



Tinjauan Ulang Produksi Biodiesel Berbahan Baku Limbah Minyak Zaitun Melalui Metode Esterifikasi Dan Transesterifikasi

Alifa Rahma Zuhri¹, Cicilia Putri Meylani², Cindy Salsabila Anjani³, Riesya Sagita Salsabilla⁴, Dessy Agustina Sari^{5*}

¹⁻⁵ Program Studi Teknik Kimia, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Jawa Barat, Indonesia

⁵ Departemen Teknik Kimia, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received Mey, 2024

Revised May, 2024

Accepted Juny, 2024

Available online July, 2024

Kata Kunci:

Asam Lemak Bebas, Biodiesel, Imobilisasi Enzim, Indeks Keasaman, Saponifikasi, Zaitun.

Keywords:

Acidity Index, Biodiesel, Enzyme Immobilization, Free Fatty Acids, Olives, Saponification.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2024 by Author. Published by Universitas PGRI ADI BUANA SURABAYA.

ABSTRAK

Tujuan dari karya ini adalah untuk menganalisis limbah minyak zaitun atau *olive pomace oil* (OPO) yang digunakan dalam memproduksi biodiesel dengan menerapkan reaksi esterifikasi dan transesterifikasi. Karena indeks keasaman (IK) OPO yang tinggi, penanganan produksi biodiesel menggunakan reaksi esterifikasi untuk mengurangi indeks tersebut. Hal ini juga bertujuan untuk mencegah tidak terjadinya reaksi saponifikasi selama reaksi transesterifikasi. Parameter esterifikasi yang sesuai ditentukan dalam beberapa menit dengan rasio molar metanol:minyak yaitu 8:1 dengan *yield* sebesar 0,75 mg KOH/g minyak IK. Minyak *pomace* adalah minyak *non-edible* dengan biaya produksi rendah dan menjadikannya sebagai sumber penting produksi biodiesel. Material ini dapat digunakan sebagai bahan baku murah untuk imobilisasi enzim. Meskipun OPO *non-edible*, bahan baku ini bernilai ekonomis untuk produksi biodiesel, tetapi jauh dari pemanfaatan untuk melakukan proses transesterifikasi dalam minyak yang tinggi asam lemak bebas. Oleh karena itu, jumlah asam lemak bebas dalam OPO harus dikurangi dengan esterifikasi asam sebagai *pretreatment*. Dengan demikian OPO dapat mengalami proses transesterifikasi untuk menjadi produk biodiesel.

ABSTRACT

This work aims to analyze waste olive oil or olive pomace oil (OPO) used in producing biodiesel by applying esterification and transesterification reactions. Due to OPO's high acidity index (IK), the handling of biodiesel production uses an esterification reaction to reduce this index. This process also aims to prevent saponification reactions from occurring during the transesterification reaction. The appropriate esterification parameters were determined in a few minutes with the molar ratio of methanol: oil which was 8:1 with a yield of 0.75 mg KOH/g IK oil. Olive oil is a non-edible oil with low production costs, making it an essential source of biodiesel production. This material can be used as a cheap raw material for enzyme immobilization. Even though OPO is non-edible, this raw material has economic value for biodiesel production. Still, it must be used to conduct transesterification in oils high in free fatty acids. Therefore, as pretreatment, the amount of free fatty acids in OPO must be reduced by acid esterification. Thus OPO can undergo a transesterification process to become a biodiesel product.

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan perkembangan industri menjadikan permintaan energi yang meningkat. Saat ini, kebutuhan energi dipenuhi oleh bahan bakar fosil yang dapat menyebabkan perubahan iklim dan pencemaran pada lingkungan makhluk hidup. Emisi gas rumah kaca (terutama karbon dioksida) menyebabkan dimulainya pencarian energi terbarukan (Ayas et al., 2019). Dalam hal ini untuk mencapai tingkat perlindungan lingkungan yang tinggi, kebijakan lingkungan mendorong penggunaan energi terbarukan seperti bahan bakar alternatif lain untuk mesin diesel dengan berbahan

*Corresponding author.

