

TEKNOLOGI PROSES UNTUK PRODUKSI BIODIESEL BERBASIS MINYAK KELAPA SAWIT

Silva Latisya

Abstrak - Pengenalan kembali minyak nabati ke mesin diesel memicu berkembangnya penelitian biodiesel. Tulisan ini bertujuan untuk menelaah kembali latar belakang, perkembangan, kebijakan, dan penelitian mengenai biodiesel secara komprehensif. Tulisan ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman dalam rangka usaha pemanfaatan minyak sawit untuk menghasilkan produk turunan yaitu energi terbarukan yang ramah lingkungan, sesuai standar bahan bakar mesin, ekonomis dan berkelanjutan. Biodiesel adalah mono alkil ester asam lemak yang diturunkan dari minyak nabati maupun minyak hewani. Minyak sawit merupakan sumber bahan baku biodiesel paling mendominasi di dunia karena produktivitas yang tinggi. Namun tingginya fluktuasi harga bahan baku (*feedstock oil*) yaitu minyak sawit rafinasi (RBDPO) menjadi salah satu isu penting. Pemerintah Indonesia memberikan dukungan terhadap industri biodiesel sawit sejak tahun 2008 hingga saat ini yakni mandat *blending* biodiesel dengan petrodiesel dan menginisiasi pembentukan BPD PKS sebagai dukungan mekanisme finansial. Secara teknis, biodiesel berbasis sawit sesuai untuk diaplikasikan ke mesin diesel karena memiliki karakteristik serupa dengan petrodiesel dan sesuai dengan standar SNI 7182:2015, ASTM, dan EN 14214. Biodiesel diproduksi melalui proses transesterifikasi atau esterifikasi bergantung pada kandungan asam lemak bebas (ALB) dalam *feedstock oil* dan dilakukan dengan bantuan katalis, baik katalis homogen ataupun heterogen. Industri biodiesel di Indonesia memiliki prospek yang baik. Perkembangan teknologi proses biodiesel saat ini menunjukkan kecenderungan pemilihan proses serta bahan baku yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan seperti HVO/HEFA maupun bahan baku limbah kelapa sawit (POME dan TKKS). Biodiesel berbasis sawit masih memiliki berbagai isu baik teknis maupun non teknis yang harus diselesaikan untuk menghadapi tantangan di pasar global.

Kata kunci: Biodiesel, Minyak kelapa sawit, Indonesia, Teknologi Proses

PENDAHULUAN

Sejarah Biodiesel

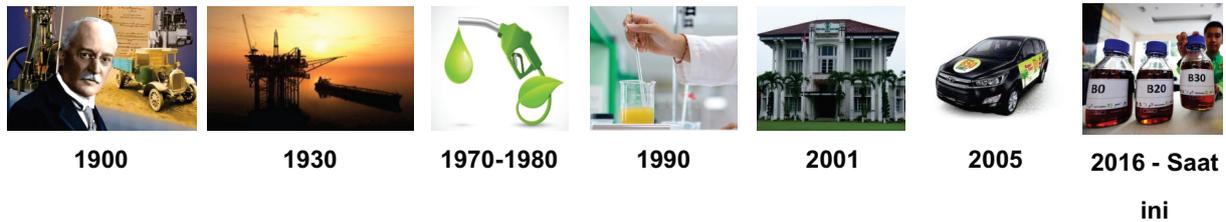
Mesin diesel dengan bahan bakar minyak kacang tanah (*crude peanut oil*) pertama di dunia dikenalkan oleh Rudolf Diesel pada saat pameran Paris Exposition tahun 1900. Namun, penggunaan minyak nabati pada mesin diesel menurun setelah tahun 1930 akibat perkembangan pesat eksplorasi minyak bumi. Pada tahun 1970-an, terjadi embargo minyak bumi dunia dan harganya meningkat drastis. Tahun 1980-an, industri dunia mulai mengembangkan bahan bakar alternatif berbasis minyak nabati sebagai pengganti minyak bumi, seperti minyak bunga matahari, biji rami,

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Silva Latisya (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan 20158, Indonesia

Email: latisyasilva@gmail.com

kacang tanah, biji kapas, *rapeseed* dan kelapa sawit. Di Indonesia, Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) mulai melakukan penelitian biodiesel pada tahun 1990-an dan mengadakan workshop internasional biodiesel berbasis minyak sawit pada tahun 2001. Dua tahun kemudian, PPKS berhasil memproduksi biodiesel berbasis minyak sawit pada skala pilot 1 ton/batch. Roadtest biodiesel sawit pertama dunia dilakukan pada 2005 dengan jarak tempuh Medan-Jakarta pp. Perkembangan biodiesel sawit Indonesia sempat vakum selama sedekade, kemudian kembali mencuat setelah terbit peraturan pemerintah Indonesia melalui mandatori B20 pada 2016. Sejak saat itu, produksi biodiesel sawit Indonesia meningkat cukup signifikan untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar diesel Indonesia. Namun sebaliknya, tren penggunaan biodiesel dunia stabil pada B5 s/d B10 sejak tahun 2005 hingga saat ini. Timeline sejarah biodiesel hingga saat ini dapat digambarkan pada Gambar 1.



- 1900 : Mesin diesel berbahan bakar minyak nabati pertama kali diperkenalkan di dunia
- 1930 : Eskplorasi minyak bumi berkembang pesat, penggunaan minyak nabati untuk mesin diesel menurun
- 1970-1980 : Penggunaan minyak nabati kembali meningkat akibat embargo minyak bumi
- 1990 : PPKS memulai penelitian biodiesel berbasis sawit di Indonesia
- 2001 : Workshop biodiesel berbasis minyak sawit diadakan oleh PPKS
- 2005 : Roadtest biodiesel sawit pertama di dunia diadakan oleh PPKS
- 2016 - Saat ini : Kebijakan Mandatori B20-B30 di Indonesia

Gambar 1. Bagan timeline sejarah perkembangan biodiesel

Biodiesel dan Minyak Sawit sebagai Bahan Baku

Menurut ASTM (American Society testing Machine) D6751, biodiesel adalah mono alkil ester asam lemak rantai panjang yang diturunkan dari minyak nabati dan minyak hewani (ASTM, 2020). Gugus mono alkil diperoleh dari alkohol seperti metanol, etanol atau alkohol lainnya. ASTM tidak mensyaratkan jenis alkohol dan sumber minyak nabati atau hewani yang digunakan, sepanjang memenuhi baku mutu biodiesel sebagai bahan bakar. Namun baku mutu biodiesel di Eropa, EN 14214 mensyaratkan gugus mono alkil hanya diperoleh dari metanol atau disebut FAME (Fatty acid Methyl Ester) dan tidak mensyaratkan sumber minyak nabati dan hewani.

