



Prestasi Pembakaran Biodiesel Berasaskan Minyak Bunga Matahari Ke Atas Pembakar Berbahan Api Cecair *Combustion Performance Sunflower Oil Biodiesel on Liquid Fuel Burner*

Muhammad Syahiran Abdul Malik¹, Mohammad Nazri Mohd Jaafar^{1,*}, Nareenthiran Mavalavan¹, Mohd Shuisma Mohd Ismail¹, Muhamad Roslan Rahim¹, Mazlan Said¹

¹ Sekolah Kejuruteraan Mekanikal, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 February 2021

Received in revised form 1 April 2021

Accepted 3 April 2021

Available online 9 May 2021

ABSTRACT

Kajian ini menyiasat mengenai prestasi pembakaran adunan bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga matahari dengan diesel pada nisbah B10 (biodiesel 10%, diesel 90%), B15 (biodiesel 15%, diesel 85%), B25 (biodiesel 25%, diesel 75%) dan B50 (biodiesel 50%, diesel 50%). Prestasi pembakaran bahan api ini dinilai berdasarkan kepada nilai suhu dinding kebuk pembakar, kecekapan terma pembakar serta kepekatan gas emisi yang dibebaskan seperti oksida nitrogen (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), dan karbon monoksida (CO). Bahan api adunan biodiesel berasaskan minyak bunga matahari diukur dan dibandingkan dengan diesel. Semua bahan api yang diuji dibakar menggunakan kebuk pembakaran terbuka pada lima nisbah kesetaraan yang berbeza, iaitu, keadaan cair bahan api ($\Phi = 0.8$ dan 0.9), stoikiometri ($\Phi = 1.0$), dan kaya bahan api ($\Phi = 1.1$ dan 1.2). Hasil kajian menunjukkan bahawa bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga matahari terbakar pada suhu yang lebih rendah. Ini menghasilkan tenaga terma bahan api dan kecekapan terma pembakar yang lebih rendah dari diesel. Selain itu, emisi yang dihasilkan adalah lebih rendah (kecuali NO_x) berbanding dengan diesel untuk semua nisbah kesetaraan. Hasilnya juga menunjukkan bahawa penggunaan biodiesel adalah berguna untuk aplikasi moden yang berbeza, khususnya di sektor industri kerana ia lebih mesra alam dan boleh dijadikan sebagai pilihan alternatif kepada bahan api petroleum.

The current study investigated the combustion performance of sunflower oil-based biodiesel fuel blends with diesel at the ratio of B10 (10% biodiesel, 90% diesel), B15 (15% biodiesel, 85% diesel), B25 (25% biodiesel, 75% diesel) and B50 (50% biodiesel, 50% diesel). The combustion performance of this fuel is evaluated based on the value of the combustion chamber wall temperature, the thermal efficiency of the burner as well as the concentration of emission gases released such as nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), and carbon monoxide (CO). Sunflower oil-based biodiesel blend fuel was measured and compared to diesel. All fuels tested were burned using a combustion chamber with one of its ends open, at five different equivalence ratios, namely, fuel-lean condition ($\Phi = 0.8$ and 0.9), stoichiometry ($\Phi = 1.0$), and fuel-rich ($\Phi = 1.1$ and 1.2). The results show that sunflower oil-based biodiesel fuels burn at lower temperatures. This results in lower fuel thermal energy, and thus, lower thermal efficiency of the

* Corresponding author.

E-mail address: nazrijaafar@utm.my

<https://doi.org/10.37934/arfmts.82.2.127145>

Keywords:

Campuran biodiesel berasaskan minyak bunga matahari; pembakaran; nisbah kesetaraan; emisi

Sunflower oil -based biodiesel blends; combustion; equivalence ratio; emissions

burner compared to diesel. Moreover, the emissions produced are lower (except for NOx) compared to diesel for all equivalence ratios. The results also show that the use of biodiesel is useful for different modern applications, especially in the industrial sector as it is more environmentally friendly and can be used as an alternative to petroleum fuels.

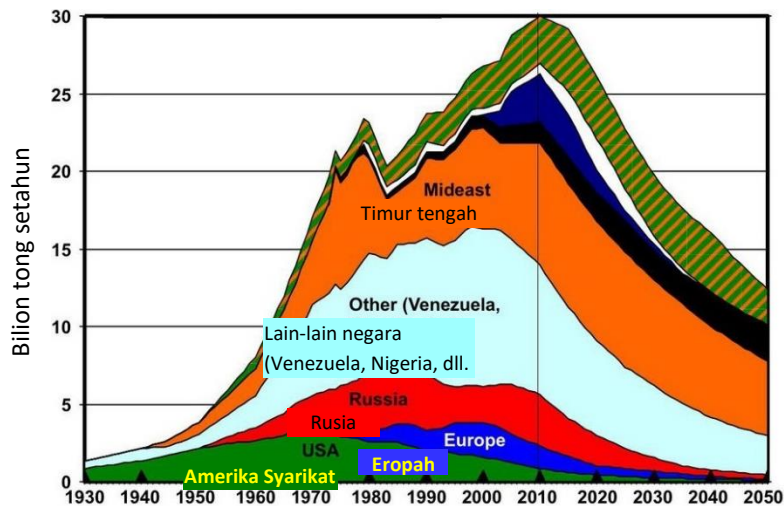
1. Pengenalan

Peningkatan jumlah penduduk dunia sejak akhir-akhir ini secara eksponen menyebabkan peningkatan permintaan tenaga dunia. Kebanyakan keperluan tenaga dunia dibekalkan melalui sumber petrokimia yang menunjukkan bahawa sumber tenaga tidak boleh diperbaharui seperti petrolium adalah terhad dan akan pupus jika penggunaan tanpa henti ini berterusan. Permintaan tenaga yang tinggi di sektor perindustrian serta masalah pencemaran yang disebabkan oleh penggunaan bahan api fosil menjadikan keadaan semakin mendesak serta memerlukan pencarian dan pembangunan sumber tenaga alternatif yang boleh diperbaharui [1].

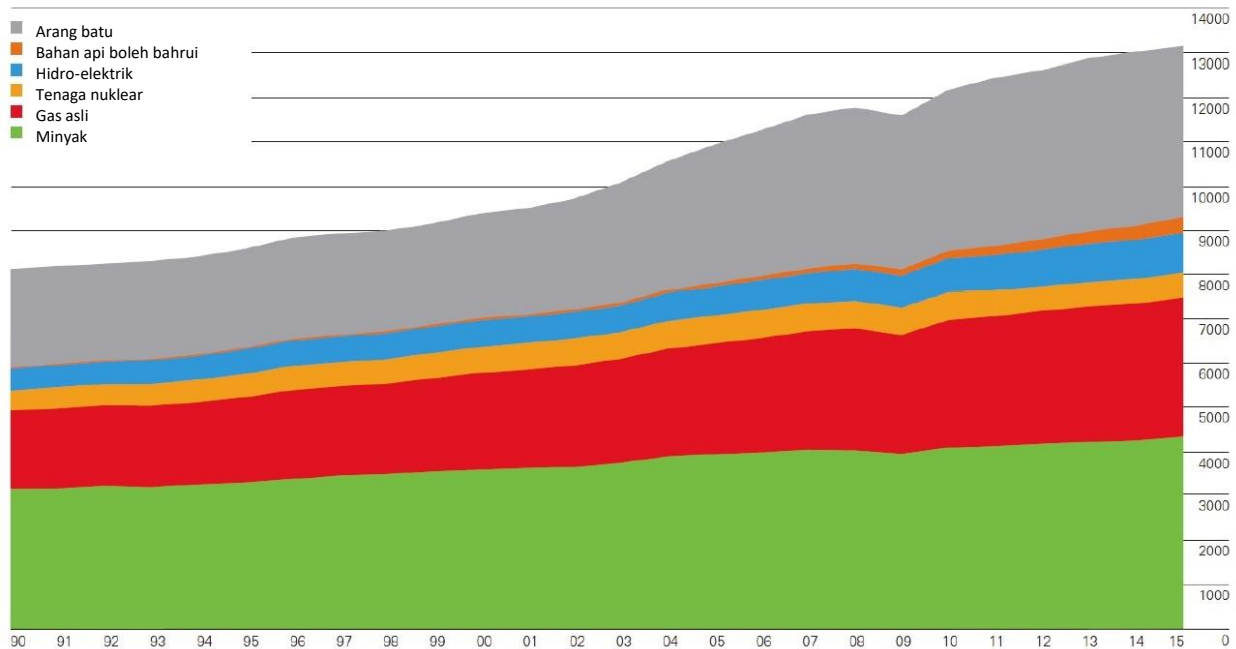
Peningkatan bilangan kenderaan bermotor oleh sebab meningkatnya jumlah penduduk dunia juga menyumbang kepada keperluan terhadap penggunaan bahan api yang semakin meningkat [2]. Malangnya, penghasilan bahan api fosil pula semakin menyusut seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 [3]. Ini adalah kerana sudah tidak banyak telaga minyak yang baharu ditemui. Perkara ini pula digandingkan dengan permintaan yang semakin meningkat (Rajah 2), maka bahan api dari sumber yang boleh diperbaharui menjadi satu alternatif yang sangat menarik [4,5].

Selain daripada itu, pembakaran bahan api fosil seperti petrol, diesel dan arang batu juga adalah antara penyumbang kepada pelepasan gas berbahaya seperti oksida nitrogen (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), dan karbon monoxide (CO) ke atmosfera [6]. Biodiesel yang dikenali sebagai tenaga hijau adalah alternatif yang sempurna untuk bahan bakar fosil. Ia dengan ketara mampu mengurangkan pelepasan CO₂, SO₂, CO dan HC dan dengan itu mengurangkan pencemaran udara [7,8]. Kitaran karbon bahan api biodiesel dari sumber yang mampan menghasilkan kitaran sifar CO₂ melalui proses fotosintesis dan pelepasan pembakaran. Ini adalah kerana tumbuhan menyerap semula lebih banyak CO₂ daripada yang dihasilkan dari proses pembakaran biodiesel. Ini berbeza dari pelepasan emisi yang dilepaskan oleh pembakaran bahan api fosil. Oleh itu, dengan membandingkan penggunaan bahan api fosil, biodiesel dapat mengurangkan pengeluaran CO₂ dengan lebih ketara iaitu sehingga 78.45% (bagi bahan api biodiesel bersih B100) dan ini secara langsung membawa kepada penyenggaraan keseimbangan ekologi [9]. Satu perkara lagi yang juga dirasakan amat penting ialah bahan api biodiesel adalah bersifat boleh terbiodegradasi dan ia mudah untuk dilupuskan [10]. Dengan itu, jawapan yang paling tepat ialah untuk beralih kepada bahan api biodiesel disebabkan oleh hujahan-hujahan di atas tadi.