E-mail addresses: dessy.agustina8@staff.unsika.ac.id

baku minyak nabati murni, substitusi dengan diesel atau alkohol, bahkan material lain yang mendukung. Biodiesel adalah alternatif yang paling banyak diterima untuk bahan bakar karena sifat kinerja pembakaran biodiesel lebih baik dibandingkan bahan bakar fosil konvensional. Performa pembakaran biodiesel dan penanganannya bersifat lebih sederhana dibandingkan bahan bakar diesel. Hal ini disebabkan oleh titik nyala yang lebih tinggi dan menjadikan bahan bakar ini lebih mudah disimpan, diangkut, dan ditangani dibandingkan solar. Kandungan residu minyak mentah, sulfur, logam, dan hidrokarbon aromatik yang tidak dimiliki oleh biodiesel disebut sebagai bahan bakar hijau (bersih, ramah lingkungan, dan tidak beracun). Bahan bakar ini terbuat dari beberapa macam minyak nabati seperti minyak bunga matahari, minyak kapas, minyak kemiri, dan minyak zaitun [1], [2]. Biodiesel juga dapat mengurangi jumlah gas CO₂, hidrokarbon dari komponen minyak bumi konvensional, partikulat ataupun senyawa sulfur ke lingkungan atmosfer, dapat terurai di alam bebas dan menekan populasi kontributor gas rumah kaca [3].

Produksi biodiesel berbahan nabati terjangkau dan terbarukan untuk sisi biaya produksi ekonomis serta sesuai spesifikasinya untuk memproduksi biodiesel. Salah satu tanaman alternatif yang memungkinkan untuk hal tersebut adalah limbah minyak zaitun (berasal dari *Olive Pomace Oil* - OPO) sebagai bahan bakar pengganti terbarukan untuk diesel fosil. Untuk mendukung proses produksinya, peneliti mereaksikan lipid dengan alkohol primer dan basa untuk melangsungkan reaksi esterifikasi, lalu dilanjutkan ke reaksi transesterifikasi. Katalis homogen maupun heterogen dapat dilibatkan juga selama proses transesterifikasi biodiesel berlangsung. Penggunaan katalis dari bahan alam dapat menjadi ide baru dalam mengkonversi bahan baku tanaman menjadi bahan bakar seperti yang perolehan senyawa aromatik dengan memanfaatkan zeolite HZSM-5 maupun katalis alam sejenisnya [4]. Katalis heterogen memberikan peran menguntungkan dalam penggunaan kembali karena proses separasinya yang lebih sederhana. Hal ini tentu menekan jumlah produksi air limbah [5], [6]. Reaksi transesterifikasi adalah reaksi pada bagian gliserol dan triasilgliserol yang digantikan oleh alkohol lain dan digunakan untuk mengubah triasilgliserol menjadi biodiesel. Reaksi ini merupakan teknologi lama untuk mensintesis biodiesel yang berasal dari minyak hewani, nabati dan limbah.

Empat metode utama produksi dan pemanfaatan biodiesel berupa transesterifikasi, penggunaan dan pencampuran langsung, mikroemulsi, dan perengkahan termal (pirolisis). Dari keempat metode tersebut, transesterifikasi adalah proses yang paling banyak digunakan dalam produksi komersial karena prosesnya yang sederhana dan mudah dalam. Reaksi transesterifikasi dapat digambarkan sebagai reaksi kimia triasilgliserol alami dan alkohol rantai pendek dengan adanya katalis untuk menghasilkan ester monoalkil yang juga dikenal sebagai biodiesel. Metode pencampuran konvensional untuk produksi biodiesel membutuhkan waktu dan energi yang intensif karena reaksi kimia antara trigliserida dan alkohol berlangsung pada luas permukaan antarmuka. Oleh karena itu, metode mutakhir diterapkan untuk mengoptimalkan reaksi transesterifikasi [7]. Dalam artikel review ini, limbah OPO digunakan dalam produksi biodiesel yang melalui reaksi esterifikasi dan transesterifikasi.