Minyak sawit adalah bahan baku biodiesel yang paling berpotensi berdasarkan jumlah pasokan dan harga dibandingkan minyak nabati lain. Minyak sawit memiliki produktifitas sebesar 3,62 ton/ha/tahun, atau 5,3 kali lebih besar dibandingkan minyak *rapeseed*, 7,8 kali lebih besar dibandingkan minyak bunga matahari, 9 kali lebih besar dibandingkan minyak kedelai. Selain produktifitas tinggi, harga minyak sawit lebih murah dibandingkan minyak nabati lain, yaitu pada kisaran 1.238,57 – 1.077.78 USD/MT sejak Januari 2011 hingga Agustus 2021, oleh karena itu, minyak sawit sangat prospek menjadi bahan baku produksi biodiesel. Selain minyak sawit, minyak nabati yang paling banyak digunakan industri biodiesel adalah minyak soya dan *rapeseed*, dengan persentasi sebesar 26%, dan

16% terhadap produksi total biodiesel dunia sebanyak 41,2 juta ton.

Kelebihan Biodiesel dibandingkan Petrodiesel dan Kebijakan Biodiesel di Indonesia

Biodiesel merupakan terobosan pionir pada perkembangan *renewable energy* dunia, yang dikenal sebagai *second generation fuel*. Istilah ini muncul ketika pasokan *non-renewable energy* minyak bumi (dikenal sebagai *first generation fuel*) semakin menipis. Meskipun biodiesel termasuk salah satu jenis *biofuel*, namun biodiesel belum tergolong *greenfuel* (*third generation fuel*) karena pada proses produksinya masih menggunakan alkohol dan katalis yang bersifat *non-renewable*. Biodiesel lebih unggul dibandingkan diesel minyak bumi berdasarkan aspek lingkungan seperti biodegradabilitas, emisi NOx, emisi sulfur dan timbal, dll. Biodiesel memiliki nilai biodegradabilitas lebih besar dibandingkan petrodiesel, menghasilkan emisi NOx lebih kecil dan tidak memiliki unsur sulfur dan timbal. Dari aspek teknis, tidak ada penurunan performa mesin diesel statis pada penggunaan biodiesel. Namun, terdapat keterbatasan penggunaan biodiesel pada mesin diesel non-statis akibat sifat kimianya.

Pengembangan biodiesel di Indonesia didorong oleh Kebijakan Mandatori Biodiesel melalui Permen ESDM No. 32 Tahun 2008 tentang penyediaan, pemanfaatan, dan tata niaga bahan

bakar nabati sebagai bahan bakar alternatif. Indonesia mengembangkan industri biodiesel berbahan baku minyak kelapa sawit karena komoditas kelapa sawit memiliki potensi terbesar untuk diolah menjadi biodiesel di Indonesia. Pemerintah Indonesia melakukan perubahan ketiga atas kebijakan mandatori biodiesel melalui Permen ESDM No. 12 Tahun 2015 dengan meningkatkan kewajiban minimal pemanfaatan biodiesel sebagai campuran bahan bakar minyak menjadi 30 persen. Pemerintah Indonesia menunjukkan keseriusan dalam pengembangan industri biodiesel dengan mengeluarkan Peraturan Menteri ESDM No. 26 Tahun 2015, yaitu badan usaha bahan bakar nabati jenis biodiesel berhak memperoleh pembiayaan biodiesel dari Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS). Dana tersebut merupakan pungutan

atas ekspor komoditas perkebunan kelapa sawit dan turunannya serta iuran dari pelaku usaha perkebunan kelapa sawit sesuai dengan Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2015. Dengan berbagai kebijakan yang telah dikeluarkan tersebut, pemerintah menetapkan target produksi biodiesel pada tahun 2025 sebesar 22.41 juta kiloliter (EBTKE, 2022). Indonesia memberlakukan kebijakan target konsumsi secara wajib atau mandatori (*blending*) dalam implementasi pencampuran solar dengan biodiesel. Oleh sebab itu, produksi biodiesel yang menunjukkan tren semakin meningkat belum tentu dapat dijadikan sebagai indikator keberhasilan kebijakan mandatori biodiesel. Tingkat *blending rate* yang ditetapkan pemerintah dalam kebijakan mandatori biodiesel cukup progresif tahapan peningkatannya (Tabel 1).

Tabel 1. Mandatori Blending Rate Biodiesel di Indonesia

Tahun	Mandatory <i>Blending</i> Biodiesel (%)
2009	B-2,5
2010	B-10
2015	B-15
2016	B-20
2020	B-30

Prospek Biodiesel di Indonesia

Produksi minyak sawit Indonesia tahun 2020 mencapai 51,58 juta ton. Porsi konsumsi dalam negeri sekitar 17,37 juta ton atau sekitar 33,67%. Penggunaan minyak sawit sebagai non-pangan sebesar 51,81% (9 juta ton) terhadap konsumsi dalam negeri atau sekitar 17,45% terhadap produksi minyak sawit Indonesia, sisanya digunakan sebagai bahan pangan. Alokasi terbesar minyak sawit non-pangan (sekitar 8,35 juta ton) digunakan untuk produksi biodiesel, selain digunakan sebagai bahan baku produk oleokimia lain. Alokasi minyak sawit untuk biodiesel dibandingkan dengan minyak sawit yang di ekspor mencapai 21,13%, sedangkan dibandingkan dengan minyak sawit yang dikonsumsi di dalam negeri adalah 41,62%. Berdasarkan data Aprobi (Asosiasi Produsen Biofuel Indonesia), jumlah industri produsen biodiesel di Indonesia sekitar 29 perusahaan yang

tersebar di Sumatera, Jawa dan Kalimantan dengan total kapasitas terpasang 12 juta kilo liter. Total realisasi utilitas kapasitas diprediksi sekitar 34%.

Berdasarkan data ESDM tahun 2019, implementasi B20 pada tahun 2018 mampu menghemat impor diesel minyak bumi senilai 26,27 triliun rupiah (EBTKE, 2020). Implementasi campuran biodiesel lebih tinggi, misal B50 pada tahun 2024 (maksimum rencana implementasi biodiesel), dapat menghemat impor diesel minyak bumi senilai 97 triliun rupiah. Proyeksi ini belum mempertimbangkan kenaikan pemakaian kendaraan diesel di Indonesia. Prospek pasar dalam negeri yang cukup besar menyebabkan beberapa industri biodiesel eksisting meningkatkan kapasitas produksi. Namun demikian, berdasarkan perhitungan realisasi produksi biodiesel sesuai kebijakan mandatori biodiesel Indonesia hingga tahun 2013 masih jauh dari target yang ditetapkan pemerintah dengan tingkat *blending rate* 4.40 persen,

sementara target yang ditetapkan 10 persen (Sipayung & Purba 2015). Realisasi yang jauh dari target tersebut terkendala beberapa hal yang menjadi penghambat pengembangan biodiesel diantaranya biaya produksi yang tinggi dan tidak tersedianya pasar biodiesel karena hanya Pertamina yang bertindak sebagai konsumen utama (Rambe, Kusnadi, & Suharno, 2019).

