

In Situ Katalitik Basa pada Proses Pembuatan Biodiesel dari Mikroalga *Nannochloropsis* sp.

Shoerya Soelarta¹, Ghusrina Prihandini^{1*}, Mariatha Martha¹,
Rusdiyana Nur Putri Salimi¹, Fitria Yulistiani¹

¹Program Studi D-III Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Jalan Geger Kalong Hilir, Bandung, Indonesia

* Email: ghusrina.prihandini@polban.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima 25 Agustus 2022
Direvisi 04 November 2022
Disetujui 30 November 2022

doi.org/10.35313/fluida.v15i2.4395

Keyword:
Cultivation
Fatty acid
Ester
Viscosity

ABSTRACT

Biodiesel is one of alternatives that substitute fossil fuels. Nannochloropsis sp. can generate lipids up to 68%, thus it has the potential raw material for biodiesel production. The objective of this study is to determine the effect of several concentration of NaOH catalyst and temperature for biodiesel production from Nannochloropsis sp. Density, viscosity, fatty acid and ester were analysed to determine characteristic of biodiesel. The method utilized in this in-situ transesterification biodiesel process by using 1% and 2% NaOH catalyst, at temperature 50°C and 60°C with atmospheric pressure. The results showed that the addition of a 2% NaOH catalyst concentration increase yield biodiesel to 71.03%, and obtained density and viscosity that close to the SNI standard were 833.75 kg/m³ and 1.3579 cSt respectively with operating conditions at 50°C and 2% NaOH. The oleic fatty acid methyl ester was detected about 68,27% as the major ester formed in biodiesel.

ABSTRAK

Kata kunci:
Asam lemak
Kultivasi
Ester
Viskositas

Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Mikroalga *Nannochloropsis* sp. merupakan biomassa yang mampu menghasilkan lipid hingga 68% dan berpotensi untuk dijadikan bahan baku pembuatan biodiesel. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi katalis NaOH dan suhu pada proses pembuatan biodiesel dari *Nannochloropsis* sp. Analisa densitas, viskositas, kandungan asam lemak dan ester yang terbentuk dilakukan untuk mengetahui karakteristik *biodiesel*. Metode yang digunakan dalam pembuatan biodiesel ini yaitu in situ transesterifikasi menggunakan katalis NaOH 1% dan 2%, pada temperatur 50°C dan 60°C pada tekanan atmosfer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi katalis NaOH 2% dapat meningkatkan *yield crude biodiesel* menjadi 71,03%, densitas dan viskositas *crude biodiesel* yang mendekati standar SNI adalah 833,75 kg/m³ dan 1,3579 cSt dengan kondisi operasi pada suhu 50°C dan konsentrasi katalis NaOH 2%. Asam oleat metil ester terdeteksi sebagai ester yang paling mendominasi pada biodiesel sebesar 68,27 %.

PENDAHULUAN

Ketahanan energi merupakan keadaan terjaminnya ketersediaan energi suatu negara dimana hampir semua sarana dan prasarana pendukung kehidupan manusia digerakkan oleh energi. Hingga saat ini, sebagian besar energi masih berasal dari bahan bakar fosil. Energi fosil merupakan

energi yang terbatas dan kurang ramah lingkungan. Proses pembakarannya menghasilkan efek yang berbahaya bagi lingkungan seperti efek rumah kaca.

Berdasarkan data permintaan energi final pada tahun 2050 dari Indonesia Energi Outlook 2019 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, pasokan minyak

di tahun 2050 diperkirakan sebesar 146,6 *Million Tonne of Oil Equivalent* (MTOE) yang nilainya meningkat hampir 3 kali lebih tinggi dari pasokan minyak di tahun 2018 yang besarnya hanya 54,8 MTOE, sedangkan produksi minyak pada 2050 cenderung menurun, terutama karena melemahnya kegiatan eksplorasi migas [1]. Dengan demikian, diperlukan tindakan untuk mengatasi masalah tersebut, yaitu dengan mengembangkan energi alternatif.

Biodiesel merupakan salah satu energi alternatif berwujud cair yang berasal dari minyak nabati atau lemak hewani dan memiliki sifat pembakaran yang mirip dengan petrodiesel [2]. Terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan dalam proses pembuatan biodiesel diantaranya transesterifikasi eks situ dan transesterifikasi in situ, baik itu secara katalitik maupun non katalitik.

