Studi Desain Reaktor In-Situ Transesterifikasi untuk Proses dan Produksi Teknologi Biodiesel dari *Microalgae Chlorella sp*.

Yustia Wulandari Mirzayanti[1,*], Siti Maisarah[2], dan Ryan Aryoga[3]
Teknik Kimia – Institut Teknlogi Adhi Tama Surabaya[1,2,3]
**e-mail: yustiawulandari_che@itats.ac.id*

ABSTRACT

Biodiesel is an alternative fuel sourced from vegetable or animal oil as a substitute for diesel fuel by using a transesterification reaction with the help of catalytic functions to reduce activation energy and accelerate the reaction. The purpose of this study is to study the design study of in-situ batch transesterification reactors for the process and production of biodiesel from microalgae chlorella sp with operating conditions in accordance with research conducted by Viegas et al. In the process of making biodiesel, the most efficient process uses a transesterification reaction. In this research, a transesterification In-Situ reactor design study was conducted using the Aspen HYSYS 8.8 program to make it easier to find out the product results, as well as reactor calculations. The operating parameters used for biodiesel production are 60^{o}C operating temperature, 1 atm pressure, 4 hour reaction time with the help of H2SO4 catalyst, and microalgae: methanol (1: 3) mass ratio using mass variations of microalgae chlorella sp 1, 2, 3, 4, and 5 kg. The results of this study on the mass ratio of microalgae chlorella sp 2 kg and methanol 6 kg based on the calculation results obtained by the reactor volume 9.7 L obtained reactor diameter 0.22 m, reactor height 0.536 m, buffer height 1.7954 m, top lid thickness 0.047 m , bottom lid thickness of 0.047 m and power consumed 1 Hp.

Keywords : *Biodiesel, microalgae, transesterification process, reactors, and Aspen HYSYS*

ABSTRAK

Biodiesel adalah bahan bakar alternatif yang bersumber dari minyak nabati atau hewani sebagai pengganti solar dengan menggunakan reaksi transesterifikasi dengan bantuan katalitis yang berfungsi untuk menurunkan energi aktivasi dan mempercepat terjadinya reaksi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji studi desain reaktor *batch* in-situ transesterifikasi untuk proses dan produksi biodiesel dari mikroalga *chlorella sp* dengan kondisi operasi sesuai penelitian yang dilakukan oleh viegas dkk. Dalam proses pembuatan biodiesel, proses yang paling efisien menggunakan reaksi transesterifikasi. Pada penelitian ini, dilakukan studi desain reaktor *In-Situ* transesterifikasi dengan menggunakan program Aspen HYSYS 8.8 untuk mempermudah mengetahui hasil produk, serta dilakukan perhitungan reaktor. Paremeter operasi yang digunakan untuk produksi biodiesel yaitu suhu operasi 60^{o}C, tekanan 1 atm, waktu reaksi 4 jam dengan bantuan katalis H_2SO_4, dan rasio massa mikroalga : methanol (1:3) menggunakan variasi massa mikroalga *chlorella sp* 1, 2, 3, 4, dan 5 kg. Hasil penelitian ini pada perbandingan massa mikroalga *chlorella sp* 2 kg dan methanol 6 kg berdasarkan hasil perhitungan diperoleh volume reaktor 9,7 L diperoleh diameter reaktor 0,22 m, tinggi reaktor 0,536 m, tinggi penyangga 1,7954 m, tebal tutup atas 0,047 m, tebal tutup bawah 0,047 m dan daya yang dikonsumsi 1 Hp.

Kata kunci : *Biodiesel, mikroalga, proses transesterifikasi, reaktor, dan Aspen HYSYS*

PENDAHULUAN

Hampir semua sumber daya yang ada di bumi ini yang banyak dimanfaatkan dan dibudidayakan sebagai kebutuhan manusia. Konsumsi energi global menunjukkan bahan bakar fosil banyak digunakan sebagai pemanfaatan sumber daya. Peningkatan permintaan energi dan juga penggunaan bahan bakar minyak secara berlebihan mengakibatkan cadangan minyak menjadi menipis [1]. Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif sebagai pengganti solar yang bersumber dari minyak nabati maupun hewani dengan menggunakan reaksi transesterifikasi dengan bantuan katalitis yang berfungsi untuk menurunkan energi aktivasi dan mempercepat terjadinya reaksi[2].

