat dari pada dioksigen dan memiliki banyak aplikasi industri dan konsumen yang berkaitan dengan oksidasi, seperti pengolahan air, pembuatan obat-obatan, ozonisasi asam oleat dan lain-lain. Dalam beberapa tahun terakhir, karena fitur pengoksidasi yang kuat, ozon telah diteliti untuk aplikasi yang berhubungan dengan pembakaran.

b. Pengaruh Ozon Pada Karakteristik Pembakaran

Menambahkan ozon terbukti mampu menjadi terobosan baru dalam mekanisme oksidasi. Perubahan unsur dalam kimia pembakaran ini menyebabkan terjadinya pembentukan OH ekstra dan formaldehida yang dapat diamati secara eksperimental. Efek ozon diselidiki pada api udara metana yang bercampur. Fluoresensi yang diinduksi laser planar dari  $CH_2O$  dilakukan untuk memahami mekanisme dari dampak ozon pada oksidasi metana. Peningkatan yang cukup besar dalam produksi formaldehida diamati ketika ozon ditambahkan ke campuran  $CH_4$ -udara. Efek ini diamati untuk suhu dan rasio kesetaraan yang berbeda. Efek ini diamati untuk suhu dan rasio kesetaraan yang berbeda.

Kimia oksidasi dengan mudah mengungkap mekanisme di balik peningkatan produksi formaldehida. Begitu ozon menyemai campuran bahan bakar-udara, atom oksigen yang berasal dari dekomposisi molekul  $O_3$  bereaksi dengan molekul  $CH_4$ , menghasilkan radikal OH yang bereaksi cepat dengan metana. Metana kemudian diubah menjadi formaldehida melalui urutan reaksi  $CH_4 \rightarrow CH_3 - CH_3O \rightarrow CH_2O$ . Melalui reaksi ini beberapa radikal OH diproduksi, sehingga akan meningkatkan reaktivitas sistem secara keseluruhan (Pinazzi & Foucher, 2017).



ozonasi sangat berpengaruh terhadap karakteristik biodiesel *ozonida* cin lama waktu ozonasi maka semakin baik karakteristik yang di sel *ozonida criegee*. Karakteristik biodiesel *ozonida criegee* dari

biodiesel murni (tanpa blending) belum sesuai dengan karakteristik standar dari minyak solar sehingga biodiesel *ozonida criegee* belum bisa digunakan sebagai alternatif bahan bakar pengganti solar. Karena densitas yang dihasilkan masih tinggi sehingga mempunyai kemampuan bakar per satuan massa yang rendah, mempunyai viskositas yang tinggi yang menyebabkan tahanan yang tinggi untuk pemecahan selama injeksi, *flash point* semakin lama ozonasi dapat mempertinggi *flash point* (titik nyala) (Purwanto and Kafidhu, 2021).

c. Dampak ozon pada pembakaran mesin IC

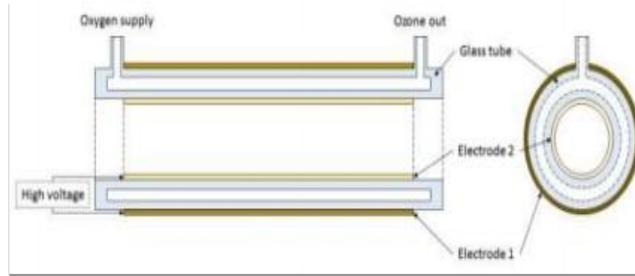
Aplikasi ozon pertama untuk mesin IC diusulkan oleh Tachibana pada tahun 1991. Eksperimen yang dilakukan pada mesin CFR, penelitian bahan bakar diesel menunjukkan bahwa efek penambahan ozon mampu meningkatkan *cetane number* (CN) bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tergantung pada kondisi awal yang dipilih, 500 ppm ozon berhubungan dengan peningkatan *cetane number* (CN) dari 2 menjadi 4, yang secara jelas menunjukkan efek peningkatan ozon pada reaktivitas bahan bakar.