II. METODE PENELITIAN

Penggunaan *review article* menjadi langkah pendekatan untuk memaparkan kajian terkait tinjauan ulang produksi biodiesel berbahan baku limbah minyak zaitun melalui metode esterifikasi dan transesterifikasi.

III. PEMANFAATAN MINYAK *POMACE* DAN ZAITUN

Minyak *pomace* adalah minyak *non-edible* berbiaya rendah sehingga menjadi bahan baku penting untuk produksi biodiesel. Minyak ini dapat digunakan sebagai bahan baku yang murah untuk imobilisasi enzim [8]. *Pomace* metil ester yang dicampur dengan solar dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada mesin diesel konvensional tanpa modifikasi besar [1]. Minyak *pomace*, dapat digunakan sebagai bahan baku berbiaya rendah, adalah produk sampingan industri dari proses produksi minyak zaitun, yang diperoleh dengan menekan *pulp* (bubur) zaitun tanpa perawatan kimia. Saat air ditambahkan, tiga tahap terjadi yaitu minyak, air, dan *pomace*. *Pomace* biasanya diekstrak lebih lanjut dengan heksana untuk menghasilkan minyak zaitun *pomace* [9].

Minyak *pomace* didapatkan melalui ekstraksi dari limbah *pomace* (setelah proses pengepresan mekanis bahan baku). *Pomace* dianggap berkualitas lebih rendah karena umur simpannya yang lama dan aplikasi pengeringan suhu tinggi, sehingga digunakan dalam pembuatan sabun dan proses industri. OPO merupakan produk sampingan yang sangat melimpah, produksi tahunan OPO di Spanyol pada 2005-2006 diperkirakan mencapai 56.000 ton (*Olive Oil Agency*). Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa penulis telah mengeksplorasi kemungkinan penggunaan OPO dalam produksi biodiesel dan menyimpulkan bahwa OPO dapat dianggap sebagai bahan baku potensial yang baik. Di sisi lain, masalah deteksi benzopirena dalam OPO yang ditemukan pada tahun 2001 telah sangat mengurangi konsumsi manusia. Dengan demikian, produksi biodiesel muncul sebagai alternatif komersial penting untuk OPO. Pabrik ekstraksi OPO tidak memerlukan proses pemurnian untuk OPO mentah sehingga dapat meningkatkan surplus biodiesel [10].

Pomace menghasilkan sekitar 60-90 g minyak *pomace* per 1 kg *pomace*, tergantung pada pengolahan dan jenis buah zaitun [1]. Olahan minyak zaitun dikeringkan dalam oven khusus yang dapat beroperasi pada suhu di atas 1000 °C, menghasilkan benzopirena dalam jumlah besar. Badan Internasional untuk Penelitian kanker mencantumkan benzopirena sebagai kemungkinan karsinogen bagi manusia. Untuk menghindari pembentukan benzopirena dalam mengubah minyak zaitun *pomace* menjadi minyak nabati. Prosesnya harus mengikuti vakum dan menggunakan bahan adsorpsi khusus, yang membuat ekstraksi minyak zaitun lebih mahal. Dengan perkiraan penurunan harga minyak zaitun dan pengurangan subsidi di masa depan, secara ekonomi dapat dikonversi menjadi minyak penghasil biodiesel yang potensial, yang memiliki kandungan asam oleat tinggi, dan menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam hal kualitas pengapian bahan bakar serta stabilitas bahan bakar. Meskipun banyak pemanfaatan minyak nabati untuk memproduksi biodiesel, penggunaan minyak zaitun *pomace* (juga dikenal sebagai orujo) sebagai bahan bakar [11]. Kandungan sulfur dan aromatik yang rendah merupakan keuntungan dari campuran *pomace* metil ester diesel. Selanjutnya, penggunaan minyak nabati dalam pembuatan biodiesel tidak berdampak pada ketersediaan minyak nabati [1].