Karakteristik minyak alga yang memiliki kandungan *Free Fatty Acid* (FFA) yang kurang dari 5% membuat proses transesterifikasi dan stabilisasi lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan dengan *edible oil* yang berasal dari dedak padi yang mempunyai nilai FFA tinggi membuat proses stabilisasi lebih rumit yaitu dengan menggunakan proses eks situ transesterifikasi [3]. Pada metode pembuatan biodiesel menggunakan metode eks situ, perlu dilakukan ekstraksi lipid terlebih dahulu sebelum dilakukan proses transesterifikasi sehingga menambah panjang rangkaian proses produksi biodiesel. Sementara pembuatan biodiesel pada metode transesterifikasi in situ memungkinkan produksi biodiesel yang lebih cepat dengan menggunakan proses tunggal.

Secara teoritis, rasio molar minyak: alkohol sebesar 1:3 diperlukan untuk reaksi transesterifikasi. Namun, alkohol berlebih umumnya digunakan untuk mendorong reaksi maju dengan waktu reaksi minimum. Sintesis biodiesel secara katalitik dapat diklasifikasikan berdasarkan katalis yang digunakan dalam proses, yaitu proses biokatalitik dan katalis kimia. Dalam proses biokatalitik, enzim digunakan sebagai katalis dalam kondisi ringan untuk transesterifikasi/esterifikasi lipid. Kelemahan utama pada metode ini adalah penonaktifan katalis yang mudah oleh racun enzim yang mungkin ada dalam bahan baku atau mungkin dihasilkan dalam proses itu sendiri. Dalam transesterifikasi

enzimatik, enzim lipase menjadi enzim yang paling umum digunakan. Sedangkan pelarut yang umumnya digunakan adalah heksana karena biaya rendah dan ketersediaan mudah. Pelarut ditambahkan untuk memastikan fase homogen antara minyak dan alkohol. Namun, karena kelarutan metanol dan gliserol dalam heksana rendah, penonaktifan enzim dapat terjadi karena keracunan oleh baik metanol atau gliserol [4]. Oleh karena itu, secara enzimatik katalisis, alkohol biasanya ditambahkan ke campuran reaksi secara bertahap untuk meminimalkan keracunan lipase oleh alkohol dan dengan demikian memperpanjang daya tahan [5].

Di sisi lain, proses yang dikatalisis secara kimia menggunakan anorganik katalis asam/basa (baik homogen maupun heterogen) untuk memproduksi biodiesel menggunakan katalis alkali seperti natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH) memiliki kelebihan masing-masing seperti biaya yang relatif rendah dibandingkan dengan heterogen dan enzimatik katalis, ketersediaan mudah di pasar, dan kemampuan untuk mempercepat transesterifikasi secara efektif di bawah kondisi reaksi ringan.

Pada penelitian ini, dibuat biodiesel menggunakan metode transesterifikasi in situ katalitik basa. Penggunaan katalis ini memungkinkan reaksi dapat berjalan di kondisi operasi normal yang berbeda dengan metode transesterifikasi in situ non katalitik, dimana reaksi dilakukan pada suhu dan tekanan yang tinggi, sehingga keselamatan kerja menjadi aspek yang harus dipertimbangkan. Katalis NaOH yang dipakai dalam pembuatan biodiesel berpotensi sebagai katalisator tinggi [6].

Mikroalga telah banyak dijadikan sebagai bahan alternatif energi terbarukan, terlebih biodiesel, karena cukup banyak mengandung lipid dan juga terdapat kandungan hidrokarbon serta protein di dalamnya. Selain itu, penggunaan mikroalga sebagai bahan baku pembuatan biodiesel tidak mengganggu ketersediaan bahan pangan seperti pada pembuatan biodiesel dengan kelapa sawit, dan juga pada proses pertumbuhannya tidak memerlukan lahan yang luas. Salah satu genus mikroalga yang dapat digunakan sebagai bahan untuk pembuatan biodiesel adalah mikroalga *Nannochloropsis* sp. [7].

Nannochloropsis sp. adalah genus mikroalga laut dengan efisiensi fotosintesis

yang tinggi dan dapat mengkonversi karbon dioksida menjadi lipid dalam bentuk triasilgliserol dan asam lemak tak jenuh ganda rantai panjang ω -3 asam eikosapentanoat [8]. Adanya kandungan lipid inilah yang membuat *Nannochloropsis* sp. berpotensi dijadikan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel. Terlebih lagi, kandungan asam lemak pada *Nannochloropsis* sp. paling tinggi di antara jenis mikroalga lainya seperti *Chlorella* sp., *Spirulina* sp., *B. baunii*, *Tetraselmis* dan *Dunaliella* [9].