Di sisi lain, tantangan industri biodiesel adalah harga bahan baku minyak sawit mentah (CPO) yang berfluktuasi lebih tinggi dibandingkan dengan minyak bumi. Biaya bahan baku berkontribusi hampir 80% dari total biaya produksi biodiesel (Lam, Jamalluddin, & Lee, 2019; Lam, Tan, Lee, & Mohamed, 2009). Biaya produksi biodiesel minyak sawit adalah 0,85 USD/L (Indrawan et al., 2017) sedangkan biaya produksi petrodiesel hanya berkisar 0,42 USD/L hingga 0,58 USD/L (IEA, 2020). Harga diesel minyak bumi mengalami fluktuasi yang lebih rendah dibandingkan fluktuasi harga CPO, sedangkan harga jual campuran petrodiesel dan biodiesel (B20 atau B30) konstan pada kurun waktu tertentu.

Perkembangan Produksi Biodiesel di Dunia

Untuk memenuhi permintaan biofuel yang terus meningkat terutama dari sektor transportasi baik darat (terutama alat berat) dan penerbangan, disamping industri biodiesel FAME yang sudah *existing*, industri biofuel saat ini sedang meningkatkan investasi untuk riset dan pengembangan fasilitas yang dapat mengubah biomassa seperti limbah, residu, dan minyak nabati murni menjadi *hydrogenated vegetable oil* melalui proses *hydroprocessing of esters and fatty acid* (HVO/HEFA) (Rianawati et al., 2021). Jika semua pabrik HVO/HEFA yang sedang dibangun atau direncanakan pada tahun 2019 beroperasi, kapasitas produksi global akan meningkat tiga kali lipat menjadi lebih dari 22 miliar liter per tahun (Renewables 2020 Global Status Report). Melalui jalur produksi HVO/HEFA ini dapat dihasilkan berbagai bahan bakar berbasis minyak nabati dengan karakteristik menyerupai bahan bakar konvensional dari fosil mulai dari bio-avtur hingga biodiesel (biodiesel dari proses ini sering disebut dengan *green diesel*).

Proses HEFA terdiri dari dua tahap reaktor katalitik dan membutuhkan hidrogen sebagai bahan baku tambahan. Pada tahap pertama, bahan baku minyak

diumpangkan ke reaktor hidrødeoksigenasi untuk penghilangan oksigen yang akan menghasilkan hidrokarbon rantai linier dengan titik beku tinggi seperti propana. Produk antara tersebut kemudian diumpangkan ke reaktor isomerisasi/ *hidrocracking* di mana hidrokarbon rantai panjang dipecah dan diisomerisasi untuk menghasilkan hidrokarbon kisaran bahan bakar yang diinginkan (misalnya avtur atau diesel) dengan titik beku yang sesuai untuk pencampuran. Produk dari reaksi ini antara lain nafta, bahan bakar bio-avtur, *green diesel* dan gas produk yang mengandung hidrokarbon ringan seperti propana, yang dapat dipisahkan menggunakan distilasi kolom (Martinez-Hernandez et al., 2019). Produk biofuel hasil proses ini memiliki karakteristik yang sangat mirip dengan bahan bakar konvensional dari fosil serta dapat diaplikasikan langsung ke mesin tanpa *blending*. Perbedaan utama dari kedua bahan bakar ini terletak pada bahan baku yang merupakan trigliserida minyak nabati yang telah dihidrødeoksigenasi. Salah satu kendala utama pemanfaatan teknologi HVO/HEFA yaitu masih sedikitnya informasi terbuka mengenai detail proses penggunaan berbagai *feedstock oil* seperti minyak sawit. Selain itu, dibutuhkan kajian tekno ekonomi mengenai konfigurasi proses produksi menggunakan teknologi ini sehingga dapat diaplikasikan di industri (Martinez-Hernandez et al., 2019).

Limbah pengolahan kelapa sawit juga telah dipelajari dan dikaji secara luas di negara-negara ASEAN seperti Indonesia dan Malaysia, karena jumlah yang melimpah. Sejumlah besar limbah terbungkalai yang menimbulkan risiko terhadap lingkungan ini dapat dimaksimalkan sebagai biomassa untuk produksi biofuel. Di Indonesia diproduksi 37,8 juta ton TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) dan 91,2 juta ton POME (*Palm Oil Mill Effluent*) pada tahun 2020 dan jumlahnya diprediksi akan meningkat menjadi 53,9 juta ton TKKS dan 130 juta ton POME pada tahun 2030 (Hambali & Rivai, 2017). Studi lain menunjukkan bahwa total 34 juta ton residu yang tersedia per tahun di Indonesia dapat diubah menjadi sekitar 7,4 juta ton diesel terbarukan per tahun. Biofuel yang dibuat dari residu yang tersedia secara berkelanjutan dapat menggantikan sekitar 15% dari permintaan bioenergi tahunan (Paltseva et al., 2016).

BIODIESEL SAWIT

Syarat bahan baku biodiesel

Industri produksi biodiesel menggunakan bahan baku minyak nabati sesuai dengan letak geografis dan iklim pangsa pasar. Industri dan pangsa pasar biodiesel Eropa menggunakan minyak bunga matahari dan *rapeseed* sebagai bahan baku. Berbeda dengan Eropa, benua Amerika yang menggunakan minyak kedelai karena produksinya yang besar dan bungkil kedelai yang dibutuhkan oleh industri peternakan. Negara-negara Asia umumnya menghasilkan biodiesel dari minyak sawit.

Biodiesel dapat diproduksi dari bahan baku minyak sawit mentah (CPO) maupun produk

rafinasinya yaitu RBDPO (*Refined, Bleached, Deodorized Palm Oil*), RBD Palm Olein, RBD Palm Stearin. Setiap jenis bahan baku tersebut memiliki nilai asam lemak bebas (ALB) yang berbeda (Tabel 2). ALB adalah faktor pembatas produksi biodiesel, dimana nilai ALB yang tinggi akan menurunkan rendemen produksi biodiesel. Industri biodiesel umumnya menggunakan RBDPO sebagai bahan baku dengan pertimbangan ALB yang lebih rendah dibandingkan CPO dan harga lebih rendah dibandingkan RBD Palm Stearin atau RBD Palm Olein.

Tabel 2. Kandungan Asam Lemak Bebas (ALB) Minyak Sawit

No.	Jenis Minyak Sawit	ALB (%)
1	CPO	1,26-7,00
2	RBDPO	0,03-0,08
3	RBD Palm Olein	0,02-0,07
4	RBD Palm Stearin	0,03-0,09

Sumber : Hasibuan, 2012

Zhang et al., (2003) menyatakan bahwa produksi biodiesel dapat dilakukan dengan menggunakan minyak goreng bekas, jelantah, minyak *non edible*, dan lemak hewani. Dalam kasus produksi biodiesel skala industri, terdapat kebutuhan akan *feedstock* berbiaya rendah seperti *crude oil*, minyak goreng bekas, jelantah, dan minyak *non edible*. Penggunaan *feedstock* berbiaya rendah untuk produksi biodiesel dapat menurunkan selisih harga biodiesel dengan petrodiesel sekaligus meminimalkan persaingan antara permintaan minyak nabati yang edible dan kebutuhan akan biofuel (Zhang et al., 2003).