Terdapat banyak bahan mentah dari minyak tumbuhan yang boleh digunakan sebagai sumber untuk dijadikan bahan api biodiesel. Antaranya adalah minyak sayuran, terutamanya daripada soya, sesawi, jatropha atau jarak, kelapa sawit, kelapa, karanja dan bunga matahari. Kesemua bahan mentah ini digunakan sebagai sumber utama mengikut kawasan geografi masing-masing. Sebagai contoh, di Eropah sumber bahan mentah yang paling popular untuk ditukarkan kepada bahan api biodiesel adalah minyak rapeseed. Sementara di kawasan Asia Tenggara pula, minyak kelapa sawit merupakan sumber bahan mentah yang utama [11].



Rajah 1 Pengeluaran bahan api fosil dunia [3]

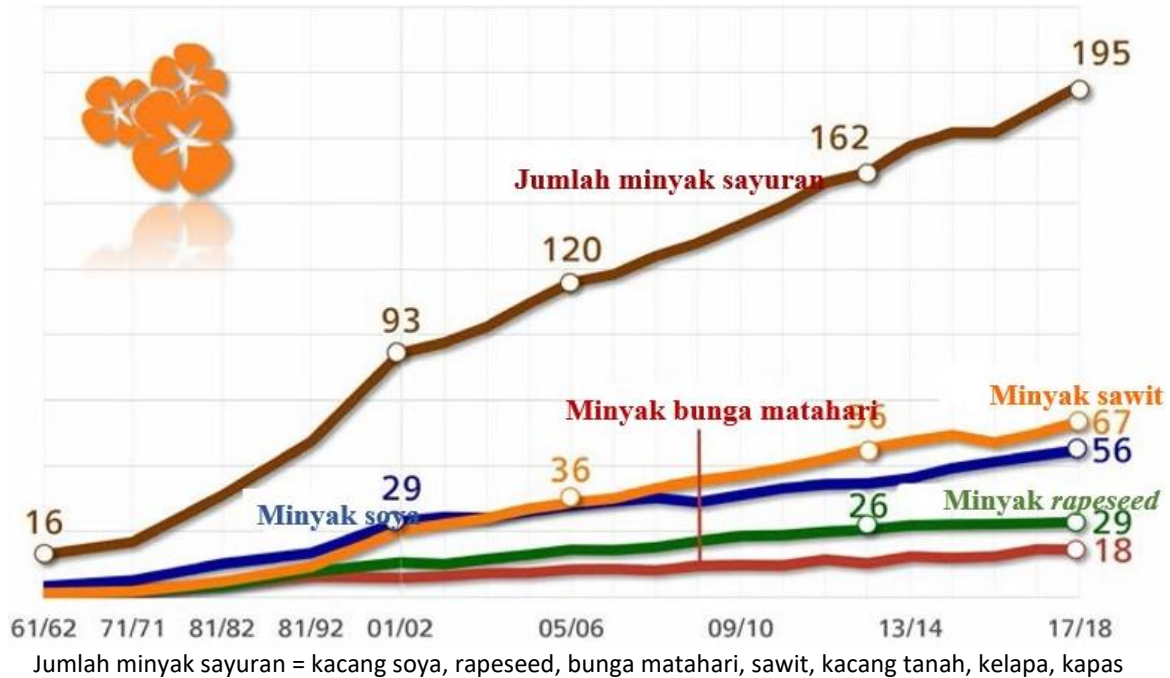


Rajah 2 Permintaan bahan api dunia dalam unit juta tan setara minyak sehingga 2015 [4]

Secara umumnya minyak tumbuhan ini dapat diklasifikasikan kepada dua kumpulan besar iaitu minyak boleh dimakan dan minyak tidak boleh dimakan. Terdapat perbezaan pendapat bagi sumber penghasilan bahan api biodiesel di mana biodiesel yang dihasilkan dari sumber minyak yang boleh dimakan dinyatakan mengganggu jaringan penghasilan makanan keperluan seharian serta boleh menyebabkan krisis kebuluran terutama di negara-negara yang mempunyai penduduk yang ramai [12]. Kadang-kadang sentimen minyak yang boleh dimakan ini digunakan oleh pihak tertentu untuk menghalang penghasilan bahan api biodiesel dari sumber ini sedangkan sebab utama bagi sesuatu biodiesel itu dihasilkan adalah bergantung kepada ketersediaan sumber tersebut selain keadaan iklim, geografi dan pembangunan ekonomi di sesebuah kawasan tersebut [13].

Sejak dulu lagi bahan api biodiesel telah dikaji dan dihasilkan dari minyak tumbuhan. Di peringkat global, minyak tumbuhan yang boleh dimakan telah digunakan lebih dari 95% untuk ditukar kepada bahan api biodiesel. Jumlah ini menunjukkan peningkatan yang pesat dalam penggunaannya secara global [14]. Pengeluar bahan api biodiesel dari sumber boleh dimakan ini antara kelompok paling

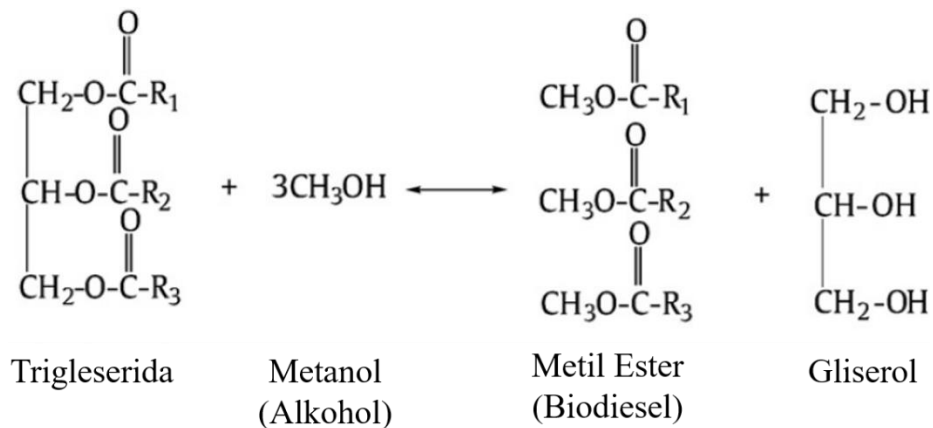
terbesar adalah Kesatuan Eropah (EU), Amerika Syarikat, Brazil, dan Indonesia [13]. Peningkatan dalam penghasilan beberapa minyak sayuran utama di seluruh dunia sehingga tahun 2018 ditunjukkan dalam Rajah 3 [15]. Bahan mentah tersedia dalam jumlah yang banyak ini mampu digunakan untuk ditukarkan kepada bahan api biodiesel bagi kegunaan pengangkutan dan industri.



Rajah 3 Penghasilan minyak sayuran secara global mengikut jenis bahan mentah utama dalam juta tan metrik untuk 2017/2018 [15]

Ma dan Hanna [16] menyatakan empat kaedah yang boleh digunakan untuk menghasilkan bahan api biodiesel iaitu campuran secara terus, pirolisis atau pemecahan haba, transesterifikasi dan emulsi mikro. Kesemua kaedah-kaedah ini ada kelebihan dan kekurangan masing-masing. Namun begitu, kaedah yang paling mudah dan digunakan secara meluas untuk menghasilkan biodiesel adalah melalui kaedah transesterifikasi. Tidak seperti kaedah-kaedah lain yang memerlukan alat yang mahal dan suhu tindak balas yang tinggi, kaedah ini sangat mudah untuk dilakukan dan hanya memerlukan kos yang rendah [17]. Selain itu, kaedah ini menurut Baroutian dan rakan-rakan [18] menjamin penghasilan bahan api biodiesel yang tinggi.

Dalam kaedah transesterifikasi, monogliserida, digliserida dan trigliserida yang terkandung dalam minyak berasaskan tumbuhan mahupun haiwan bertindak balas dengan alkohol (seperti metanol dan etanol) sambil dibantu oleh bahan pemangkin (seperti natrium hidroksida atau potasium hidroksida) untuk menghasilkan biodiesel yang dipanggil alkil ester dan gliserol [19,20]. Proses tindak balas bagi penghasilan biodiesel ini dilakarkan dalam Rajah 4. Alkil ester boleh digunakan secara terus dalam enjin diesel ataupun dicampur dengan diesel mengikut peratusan campuran yang dikehendaki ataupun ditetapkan oleh pihak berkuasa. Biodiesel yang digunakan secara terus perlu menepati spesifikasi yang ditetapkan dalam EN14214 manakala secara campuran dengan diesel perlu menepati spesifikasi yang ditetapkan dalam ASTM D6751. Hal ini adalah untuk memastikan penggunaan bahan api biodiesel dalam enjin berjalan lancar selain menjamin keselamatan pada alam sekitar dan kesihatan awam [19].



Rajah 4 Lakaran tindak balas minyak dan alkohol bagi menghasilkan biodiesel [17]

Minyak bunga matahari adalah antara sumber terbesar penghasilan minyak yang boleh dimakan di dunia, iaitu sebanyak 9.2% dengan penghasilan sebanyak 19 Mega tan setahun pada 2018 [21]. Penghasilan minyak ini banyak tertumpu di benua Eropah, di mana dua per tiga penghasilan dari negara Ukraine, Russia dan Turki. Minyak bunga matahari banyak digunakan sebagai minyak goreng masakan serta perbagai produk makanan, kecantikan dan kesihatan. Komposisi asid lemak yang terbesar yang terdapat dalam minyak bunga matahari adalah dari jenis asid lemak tak tepu, di mana asid lemak Oleik dan Linoleik terkandung sebanyak 62.2% dan 28.0% dari keseluruhan komposisi minyak [22]. Jadual 1 menunjukkan komposisi penuh asid lemak yang terkandung dalam minyak bunga matahari, mengikut kaedah pengesanan yang dicadangkan oleh Singh [23].