Minyak zaitun memegang posisi signifikan di pasar minyak nabati dunia. Pada tahun 2014, produksi global tahunan *olive oil* (OO) primer adalah 3.050.390 ton. Produsen utama yaitu Spanyol (57% dari produksi global 1.738.600 ton/tahun) [12]. Faktanya, Spanyol mengkonsumsi sekitar 600 MT minyak nabati per tahun. Minyak ini sebagian besar (70%) digunakan untuk menggoreng. Menurut *Spanish National Statistics Institute*, sekitar 74 MT sampah OO dikumpulkan setiap tahun. Dengan adanya uap air dan hidrolisat, konsentrasi FFA (*Free Fatty Acid*) dalam limbah OPO meningkat dengan cepat [13]. Minyak zaitun adalah molekul non-polar dengan konstanta dielektrik 3,2 yang hampir transparan dalam medan listrik gelombang mikro, tetapi molekul polar dengan konstanta dielektrik yang tinggi dapat secara selektif menyerap energi gelombang mikro. Pemanasan selektif molekul polar dapat menyebabkan pembentukan domain yang cepat pada suhu yang jauh lebih tinggi daripada campuran reaksi [14].

Pengolahan Minyak *Pomace* dan Zaitun Menjadi Biodiesel Esterifikasi dengan katalis asam

OPO dengan kandungan asam lemak bebas yang tinggi digunakan sebagai bahan baku menjanjikan dalam produksi biodiesel dengan menerapkan reaksi esterifikasi dan kemudian transesterifikasi. Karena indeks keasaman OPO yang tinggi, maka reaksi esterifikasi dilakukan untuk menurunkan IK-nya agar tidak terjadi saponifikasi selama reaksi transesterifikasi. Parameter esterifikasi yang sesuai ditentukan sebagai menit, dengan perbandingan molar metanol terhadap minyak sebesar 8:1 dengan hasil 0,75 mg KOH per g minyak IK. Untuk mendapatkan biodiesel, reaksi esterifikasi dilanjutkan dengan transesterifikasi pada temperatur 65°C, selama 5 menit dengan rasio sebesar 7:1 untuk metanol terhadap minyak dengan adanya katalis KOH 1,5%. Kandungan FAME, kepadatan, titik nyala, titik awan dan titik tuang biodiesel ditemukan sebagai 98,56%, 0,886 g/cm³, 177, -10, -5 °C yang sesuai dengan EN 14214 sebagai pengaturan spesifikasi produk biodiesel berdasarkan standar Eropa [9], [10], [15].

Kadar asam bebas yang lebih dari 3% akan mempengaruhi proses transesterifikasi produksi biodiesel. Oleh karena itu, bahan yang digunakan yaitu *olive oil* karena memiliki kualitas minyak yang tinggi. Akan menjadi masalah atau tantangan tersendiri apabila kandungan asam lemak tinggi dalam proses produksi biodiesel. Saat proses transesterifikasi akan terbentuk sabun apabila asam lemak tinggi, sehingga menyebabkan berbagai kesulitan seperti pemisahan produk dan perolehan yield yang menurun. Proses produksi biodiesel dilakukan dengan dua tahap. Yang pertama menurunkan kadar asam lemak

bebas yang dilakukan dengan esterifikasi asam. Yang kedua menghasilkan biodiesel yang dilakukan dengan transesterifikasi basa [6]. Jika di dalam biodiesel masih terdapat kandungan asam lemak bebas (ALB) maka akan mengakibatkan korosi pada mesin diesel karena meningkatnya nilai asam dan melampaui standar. Esterifikasi yang dilakukan dapat menambah ester dan menghilangkan asam lemak bebas pada biodiesel.