Sebagian besar studi mengenai aplikasi ozon untuk mesin IC berkaitan dengan mode pembakaran canggih yang inovatif. Secara khusus, aplikasi ozon diselidiki sebagai solusi yang mungkin untuk mengatasi masalah yang menghalangi proses pembakaran yang berpotensi bersih dan efisien ini untuk digunakan dalam mesin IC pada aplikasi komersial skala besar. aplikasi komersial skala besar.

d. Generator Ozon

Ozon dapat dihasilkan dengan menggunakan generator ozon. Ozon diproduksi oleh ozonizer yang bekerja berdasarkan prinsip pelepasan penghalang dielektrik, yang menghasilkan ozon di antara dua elektroda yang dipisahkan oleh bahan dielektrik dan didukung oleh sinyal tegangan tinggi.





**Gambar 6** Representasi skematis dari generator ozon yang bekerja berdasarkan prinsip Dielectric Barrier Discharge (DBD)

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 6, dua elektroda mengelilingi kaca: satu di dalam silinder dan yang lainnya di luar. Ozon dihasilkan dari molekul oksigen yang terurai di dalam silinder di bawah pengaruh pelepasan tegangan tinggi dan kemudian bergabung kembali, membentuk molekul  $O_3$ . Oleh karena itu, jumlah ozon dapat dikontrol dengan memberikan variasi pada frekuensi tegangan *ozonizer*. Cara lain untuk mengontrol ozon yang dihasilkan adalah dengan mengatur aliran yang melintasi volume silinder. Generator ozon yang dijelaskan sebelumnya menghasilkan ozon berdasarkan kapasitas yang diberikan sebagai persentase tetapi perangkat tidak menunjukkan jumlah ozon yang dihasilkan. Oleh karena itu, untuk menganalisis jumlah ozon yang digunakan untuk mengukur konsentrasi yang sesuai asupan mesin. Alat yang digunakan untuk memantau konsentrasi ozon adalah *Ozone Gas Detector*. Penentuan konsentrasi ozon didasarkan pada penyerapan radiasi UV oleh ozon (Pinazzi and Foucher, 2017)

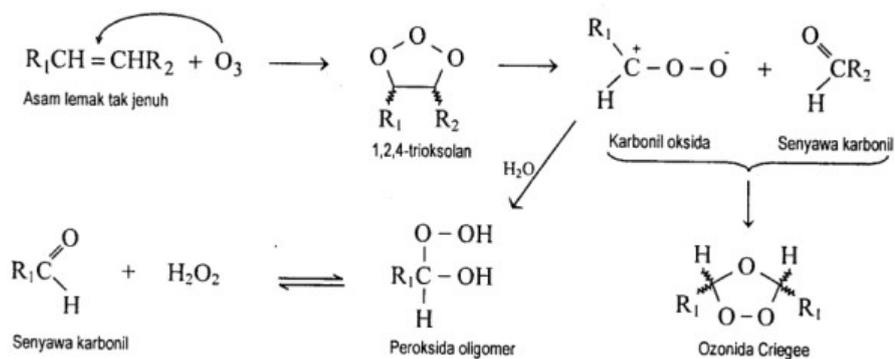
Secara sederhana, proses pelarutan ozon ke dalam cairan minyak dilakukan dengan cara melewatkan ozon dalam bentuk butiran atau gelembung gas yang relatif cukup halus. Pembentukan gas halus tersebut dilakukan dengan cara melewatkan ozon dalam pengelembungan gas yang langsung diinjeksikan ke dalam cairan minyak. Setelah reaksi berlangsung selama 1 jam, cairan produk langsung disimpan dalam botol yang tertutup yang rapat untuk kemudian dianalisis. Bahan baku ozonator ini adalah udara dari kompresor yang terlebih dahulu dilewatkan dalam kolom zeolit dan gel silika (silica gel) untuk mengeringkan kandungan uap air dan atau polutan-polutan yang dikandung udara. Di samping itu



ksi yang terlalu tinggi (di atas 40 °C) ternyata tidak memberikan cukup signifikan bahkan lebih cenderung kontra produktif atau ada

kemungkinan menghasilkan senyawa-senyawa yang tidak tepat untuk digunakan sebagai bahan bakar ataupun aditif bahan bakar mesin diesel (Bismo, 2004).