Jadual 1

Komposisi asid lemak yang terkandung dalam minyak bunga matahari [22]

Asid Lemak	Peratus Kandungan (%)
Asid Laurik (C12:0)	0.02
Asid Miristik (C14:0)	0.09
Asid Palmitik (C16:0)	6.2
Asid Margarik (C17:0)	0.02
Asid Stearik (C18:0)	2.8
Asid Arakhidik (C20:0)	0.21
Asid Palmitoleik (C16:1)	0.12
Asid Vakkenik (C18:1)	28.0
Asid Paullinik (C20:1)	0.18
Asid Linoleik (C18:2)	62.2
Asid Linolenik (C18:3)	0.16
Peratus Lemak Tepu (%)	9.34
Peratus Lemak Tak tepu (%)	90.66
Peratus Keseluruhan (%)	100

Kebanyakan kajian penggunaan bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga matahari dibuat pada enjin pembakaran dalam bagi kenderaan bermotor yang menggunakan enjin diesel untuk menilai tahap prestasi kenderaan dan pelepasan gas emisi yang dihasilkan. Kajian yang dijalankan oleh penyelidik-penyelidik seperti dalam penyelidikan oleh Ali dan Abuhabaya [24], Santos dan rakan-rakan [25], dan Tutunea dan Dumitru [26] mendapati prestasi enjin diesel yang menggunakan bahan api biodiesel tidak mempunyai pengurangan yang ketara dengan minyak diesel. Kuasa enjin dan daya tujahan dilihat sedikit berkurangan dari diesel manakala bahan api tentu brek sedikit meningkat. Hal

ini disebabkan adanya perbezaan kandungan tenaga, ketumpatan dan kelikatan antara bahan api biodiesel dan diesel. Bagi pelepasan gas emisi, pengurangan yang signifikan terhadap pelepasan CO dan UHC dicatatkan disebabkan kandungan oksigen yang tinggi dalam bahan api biodiesel. Namun begitu, penghasilan gas emisi NO_x dan CO₂ dilihat lebih tinggi dari diesel dan ini dipercayai disebabkan oleh galakkan pembakaran sempurna yang meningkatkan suhu pembakaran.

Tekanan permintaan bahan api fosil tidak hanya terkesan dalam sektor pengangkutan namun juga turut dirasai dalam sektor industri. Dengan adanya banyak kajian penggunaan bahan api biodiesel dalam enjin diesel telah menarik minat para pengkaji untuk mengetengahkan penggunaan bahan api biodiesel dalam peralatan industri yang beroperasi menggunakan bahan api diesel. Salah satu alat tersebut adalah alat pembakar minyak. Alat ini adalah alat mekanikal yang membakar campuran minyak dan udara pada nisbah yang ditetapkan untuk menghasilkan tenaga haba yang tinggi bagi tujuan pemanasan dandang, relau dan pengeringan produk [27].

Kajian penggunaan bahan api biodiesel bagi alat pembakar adalah terhad dan tidak setanding penggunaan dalam enjin diesel. Namun begitu, terdapat juga beberapa kajian yang menggunakan biodiesel berasaskan minyak yang boleh dimakan bagi tujuan pemanasan dandang dan relau. Antara kajian yang dilakukan adalah dari Abdul Malik dan rakan-rakan [28] pada tahun 2017 menggunakan biodiesel berasaskan minyak kelapa B5 hingga B25, Jaafar dan Safiullah [29] pada tahun 2018 menggunakan biodiesel berasaskan minyak dedak beras B5 hingga B25 dan Hasan dan rakan-rakan [30] menggunakan biodiesel berasaskan bunga matahari B20 hingga B100 pada tahun 2018. Kajian mereka mendapati pembakaran biodiesel masing-masing mengurangkan suhu pembakaran dan juga memperoleh pengurangan gas emisi NO_x (kecuali Mohd Jaafar dan Safiullah), CO dan SO₂ yang sangat baik.

Dalam kajian semasa, kita akan menyiasat prestasi pembakaran bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga matahari menggunakan alat pembakar minyak ringan industri pada keadaan pembakaran cair bahan api, stoikiometri dan kaya bahan api. Perbezaan keadaan pembakaran ini adalah untuk menilai prestasi dari segi corak suhu dinding kebuk pembakar, tenaga terma bahan api dan kecekapan terma pembakar. Selain itu, penilaian juga dibuat pada corak pelepasan gas emisi NO_x, CO dan SO₂ yang dijana oleh bahan api biodiesel. Minyak diesel akan digunakan sebagai dasar pengukuran keberkesanan prestasi dan emisi yang akan dihasilkan oleh bahan api biodiesel berasaskan bunga matahari dalam ujikaji.

2. Kaedah Ujikaji

Biodiesel berasaskan minyak bunga matahari dihasilkan di Makmal Pembakaran, Sekolah Kejuruteraan Mekanikal, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Teknologi Malaysia menggunakan kemudahan penyelidikan sedia ada. Terdapat tiga fasa dalam proses pengesteran, yang merangkumi proses pra-rawatan, prosedur trans-esterifikasi, dan proses pasca-rawatan.

Dalam proses pra-rawatan, minyak bunga matahari dipanaskan pada suhu 60°C pada halaju putaran 400 putaran per minit selama 60 minit dengan menggunakan penyejat berputar untuk mengeluarkan apa-apa kelembapan dari bahan mentah. Pada ketika itu minyak bunga matahari dicampur dengan 25% jumlah metanol (MeOH) dan 1% berat Potasium Hidroksida (KOH) untuk menghasilkan bahan api biodiesel dan gliserol berasaskan minyak bunga matahari dalam 120 minit masa tindak balas. Dalam proses selepas rawatan, gliserol yang dibentuk di lapisan dasar telah dikeluarkan dan biodiesel berasaskan minyak bunga matahari akan melalui prosedur pembersihan menggunakan air suling yang dipanaskan pada 50°C pada jeda yang berbeza untuk menghapuskan kekotoran yang tidak diinginkan dan baki gliserol. Sebagai langkah terakhir, biodiesel berasaskan minyak

bunga matahari dipanaskan selama 60 menit untuk memindahkan sebarang air sisa yang masih terperangkap dalam biodiesel. Proses transesterifikasi ditunjukkan dalam Rajah 5.

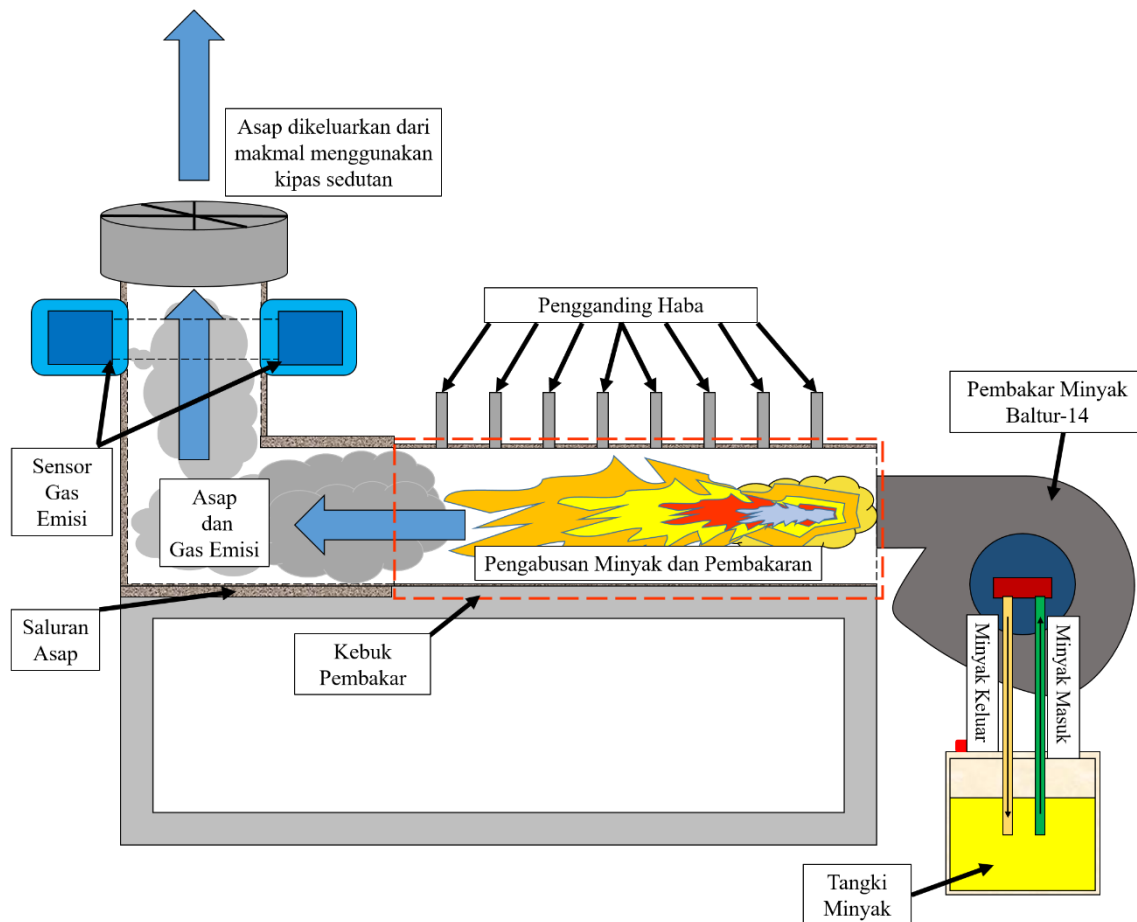


Rajah 5 Proses transesterifikasi bagi minyak bunga matahari

2.1 Persediaan Eksperimen

Penyusunan rig ujikaji pembakaran adalah seperti gambar skematik dalam Rajah 6. Pelantar ini menggabungkan pembakar minyak ringan industri Baltur-14 dengan muncung semburan piawai, pengganding haba jenis K yang boleh mengukur suhu sehingga 1260°C , ruang pembakaran jenis silinder terbuka pada salah satu hujungnya dan berdiameter 380mm diperbuat daripada keluli tahan karat dengan panjang 900mm dan mempunyai ketebalan 4mm, serta disambung kepada penganalisis gas untuk tujuan mengukur aras gas emisi yang dijana.

Pembakar minyak ringan telah dipasang di bahagian depan kebuk pembakaran untuk membekalkan udara dan api. Lapan pengganding haba dipasang di sepanjang permukaan atas kebuk pembakaran; masing-masing dijarakkan pada 100mm antara satu sama lain. Pengganding haba disambung kepada pengukur suhu. Untuk muncung semburan, muncung dengan pembukaan tunggal pada sudut 45° telah digunakan. Muncung ini mempunyai kadar semburan bahan api sebanyak 1.5 Gelen per jam pada tekanan 100 psi.