Pada bahan bakar biodiesel berasal dari mikroalga. Biodiesel mikroalga ini menjadi prioritas utama sebagai bahan bakar biodiesel karena mempunyai keunggulan komperatif dibandingkan dengan bahan nabati lainnya [3]. Adapun mikroalga *Chlorella sp* yaitu 29% [4].

Salah satu proses biodiesel yaitu proses in-situ transesterifikasi mereaksikan metanol, dengan lipid mikroalga dalam biomassa mikroalga langsung menjadi ester metil asam lemak (FAME atau biodiesel) tanpa mengekstraksi lipid terlebih dahulu [5]. Proses transesterifikasi tersebut berlangsung pada suatu reaktor yang di desain secara khusus untuk menghasilkan produk yang terbaik. Penelitian sebelumnya yang banyak dilakukan tentang pembuatan biodiesel dari mikroalga menggunakan proses in-situ transesterifikasi sehingga perlu dikaji lebih lanjut desain reaktor tersebut. Simulasi dengan menggunakan program aspen HYSYS adalah simulasi proses yang dirancang untuk melayani banyak industri pemrosesan. Keunggulan dalam program tersebut adalah program yang interaktif, intuitif, terbuka dan dapat diperluas [6].

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya antara lain Desain reaktor dan simulasi pirolisis untuk produksi bio-oil dari cangkang kelapa sawit dengan sistem *self-pyrolysis* [7]. Perencanaan desain reaktor biodiesel sistem *batch* untuk produksi biodiesel skala industri kecil [8]. Rancang Bangun Dan Pengujian Reaktor Berpengaduk Statis Untuk Produksi Biodiesel Secara Kontinyu [9]. Kajian pengunaan *static mixing reactor* pada proses produksi biodiesel secara katalitik dengan sistem *continue* [2]. *Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review* [10], dan *Design, construction and performance evaluation of a mini-scale batch reactor for biodiesel production: A case study of shea butter* [11].

Berdasarkan penjelasan penelitian sebelumnya, penulis akan melakukan penelitian yaitu studi desain reaktor transesterifikasi *in situ* untuk proses dan produksi teknologi biodiesel dengan mikroalga *Chlorella sp*. Studi desain reaktor in-situ ini data yang diperoleh berdasarkan penelitian sebelumnya yang berjudul "*A route to produce renewable diesel from algae: Synthesis and characterization of biodiesel via in situ transesterification of Chlorella algae and its catalytic deoxygenation to renewable diesel*" [12]. Serta desain reaktor jenis *batch* ini akan dilakukan simulasi dengan menggunakan simulator aspen HYSYS.

TINJAUAN PUSTAKA

Microalgae

Mikroalga memiliki kemampuan beradaptasi yang baik, sehingga mereka dapat bersaing dalam seluruh siklus pertumbuhan setiap beberapa hari. Kondisi pertumbuhan mempengaruhi metabolisme adaptasi dan produksi minyak alga. Dalam kondisi normal, minyak alga mengandung 5-20% biomassa kering dan meningkatkan hingga 20-50% biomassa kering dalam kondisi yang tidak sesuai. Beberapa faktor mempengaruhi produksi minyak alga, seperti intensitas cahaya, suhu, salinitas, pH, dan kondisi pertumbuhan budidaya [13].

Mikroalga yang akan digunakan dalam penelitian adalah mikroalga jenis *chorella sp.* mikroalga jenis ini mudah didapatkan dan dikembangkan di Indonesia. *Chorella sp* termasuk dalam filum *Chlorophyta*, kelas *Chlorophyceae*, Ordo *Chloroccocales* , Famili *Chlorelllaceae*, Genus *Chorella*, dan Spesies *Chorella sp*. Mikroalga jenis ini sangat potensial menghasilkan senyawa kimia yang berfungsi sebagai antioksidan karena mengandung karotenoid yaitu *cis-zeaxantin, α-karoten, dan cis α-karoten* [14].

Reaktor

Reaktor adalah adalah suatu alat proses tempat di mana terjadinya suatu reaksi berlangsung, baik itu reaksi kimia atau nuklir dan bukan secara fisika [8]. Berdasarkan prosesnya reaktor dibagi menjadi 3 jenis, yaitu

1. Reaktor *batch*, reaktor ini memiliki pengaduk yang berisi reaktan, tidak ada aliran inlet atau outlet selama operasi.
2. Reaktor *semi batch*, biasanya berbentuk tangki yang berpengaduk. Cara operasinya dengan jalan memasukkan sebagian zat pereaksi ke dalam reaktor, sedangkan zat pereaksi yang lain atau sisanya dimasukkan secara kontinu ke dalam reaktor.
3. Proses kontinyu (reaktor pipa, reaktor tangki). Reaktor ini mempunyai aliran masukan dan

keluaran (*inlet*/*outlet*) yang terdiri dari campuran homogen/heterogen. Reaksi kontinue di operasikan pada kondisi *steady*. Dimana arus aliran masuk sama dengan arus aliran keluar [8].