METODE

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan yaitu aerator, fotobioreaktor dengan bantuan sinar 3000 lux, seperangkat alat centrifuge, *freeze dryer*, seperangkat alat ekstraksi soklet, piknometer, viscometer Ostwald, suplai CO₂ 5 mg/L, vitamin B12, pupuk walne, biomassa mikroalga *Nannochloropsis* sp. kering, garam laut, n-heksana teknis, NaOH p.a, metanol 98% p.a., dan aquades.

Kultivasi *Nannochloropsis* sp.

Kultivasi mikroalga *Nannochloropsis* sp. dilakukan di Laboratorium Bioproses Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Bandung pada fotobioreaktor berukuran 1L. Kultivasi diawali dengan membuat media tumbuh mikroalga menggunakan air laut dengan kadar garam 30 ppt sebanyak 300 ml ke dalam fotobioreaktor. Selanjutnya, mikroalga *Nannochloropsis* sp. ditambahkan sebanyak 600 ml. Setelah itu, dipasangkan selang dari aerator ke fotobioreaktor secara kontinyu. Penerangan dilakukan menggunakan lampu dengan siklus terang:gelap selama 12:12 jam. Setiap kultur diberi 5 mg/L CO₂ setiap hari serta 1 ml walne dan 1 ml vitamin B12 setiap dua hari sekali. Kultivasi dilakukan selama 12 hari.

Pemanenan *Nannochloropsis* sp.

Pemanenan mikroalga dilakukan setelah kultivasi mikroalga *Nannochloropsis* sp. selama 12 hari siap dipanen. Metode pemanenan dilakukan menggunakan sentrifugasi karena memiliki efisiensi tinggi yaitu >90% [10]. Sentrifugasi dilakukan dengan waktu 10

menit, kecepatan 4000 rpm dan temperatur 10°C.

Ekstraksi Asam Lemak

Ekstraksi asam lemak biomassa dari mikroalga *Nannochloropsis* sp. yaitu menggunakan metode sokletasi untuk dianalisis kadar asam lemak bebasnya sebelum pembuatan biodiesel. Pelarut yang digunakan untuk ekstraksi asam lemak sendiri adalah n-heksana teknis.

Transesterifikasi In Situ Katalitik Basa

Proses transesterifikasi dilakukan dengan mereaksikan biomassa mikroalga *Nannochloropsis* sp. kering dan methanol dengan perbandingan biomassa mikroalga terhadap methanol sebesar 1:12 g/ml. Proses transesterifikasi in situ dilakukan dengan variasi katalis NaOH 1% dan 2%, pada suhu 50°C dan 60°C, tekanan atmosfer, dan dilakukan pengadukan konstan. Adapun katalis NaOH dipilih karena proses reaksi dapat dilakukan pada temperatur relatif rendah dan pada tekanan atmosfer [11]. Setelah proses transesterifikasi selesai, dilakukan pengujian densitas dan viskositas dari *crude biodiesel* yang dihasilkan menggunakan piknometer dan viskometer Ostwald.

Perhitungan Yield

Yield merupakan jumlah pereaksi pembatas pada awal reaksi dan menentukan hasil akhir reaksi. Dalam hal ini *yield* dirumuskan sebagai jumlah produk yang dihasilkan selama reaksi dibagi dengan jumlah bahan baku awal yang digunakan.

$$Yield = \frac{\text{hasil biodiesel (g)}}{\text{bahan baku awal (g)}} \times 100\%$$

Pengujian Ester

Analisis kuantitatif Me-OH pada setiap sampel dilakukan menggunakan GC-MS Shimadzu yang dilengkapi dengan *spilled injector* dan detektor MSD. Pemisahan dilakukan pada kolom kapiler HP-5MS 5% Phenyl Methyl Siloxane (ketebalan film 30 m x 250 um i.d, 0,25 um), model Agilent number 19091S-433. Program suhu diatur pada 100 °C sebagai batas bawah dan 370 °C

sebagai batas atas pada 15 °C /menit dan tahan selama 16 menit. Total waktu analisis memakan waktu 28 menit. Helium digunakan sebagai pembawa gas dengan kecepatan rata-rata 37 cm/detik pada 200 °C. Analisis data dilakukan dengan Metode HP 6890 GC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Kultivasi Mikroalga