Rajah 6 Susunan rig ujikaji bagi pembakaran bahan api biodiesel

Ruang aliran keluar dari kebuk pembakaran disambung kepada saluran asap untuk menyalurkan pelepasan keluar dari makmal. Tahap pencemaran gas NO_x , SO_2 , dan CO dikesan menggunakan sensor emisi yang terdapat dalam saluran asap dan sensor ini menghantar tanda elektrik ke penganalisis gas untuk menunjukkan aras emisi yang dikesan. Penunjuk kelajuan telah digunakan untuk menetapkan kelajuan udara yang sesuai ke nisbah aliran bahan api adunan biodiesel untuk semua nisbah setara yang berbeza, Φ . Nisbah kesetaraan, yang digunakan dalam kajian ini ialah 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 dan 1.2. Nisbah kesetaraan lebih rendah daripada stoikiometri 1.0 ($\Phi < 1.0$) adalah campuran cair bahan api yang mempunyai lebih banyak udara dan kurang bahan api, manakala untuk nisbah kesetaraan yang lebih tinggi daripada 1.0 ($\Phi > 1.0$) adalah merupakan campuran yang kaya bahan api dengan udara yang kurang daripada keadaan stoikiometri $\Phi = 1.0$.

3. Keputusan dan Perbincangan

Hasil kajian untuk ujian pembakaran menggabungkan sifat fizikal bahan api, profil suhu dinding, tenaga terma bahan api, kecekapan terma pembakar dan pelepasan emisi yang berada dalam keadaan gas. Suhu dinding bergantung pada suhu yang dibezakan oleh pengganding haba di sepanjang dinding kebuk pembakaran. Nilai suhu diukur dari input pembakar ke ruang pembakaran. Juga, tenaga terma bahan api dihitung dari kadar aliran dan kandungan tenaga bahan api yang digunakan, manakala kecekapan terma pembakar dikira dari kemampuan bahan api biodiesel memanaskan kebuk pembakar pada setiap keadaan pembakaran. Bagi kepekatan emisi untuk NO_x , SO_2 , dan CO , nilai masing-masing diplot terhadap nisbah kesetaraan, Φ untuk setiap campuran bahan api.

3.1 Sifat-Sifat Bahan Api

Jadual 2 menunjukkan pengaruh peratusan minyak bunga matahari ke atas ketumpatan, kelikatan kinematik, nilai kalori dan ketegangan permukaan. Ketumpatan adalah nisbah antara berat dan isipadu sesuatu bahan. Minyak yang mempunyai ketumpatan yang tinggi akan meningkatkan kadar penggunaan bahan api semasa pembakaran disebabkan jumlah isipadu pengabusan minyak yang tinggi ke dalam kebuk pembakar [31]. Dapat dilihat ketumpatan campuran biodiesel B10, B15, B25 dan B50 meningkat kira-kira 0.11%, 0.24%, 0.60% dan 1.20%, berbanding ketumpatan diesel. Menggabungkan bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga matahari dengan diesel akan meningkatkan kepadatannya secara berkala. Semakin tinggi kandungan biodiesel berasaskan minyak bunga matahari, semakin tinggi kepadatan adunan bahan api yang dihasilkan. Peningkatan ketumpatan bahan api mengikut Ramalho dan rakan-rakan [32] adalah disebabkan komposisi alkil ester terdiri daripada karbon, hidrogen dan oksigen yang menjadikan struktur molekul bahan api biodiesel lebih berat dari bahan api berasaskan hidrokarbon.

Kelikatan merupakan sifat bendalir kerana terdapatnya rintangan yang diwujudkan oleh satu lapisan bendalir ke atas lapisan yang bersebelahan dengan gerakan relatif antara mereka [33]. Bahan api yang lebih likat mempunyai ciri-ciri pengabusan yang lemah dan sudut semburan sempit [34]. Hal ini boleh menyebabkan penurunan prestasi pembakaran serta pelepasan gas emisi yang tinggi [31]. Kelikatan kinematik campuran bahan api biodiesel B10, B15, B25 dan B50 didapati meningkat sekitar 27.0%, 29.0%, 42.0% dan 48.0%, berbanding dengan kelikatan kinematik diesel. Peningkatan ini boleh dikaitkan dengan kenyataan Ramalho dan rakan-rakan [32] bahawa daya kekuatan antara molekul alkil ester adalah lebih tinggi dari bahan api diesel dan ini menyumbang kepada peningkatan daya rintangan molekul bahan api untuk bergerak.

Jadual 2

Sifat-sifat Fizikal Bahan Api

Adunan	Ketumpatan (g/cm ³)	Kelikatan kinematik, @ 40°C (mm ² /s)	Nilai Kalori (kJ/kg)	Ketegangan Permukaan (mN/m)
Diesel	0.837	3.1265	45833	31.4
B10	0.838	3.9846	45602	31.6
B15	0.839	4.0243	45369	31.7
B25	0.842	4.4289	43581	32.2
B50	0.847	4.6215	43034	33.4

Ketegangan permukaan cecair adalah salah satu sifat asas yang mempengaruhi ciri pengabusannya [35]. Proses pengabusan adalah peringkat permulaan pembakaran bahan api dalam enjin diesel, dan oleh itu ketegangan permukaan bahan api mempunyai peranan dalam pembakaran bahan bakar. Ketegangan permukaan yang tinggi bagi bahan api cecair boleh menghalang proses pengabusan yang sempurna dan ini menjadikan campuran bahan api dan udara menjadi tidak baik bagi suatu pembakaran [36]. Bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga matahari B10, B15, B25 dan B50 didapati meningkat sebanyak 0.63%, 1.0%, 2.5% dan 6.4% berbanding diesel apabila peratusan campuran meningkat. Hal ini dapat dikaitkan dengan daya kekuatan antara molekul alkil ester sendiri yang lebih kuat bersatu padu dari diesel bagi menghalang pecahan molekul bahan api semasa pengabusan [37].

Nilai kalori adalah satu nilai yang menunjukkan jumlah tenaga yang terkandung dalam bahan api tersebut dan boleh ditukarkan kepada tenaga haba semasa proses pembakaran. Sifat ini adalah penting kerana ia menentukan prestasi pembakaran serta tahap suhu pemanasan yang dihasilkan [38]. Dapat dilihat dalam Jadual 2 apabila peratusan bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga

matahari meningkatkan nilai kalori akan berkurangan. Nilai kalori campuran bahan api biodiesel B10, B15, B25 dan B50 menunjukkan penurunan masing-masing 0.5%, 1.0%, 4.9% dan 6.1% berbanding dengan nilai kalori diesel. Penurunan ini boleh dikaitkan dengan kenyataan Atabani dan rakan-rakan [39] di mana nisbah kandungan antara karbon dan hidrogen yang tinggi menjadikan bahan api itu mempunyai nilai kalori yang tinggi. Namun kehadiran oksigen pada struktur molekul alkil ester telah mengurangkan nisbah tersebut dan akhirnya menurunkan tenaga yang terkandung dalam bahan api biodiesel.

3.2 Profil Suhu Dinding

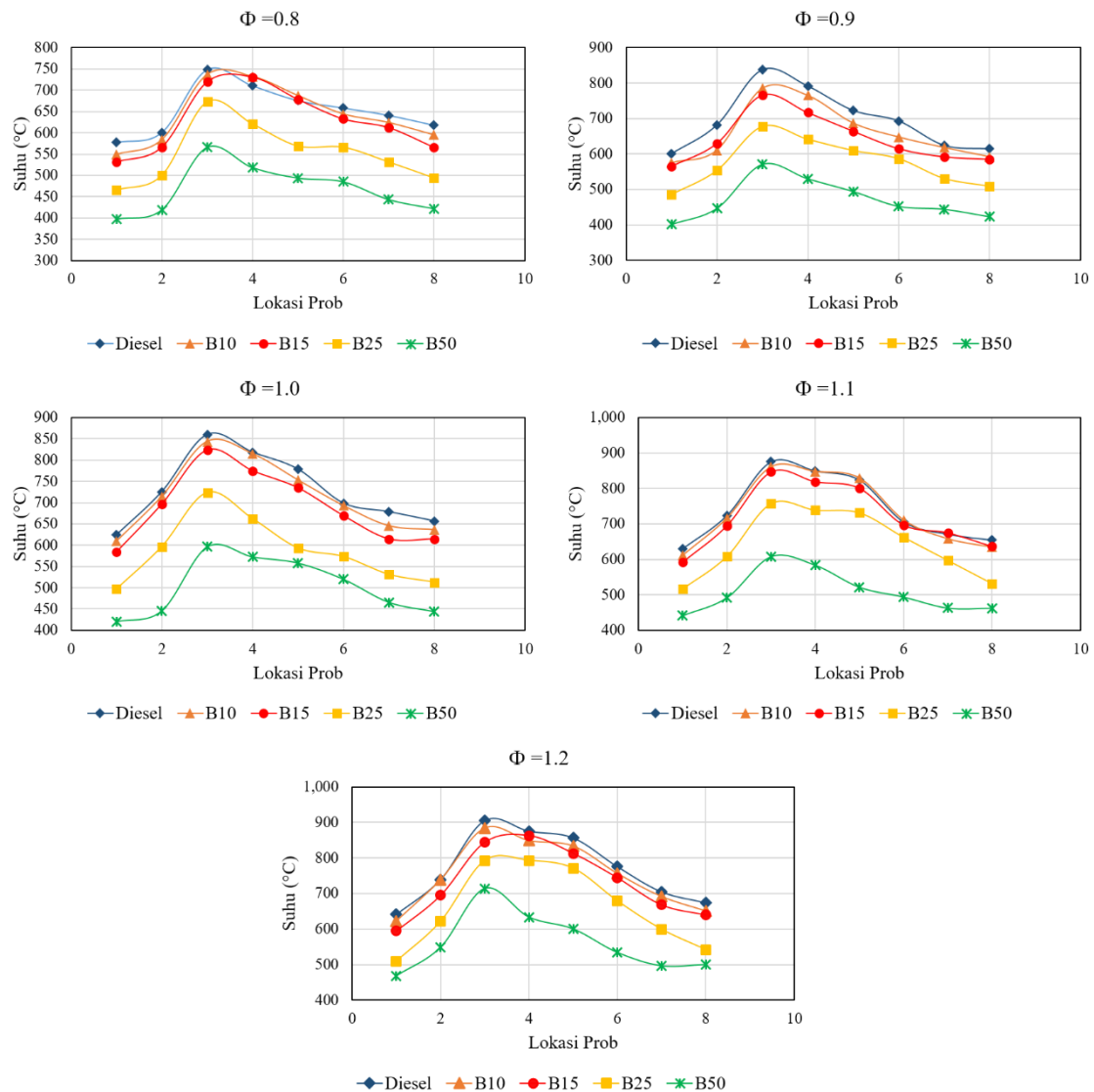
Corak suhu dinding pembakar bagi bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari yang dikaji pada nisbah kesetaraan $\Phi=0.8$ hingga 1.2 ditunjukkan dalam Rajah 7. Dari rajah ini, dapat dilihat suhu dinding puncak bagi kesemua bahan api yang dikaji pada setiap nisbah kesetaraan menghasilkan corak suhu yang meningkat hingga ke puncak dari prob pertama ke prob ketiga dan menurun sehingga ke prob terakhir (kelapan). Corak ini terbentuk adalah disebabkan oleh fasa pembentukan api yang dapat dibahagikan kepada tiga peringkat pembentukan iaitu fasa awal, pertengahan dan fasa akhir [40]. Pada fasa awal pembakaran, bahan api dan udara bercampur dan separa terbakar, dan ini meningkatkan suhu pembakaran. Pembakaran penuh berlaku di fasa pertengahan dan hal ini meningkatkan suhu pembakaran hingga ke puncak. Akhirnya, pada zon akhir, suhu pembakaran menurun disebabkan adanya pembentukan gas emisi yang bercampur dengan udara dan mengalami proses penyejukan. Oleh itu, dapat disimpulkan pada prob pertama sehingga ke tiga, kesemua bahan api yang diujikaji mengalami fasa pembakaran awal dan pertengahan, dan seterusnya sehingga ke prob terakhir mengalami fasa pembakaran akhir.