Mutu Biodiesel

Biodiesel berbasis minyak sawit memiliki karakteristik bahan bakar yang mirip dengan petrodiesel seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Selain itu, beberapa pengujian yang telah dilakukan terhadap biodiesel berbasis sawit menyatakan biodiesel sawit memenuhi parameter-parameter standar nasional (SNI 7182:2015) dan internasional spesifikasi biodiesel seperti EN 14214 dan ASTM D6751.

PRODUKSI BODIESEL

Perkembangan Teknologi Produksi Biodiesel

Terdapat beberapa alternatif teknologi proses untuk produksi biodiesel. Salah satunya yaitu mikroemulsi, yakni dispersi termal stabil dari cairan tak bercampur yang distabilkan menggunakan surfaktan atau kosurfaktan untuk produksi biodiesel (Monisha et al., 2014; Adepoju et al., 2018; Gebremariam & Marchetti, 2017). Namun, produk yang dihasilkan menggunakan metode ini cenderung menghasilkan karbon lebih tinggi dan endapan pada ujung injektor, katup masuk dan bagian atas silinder selama penggunaan di mesin karena viskositas yang lebih tinggi, volatilitas yang lebih rendah dan reaktivitas karakteristik rantai hidrokarbon tak jenuh (Liaquat et al., 2013; Liaquat et al., 2014). Kondisi ini pada akhirnya dapat menyebabkan terjepitnya jarum injeksi dan pembakaran yang tidak sempurna (Abed et al., 2019; Tziourtzioumis & Stamatelos, 2019). Teknologi proses biodiesel lainnya yaitu *thermal cracking* atau pirolisis, yakni proses konversi yang melibatkan pemanasan dalam ketiadaan oksigen atau dengan penggunaan katalis (Abbaszaadeh et al., 2012; Ishola et al., 2020; Tambun et al., 2017). Sulit untuk

mengontrol produk utama pirolisis karena prosesnya bergantung pada kondisi eksperimental seperti waktu tinggal, panas, suhu reaksi, dan laju pemanasan (Girish, 2018). Fenomena ini dapat menyebabkan

terbentuknya senyawa kimia yang tidak diinginkan seperti belerang, air dan residu yang dapat menyebabkan korosi pada mesin (Jambulingam et al., 2019).

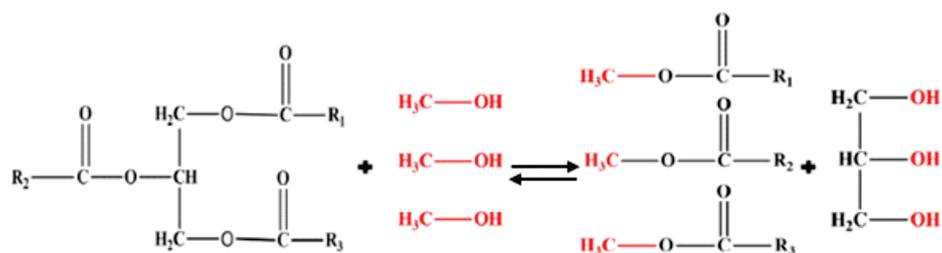
Tabel 3. Karakteristik biodiesel sawit dibandingkan dengan petro diesel dan standar

No	Parameter	Petro diesel	Biodiesel sawit (referensi)	SNI 7182:2015	ASTM D6751	EN 14214	Satuan, Min/Max
1	Massa jenis pada 15°C	853	855,3 (Paryanto, Prakoso, & Gozan, 2019)	850-890	-	860-890	Kg/m ³
2	Viskositas kinematik pada 40°C	4	4,10 (Zuleta, Rios, & Benjumea, 2012)	2,3-6,0	1,9-6,0	3,5-5,0	mm ² s (cSt)
3	Angka Setana	-	58,3 (Lam et al., 2019)	51	47	51	Min
4	Titik nyala	98	182 (Lam et al., 2019)	130	130	120	°C, min
5	Korosi lempeng tembaga	-	1a (Lam et al., 2019)	1	3	1	(3 jam pada 50°C)
6	Residu karbon	0,14	0,02 (Lam et al., 2019)	0,05	0,05	0,3	%-massa, maks
7	Abu tersulfatkan	0,1	<0,001 (Lam et al., 2019)	0,02	0,05	0,3	%-massa, maks
8	Angka asam	-	0,28 (Zuleta et al., 2012)	0,4	0,8	0,5	mg-KOH/g, maks
9	Gliserol bebas	-	0,006 (Paryanto et al., 2019)	0,02	0,02	0,02	%-massa, maks
10	Gliserol total	-	0,128(Paryanto et al., 2019)	0,24	0,24	0,25	%-massa, maks
11	Kadar metil ester	-	98,7 (Paryanto et al., 2019)	96,5	-	96,5	%-massa, min
12	Monogliserida	-	0,179 (Paryanto et al., 2019)	0,55	-	-	%-massa, maks

Transesterifikasi dan Esterifikasi

Biodiesel atau *fatty acid methyl ester* (FAME) secara umum diproduksi menggunakan reaksi transesterifikasi antara trigliserida (senyawa utama dalam minyak nabati) dan alkohol (methanol atau etanol). Reaksi transesterifikasi ini secara alami

merupakan reaksi *reversible* dan dapat berjalan dengan atau tanpa katalis (Sharma et al., 2018). Reaksi ini juga dapat disebut sebagai alkoholisis karena melibatkan penukaran alkil rantai karbon (-R) dari ester trigliserida dengan alkil rantai karbon dari alkohol (Gambar 1).



Gambar 2. Mekanisme reaksi transesterifikasi (metanolisis) biodiesel

Trigliserida bereaksi dengan 3 molekul methanol sehingga menghasilkan 3 molekul fatty acid methyl ester (FAME). Selain itu, reaksi ini juga menghasilkan sebuah molekul gliserol. Hal inilah yang menyebabkan reaksi transesterifikasi dengan methanol lebih umum dilakukan pada skala komersial. Hasil samping berupa gliserol ini memiliki nilai sehingga dapat meningkatkan nilai produk dari reaksi yang berlangsung.

katalis mudah di pasaran, dan mampu mempercepat transesterifikasi secara efektif dengan kondisi reaksi ringan. Selain itu, transesterifikasi dengan katalis basa 4000 kali lebih cepat dibandingkan dengan katalis asam (Kulkarni & Dalai, 2006). NaOH dan KOH tersedia dalam bentuk pelet tetapi sangat larut dalam alkohol. Oleh karena itu, katalis ini biasanya dicampur dengan alkohol sebelum reaksi transesterifikasi berlangsung.