Kultivasi mikroalga dilakukan dalam fotobioreaktor. Fotobioreaktor didesain sedemikian rupa untuk mengkultur dan menyerap CO₂ [12]. Selain itu fotobioreaktor digunakan untuk meminimalisasi risiko terjadinya kontaminasi [11]. Mikroalga *Nannochloropsis* sp. yang dikultivasi pada hari pertama ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Kultivasi Mikroalga *Nannochloropsis* sp. hari pertama

Pada hari ke-1, mikroalga *Nannochloropsis* sp. masih beradaptasi terhadap lingkungannya dan kultur masih berwarna hijau muda. Pada hari ke-12, kultur *Nannochloropsis* sp. memiliki kepadatan maksimal terlihat dari warna kulturnya yang menjadi hijau tua seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**.



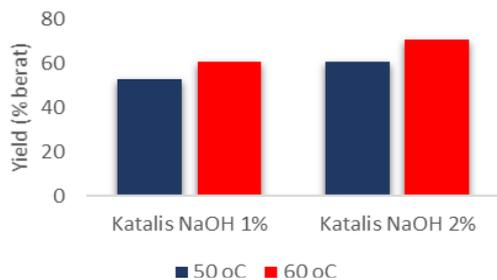
Gambar 2. Kultivasi Mikroalga *Nannochloropsis* sp. Hari ke-12

Mikroalga *Nannochloropsis* sp. selanjutnya dipanen menggunakan sentrifugasi untuk diambil biomasanya dan dikeringkan menggunakan *freeze dryer*. Adanya kandungan air pada biomassa akan memperlambat reaksi atau bersifat sebagai inhibitor pada saat dilakukan reaksi transesterifikasi in situ [14]. Dari hasil pengeringan tersebut, didapat kadar air rata-rata dari biomassa yang dihasilkan sebesar 7,98%. Kadar air tersebut relatif rendah dibandingkan dengan penelitian sebelumnya mempunyai kadar airnya sebesar 10% [15].

Adapun kadar asam lemak bebas dari biomassa mikroalga *Nannochloropsis* sp. setelah dianalisis adalah sebesar 2,82%. Kadar asam lemak bebas tersebut relatif rendah dibandingkan kandungan asam lemak bebas dari *Chlorella* sp. yang dijadikan bahan baku pembuatan biodiesel dengan metode in situ sebesar 3,2% [16].

Pengaruh Variasi Suhu dan Katalis terhadap Yield Crude Biodiesel yang Dihasilkan

Perolehan *yield* hasil transesterifikasi in situ pada suhu reaksi pada 50°C dan 60°C, dengan konsentrasi katalis NaOH 1% dan 2% dapat ditunjukkan pada **Gambar 3** terlihat bahwa *yield* biodiesel yang optimum diperoleh pada penggunaan katalis NaOH 2% dan pada suhu reaksi 60°C dengan *yield* yang dihasilkan adalah sebesar 71,03% berat dibandingkan dengan suhu reaksi 50°C. *Yield* yang diperoleh pada kondisi ini lebih tinggi dibandingkan dengan *yield* biodiesel dari penelitian Widyastuti dan Dewi [7] yang hanya mencapai 59,85%. Peningkatan suhu dapat mempercepat gerak kinetik reaktan, sehingga reaksi akan berjalan cepat dan memaksimalkan *yield* biodiesel yang didapat. Hal tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Samosir, dimana *yield* biodiesel meningkat seiring dengan kenaikan suhu [17]. Namun, untuk suhu reaksi diatas 60°C tidak dilakukan penelitian lebih lanjut, dikarenakan pada suhu tersebut mendekati titik didih methanol dimana methanol akan menguap sehingga proses pereaksian dianggap kurang efisien.