Selain itu, dapat diperhatikan pembakaran bahan api diesel adalah yang tertinggi bagi kesemua nisbah kesetaraan. Pembakaran bahan api diesel menghasilkan anggaran suhu puncak pada 749°C (untuk $\Phi=0.8$), 843°C (untuk $\Phi=0.9$), 859°C (untuk $\Phi=1.0$), 876°C (untuk $\Phi=1.1$) dan 901°C (untuk $\Phi=1.2$). Peningkatan kadar peratusan bahan api biodiesel berasaskan bunga matahari dari B10 ke B50 dilihat menurunkan suhu dinding kebuk pembakar secara berperingkat. Penurunan suhu dinding bagi bahan api biodiesel B10 dan B15 dilihat sedikit berkurangan dengan diesel dan hal ini adalah kerana sifat bahan api bagi kedua-dua biodiesel ini adalah tidak jauh berbeza dengan diesel. Bagi B25 dan B50 dilihat amat ketara dengan bahan api diesel. Pembakaran bahan api biodiesel B50 mencatatkan suhu puncak pada 597°C (untuk $\Phi=0.8$), 559°C (untuk $\Phi=0.9$), 597°C (untuk $\Phi=1.0$), 617°C (untuk $\Phi=1.1$) dan 635°C (untuk $\Phi=1.2$).

Penurunan ini dapat dikaitkan dengan nilai kalori bahan api, kelikatan kinematik dan ketegangan permukaan cecair [41]. Bahan api diesel mempunyai nilai kalori yang tinggi dan kurang likat dan tegang daripada biodiesel berasaskan bunga matahari. Disebabkan hal ini, bahan api diesel mempunyai pengabusan yang lebih baik berbanding biodiesel dan membakar pada suhu yang tinggi. Bagi bahan api biodiesel yang mempunyai kandungan tenaga yang rendah dan kelikatan dan ketegangan lebih tinggi dari diesel sedikit sebanyak mempengaruhi kesempurnaan pengabusan minyak dalam kebuk pembakar dan akhirnya merendahkan suhu pembakaran bahan api [41]. Oleh itu, peningkatan peratus campuran bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga matahari sehingga B50 akan mengalami rintangan yang lebih tinggi bagi kesempurnaan pengabusan dan akhirnya menghasilkan suhu pembakaran lebih rendah dari yang lain.

Pembakaran minyak pada nilai kesetaraan yang lebih tinggi sehingga $\Phi=1.2$ didapati meningkatkan suhu dinding pembakar bagi kesemua bahan api yang diujikaji. Hal ini kerana nisbah kesamaan yang lebih tinggi menghasilkan peningkatan suhu yang lebih tinggi disebabkan lebih

banyak bahan bakar disembur dalam kebuk pembakaran dan dibakar [27]. Oleh itu, lebih banyak haba dihasilkan semasa pembakaran.



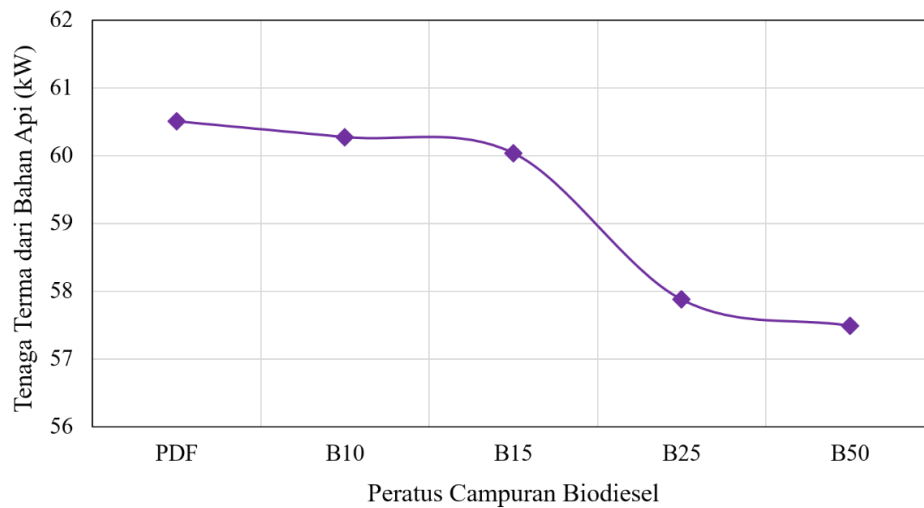
Rajah 7 Profil suhu dinding untuk kedudukan prob berbeza bagi nisbah kesetaraan, $\Phi = 0.8$ hingga 1.2

3.3 Kecekapan Pembakaran Minyak

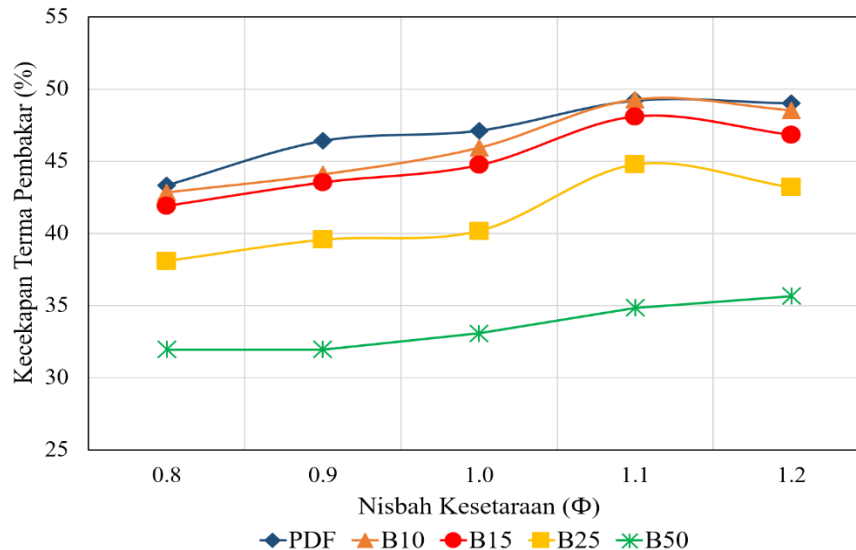
Kecekapan pembakaran bahan api diesel dan biodiesel berasaskan minyak bunga matahari B10 hingga B50 dipaparkan dalam Rajah 8 dan Rajah 9. Dalam Rajah 8, tenaga terma bahan api diesel adalah sebanyak 60.51kW dan peningkatan peratus campuran biodiesel berasaskan bunga matahari B10 hingga B50 menurunkan tenaga terma bahan api masing-masing sebanyak 0.39%, 0.78%, 4.35% dan 4.99%. Penurunan tenaga terma ini adalah disebabkan rendahnya nilai kalori bahan api biodiesel tersebut berbanding dengan diesel dan hal ini telah mempengaruhi kadar pembebasan haba dan tenaga dari bahan api apabila dibakar [27].

Dalam Rajah 9, kecekapan terma pembakar bagi semua bahan api yang dikaji dipaparkan. Dapat dilihat di sini bahawa terdapat peningkatan kecekapan terma pembakar bagi kesemua bahan api apabila nisbah kesetaraan meningkat hingga $\Phi=1.2$. Selain itu, peningkatan campuran biodiesel B10 hingga B50 menurunkan aras kecekapan terma pembakar pada semua nisbah kesetaraan.

Disebabkan kecekapan terma bergantung kepada kadar haba yang dihasilkan semasa pembakaran, maka perubahan keadaan pembakaran dari keadaan cair bahan api, stoikiometri kepada kaya bahan api meningkatkan jumlah bahan api yang disembur untuk dibakar [41]. Hal ini sekaligus menaikkan suhu pembakaran dan menyumbang kepada peningkatan kecekapan terma pembakar. Selain itu, minyak yang menghasilkan suhu dinding pembakar yang tertinggi akan mempunyai kecekapan terma yang tinggi [42]. Ini dapat dilihat di mana bahan api diesel yang membakar dan menghasilkan suhu dinding yang tinggi menghasilkan terma kecekapan yang lebih tinggi dari biodiesel berasaskan bunga matahari B10 hingga B50.