Katalis dalam Produksi Biodiesel

Katalis Homogen

Produksi biodiesel umumnya melalui jalur transesterifikasi berbasis reaksi katalitik menggunakan katalis homogen basa, karena biaya rendah dan reaktivitas tinggi. Tetapi proses tersebut dapat menimbulkan permasalahan terhadap efisiensi energi dan penggunaan air pencucian dalam pemisahan katalis dari campuran maupun pemurnian dari produk samping hasil reaksi (Dalai et al., 2012). Katalis homogen berdasarkan karakteristiknya dapat dikategorikan menjadi katalis homogen basa dan katalis homogen asam.

A. Katalis Homogen Basa

Katalis basa seperti natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH) adalah katalis yang umum digunakan di industri dalam memproduksi biodiesel. Hal tersebut karena penggunaan katalis basa membutuhkan biaya yang relatif rendah dibandingkan dengan katalis heterogen, ketersediaan

Katalis basa homogen memiliki kelemahan yakni sensitivitasnya yang tinggi terhadap kandungan asam lemak bebas (ALB) dalam minyak. Kandungan ALB dalam minyak perlu dijaga serendah mungkin (0,5%–1%) untuk mencegah terjadinya reaksi saponifikasi. Pembentukan sabun yang berlebihan menghambat pemisahan fase biodiesel-gliserol dan dengan demikian akan mengurangi hasil biodiesel secara drastis. Umumnya, RBDPO digunakan untuk memproduksi biodiesel karena kandungan ALB yang rendah (0,1%–0,5%) dan meminimalkan dampak reaksi saponifikasi.

Darnoko & Cheryan (2000) mempelajari reaksi transesterifikasi RBDPO dengan metanol yang dikatalisis oleh KOH. Hasil yang diperoleh cukup tinggi (90%) namun karena serangkaian proses pemurnian diperlukan untuk mengubah CPO menjadi RBDPO, tambahan biaya pemrosesan telah meningkatkan keseluruhan biaya produksi biodiesel sawit dan menghasilkan proses yang kurang layak secara ekonomi. Penggantian bahan menjadi CPO yang harganya lebih rendah dari RBDPO memiliki

kelemahan yakni kandungan ALB yang tinggi berkisar antara 3% sampai 6,5% (Che Man et al., 1999). Perlu dilakukan penurunan kandungan ALB pada CPO yakni dengan tahapan reaksi esterifikasi sebelum reaksi transesterifikasi dengan katalis basa berlangsung.

B. Katalis Homogen Asam

Katalis homogen asam lebih sesuai untuk bahan baku yang mengandung ALB tinggi dalam produksi biodiesel. Asam sulfat (H_2SO_4) dan asam klorida (HCl) merupakan katalis yang paling umum digunakan karena sifat asam yang kuat dan biaya rendah. Namun demikian, dilaporkan bahwa H_2SO_4 dapat memiliki kinerja yang lebih baik daripada HCl dalam transesterifikasi minyak goreng sawit bekas (Al-Widyan & Al-Shyoukh, 2002). Katalis asam mampu melakukan esterifikasi dan transesterifikasi secara bersamaan. Esterifikasi terjadi ketika ALB bereaksi dengan alkohol dengan adanya katalis asam untuk menghasilkan produk reaksi berupa ester. Namun, diperlukan rasio molar alkohol terhadap minyak yang tinggi untuk mempercepat transesterifikasi menggunakan katalis asam. Selain itu, penggunaan katalis homogen asam menimbulkan beberapa kelemahan, seperti sifat asam yang kuat menyebabkan korosi serius pada dinding reaktor, pipa, dan katup, laju reaksi lambat, dan kesulitan dalam pemisahan katalis.

Katalis Heterogen

Selain katalis homogen, produksi biodiesel dapat dilakukan dengan bantuan katalis heterogen (Dalai et al., 2012). Pemanfaatan katalis heterogen dalam produksi biodiesel menjadi perhatian pada beberapa tahun terakhir karena sifatnya yang lebih ramah lingkungan, lebih stabil, serta proses pemisahan katalis dan pemurnian campuran reaksi proses yang lebih mudah dibandingkan dengan katalis homogen. Pengembangan katalis heterogen dalam proses produksi biodiesel dapat memberikan perbaikan signifikan dalam efisiensi produksi dengan mengurangi kebutuhan energi pada proses pemurnian, memungkinkan untuk menerapkan proses yang kontinyu sekaligus meningkatkan kualitas dari hasil samping gliserol sehingga dapat meningkatkan nilai keseluruhan produk. Produk hasil samping gliserol memiliki potensi nilai signifikan untuk

diaplikasikan pada industri farmasetikal dan kosmetik.

Berdasarkan sumbernya, katalis heterogen dapat diklasifikasikan menjadi katalis yang bersumber dari batuan alam seperti CaO atau logam oksida lain dan bio katalis atau enzim. Enzim merupakan katalis dengan reaktivitas tinggi dalam reaksi kimia, tidak menyebabkan permasalahan pada pemurnian, pencucian, saponifikasi (pembentukan sabun), dan netralisasi pada transesterifikasi. Namun demikian, tingginya harga, keterbatasan kondisi penggunaan, dan deaktivasi menyebabkan enzim kurang umum penggunaannya pada skala industri. Apabila dibandingkan dengan rendemen FAME yang dihasilkan menggunakan katalis homogen, jumlah katalis heterogen dan rasio methanol:minyak yang dibutuhkan menjadi lebih lebih besar, suhu lebih tinggi, dan waktu reaksi yang lebih lama (Athar & Zaidi, 2020).

Teknologi Proses Biodiesel Berbasis Minyak Sawit

Di antara teknologi proses yang ada, transesterifikasi menjadi pilihan yang paling umum digunakan dalam proses produksi biodiesel karena kesederhanaan proses dan ester asam lemak yang diperoleh melalui proses ini memiliki karakteristik yang mirip dengan petrodiesel (Kapadia et al., 2019). Minyak sawit dan turunannya telah terbukti dapat dan baik digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel. Beberapa teknologi proses produksi biodiesel berbasis minyak sawit yang berkembang hingga saat ini telah dirangkum dalam Tabel 4.

Tantangan Global Biodiesel

Biodiesel memiliki prospek yang baik kedepan di dunia, namun demikian saat ini biodiesel masih sulit berkembang. Beberapa aspek teknis yang menjadi tantangan penggunaan biodiesel dari negara-negara Asia seperti Indonesia di pasar global antara lain harga dan rantai pasok *feedstock*, dampak terhadap mesin, serta emisi Nox (Syafiuddin et al., 2020). Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, biaya bahan baku atau *feedstock cost* menyumbang porsi yang cukup besar pada biaya produksi biodiesel sawit sehingga mengurangi daya saing biodiesel. Selain itu, kondisi geografis tertentu dibutuhkan untuk menghasilkan tanaman sawit penghasil minyak nabati sebagai *feedstock* untuk biodiesel, sehingga industri biodiesel

sawit sangat rentan apabila terjadi gangguan pasokan pada negara-negara penghasil sawit yang terbatas.