Jika beberapa saat setelah reaksi transesterifikasi berlangsung ditambahkan ozon ke dalam campuran reaksi tersebut, maka berarti ozon akan cenderung menyerang senyawa-senyawa alkil-ester. Reaksi ozon dengan ikatan-ikatan rangkap pada molekul-molekul alkil-ester menggunakan katalis-katalis berbasis zeolite ataupun GAC (*Granulated Activated Carbon*) sebenarnya identik dengan reaksi ozonolysis senyawa-senyawa alkena. Secara skematis, reaksi ozonolysis tersebut dapat dilihat pada gambar 7.



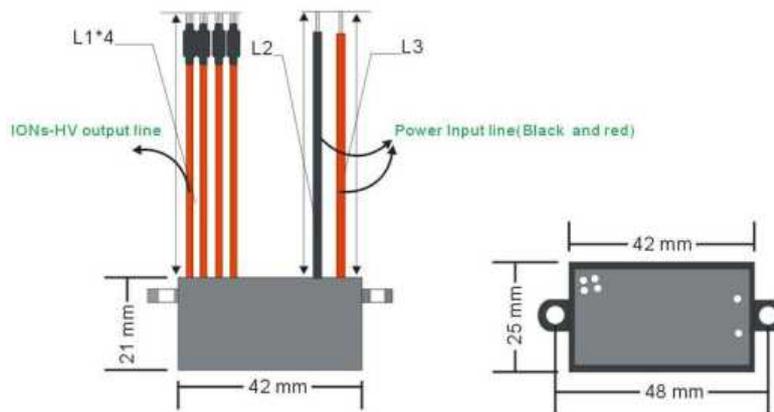
**Gambar 7** Mekanisme Criegee untuk Reaksi Ozonasi pada Ester Asam Lemak Tak Jenuh (Bismo, 2005)

Senyawa ozonida sebagai senyawa antara yang terbentuk pertama kali adalah 1,2,3-trioksolan sebagai molekul yang relatif tidak stabil karena kepadatan oksigennya yang terlalu tinggi, sehingga kemudian segera merestrukturisasi diri menjadi *ozonide criegee* yang jauh lebih stabil. Senyawa lain yang dapat terbentuk karena reaksi ozonolysis ini adalah senyawa-senyawa karbonil dan asam-asam dikarboksilat (dengan rantai karbon yang lebih pendek), diikuti dengan peroksida oligomer dan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Kedua senyawa peroksida tersebut dapat dihindari jika digunakan inhibitor selektif berbasis logam seng (Zn). Karena molekul alkil-ester sebagai produk reaksi transesterifikasi sebagian dikonversikan menjadi senyawa lain oleh reaksi ozonolysis, maka secara pasti sistem kesetimbangan akan bergeser ke arah kanan (produk) sedemikian rupa untuk mengkompensasi harga tetapan yang tidak berubah pada suhu reaksi yang sama (isoterm) (Bismo,



## 2.6 Ion

*Negative Ion Generator* adalah alat yang berguna untuk menghasilkan ion ion negatif. Ion-ion negatif yang dihasilkan ini berguna untuk membersihkan udara sehingga udara yang masuk ke dalam ruang bakar akan menjadi bersih. Pada prinsipnya adalah alat ini digunakan untuk proses ionisasi bahan bakar modern. Dengan proses tersebut alat ini mampu menambah ion negatif dalam udara sehingga pada proses pembakaran ion negatif di udara akan berikatan dengan ion positif.