Tujuan dari metode esterifikasi adalah mengubah ALB dari minyak menjadi ester. Pembentukan metil ester terjadi karena adanya reaksi perubahan trigliserida (reaksi lambat). Reaksi transesterifikasi trigliserida umumnya memakai katalis homogen misalnya NaOH atau NaOCH₃ dan selanjutnya menggunakan asam asetat sebagai bentuk penetralan metil ester karena adanya reaksi katalis alkohol dengan asam lemak bebas. Faktor yang mempengaruhi pada proses ini adalah jumlah ALB dan pereaksi alkohol, suhu, kandungan air dalam minyak, waktu reaksi, dan konsentrasi katalis [16]. Metode esterifikasi menggunakan katalis asam kuat, misalnya H₂SO₄ atau HCl. Perubahan trigliserida menjadi metil ester disebabkan oleh katalis tersebut, akan tetapi transesterifikasi menggunakan katalis basa lebih cepat dibandingkan dengan katalis tersebut.

Transesterifikasi

Reaksi transesterifikasi bisa disebut sebagai reaksi alkoholisis. Reaksi transesterifikasi merupakan trigliserida pada minyak yang direaksikan dengan alkohol sehingga membentuk alkil ester. Reaksi transesterifikasi menggunakan jenis alkohol mentol. Biodiesel dan gliserin dihasilkan oleh reaksi transesterifikasi [17]. Kemudian, terdapat berbagai faktor yang mempengaruhi proses transesterifikasi tergantung reaksinya. Kandungan asam lemak bebas, kadar air yang terdapat pada minyak, perbandingan konsentrasi antara pelarut (umumnya alkohol dan jenisnya) terhadap minyak maupun ragam katalis, suhu dan kinetika reaksi, kuantitas bahan ketika dicampurkan, serta keterlibatan *co-solvent* yang organik merupakan faktor-faktor tersebut. Kualitas minyak (bahan baku) mempengaruhi kualitas metil ester, komposisi yang terdapat pada asam lemak minyak, proses manufaktur dan bahan lainnya yang dapat digunakan dalam proses, dan pengukuran pasca produksi seperti kontaminan. Komponen yang tidak dapat disabunkan, alkohol, air, sabun, gliserol terikat, gliserol bebas, FFA, residu katalis adalah kontaminan tersebut. Proses esterifikasi asam lemak dengan metanol menghasilkan ester lemak yang sering disebut dengan metil ester dalam bentuk cair. Metil ester tidak mudah berubah warna dan bersifat korosif.

Salah satu aplikasi transesterifikasi yang paling berguna adalah produksi biodiesel dari minyak nabati, tetapi proses ini tidak ekonomis jika bahan yang digunakan adalah minyak nabati dengan kualitas yang dapat dimakan. Namun, melalui proses produksi minyak zaitun, sering terjadi kandungan asam lemak bebas minyak zaitun mencapai jumlah yang tidak standar yang pada dasarnya membuat minyak tidak dapat dimakan. Penyulingan minyak zaitun dengan jumlah asam lemak bebas yang tinggi rentan terhadap tingkat kehilangan penyulingan yang tinggi, dan umumnya penyulingan tersebut tidak ekonomis untuk industri makanan komersial. Oleh karena itu, penggunaan minyak nabati yang tidak dapat dikonsumsi ini direkomendasikan untuk produksi biodiesel melalui transesterifikasi. Asam lemak bebas dan kadar air merupakan parameter kunci dalam memilih jenis minyak, dan pemanfaatan minyak termakan industri sejauh ini sangat mahal. Meskipun OPO yang tidak dapat dimakan bernilai ekonomis untuk produksi biodiesel. Proses transesterifikasi hampir tidak dapat dilakukan pada minyak dengan kandungan asam lemak bebas dalam jumlah yang besar. Oleh karena itu, jumlah asam lemak bebas dalam OPO harus dikurangi dengan esterifikasi sebagai *pretreatment*, dan kemudian OPO di transesterifikasi untuk menghasilkan biodiesel [14].