Tabel 4. Teknologi proses biodiesel berbasis minyak kelapa sawit

Referensi	Jenis Feedstock	Katalis	Yield (%)	Kandungan ester (%)
(Alkabbashi, Alam, Mirghani, & Al-Fusaiei, 2009)	CPO	1,4% KOH	-	93,6
(Darnoko & Cheryan, 2000)	RBDPO	1% KOH	-	90,0
(Cukalovic et al., 2013)	CPO	1% KOH; 26% (dari ALB) H ₂ SO ₄	93	97,0
(Hayyan, Hashim, Hayyan, & Qing, 2014)	CPO	1% HClO ₄	-	88,0
(Theam, Islam, Choo, & Taufiq-Yap, 2015)	RBDPS	1% nanopartikel Ca(CH ₃ O) ₂	-	94,7
(Suwanno et al., 2017)	Minyak Residu dari POME	36 U Crude Lipase (dari buah sawit) /10 g minyak	-	92,7
(Roschat, Phewphong, Khunchalee, & Moonsin, 2018)	Minyak Olein Sawit	5% SrO	-	98,2
(Gupta & Rathod, 2019)	PFAD	1,25% H ₂ SO ₄ ; Radiasi Matahari	-	96,81
(Kefas, Yunus, Rashid, & Taufiq-Yap, 2019)	PFAD	2,5% <i>modified sulfonated glucose</i>	-	97,1
(Muanrukxa & Kaewkannetra, 2020)	Sludge minyak sawit	2% Lipase powder (<i>immobilized</i>)	-	91,3
(Sangar et al., 2019)	PFAD	5% SCG (<i>sulphonated carbon derived glycerol</i>)	-	97,8
(dos Santos, Hatanaka, de Oliveira, & Flumignan, 2019)	CPO	Air (hidrolisis subkritis); 1% H ₂ SO ₄	-	99,2
(Shuit & Tan, 2019)	PFAD	3% <i>sulfonated multi-walled carbon nanotubes (s-MWCNTs)</i>	-	94,8
(Somnuk, Soysuwan, & Prateepchaikul, 2019)	PFAD	13,5% H ₂ SO ₄	86,4	99,96

(continued)

Referensi	Jenis Feedstock	Katalis	Yield (%)	Kandungan ester (%)
(Azan et al., 2020)	Minyak limbah (campuran CPO dan RPDPO)	0,08% CaO/Ni (cangkang telur)	-	90,35
(Ayoola et al., 2020)	CPKO	0,7-1,7% KOH ; NaOH	-	87-99
(Ishola et al., 2020)	RBDP Olein	1,5 % KOH	62,5	
(Wong et al., 2020)	Asam Oleat	10% karbon aktif (tandan kosong sawit)	-	50,5
(Abdullah et al., 2021)	Minyak goreng bekas	4 wt% of PKSHAC- K_2CO_3 (20%), CuO (5%) (nano katalis bifungsional dari cangkang sawit)	82,5	95,36
(Al-Aseebee, Rashid, & Samir Naje, 2021)	RBDPS	1% KOH	-	
(Ejeromedoghene, 2021)	PKO	CH_3COOH	-	98

Kemudian aspek mutu biodiesel yang cenderung memiliki viskositas lebih tinggi dibandingkan petrodiesel sehingga dapat menimbulkan permasalahan terhadap mesin (Hoekman et al 2012). Permasalahan yang ditimbulkan antara lain menurunnya kualitas atomisasi dan menyebabkan laju pelepasan panas menjadi rendah sehingga mesin boros bahan bakar jika dibandingkan dengan petrodiesel (Mohanad et al 2017; Atabani et al 2012). Permasalahan teknis lain terkait biodiesel sawit yakni kontaminan seperti monogliserida jenuh (SMG) yang dapat mengendap pada kondisi suhu rendah dan menyebabkan penyumbatan filter bahan bakar serta emisi NOx yang dihasilkan dari pembakaran.

Selain itu, tantangan biodiesel sawit yakni isu sosio-ekonomi, dilema pangan vs energi, dan isu lingkungan (Rianawati et al., 2021). Masih terdapat banyak perbaikan yang perlu dilakukan pada sisi hulu kelapa sawit Indonesia yang dapat berdampak terhadap industri hilir biodiesel. Permasalahan terkait kesejahteraan petani dapat memberikan pengaruh signifikan pada kualitas dan kuantitas minyak yang dihasilkan dari perkebunan sawit. Kemudian dilema

antara pemanfaatan minyak sawit sebagai kebutuhan pangan dan bahan baku biodiesel (sektor energi) juga menjadi isu penting saat ini. Tidak kalah penting, isu lingkungan yang diangkat oleh *non government organization* (NGO) mengenai dampak perkebunan sawit sendiri menjadi sumber *black campaign* yang menghambat pasar dunia untuk menerima biodiesel sawit.

PENUTUP

Minyak sawit merupakan bahan baku biodiesel yang termasuk dalam golongan energi terbarukan yang sangat menjanjikan. Terbukti dari fakta bahwa minyak sawit merupakan sumber bahan baku biodiesel paling mendominasi di dunia karena produktivitas yang tinggi. Biodiesel berbasis sawit sesuai untuk diaplikasikan ke mesin diesel karena memiliki karakteristik serupa dengan petrodiesel dan sesuai dengan standar SNI 7182:2015, ASTM D6751, dan EN 14214. Biodiesel lebih unggul dibanding petrodiesel karena bersifat *biodegradable* dan ramah lingkungan. Tingginya harga bahan baku (*feedstock*