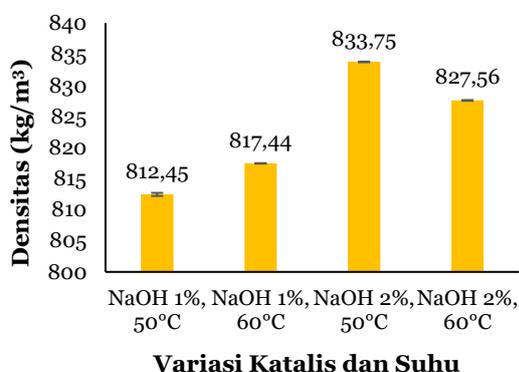


Gambar 3. Pengaruh Variasi Suhu dan Katalis terhadap *Yield Crude Biodiesel* yang Dihasilkan

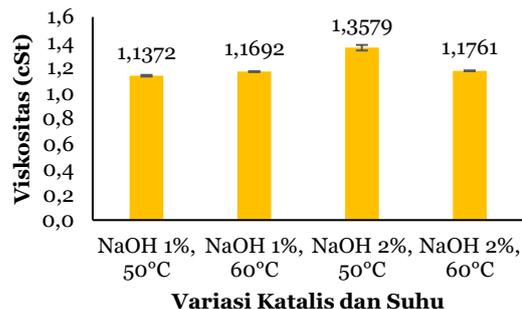
Pada **Gambar 3** terlihat bahwa pada penggunaan katalis NaOH 2%, *yield biodiesel* (% berat) yang dihasilkan lebih besar dibandingkan pada penggunaan katalis NaOH 1%. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Efavi dkk. dimana penambahan konsentrasi NaOH sebagai katalis dapat meningkatkan *yield* [18]. Hal tersebut terjadi karena penambahan konsentrasi katalis dapat mempercepat reaksi dengan cara menurunkan energi aktivasi. Namun, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk penggunaan katalis berlebih, karena katalis basa yang terlalu banyak sendiri dapat menyebabkan terjadinya pembentukan sabun, sehingga *yield* yang dihasilkan akan menurun. Selain itu, penambahan jumlah katalis yang berlebih juga akan bertindak sebagai inhibitor sehingga menghambat terjadinya reaksi yang mengarah ke produk [19]

Hasil Uji Densitas dan Viskositas

Hasil pengujian densitas dan viskositas dari *crude biodiesel* dengan variasi suhu pada 50°C dan 60°C, serta pada konsentrasi katalis NaOH 1% dan 2% ditunjukkan pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**.



Gambar 4. Hasil Pengujian Densitas



Gambar 5. Hasil Pengujian Viskositas

Dari hasil uji densitas yang ditunjukkan pada **Gambar 4** dapat dilihat densitas paling tinggi dari *crude biodiesel* adalah pada reaksi transesterifikasi in situ pada kondisi operasi katalis NaOH 2%, suhu 50°C yaitu 833,75 kg/m³. Nilai tersebut sedikit lebih kecil dari standar biodiesel SNI yang nilainya sebesar 850 kg/m³. Nilai densitas ini juga lebih kecil dibandingkan dengan penelitian Widyastuti dan Dewi [7] biodiesel dari minyak alga *chlorella* dengan katalis basa sebesar 0,88 g/cm³.

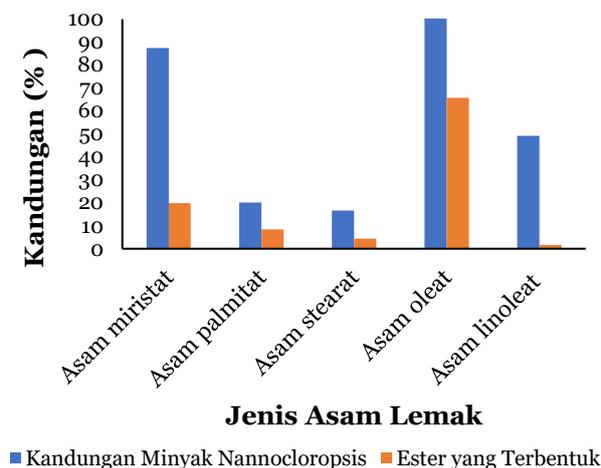
Hasil pengujian densitas yang tidak mendekati standar SNI disebabkan karena kemurnian dari biodiesel itu sendiri, dimana pada penelitian kali ini tidak dilakukan pemurnian lebih lanjut. Hal ini sesuai dengan penelitian Montero dan Styotcheva, bahwa densitas dari biodiesel bergantung pada massa molar, kadar asam lemak bebas, kadar air, komposisi asam lemak, dan kemurniannya [20]. Selain itu, Tan dkk, 2019 juga menyatakan bahwa penggunaan katalis homogen basa seperti yang digunakan pada penelitian kali ini memiliki kelemahan, yaitu katalis sebagian larut dalam biodiesel dan gliserol [21].