Aspen Hysys

Simulator ini dibuat dengan UniSim ™ Design Suite Honeywell, yang didasarkan pada perangkat lunak HYSYS®. Ini menawarkan simulasi, desain, pemantauan kinerja, simulasi kondisi-stabil dan dinamis, untuk produksi minyak dan gas, pemrosesan gas, penyulingan minyak bumi dan industri kimia. Pabrik kimia tidak pernah benar-benar dalam kondisi mapan. Gangguan umpan dan lingkungan, pengotoran penukar panas, dan degradasi katalitik secara terus-menerus mengganggu kondisi proses yang berjalan dengan lancar. Perilaku transien dari sistem proses paling baik dipelajari menggunakan alat simulasi dinamis seperti Desain UniSim ™.

METODE

Studi Literatur

Pada tahap awal penelitian, dilakukan studi literatur untuk mempelajari sifat-sifat fisik dan kimia mikroalga *Chlorella sp*. minyak *Chlorella sp* adalah *Hexanedioic acid, bis (2-ethylhexyl) ester* yang termasuk golongan asam karboksilat [15]. Minyak *Chlorella sp* secara fisik berwarna kuning bening. Karakteristik dari minyak *Chlorella sp* dapat dilihat pada **Tabel 1.**

Tabel 1. Karakteristik Fisika dan Kimia Minyak *Chlorella sp* [15]

Parameter	Nilai
Densitas (27^{o}C) gr/ml	0,678
Bilangan Asam	0,908
Viscositas (cst)	2,12085
FFA (%)	0,6

FAME didominasi senyawa *methyl palmitate*. *Methyl palmitate* ini memiliki rumus molekul $C_{17}H_{34}O_2$. Berdasarkan jumlah atom karbon C, *FAME* dari *Chlorella sp* yang termasuk ke dalam golongan diesel dengan rantai C15-C18 antara lain adalah *Methyl Isotetradecanoat, Methyl Palmitoleate, Methyl Palmitate* [15].

Studi desain reaktor in-situ ini data berdasarkan penelitian sebelumnya yang diteliti oleh Carolina Vieira Viêgas, dkk. 2015. "*A route to produce renewable diesel from algae: Synthesis and characterization of biodiesel via in situ transesterification of Chlorella algae and its catalytic deoxygenation to renewable diesel*". Berikut **Tabel 2** parameter pembuatan biodiesel dari mikroalga *chlorella sp* secara in-situ [12] :

Tabel 2. Parameter Pembuatan Biodiesel dari Mikroalga *Chlorella sp* [12]

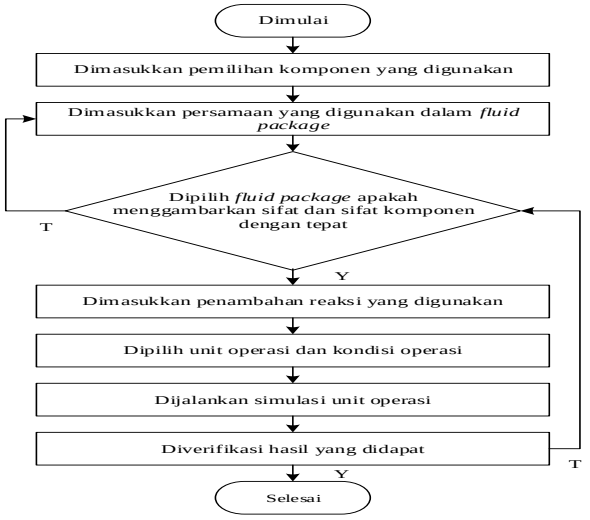
Parameter	Nilai
Suhu Reaktor (^{o}C)	60
Tekanan (atm)	1
Rasio alga dengan methanol	1 : 3
Konsentrasi katalis g H_2SO_4/g biomassa (wt%)	2
Waktu reaksi (jam)	4
Konversi (%)	97

Tabel 3. Parameter Reaktor Pembuatan Biodiesel [11]