oil) yaitu minyak sawit rafinasi atau *refined bleached deodorized palm oil* (RBDPO) menjadi isu penting karena menjadi kendala aplikasi biodiesel sebagai bahan bakar. Biodiesel sawit memiliki prospek kedepan yang baik karena selain permintaan yang akan terus meningkat, pemerintah Indonesia terus memberikan dukungan melalui berbagai kebijakan teknis maupun mekanisme finansial. Biodiesel umumnya diproduksi melalui proses transesterifikasi maupun esterifikasi bergantung pada kandungan asam lemak bebas (ALB) dalam minyak. Proses produksi biodiesel dilakukan dengan bantuan katalis baik katalis homogen ataupun heterogen. Salah satu perkembangan biodiesel saat ini yaitu produk *green diesel* yang memiliki karakteristik serupa petrodiesel yang diproduksi melalui proses HEFA dan pengembangan bahan baku limbah kelapa sawit (POME dan TKKS) untuk memenuhi kebutuhan biodiesel yang terus meningkat. Biodiesel berbasis sawit masih memiliki berbagai isu baik teknis maupun non teknis yang harus diselesaikan untuk menghadapi tantangan di pasar global.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaszaadeh, A., Ghobadian, B., Omidkhah, M. R., & Najafi, G. (2012). Current biodiesel production technologies: A comparative review. *Energy Conversion and Management*, 63, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.027>
- Abdullah, R. F., Rashid, U., Ibrahim, M. L., Hazmi, B., Alharthi, F. A., & Nehdi, I. A. (2021). Bifunctional nano-catalyst produced from palm kernel shell via hydrothermal-assisted carbonization for biodiesel production from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137(November 2020), 110638. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110638>
- Abed, K. A., Gad, M. S., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., & Elyazeed, S. A. (2019). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(2), 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.03.001>
- Adepoju, T. F., Rasheed, B., Olatunji, O. M., Ibeh, M. A., Ademiluyi, F. T., & Olatunbosun, B. E. (2018). Modeling and optimization of lucky nut biodiesel production from lucky nut seed by pearl spar catalysed transesterification. *Heliyon*, 4(9), e00798. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00798>
- Al-Aseebee, M. D. F., Rashid, A. H., & Samir Naje, A. (2021). Ecofriendly enhancement of engine performance using biofuel palm stearin. *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.558>
- Al-Widyan, M. I., & Al-Shyoukh, A. O. (2002). Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. *Bioresource Technology*, 85(3), 253–256. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00135-9)
- Alkabbashi, A. N., Alam, M. Z., Mirghani, M. E. S., & Al-Fusaiel, A. M. A. (2009). Biodiesel production from Crude Palm Oil by transesterification process. *Journal of Applied Sciences*, 9(17), 3166–3170. <https://doi.org/10.3923/jas.2009.3166.3170>
- ASTM. (2020). Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels. In *ASTM D6751-15c Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels: Vol. i* (pp. 1–11). West Conshohocken: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6751-20A>
- Athar, M., & Zaidi, S. (2020). A review of the feedstocks, catalysts, and intensification techniques for sustainable biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104523. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104523>
- Ayoola, A. A., Hymore, F. K., Omonhinmin, C. A., Babalola, P. O., Fayomi, O. S. I., Olawole, O. C., ... Babalola, A. (2020). Response surface methodology and artificial neural network analysis of crude palm kernel oil biodiesel production. *Chemical Data Collections*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2020.100478>
- Azan, M. N. I. N., Kamal, P. N. S. M. M., Rasmadi, M. A. A., Adzhar, M. H., Zakaria, M. A., Taufek, A.

- S. A., ... Alikasturi, A. S. (2020). Production of biodiesel from palm oil refinery pilot plant waste using Ni/CaO (ES) catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 31, 292–299.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.012>
- Che Man, Y. B., Moh, M. H., & Van De Voort, F. R. (1999). Determination of free fatty acids in crude palm oil and refined-bleached-deodorized palm olein using Fourier transform infrared spectroscopy. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(4), 485–490. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0029-z>
- Cukalovic, A., Monbaliu, J. C. M., Eeckhout, Y., Echim, C., Verhé, R., Heynderickx, G., & Stevens, C. V. (2013). Development, optimization and scale-up of biodiesel production from crude palm oil and effective use in developing countries. *Biomass and Bioenergy*, 56(0), 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.015>
- Dalai, A. K., Issariyakul, T., & Baroi, C. (2012). Biodiesel production using homogeneous and heterogeneous catalysts: A review. In L. Guzzi & A. Erdohelyi (Eds.), *Catalysis for Alternative Energy Generation* (Vol. 9781461403). New: Springer International Publishing and Capital Publishing Company. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0344-9_6
- Darnoko, D., & Cheryan, M. (2000). Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(12), 1263–1267.
<https://doi.org/10.1007/s11746-000-0198-y>
- dos Santos, L. K., Hatanaka, R. R., de Oliveira, J. E., & Flumignan, D. L. (2019). Production of biodiesel from crude palm oil by a sequential hydrolysis/esterification process using subcritical water. *Renewable Energy*, 130, 633–640.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.102>
- EBTKE. (2020). Pemerintah Serious Capai Target Pemanfaatan Biofuel, Dampaknya Luar Biasa. Retrieved from [Etbke.Esdm.Go.Id website: https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/02/07/2470/pemerintah.serious.capai.target.pemanfaatan.biofuel.dampaknya.luar.biasa](https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/02/07/2470/pemerintah.serious.capai.target.pemanfaatan.biofuel.dampaknya.luar.biasa)
- EBTKE. (2022). Strategi Pemerintah Wujudkan Pemanfaatan Biofuel Yang Berkelanjutan. Retrieved from [Https://Ebtke.Esdm.Go.Id/](https://Ebtke.Esdm.Go.Id/) website: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2022/02/15/3085/strategi.pemerintah.wujudkan.pemanfaatan.biofuel.yang.berkelanjutan>
- Ejeromedoghene, O. (2021). Acid-catalyzed transesterification of Palm Kernel Oil (PKO) to biodiesel. *Materials Today: Proceedings*, (xxxx).
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.042>
- Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405–416. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80288-7](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80288-7)
- Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2017). Biodiesel production technologies: Review. In *AIMS Energy* (Vol. 5).
<https://doi.org/10.3934/energy.2017.3.425>
- Girish, C. R. (2018). Review of various feedstocks used and the operating conditions for biodiesel production. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8(4), 357–370. <https://doi.org/10.24247/ijmperdaug201838>
- Gupta, A. R., & Rathod, V. K. (2019). Solar radiation as a renewable energy source for the biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. *Energy*, 182, 795–801. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.189>
- Hambali, E., & Rivai, M. (2017). The Potential of Palm Oil Waste Biomass in Indonesia in 2020 and 2030. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012050>
- Hasibuan, H. A. (2012). Kajian Mutu Dan Karakteristik Minyak Sawit Indonesia Serta Produk Fraksinasinya. *Jurnal Standardisasi*, 14(1), 13–21. <https://doi.org/10.31153/js.v14i1.51>
- Hayyan, A., Hashim, M. A., Hayyan, M., & Qing, K. G. (2014). Biodiesel production from acidic crude palm oil using perchloric acid. *Energy Procedia*, 61, 2745–2749.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.295>