Rajah 8 Tenaga terma bagi bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari untuk nisbah kesetaraan $\Phi = 0.8$ hingga 1.2



Rajah 9 Kecekapan terma pembakar bagi bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari untuk nisbah kesetaraan $\Phi = 0.8$ hingga 1.2

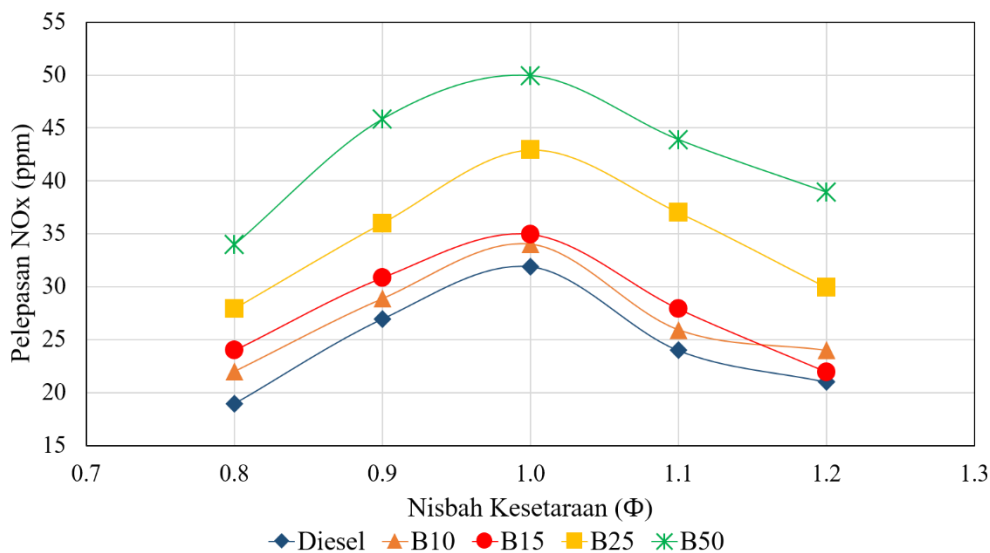
3.4 Emisi

Salah satu perkara utama di sebalik penggunaan bahan api yang boleh diperbaharui adalah mengenai kesedaran kadar pengembangan pelepasan gas rumah hijau dan perubahan iklim alam sekitar. Adalah penting untuk mengetahui sama ada pelepasan gas emisi dari pembakaran bahan api biodiesel dapat mengurangkan kesan rumah hijau bagi mengurangkan tumpuan menggunakan

bahan api diesel fosil. Oksida nitrogen (NO_x), Karbon Monoksida (CO) dan Sulfur Dioksida (SO₂) adalah bahan pencemar asas yang boleh dikaitkan dalam pembakaran bahan api biodiesel berasaskan minyak bunga matahari dan keputusan ujikaji yang dijalankan dipaparkan dalam Rajah 10 hingga Rajah 12.

3.4.1 Pembentukan NO

Rajah 10 menunjukkan corak pembentukan NO_x untuk bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari B10 hingga B50 pada nisbah kesetaraan $\Phi = 0.8$ hingga 1.2. Dapat dilihat corak pelepasan NO_x bagi semua bahan api pada keadaan cair bahan api, stoikiometri hingga kaya bahan api menghasilkan bentuk quadratik, dengan puncak NO_x berada pada nilai kesetaraan $\Phi = 1.0$. Pembentukan sebegini berkait rapat dengan suhu pembakaran dan ketersediaan oksigen [37,43]. Perubahan keadaan pembakaran dari cair bahan api ke stoikiometri meningkatkan suhu pembakaran minyak dan ini meningkatkan pelepasan NO_x. Walaubagaimanapun, apabila pembakaran memasuki keadaan kaya bahan api, ketersediaan oksigen adalah kurang dari bahan api menjadikan pembentukan NO_x berkurangan walaupun suhu pembakaran tinggi ketika itu.



Rajah 10 Pelepasan NO_x bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari pada nisbah kesetaraan yang berbeza

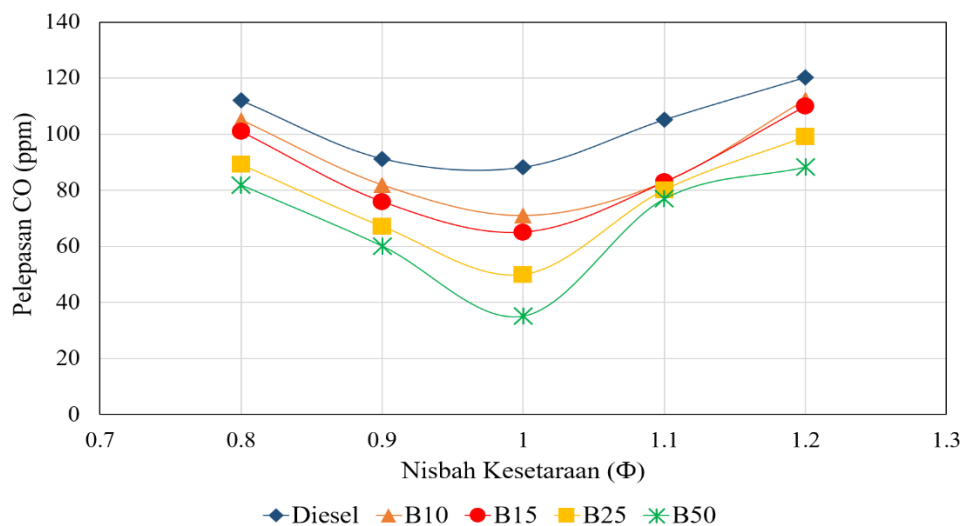
Perbandingan corak emisi antara bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari B10 hingga B50 mendapati pelepasan NO_x bagi diesel adalah lebih rendah dari biodiesel dan peningkatan peratusan campuran biodiesel akan meningkatkan corak NO_x secara berperingkat. Pada keadaan stoikiometri ($\Phi = 1.0$), bahan api diesel menghasilkan NO_x sebanyak 32ppm, diikuti B10 sebanyak 33ppm, B15 sebanyak 34ppm, B25 sebanyak 42ppm dan B50 sebanyak 50ppm. Peningkatan emisi NO_x bagi B10 pada keadaan ini adalah sebanyak 3.03% diikuti B15 sebanyak 5.88%, B25 sebanyak 23.81% dan B50 sebanyak 36.00%.

Mengikut Fernando dan rakan-rakan [43], pembentukan NO_x dapat dibahagikan kepada tiga mekanisme iaitu NO_x terma, NO_x penggesa dan NO_x bahan api. Pembentukan NO_x melalui mekanisme NO_x terma adalah yang paling utama bergantung kepada suhu pembakaran dan ketersediaan oksigen. Hal ini dapat dilihat dengan penghasilan corak emisi NO_x bagi semua bahan api. Bagi pembentukan melalui mekanisme NO_x penggesa, mengikut Refaat [44], biodiesel yang mempunyai peratusan asid lemak tak tepu yang tinggi menyumbang kepada pembentukan radikal

bebas yang banyak dan akhirnya menggalakkan pembentukan NOx penggesa. Bagi pembentukan NOx bahan api, biodiesel diketahui untuk mengandungi kadar nitrogen yang sangat rendah [43]. Jadi, peningkatan pelepasan NOx bagi bahan api biodiesel berasaskan bunga matahari boleh dikaitkan dengan komposisinya sendiri yang sangat tinggi mengandungi asid lemak tak tepu (sehingga 90%) dan ini menyumbang kepada bacaan NOx yang lebih tinggi dari diesel.

3.4.2 Pelepasan CO

Rajah 11 memaparkan corak pelepasan CO bagi semua bahan api yang dikaji pada nisbah kesetaraan yang berbeza. Dapat dilihat gas emisi CO bagi semua bahan api membentuk corak quadratik apabila pembakaran dilakukan dari keadaan cair bahan api, stoikiometri hingga kaya bahan api. Pelepasan CO pada keadaan cair bahan api hingga stoikiometri mencatatkan penurunan sehingga mencapai nilai terendah dan kemudian meningkat kembali apabila pembakaran memasuki keadaan kaya bahan api. Corak sebegini berlaku disebabkan pada keadaan cair bahan api, udara yang laju bercampur dengan bahan api yang sedikit telah membentuk beberapa kawasan yang mempunyai percampuran yang kurang baik dan ini telah menyumbang kepada bacaan CO yang tinggi [45]. Pada keadaan stoikiometri, bacaan percampuran bahan api dan udara adalah sempurna menjadikan bacaan CO mencapai titik terendah manakala pada keadaan kaya bahan api, kekurangan bekalan udara menjadikan pembakaran minyak tidak sempurna dan ini meningkatkan bacaan CO [28].



Rajah 11 Pelepasan CO bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari pada nisbah kesetaraan yang berbeza

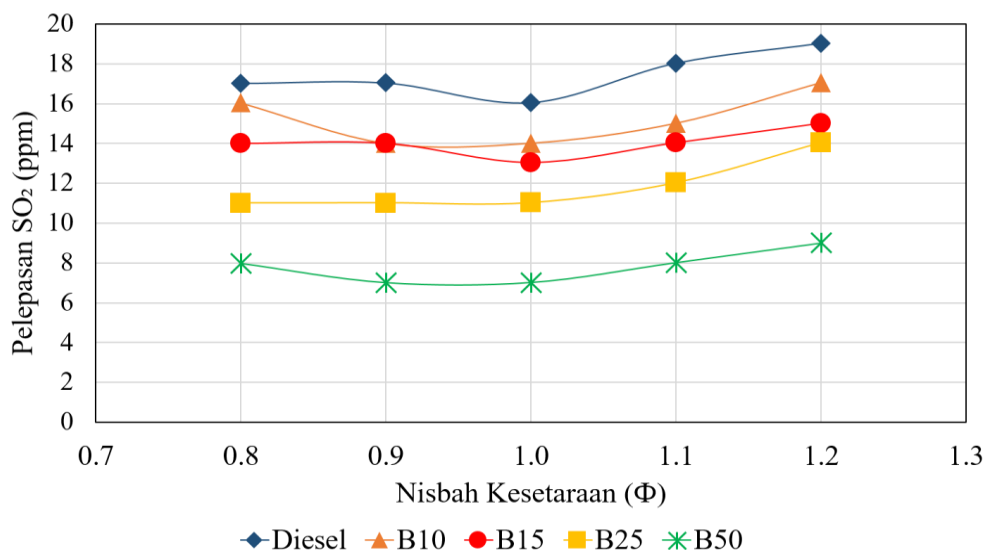
Bacaan emisi CO bagi bahan api biodiesel berasaskan bunga matahari mencatatkan bacaan yang lebih rendah dari diesel dan peningkatan peratusan campuran B10 hingga B50 menggalakkan penurunan emisi secara berperingkat. Pada keadaan stoikiometri ($\Phi = 1.0$), bacaan CO bagi diesel adalah sebanyak 86ppm diikuti B10 sebanyak 72ppm, B15 sebanyak 64ppm, B25 sebanyak 50ppm dan B50 sebanyak 36ppm. Penurunan pelepasan CO bagi bahan api biodiesel pada keadaan ini adalah sebanyak 16.28% bagi B10, 25.58% bagi B15, 41.86% bagi B25 dan 58.14% bagi B50.