Dari hasil uji viskositas yang ditunjukkan pada **Gambar 5**, didapat viskositas *crude biodiesel* yang mendekati SNI yaitu 2,3 cSt adalah pada saat proses transesterifikasi in situ dengan kondisi operasi penggunaan katalis NaOH 2%, dengan suhu reaksi 50°C yaitu sebesar 1,3579 cSt, sedangkan hasil yang paling jauh dari nilai SNI adalah pada saat proses transesterifikasi in situ dengan kondisi operasi penggunaan katalis 2% dan suhu 50°C yaitu sebesar 1,1372. Hasil ini menunjukkan hubungan serupa dengan hasil uji densitas sebelumnya yaitu semakin tinggi densitas maka viskositas dari *crude biodiesel* yang dihasilkan akan semakin tinggi juga. Dari hasil uji densitas dan viskositas tersebut terlihat hasil *crude biodiesel* dengan metode ini belum

memenuhi standar SNI biodiesel yang disyaratkan.

Komposisi Ester dalam Biodiesel

Komposisi asam lemak dan ester biodiesel mikroalga *Nannochloropsis* yang terbentuk pada kondisi operasi katalis NaOH 2%, suhu 50°C terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Komposisi asam lemak mikroalga *Nannochloropsis* sp. dan esternya

Komposisi asam lemak yang terkonversi menjadi biodiesel didominasi utama oleh asam oleat metil ester sebesar 68,27 %; asam miristat metil ester 18,12 % dan asam palmitat metil ester 6,46 %. Hal ini juga disebabkan karena komposisi terbesar lipid dari minyak mikroalga *Nannochloropsis* juga berasal dari asam oleat [22].

Asam lemak yang terkandung dalam biodiesel mikroalga *Nannochloropsis* meliputi myristic acid (C14:0) 87,35%, palmitic acid (C:16) 20,05%, stearic acid (C:18:0) 16,68%, oleic acid (C18:1) 101,5%, linoleic acid (C18:2) 49,02%. Asam lemak yang terkandung juga merepresentasikan jumlah minyak yang terekstrak dari mikroalga dalam proses insitu biodiesel menggunakan katalis basa.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa peningkatan suhu reaksi hingga 60°C dapat meningkatkan *yield crude biodiesel* yang dihasilkan. Begitupun dengan penambahan konsentrasi katalis dengan NaOH 2%, dapat meningkatkan *yield crude biodiesel*, yaitu hingga 71,03% berat. Adapun densitas

crude biodiesel yang mendekati SNI adalah 833,75 kg/m³ dan viskositas yang mendekati nilai SNI adalah 1,3579 cSt, yaitu pada transesterifikasi dengan kondisi operasi suhu 50°C dan konsentrasi katalis NaOH 2%. Selanjutnya masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penambahan jumlah katalis NaOH di atas 2% untuk melihat pengaruh terhadap perolehan *yield* dan parameter lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung yang telah mendukung penelitian ini sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Surhayati, S.H. Y. Pambudi, J. L. Wibowo, dan N. I. Pratiwi, "Indonesia Energy Outlook 2019." Djoko Siswanto, Jakarta, Sep-2019.
- [2] M. Mahfud, *BIODIESEL Perkembangan Bahan Baku & Teknologi*. Surabaya, Indonesia: Putra Media Nusantara, 2018.
- [3] S. Zullaikah, Y. T. Rahkadima, and Y.-H. Ju, "A non-catalytic in situ process to produce biodiesel from a rice milling by-product using a subcritical water-methanol mixture," *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 764–770, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.040.
- [4] D. Royon, M. Daz, G. Ellenrieder, and S. Locatelli, "Enzymatic production of biodiesel from cotton seed oil using t-butanol as a solvent," *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 3, pp. 648–653, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.02.021.
- [5] Y. Watanabe, Y. Shimada, A. Sugihara, H. Noda, H. Fukuda, and Y. Tominaga, "Continuous production of biodiesel fuel from vegetable oil using immobilized *Candida antarctica* lipase," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 77, no. 4, pp. 355–360, Apr. 2000, doi: 10.1007/s11746-000-0058-9.
- [6] D. S. Prayanto, M. Salahudin, L. Qadariyah, dan M. Mahfud, "Pembuatan biodiesel dari Minyak Kelapa Dengan katalis NaOH Menggunakan Gelombang Mikro (microwave) Secara Kontinyu," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 1, 2016.