- Indrawan, N., Thapa, S., Rahman, S. F., Park, J. H., Park, S. H., Wijaya, M. E., ... Park, D. H. (2017). Palm biodiesel prospect in the Indonesian power sector. *Environmental Technology and Innovation*, 7, 110–127.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.01.001>
- Ishola, F., Adelekan, D., Mamudu, A., Abodunrin, T., Aworinde, A., Olatunji, O., & Akinlabi, S. (2020). Biodiesel production from palm olein: A sustainable bioresource for Nigeria. *Heliyon*, 6(4), e03725.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03725>
- Jambulingam, R., Srinivasan, G. R., Shankar, V., Munir, M., Saeed, M., Palani, S., & Srinivasan, S. R. (2019). Beef subcutaneous fats. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(4), 1 2 0 9 – 1 2 1 8 .
<https://doi.org/10.24247/ijmperdaug2019126>
- Kapadia, H., Brahmabhatt, H., Dabhi, Y., & Chourasia, S. (2019). Investigation of emulsion and effect on emission in CI engine by using diesel and biodiesel fuel: A review. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(4), 323–337.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.06.004>
- Kefas, H. M., Yunus, R., Rashid, U., & Taufiq-Yap, Y. H. (2019). Enhanced biodiesel synthesis from palm fatty acid distillate and modified sulfonated glucose catalyst via an oscillation flow reactor system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 102993.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102993>
- Kulkarni, M. G., & Dalai, A. K. (2006). Waste cooking oil - An economical source for biodiesel: A review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(9), 2901–2913.
<https://doi.org/10.1021/ie0510526>
- Lam, M. K., Jamalluddin, N. A., & Lee, K. T. (2019). Production of biodiesel using palm oil. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels* (2nd ed.). Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00023-3>
- Lam, M. K., Tan, K. T., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2009). Malaysian palm oil: Surviving the food versus fuel dispute for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1456–1464.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.009>
- Liaquat, A. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Fazal, M. A., Khan, A. F., Fayaz, H., & Varman, M. (2013). Impact of palm biodiesel blend on injector deposit formation. *Applied Energy*, 111, 882–893.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.036>
- Liaquat, A. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., & Rizwanul Fattah, I. M. (2014). Impact of biodiesel blend on injector deposit formation. *Energy*, 72, 813–823.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.006>
- Martinez-Hernandez, E., Ramírez-Verduzco, L. F., Amezcua-Allieri, M. A., & Aburto, J. (2019). Process simulation and techno-economic analysis of bio-jet fuel and green diesel production — Minimum selling prices. *Chemical Engineering Research and Design*, 146, 60–70.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.03.042>
- Monisha, J., Harish, A., Sushma, R., Krishna, M. T. P., Blessy, B. M., & Ananda, S. (2014). *Biodiesel: A Review*. 3(January), 902–912.
- Muanruksa, P., & Kaewkannetra, P. (2020). Combination of fatty acids extraction and enzymatic esterification for biodiesel production using sludge palm oil as a low-cost substrate. *Renewable Energy*, 146, 901–906.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.027>
- Paltseva, J., Searle, S., & Malins, C. (2016). *Potential for Advanced Biofuel Production From Palm Residues in Indonesia*. (June), 4. Retrieved from http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_palm_residues_2016.pdf
- Paryanto, I., Prakoso, T., & Gozan, M. (2019). Determination of the upper limit of monoglyceride content in biodiesel for B30 implementation based on the measurement of the precipitate in a Biodiesel–Petrodiesel fuel blend (BXX). *Fuel*, 258(August), 116104.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116104>
- Rambe, K. R., Kusnadi, N., & Suharno, S. (2019). Dinamika Kebijakan Pengembangan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit Indonesia. *Jurnal*

- Sosial Ekonomi Pertanian*, 15(3), 239.
<https://doi.org/10.20956/jsep.v15i3.6578>
- Rianawati, E., Yusup, S., Fuichin, B. L., Unrean, P., Acda, M. N., Gracia, E., ... Ayu, P. M. (2021). Challenges for sustainable biofuel industry development in Indonesia and Malaysia: A policy recommendation. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, (April), 1234–1241.
<https://doi.org/10.5071/29thEUBCE2021-4BV.7.8>
- Roschat, W., Phewphong, S., Khunchalee, J., & Moonsin, P. (2018). Biodiesel production by ethanolysis of palm oil using SrO as a basic heterogeneous catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 13916–13921.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.040>
- Sangar, S. K., Syazwani, O. N., Farabi, M. S. A., Razali, S. M., Shobhana, G., Teo, S. H., & Taufiq-Yap, Y. H. (2019). Effective biodiesel synthesis from palm fatty acid distillate (PFAD) using carbon-based solid acid catalyst derived glycerol. *Renewable Energy*, 142, 658–667.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.118>
- Sharma, S., Saxena, V., Baranwal, A., Chandra, P., & Pandey, L. M. (2018). Engineered nanoporous materials mediated heterogeneous catalysts and their implications in biodiesel production. *Materials Science for Energy Technologies*, 1(1), 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.05.002>
- Shuit, S. H., & Tan, S. H. (2019). Esterification of palm fatty acid distillate with methanol via single-step pervaporation membrane reactor: A novel biodiesel production method. *Energy Conversion and Management*, 201(September), 112110.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112110>
- Somnuk, K., Soysuwan, N., & Prateepchaikul, G. (2019). Continuous process for biodiesel production from palm fatty acid distillate (PFAD) using helical static mixers as reactors. *Renewable Energy*, 130, 100–110.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.039>
- Suwanno, S., Rakkan, T., Yunu, T., Paichid, N., Kimtun, P., Prasertsan, P., & Sangkharak, K. (2017). The production of biodiesel using residual oil from palm oil mill effluent and crude lipase from oil palm fruit as an alternative substrate and catalyst. *Fuel*, 195, 82–87.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.049>
- Syafiuddin, A., Chong, J. H., Yuniarto, A., & Hadibarata, T. (2020). The current scenario and challenges of biodiesel production in Asian countries: A review. *Bioresource Technology Reports*, 12(March 2021), 100608.
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100608>
- Tambun, R., Gusti, O. N., Nasution, M. A., & Saptawaldi, R. P. (2017). Biofuel Production From Palm Olein By Catalytic Cracking Process Using Zsm-5 Catalyst. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 6(1), 50–55.
<https://doi.org/10.15294/jbat.v6i1.8733>
- Theam, K. L., Islam, A., Choo, Y. M., & Taufiq-Yap, Y. H. (2015). Biodiesel from low cost palm stearin using metal doped methoxide solid catalyst. *Industrial Crops and Products*, 76, 281–289.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.058>
- Tziourtzioumis, D. N., & Stamatelos, A. M. (2019). Diesel-injection equipment parts deterioration after prolonged use of biodiesel. *Energies*, 12(10).
<https://doi.org/10.3390/en12101953>
- Wong, W. Y., Lim, S., Pang, Y. L., Shuit, S. H., Chen, W. H., & Lee, K. T. (2020). Synthesis of renewable heterogeneous acid catalyst from oil palm empty fruit bunch for glycerol-free biodiesel production. *Science of the Total Environment*, 727, 138534.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138534>
- Zhang, Y., Dubé, M. A., McLean, D. D., & Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, 89(1), 1–16.
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00040-3)
- Zuleta, E. C., Rios, L. A., & Benjumea, P. N. (2012). Oxidative stability and cold flow behavior of palm, sacha-inchi, jatropha and castor oil biodiesel blends. *Fuel Processing Technology*, 102, 96–101.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.04.018>