**Gambar 8** *Negative Ion Generator*

Beberapa penelitian dilakukan dengan menggunakan campuran bioetanol-bensin, meningkatkan angka oktan, oksigen, dan menurunkan suhu pemanasan. Angka oktan tinggi meningkatkan performa mesin dan mengurangi emisi. Temperatur bahan bakar mempengaruhi kinerja dan emisi biodiesel. Eksperimen dilaporkan untuk penyelidikan variasi siklik parameter pembakaran. Magnetisasi bahan bakar mengurangi 9% hingga 30% konsumsi bahan bakar dan mengurangi emisi gas buang HC dan CO. Magnetisasi bahan bakar menyebabkan peningkatan suhu pembakaran bahan bakar. Peningkatan temperatur bahan bakar menyebabkan peningkatan tekanan pembakaran, sehingga performa mesin meningkat (Sugiarto et al., 2018).

Molekul hidrokarbon merupakan unsur penyusun utama bensin, cenderung untuk saling tertarik satu sama lain, membentuk gugus molekul (*clustering*).



di medan magnet pada molekul hidrokarbon tersebut menyebabkan pemisahan molekul hidrokarbon (*declustering*), sehingga terbentuk jarak yang lebih jauh antara molekul hidrokarbon dan melemahkan ikatan antara atom HC dan

mudah tertarik dengan oksigen pada proses pembakarannya. Dengan adanya hal tersebut di atas, bahan bakar yang terkena efek kemagnetan akan menjadi semakin reaktif dalam proses pembakaran yang sempurna di ruang pembakaran, sehingga akan mempengaruhi unjuk kerja mesin yang semakin meningkatkan (Harianto et al., 2015). Umumnya bahan bakar untuk mesin pembakaran internal adalah senyawa molekul. Namun molekul-molekul ini belum telah disesuaikan, bahan bakar tidak aktif saling mengunci dengan oksigen selama pembakaran, molekul bahan bakar atau rantai hidrokarbon harus terionisasi dan ditata kembali (Niaki et al., 2020).

## 2.7 Fourier Transformed Infrared (FTIR)

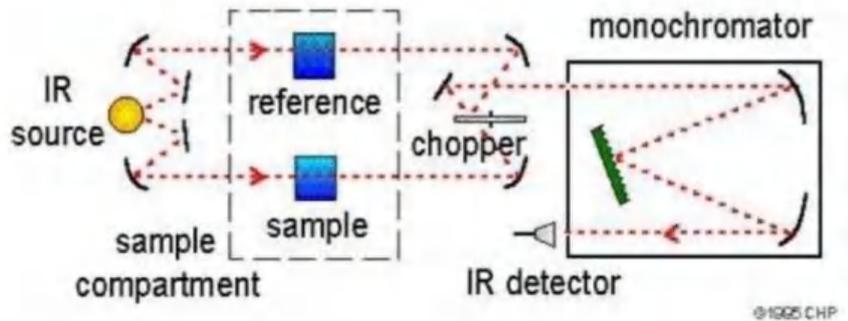
*Fourier Transformed Infrared* (FTIR) merupakan salah satu alat atau instrumen yang dapat digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi, mengidentifikasi senyawa dan menganalisis campuran dari sampel yang dianalisis tanpa merusak sampel. Berdasarkan panjang gelombang tersebut daerah inframerah dibagi menjadi tiga daerah, yaitu IR dekat ( $14000- 4000 \text{ cm}^{-1}$ ) yang peka terhadap vibrasi *overtone*, IR sedang ( $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ) berkaitan dengan transisi energi vibrasi dari molekul yang memberikan informasi mengenai gugus-gugus fungsi dalam molekul tersebut, dan IR jauh ( $400 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ) untuk menganalisis molekul yang mengandung atom-atom berat seperti senyawa anorganik tapi butuh teknik khusus. Biasanya analisis senyawa dilakukan pada daerah IR sedang (Nasution and Fernandez, n.d.).