Pembentukan CO yang lebih rendah bagi biodiesel dapat dikaitkan dengan sifat bahan api itu sendiri yang mengandungi jumlah oksigen yang lebih tinggi dan nisbah karbon dan hidrogen yang lebih rendah berbanding bahan api fosil [35]. Kandungan oksigen dalam biodiesel menurut Heravi dan rakan-rakan [46] adalah tinggi sekitar 10% hingga 12% dan ini menggalakkan kadar pembakaran yang lebih baik. Kadar pembakaran yang lebih baik membantu bahan api mencapai pembakaran yang

sempurna dan ini dapat mengurangkan pembentukan CO [47], memandangkan faktor pembentukan CO adalah disebabkan pembakaran yang kurang sempurna [48].

3.4.3 Emisi SO_2

Rajah 12 menunjukkan peratus pelepasan SO_2 bagi bahan api diesel dan bahan api biodiesel berasaskan bunga matahari B10 hingga B50. Seperti yang diperhatikan, corak pelepasan SO_2 bagi semua bahan api menunjukkan peningkatan dari nisbah kesetaraan $\Phi = 0.8$ hingga 1.2. Bacaan SO_2 bagi semua bahan api adalah rendah ketika pembakaran dalam keadaan cair bahan api dan ini disebabkan oleh lebih udara yang bergerak laju menghalang tindak balas yang sempurna antara molekul sulfur dan oksigen untuk membentuk SO_2 [46]. Apabila pembakaran bergerak ke stoikiometri dan kaya bahan api, pembentukan SO_2 semakin meningkat disebabkan kurangnya halangan dari udara yang masuk secara perlahan serta suhu pembakaran yang tinggi. Pada keadaan stoikiometri ($\Phi = 1.0$), pelepasan gas emisi SO_2 bagi bahan api diesel mencatatkan bacaan sebanyak 16ppm, diikuti B10 sebanyak 14ppm, B15 sebanyak 13ppm, B25 sebanyak 11ppm dan B50 sebanyak 7ppm.



Rajah 12 Pelepasan SO_2 bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari pada nisbah kesetaraan yang berbeza

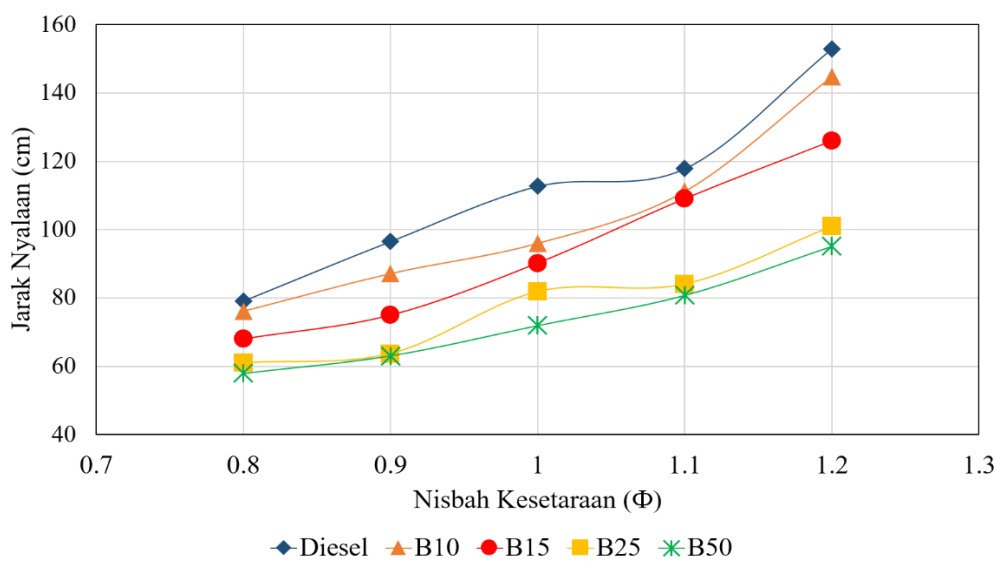
Selain itu juga dapat diperhatikan corak pelepasan SO_2 bagi bahan api biodiesel berasaskan bunga matahari semakin berkurangan apabila peratusan campuran meningkat dari B10 ke B50. Pengurangan bacaan SO_2 bagi bahan api biodiesel pada keadaan stoikiometri adalah sebanyak 12.50% bagi B10, 18.75% bagi B15, 31.25% bagi B25 dan 56.25% bagi B50. Mengikut Heravi dan rakan-rakan [46], biodiesel adalah bahan api yang mengandungi sangat sedikit atau tiada langsung sulfur. Biodiesel yang dicampur dengan bahan api fosil akan melarutkan kandungan sulfur dalam bahan api tersebut dan ini akan mengurangkan pembentukan SO_2 apabila dibakar [49].

3.4.4 Panjang nyalaan

Rajah 13 menunjukkan corak panjang nyalaan yang dihasilkan oleh bahan api diesel dan biodiesel berasaskan minyak bunga matahari B10 hingga B50 pada nisbah kesetaraan yang berbeza. Seperti yang diperhatikan, panjang nyalaan bagi semua bahan api meningkat dari keadaan pembakaran cair bahan api ke kaya bahan api. Peningkatan panjang nyalaan ini adalah kerana peningkatan nisbah

kesetaraan dari $\Phi = 0.8$ hingga 1.2 mengurangi bekal udara dan ini menjadikan api pembakaran bertindak balas dan menjadi lebih panjang untuk mencari oksigen yang secukupnya bagi melengkapkan pembakaran [50].

Selain itu, dapat dilihat peningkatan peratusan campuran biodiesel B10 hingga B50 mengurangkan corak panjang nyalaan api secara berkala. Pada keadaan stoikiometri ($\Phi = 1.0$), panjang nyalaan bagi diesel adalah sebanyak 113cm, diikuti B10 sebanyak 96cm, B15 sebanyak 90cm, B25 sebanyak 82cm dan B50 sebanyak 72cm. Pengurangan panjang nyalaan bagi biodiesel berasaskan bunga matahari adalah sebanyak 15.04% bagi B10, 20.35% bagi B15, 27.43% bagi B25 dan 36.28% bagi B50. Biodiesel yang mengandungi oksigen yang tinggi dari membantu meningkatkan kadar pembakaran bagi mencapai pembakaran yang sempurna. Hal ini mengurangkan tindak balas api pembakaran untuk mencari bekal oksigen bagi melengkapkan pembakaran dan seterusnya memendekkan panjang nyalaan [50].



Rajah 13 Panjang api bahan api diesel dan biodiesel berasaskan bunga matahari pada nisbah kesetaraan yang berbeza

4. Kesimpulan

Bahan api biodiesel berasaskan bunga matahari adalah bahan api yang mempunyai potensi untuk mengurangkan kebergantungan penggunaan bahan api fosil bagi tujuan industri. Melalui kajian yang dibuat ke atas alat pembakar minyak ringan ini, dapat diperhatikan prestasi pembakaran bahan api biodiesel bagi B10 dan B15 memaparkan pengurangan yang tidak terlalu ketara jika dibandingkan dengan diesel. Peningkatan peratus campuran yang lebih tinggi ke B25 dan B50 mengurangkan prestasi pembakaran dengan lebih ketara. Disebabkan prestasi pembakaran dipengaruhi oleh nilai kalori, kelikatan kinematik dan ketegangan permukaan bahan api, maka peningkatan campuran biodiesel merendahkan suhu pembakaran serta mengurangkan kesempurnaan pengabusan bahan api. Ini merendahkan tenaga terma bahan api dan kecekapan terma pembakar yang dihasilkan. Namun begitu, dapat dilihat pengurangan pelepasan gas emisi (kecuali NOx) yang sangat baik. Kandungan oksigen yang tinggi dan nilai sulfur yang rendah mengurangkan pelepasan gas emisi ketika pembakaran. Bagi gas emisi NOx, terdapat peningkatan yang jelas apabila campuran biodiesel meningkat. Disebabkan minyak bunga matahari secara semulajadi mengandungi asid lemak tak tepu yang sangat tinggi, maka kandungan ini mempengaruhi pelepasan NOx penggesa yang menyumbang kepada jumlah NOx ketika pembakaran. Secara keseluruhan, biodiesel berasaskan bunga matahari

mampu menjadi bahan api alternatif bagi mengurangkan penggunaan bahan api fosil untuk tujuan pemanasan industri.

Penghargaan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia dan Pusat Pengurusan Penyelidikan, Universiti Teknologi Malaysia kerana menganugerahkan geran penyelidikan untuk melaksanakan projek ini (Projek Nombor: 17J92). Mereka juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Sekolah Kejuruteraan Mekanikal, Fakulti Kejuruteraan yang telah menyediakan ruang untuk kajian ini dilaksanakan.