Parameter	Nilai
Diameter	190 mm
Tinggi utama	180 mm
Tinggi volume kosong	30 mm
Ketebalan	2 mm
Volume liquid	4.500.000 mm^3 (4,5 L)
Volume kosong	1.500.000 mm^3 (1,5 L)
Volume *occuupied by impeller shaft and blades*	500.000 mm^3 (0,5 L)

Total volume	
Agitation Unit Dimensions	6.500.000 mm^3 (6,5 L)
Impeller diameter	180 mm
Length of the turbine blade	120 mm
Distance of the impeller to the base	60 mm
Height of the impeller	150 mm

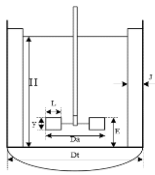
Simulasi Desain Reaktor



Gambar 1. Flowchart Proses Simulasi Pembuatan Biodisel Menggunakan Simulator ASPEN HYSYS V8.8

Desain dan Instalasi

Menghitung diameter, tebal silinder, tebal tutup atas, dan tebal tutup bawah.
Menghitung Pengaduk



Gambar 2. Pengaduk Reaktor Transesterifikasi

Menentukan jenis pengaduk setelah itu lihat data Da/Dt, C/Dt, Da/W, Dt/J, dan L/Da [16].

$$N_{Re} = \frac{Da^2 \times N \times \rho}{M} \quad \text{.....(1)}$$

Dari fig. 3.4-4 Geankoplis Ed 4 hal 159 diperoleh Np

$$P = \frac{N_p \times N^3 \times Da^5 \times \rho}{Gc} \quad \text{..... (2)}$$

Efisiensi motor [17]
Menghitung penguat (Nozzle), menghitung penyangga, menghitung base plate

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses In-Situ Transesterifikasi

Hasil FAME dari mikroalga *chlorella sp* dari penelitian sebelumnya yang optimal seperti dicantumkan pada **Table 4**. Dasar pemilihan mikroalga jenis *Chlorella sp.* dikarenakan dapat

menghasilkan minyak sebanyak 28-32% dari berat keringnya. Selain itu, mikroalga *Chlorella sp.* termasuk salah satu kelompok alga hijau yang paling banyak jumlahnya diantara alga hijau lainnya, sebanyak 90% *Chlorella sp.* hidup di air tawar dan 10% *Chlorella sp.* hidup di air laut. Berdasarkan kandungan minyak yang cukup besar, *Chlorella sp.* berpotensi besar untuk dapat diproses menjadi biodiesel [4].

Tabel 4. Jumlah FAME yang diperoleh pada kondisi yang optimal [12]

Bahan baku	Massa (gr)	Methanol	Jumlah FAME mentah (g)	Jumlah yang dimurnikan FAME (g)
Alga	100	300	7,09	6,57
Lipid	10,55	30	5,03	a.m.

Pada penelitian sebelumnya sangat banyak desain reaktor pembuatan biodiesel dengan proses transesterifikasi yang berbahan baku minyak. Sedangkan desain reaktor penelitian ini menggunakan proses transesterifikasi *in situ* dalam menghasilkan biodiesel dengan bahan baku mikroalga kering. Kelebihan proses transesterifikasi *in situ* yaitu proses ini menyederhanakan proses pembuatan biodiesel, mengurangi unit operasi sehingga mengurangi harga produksi biodiesel. Transesterifikasi *in situ* merupakan cara yang efisien untuk mengkonversi langsung minyak menjadi biodiesel, dengan cara mengeliminasi proses ekstraksi yang merupakan metode konvensional. Reaksi utama yang terjadi dalam proses pembuatan biodiesel ini yaitu reaksi esterifikasi dan reaksi transesterifikasi dengan katalis asam.

Reaksi esterifikasi :

$$\underset{\text{Asam lemak}}{RCOOH} + \underset{\text{Metanol}}{CH_3OH} \longleftrightarrow \underset{\text{FAME}}{RCOOCH_3} + \underset{\text{Air}}{H_2O}$$

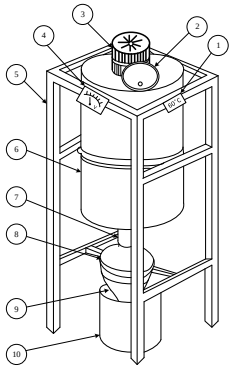
Reaksi Transesterifikasi :

$$\text{Trigliserida (TG)} + 3\ CH_3OH \longleftrightarrow \text{FAME} + \text{Gliserol}$$