Reaksi transesterifikasi minyak pomace dilakukan dengan metanol dan enzim lipase yang diimmobilisasi pada *olive pomace* (1 g) pada suhu 25 °C selama 24 jam. Rendemen metil ester asam lemak tertinggi diperoleh sebesar 93%. Lipase amobil yang diimmobilisasi pada kondisi optimum (konsentrasi enzim 5%, konsentrasi buffer 20 mM dan pH 6) digunakan untuk produksi biodiesel dengan transesterifikasi minyak pomace dan metanol. Alkohol memiliki efek penghambatan yang signifikan pada reaksi transesterifikasi. Oleh karena itu metanol ditambahkan ke minyak *pomace* [9].

Umumnya, transesterifikasi merupakan reaksi katalis basa yang 4000 kali lebih cepat dari reaksi katalis asam. Biaya produksi biodiesel merupakan salah satu konstituen primer yang dapat diturunkan dengan memilih limbah minyak sebagai sumber bahan standar. Transesterifikasi katalis basa karanja (*Pongamia pinnata*) minyak dapat membuat biodiesel menurun yang dimulai dari 96 menjadi 6,1% dengan menggunakan menaikkan konsentrasi asam lemak bebas. Jumlah FFA yang tinggi pada bahan

baku biodiesel membuatnya tidak cocok untuk transesterifikasi katalis basa pada pembentukan sabun antara FFA serta katalis basa. Sabun menurunkan reaksi dan bertindak menjadi surfaktan antara dua produk akhir yg tidak dapat bercampur (metil ester dan gliserol), sehingga dihasilkan pemisahan hilir lebih sulit serta mengakibatkan peningkatan viskositas biodiesel dan porto pemurnian. Transesterifikasi dengan minyak sawit olahan dapat menaikkan konsentrasi sabun dari 1,48 menjadi 3,21%, dan kemurnian biodiesel menurun dari 98 menjadi 85%. Selain sabun, air merupakan produk saponifikasi lainnya. Transesterifikasi dapat meningkatkan air dari 20 menjadi 80%, akibatnya biodiesel menurun kurang lebih dari 98 menjadi kurang dari 40%. Sabun berasal dari asam lemak jenuh sehingga mengakibatkan campuran reaksi sabun yang hiperbola dapat membuat gel dan membentuk massa semi padat yang sangat sulit didapatkan [13].

IV. KESIMPULAN

Esterifikasi dengan katalis asam OPO dengan kandungan asam lemak bebas yang tinggi digunakan sebagai bahan baku yang menjanjikan dalam produksi biodiesel dengan menerapkan reaksi esterifikasi dan dilanjutkan ke reaksi transesterifikasi. Proses produksi biodiesel dilakukan dengan dua tahap. Yang pertama menurunkan kadar asam lemak bebas yang dilakukan dengan esterifikasi asam, dan yang kedua menghasilkan biodiesel yang dilakukan dengan transesterifikasi basa. Salah satu aplikasi transesterifikasi yang paling berguna adalah produksi biodiesel dari minyak nabati, tetapi proses ini tidak ekonomis jika bahan yang digunakan adalah minyak nabati dengan kualitas yang dapat dikonsumsi.