Rujukan

- [1] Ayhan, Demirbas. "Progress and recent trends in biodiesel fuels." *Energy Conversion and Management* 50, no. 1 (2009): 14-34. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>
- [2] Gross, Wendelin F., Cristina Hayden, and Christian Butz. "About the impact of rising oil price on logistics networks and transportation greenhouse gas emission." *Logistics Research* 4, no. 3 (2012): 147-156. <https://doi.org/10.1007/s12159-012-0072-2>
- [3] Conca, James. "No Peak Oil for America or The World." *Forbes*, Mar 2, 2017. <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2017/03/02/no-peak-oil-for-america-or-the-world/?sh=2f058cd84220>.
- [4] Papandreou, Andreas, and Franco Ruzzenenti. "On the effects of fossil fuel prices on the transition towards a low carbon energy system." *Part A, Fessud Financialisation, Economy, Society and Sustainable Development Working Paper Series* 89 (2015).
- [5] Basha, Syed Ameer, K. Raja Gopal, and S. Jebaraj. "A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, no. 6-7 (2009): 1628-1634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.031>
- [6] Klass, D. L. "Energy consumption, reserves, depletion and environmental issues." *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals* (1998): 1-27. <https://doi.org/10.1016/B978-012410950-6/50003-9>
- [7] Atabani, Abdelaziz E., Arridina S. Silitonga, Irfan Anjum Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, and S. Mekhilef. "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, no. 4 (2012): 2070-2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>
- [8] Demirbas, Ayhan. "Importance of biodiesel as transportation fuel." *Energy Policy* 35, no. 9 (2007): 4661-4670. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.04.003>
- [9] Rajaeifar, Mohammad Ali, Barat Ghobadian, Majeed Safa, and Mohammad Davoud Heidari. "Energy life-cycle assessment and CO2 emissions analysis of soybean-based biodiesel: a case study." *Journal of Cleaner Production* 66 (2014): 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.041>
- [10] Senthilkumar, S., G. Sivakumar, and Siddarth Manoharan. "Investigation of palm methyl-ester bio-diesel with additive on performance and emission characteristics of a diesel engine under 8-mode testing cycle." *Alexandria Engineering Journal* 54, no. 3 (2015): 423-428. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.019>
- [11] Rathore, Vivek, and Giridhar Madras. "Synthesis of biodiesel from edible and non-edible oils in supercritical alcohols and enzymatic synthesis in supercritical carbon dioxide." *Fuel* 86, no. 17-18 (2007): 2650-2659. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.03.014>
- [12] Demirbas, Ayhan, Abdullah Bafail, Waqar Ahmad, and Manzoor Sheikh. "Biodiesel production from non-edible plant oils." *Energy Exploration & Exploitation* 34, no. 2 (2016): 290-318. <https://doi.org/10.1177/0144598716630166>
- [13] Lukić, Ivana, Željka Kesić, Miodrag Zdujić, and Dejan Skala. "Vegetable oil as a feedstock for biodiesel synthesis." *Veg. Oil Prop. Uses Benefits* (2016): 83-128.
- [14] Gui, Meei Mei, K. T. Lee, and S. Bhatia. "Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock." *Energy* 33, no. 11 (2008): 1646-1653. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.06.002>
- [15] UFOP. *Report on Global Market Supply 2017/2018 - European and world demand for biomass for the purpose of biofuel production in relation to supply in the food and feedstuff markets*. Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP): Germany (2018).
- [16] Ma, Fangrui, and Milford A. Hanna. "Biodiesel production: a review." *Bioresource Technology* 70, no. 1 (1999): 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)

- [17] Lam, Man Kee, Keat Teong Lee, and Abdul Rahman Mohamed. "Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: a review." *Biotechnology Advances* 28, no. 4 (2010): 500-518. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.03.002>
- [18] Baroutian, Saeid, Mohamed Kheireddine Aroua, Abdul Aziz Abdul Raman, and Nik Meriam Nik Sulaiman. "Potassium hydroxide catalyst supported on palm shell activated carbon for transesterification of palm oil." *Fuel Processing Technology* 91, no. 11 (2010): 1378-1385. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.009>
- [19] Meher, L. C., D. Vidya Sagar, and S. N. Naik. "Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10, no. 3 (2006): 248-268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- [20] Nizah, M. F. Rabiah, Y. H. Taufiq-Yap, Umer Rashid, Siow Hwa Teo, ZA Shajaratun Nur, and Aminul Islam. "Production of biodiesel from non-edible *Jatropha curcas* oil via transesterification using Bi₂O₃-La₂O₃ catalyst." *Energy Conversion and Management* 88 (2014): 1257-1262. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.072>
- [21] Pilorgé, Etienne. "Sunflower in the global vegetable oil system: situation, specificities and perspectives." *OCL* 27 (2020): 34. <https://doi.org/10.1051/ocl/2020028>
- [22] Orsavova, Jana, Ladislava Misurcova, Jarmila Vavra Ambrozova, Robert Vicha, and Jiri Mlcek. "Fatty acids composition of vegetable oils and its contribution to dietary energy intake and dependence of cardiovascular mortality on dietary intake of fatty acids." *International Journal of Molecular Sciences* 16, no. 6 (2015): 12871-12890. <https://doi.org/10.3390/ijms160612871>
- [23] Singh, Bharat P. *Industrial crops and uses*. Cabi, No. SB185. I53 2010. Ovid Technologies, Inc., 2010. <https://doi.org/10.1079/9781845936167.0000>
- [24] Ali, J. A., and A. Abuhabaya. "Sunflower biodiesel: efficiency and emissions." *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering* 83 (2014): 179-190. <https://doi.org/10.2495/978-1-78466-034-5/017>
- [25] Santos, Bjorn S., Sergio C. Capareda, and Jewel A. Capunitan. "Sunflower methyl ester as an engine fuel: performance evaluation and emissions analysis." *International Scholarly Research Notices* 2013 (2013). <https://doi.org/10.1155/2013/352024>
- [26] Tutunea, Dragos, and Ilie Dumitru. "Analysis of performance and emissions of diesel engine using sunflower biodiesel." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 252, no. 1, p. 012085. IOP Publishing, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/252/1/012085>
- [27] Musthafa, Anas Basri. "Study on the Performance of Palm Methyl Ester in a Combustion System." *PhD diss., Universiti Teknologi Malaysia*, 2015.
- [28] Abdul Malik, Muhammad Syahiran, Ashrul Ishak Mohamad Shaiful, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, and Amirah Mohamad Sahar. "Combustion and emission characteristics of coconut-based biodiesel in a liquid fuel burner." *Energies* 10, no. 4 (2017): 458. <https://doi.org/10.3390/en10040458>
- [29] Jaafar, Mohammad Nazri Mohd, and Safiullah Safiullah. "Combustion Characteristics of Rice Bran Oil Biodiesel in an Oil Burner." *Jurnal Teknologi* 80, no. 3 (2018). <https://doi.org/10.11113/jt.v80.11612>
- [30] Hasan, Abed Al-Khadim M., Mahmoud A. Mashkour, and Amer A. Mohammed. "Experimental Investigations on Combustion Pollutant Emissions of Sunflower Biodiesel and Its Blends with Diesel and Kerosene for Furnace Application." *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences* 26, no. 8 (2018): 88-100.
- [31] Barabás, István, and Ioan-Adrian Todoruț. "Biodiesel quality, standards and properties." *Biodiesel - Quality, Emissions and By-Products* (2011): 3-28. <https://doi.org/10.5772/25370>
- [32] Ramalho, E. F. S. M., J. R. Carvalho Filho, A. R. Albuquerque, S. F. De Oliveira, E. H. S. Cavalcanti, L. Stragevitch, I. M. G. Santos, and A. G. Souza. "Low temperature behavior of poultry fat biodiesel: diesel blends." *Fuel* 93 (2012): 601-605. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.051>
- [33] Durrenberger, Joe. *Furnace Efficiency Testing*. No. AK-RD-84-12. State of Alaska, Department of Transportation and Public Facilities, Division of Planning, Research Section, 1983.
- [34] Knothe, Gerhard, Jurgen Krahl, and Jon Van Gerpen. *The Biodiesel Handbook*. No. L-0578. AOCS Press, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781439822357>
- [35] Knothe, Gerhard. "Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters." *Fuel Processing Technology* 86, no. 10 (2005): 1059-1070. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.002>
- [36] Esteban, Bernat, Jordi-Roger Riba, Grau Baquero, Rita Puig, and Antoni Rius. "Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines." *Fuel* 102 (2012): 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.042>
- [37] Palash, S. M., M. A. Kalam, H. H. Masjuki, B. M. Masum, IM Rizwanul Fattah, and M. Mofijur. "Impacts of biodiesel combustion on NO_x emissions and their reduction approaches." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013): 473-490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.003>

- [38] Ali, O. M., R. Mamat, M. G. Rasul, and G. Najafi. "Potential of biodiesel as fuel for diesel engine." In *Clean Energy for Sustainable Development*, pp. 557-590. Academic Press, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805423-9.00018-1>
- [39] Atabani, A. E., A. S. Silitonga, H. C. Ong, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, Irfan Anjum Badruddin, and H. Fayaz. "Non-edible vegetable oils: a critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18 (2013): 211-245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.013>
- [40] Rahim, M. R. "Kesan Penggunaan Pemusar Dwi Ganda Aliran Jejarian Terhadap Hasil Pembakaran Berbahan Api Cecair." *Master diss., Universiti Teknologi Malaysia*, 2016.
- [41] Ganjehkaviri, Abdolsaeid, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Seyed Ehsan Hosseini, and Anas Basri Musthafa. "Performance evaluation of palm oil-based biodiesel combustion in an oil burner." *Energies* 9, no. 2 (2016): 97. <https://doi.org/10.3390/en9020097>
- [42] Bazooyar, Bahamin, Afshin Ghorbani, and Ahmad Shariati. "Combustion performance and emissions of petrodiesel and biodiesels based on various vegetable oils in a semi industrial boiler." *Fuel* 90, no. 10 (2011): 3078-3092. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.025>
- [43] Fernando, Sandun, Chris Hall, and Saroj Jha. "NOx reduction from biodiesel fuels." *Energy & Fuels* 20, no. 1 (2006): 376-382. <https://doi.org/10.1021/ef050202m>
- [44] Refaat, A. A. "Correlation between the chemical structure of biodiesel and its physical properties." *International Journal of Environmental Science & Technology* 6, no. 4 (2009): 677-694. <https://doi.org/10.1007/BF03326109>
- [45] Samaras, C. "Emissions estimation from industrial gas turbine combustors." *Master diss., Cranfield University, Cranfield, UK*, 2010.
- [46] Heravi, Hamid Momahedi, Saeed Baghdar Hosseini, Fatemeh Farash Bamoharram, and Javad Baharara. "The Effect of various vegetable oils on pollutant emissions of biodiesel blends with gasoil in a furnace." *Thermal Science* 19, no. 6 (2015): 1977-1984. <https://doi.org/10.2298/TSCI140218022H>
- [47] Venu, Harish, and Prabhu Appavu. "Combustion and emission characteristics of Tamarind seed biodiesel-diesel blends in a compression ignition engine." *International Journal of Ambient Energy* (2019): 1-6. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1611652>
- [48] Vakkilainen, Esa K. "Solid Biofuels and Combustion." *Steam Generation from Biomass* (2017): 18-56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804389-9.00002-2>
- [49] Sapee, S. "Study on the Combustion Performance of Jatropha and Used Cooking Oil Biodiesels in a Liquid Fuel Burner." *Master diss., Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Malaysia*, 2017.
- [50] Hasagaya, Muhammad Azreen Azeem. "Performance Study of Biodiesel Blends on Burner System." *PhD diss., Universiti Teknologi Malaysia*, 2010.