- [7] C. R. Widyastuti dan A. C. Dewi, "Sintesis Biodiesel Dari Minyak Mikroalga *Chlorella vulgaris* Dengan Reaksi Transesterifikasi Menggunakan Katalis Koh," *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, Pp. 29–33, 2015.
- [8] X.-N. Ma, T.-P. Chen, B. Yang, J. Liu, dan F. Chen, "Lipid production from nannochloropsis," *Marine Drugs*, vol. 14, no. 4, p. 61, 2016.
- [9] S. Amini dan R. Susilowati, "Produksi Biodiesel Dari Mikroalga *Botryococcus braunii*," *Squalen*, Vol. 5, 2010.
- [10] A. J. Dassey dan C. S. Theegala, "Harvesting economics and strategies using centrifugation for cost effective separation of microalgae cells for biodiesel applications," *Bioresource Technology*, vol. 128, pp. 241–245, 2013.
- [11] D. Y. C. Leung, X. Wu, dan M. K. H. Leung, "A review on biodiesel production using catalyzed transesterification," *Applied Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1083–1095, 2010.
- [12] N. F. Widyaningrum, B. Susilo, dan M. B. Hermanto, "Studi Eksperimental Fotobioreaktor Photovoltaic untuk Produksi Mikroalga (*Nannochloropsis oculata*)," *Bioproses Komoditas Tropis*, vol. 1, 2013.
- [13] S. Praharyawan, "Peningkatan Produksi Biomassa Sebagai Strategi Jitu dalam Mempercepat Produksi Biodiesel Berbasis Mikroalga di Indonesia," *Bioteknologi & Biosains Indonesia*, vol. 8, no. 2021, 2021.
- [14] G. Bauer, S. Lima, J. Chenevard, M. Sugnaux, dan F. Fischer, "Biodiesel via in situ wet microalgae biotransformation: Zwitter-type ionic liquid supported extraction and transesterification," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 1931–1937, 2017.
- [15] D. Fithriani, D. Ambarwaty, dan Nurhayati, "Identification of bioactive compounds from nannochloropsis sp.," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 404, no. 1, p. 012064, 2020.
- [16] S. B. Velasquez-Orta, J. G. M. Lee, dan A. Harvey, "Alkaline in situ transesterification of *Chlorella vulgaris*," *Fuel*, vol. 94, pp. 544–550, 2012.
- [17] I. Samosir, B. Gusman, dan L. Buchori, "Pengaruh Katalis Asam (H_2SO_4) dan Suhu Reaksi dalam Pembuatan Biodiesel dari Limbah Minyak Ikan," *Teknologi Kimia dan Industri*, vol. 1, 2012.
- [18] J. K. Efavi, D. Kanbogtah, V. Apalangya, E. Nyankson, E. K. Tiburu, D. Dodoo-Arhin, B. Onwona-Agyeman, dan A. Yaya, "The effect of NaOH catalyst concentration and extraction time on the yield and properties of citrullus vulgaris seed oil as a potential biodiesel feed stock," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 25, pp. 98–102, 2018.
- [19] S. Shrikhande, G. Deshpande, A. N. Sawarkar, Z. Ahmad, and D. S. Patle, "Design and retrofitting of ultrasound intensified and ionic liquid catalyzed in situ algal biodiesel production," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 171, pp. 168–185, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.cherd.2021.05.010.
- [20] G. Montero dan M. Stoytcheva, Eds., *Biodiesel- quality, emissions and by-products*. Rijeka, Croatia: InTech, 2011.
- [21] Y. H. Tan, M. O. Abdullah, J. Kannedo, N. M. Mubarak, Y. S. Chan, dan C. Nolasco-Hipolito, "Biodiesel production from used cooking oil using green solid catalyst derived from calcined fusion waste chicken and fish bones," *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 696–706, 2019.
- [22] S. Amini and S. Sugiyono, "Kandungan Minyak Mikroalga Jenis *Tetraselmis* Sp. dan *Chlorella* Sp. Berdasarkan Umur Pertumbuhannya," *Prosiding Forum Inovasi Teknologi Akuakultur*, vol. 1, no. 1, pp. 1133–1138, Dec. 2011.