REFERENCES

- [1] S. Çaynak, M. Gürü, A. Biçer, A. Keskin, and Y. İcingür, "Biodiesel production from pomace oil and improvement of its properties with synthetic manganese additive," *Fuel*, vol. 88, pp. 534–538, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.fuel.2008.09.031.
- [2] T. Mihankhah, M. Delnavaz, and N. G. Khaligh, "Application of TiO nanoparticles for eco-friendly biodiesel production from waste olive oil," *International Journal of Green Energy*, vol. 15, no. 2, pp. 69–75, Jan. 2018, doi: 10.1080/15435075.2018.1423975.
- [3] S. L. Dmytryshyn, A. K. Dalai, S. T. Chaudhari, H. K. Mishra, and M. J. Reaney, "Synthesis and characterization of vegetable oil derived esters: evaluation for their diesel additive properties," *Bioresource Technology*, vol. 92, no. 1, pp. 55–64, Mar. 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2003.07.009.
- [4] A. S. Sinaga, A. R. Zuhri, N. S. P. Rahmat, M. L. Yoshikawa, M. A. Jatnika, and D. A. Sari, "Proses konversi metanol menjadi senyawa aromatik," *TECHNOSCIENTIA*, vol. 15, no. 2, pp. 1–8, Mar. 2023, doi: 10.34151/technoscience.v15i2.4159.
- [5] G. Arzamendi, I. Campo, E. Arguiñarena, M. Sánchez, M. Montes, and L. M. Gandía, "Synthesis of biodiesel with heterogeneous NaOH/alumina catalysts: Comparison with homogeneous NaOH," *Chemical Engineering Journal*, vol. 134, pp. 123–130, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.cej.2007.03.049.
- [6] G. N. Fadhillah and D. A. Sari, "Produksi biodiesel yang berbahan baku kelapa sawit dengan melibatkan katalis homogen dan heterogen," *Pena: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, vol. 37, no. 2, pp. 87–94, 2023, doi: 10.31941/jurnalpena.v37i2.2484.
- [7] M. A. Rajaeifar, A. Akram, B. Ghobadian, S. Rafiee, R. Heijungs, and M. Tabatabaei, "Environmental impact assessment of olive pomace oil biodiesel production and consumption: A comparative lifecycle assessment," *Energy*, vol. 106, pp. 87–102, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.010.
- [8] Y. Yücel, "Optimization of biocatalytic biodiesel production from pomace oil using response surface methodology," *Fuel Processing Technology*, vol. 99, pp. 97–102, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.02.008.
- [9] Y. Yücel, "Biodiesel production from pomace oil by using lipase immobilized onto olive pomace," *Bioresource Technology*, vol. 102, pp. 3977–3980, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.12.001.
- [10] A. Lama-Muñoz, P. Álvarez-Mateos, G. Rodríguez-Gutiérrez, M. M. Durán-Barrantes, and J. Fernández-Bolaños, "Biodiesel production from olive–pomace oil of steam-treated alperujo," *Biomass and Bioenergy*, vol. 67, pp. 443–450, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.biombioe.2014.05.023.
- [11] I. López, C. E. Quintana, J. J. Ruiz, F. Cruz-Peragón, and M. P. Dorado, "Effect of the use of olive–pomace oil biodiesel/diesel fuel blends in a compression ignition engine: Preliminary exergy analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 85, pp. 227–233, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.084.
- [12] F. FOAST, "Food and agriculture organization of the united nations." Accessed: Aug. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

- [13] L. Dehghan, M.-T. Golmakani, and S. M. H. Hosseini, "Improving biodiesel yield from pre-esterified inedible olive oil using microwave-assisted transesterification method," *grasasaceites*, vol. 72, no. 3, pp. 1–10, Sep. 2021, doi: 10.3989/gya.0336201.
- [14] L. Dehghan, M.-T. Golmakani, and S. M. H. Hosseini, "Optimization of microwave-assisted accelerated transesterification of inedible olive oil for biodiesel production," *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 915–922, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.02.017.
- [15] N. Ayas, T. E. Cetin, S. Ongoren, and Z. Dincer, "Biodiesel production from olive pomace," *SGCE*, vol. 8, no. 3, pp. 320–324, 2019, doi: 10.12720/sgce.8.3.320-324.
- [16] R. Y. Naulina *et al.*, *Kimia industri*. Bandung: Penerbit Widina Media Utama, 2023. [Online]. Available: <https://repository.penerbitwidina.com/media/publications/563628-kimia-industri-64fe6020.pdf>
- [17] F. Sanchez and P. T. Vasudevan, "Enzyme catalyzed production of biodiesel From olive oil," *ABAB*, vol. 135, pp. 1–14, 2006, doi: 10.1385/ABAB:135:1:1.