Prinsip kerja FTIR adalah interaksi antara energi dan materi. *Infrared* yang melewati celah ke sampel, di mana celah tersebut berfungsi mengontrol jumlah energi yang disampaikan kepada sampel. Kemudian beberapa *infrared* diserap oleh sampel dan yang lainnya ditransmisikan melalui permukaan sampel sehingga sinar *infrared* lolos ke detektor dan sinyal yang terukur kemudian dikirim ke komputer dan direkam dalam bentuk puncak-puncak. Spektrofotometer FTIR merupakan alat yang dapat digunakan untuk identifikasi senyawa, khususnya senyawa organik. Analisis kualitatif dengan spektroskopi FTIR secara umum digunakan untuk

gugus-gugus fungsional yang terdapat dalam suatu senyawa yang  
ation & Fernandez, n.d.).



Pada sistem optik FTIR digunakan radiasi LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) yang berfungsi sebagai radiasi yang diinterferensikan dengan radiasi infra merah agar sinyal radiasi infra merah yang diterima oleh detektor secara utuh dan lebih baik.



Gambar 7 Sistem Optik FT-IR(Nasution and Fernandez, n.d.)

## 2.8 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

GC-MS merupakan instrumen gabungan dari alat GC (*Gas Chromatography*), kemudian diidentifikasi dengan MS (*Mass Spectrometry*). GC dan MS digunakan untuk memisahkan dan mengidentifikasi komponen-komponen campuran yang mudah menguap.(Choo-Smith et al., 2001). Kegunaan alat GC-MS adalah:

1. Untuk menentukan berat molekul suatu senyawa dengan sangat teliti.
2. Spektroskopi massa dapat digunakan untuk mengetahui rumus molukul tanpa analisis unsur.
3. Dapat mengenali senyawa berdasarkan reaksi fragmentasi, sehingga bisa didapatkan cara tambahan untuk mengetahui apakah senyawa tersebut termasuk golongan alkohol, asam karboksilat, aldehida dan lain sebagainya.





**Gambar 8** Alat GC-MS(Choo-Smith et al., 2001)

Pada metode analisis GC-MS adalah dengan membaca spektra yang terdapat pada kedua metode yang digabung tersebut. Pada spektra GC jika terdapat bahwa dari sampel mengandung banyak senyawa yaitu terlihat dari banyaknya puncak (peak) dalam spektra GC tersebut. Berdasarkan data waktu retensi yang sudah diketahui dari literatur, bisa diketahui senyawa apa saja yang ada dalam sampel. Selanjutnya adalah dengan memasukkan senyawa yang diduga tersebut ke dalam instrumen spektrometer massa (Choo-Smith et al., 2001).

Hal ini dapat dilakukan karena salah satu kegunaan dari kromatografi gas adalah untuk memisahkan senyawa-senyawa dari suatu sampel. Setelah itu, didapat hasil dari spektra spektrometer massa pada grafik yang berbeda. Informasi yang diperoleh dari kedua teknik ini yang digabung dalam instrumen GC-MS tak lain hasil dari masing-masing spektra. Untuk spektra GC, informasi terpenting yang didapat adalah waktu retensi untuk tiap-tiap senyawa dalam sampel. Sedangkan untuk spektra MS, bisa diperoleh informasi mengenai massa molekul relatif dari senyawa sampel tersebut (Choo-Smith et al., 2001).



## 2.9 Perhitungan Konsumsi Energi

Konsumsi energi dari sistem dapat dihitung dengan persamaan berikut (Hazmi & Desmiarti, 2013).

$$W = \frac{V \times I \times t}{\text{volume}} \quad (1)$$

Dimana :

W = Energi listrik yang dibutuhkan (kWh/L)

V = Tegangan Listrik (kV)

I = Arus Listrik (Ampere)

T = Waktu (jam)

Volume = volume limbah cair kelapa sawit (L)