Reaktor Batch

Faktor penting untuk mencapai produktivitas tinggi dalam sistem batch adalah perhitungan tepat waktu yang diperlukan untuk konversi lengkap reagen menjadi produk . Dalam sistem batch, profil suhu optimal ditentukan melalui reaksi kimia. Setelah itu, suhu menurun dengan waktu tertentu untuk menghambat pengurangan konstanta kesetimbangan kimia. Profil suhu berbeda untuk reaksi reversibel endotermik. Dalam kondisi ini, suhu meningkat dengan cepat sebanyak mungkin ke jumlah tertinggi karena kenaikan konstanta kesetimbangan kimia tergantung pada peningkatan suhu [8]. Proses harus sering diperiksa karena sistem batch adalah proses yang bervariasi waktu di mana parameter utama dapat berubah seiring waktu. Kesalahan pemodelan biasanya tidak dapat dihindari karena gangguan eksternal dan kondisi kompleks sistem *batch* yang mempengaruhi hasil produk akhir. Untuk mengatasi masalah ini dalam proses kontrol, sering optimasi on-line telah digunakan untuk memperkirakan profil yang diinginkan secara efisien [11].

Berikut desain reaktor mini-batch untuk produksi biodiesel [11] :

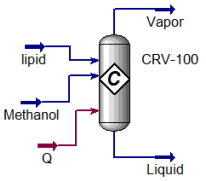


No. Keterangan
1 Temperature control
2 Inlet raw material
3 D.C Motor
4 Volt meter
5 Penyangga
6 Reaktor/Main Vassel
7 Outlet
8 Separating Funnel Holder
9 Separating Funnel
10 Product Receive

Gambar 3. Desain Reaktor Mini-Batch In-Situ Transesterifikasi

Desain dan Spesifikasi Reaktor In-Situ Transesterifikasi

Desain reaktor untuk proses dan produksi teknologi biodiesel dari mikroalga disimulasikan menggunakan basis kandungan minyak mikroalga (Di2C2C6Adipa) yaitu 2 kg dan 6 kg methanol sesuai rasio (1:3). Hal ini dilakukan untuk mempermudah proses simulasi menggunakan Aspen HYSYS 8.8 pada produksi pada sistem *batch*.



Gambar 4. Simulasi Reaktor

Data yang didapatkan dari simulasi reaktor menggunakan HYSYS disajikan **Tabel 5**. Skema proses dan produksi pembuatan biodiesel dari mikroalga *chlorella sp* dapat dijelaskan dimulai dengan sintesis biodiesel dan diikuti oleh langkah-langkah proses selanjutnya untuk mendapatkan produk biodiesel dan gliserol murni.

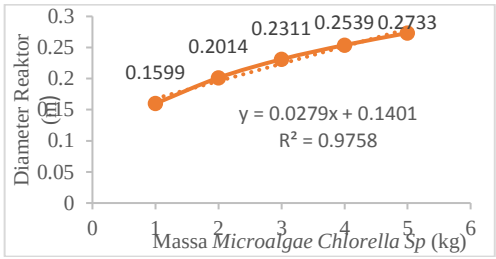
Tabel 5. Mass Flow dari Komponen dalam Reaksi pada Reaktor

Komponen	**Kg/*batch***			
	Input		**Output**	
	Di2C2C6Adipa	**Methanol**	**Liquid**	**Vapor**
Di2C2C6Adipa	2,0000	0,0000	0,0600	0,0000
Methanol	0,0000	6,0000	5,8323	0,0000
M-Palmitate	0,0000	0,0000	1,6256	0,0000
Glycerol	0,0000	0,0000	0,4821	0,0000
Total	8,0000		8,0000	

Tabel 5 memberikan laju aliran massa komponen yang terlibat dalam reaksi proses produksi biodiesel dari mikroalga, yang telah disimulasikan dengan bantuan Simulator proses Aspen HYSYS. laju aliran massa total dari input dan output reaktor sama. Ini adalah indikasi lain bahwa sistem itu beroperasi pada kondisi yang tepat dan hukum konservasi massa telah dipatuhi oleh simulator proses [6]. Selain itu, komponen dengan laju aliran massa tertinggi di produk cair dari reaksi berupa produk yang diinginkan yaitu metil palmitate. Akan tetapi, untuk memastikan *yield* yang dihasilkan tidak efisien jika hanya melihat dari hasil stikiometri dikarenakan tidak sesuai dengan hasil penelitian. Sehingga perlu dikaji lebih lanjut pada hasil produk biodiesel dari mikroalga ini. Pada reaktor ini untuk memenuhi suhu operasi diperlukan panas masuk sebesar 382,6 kJ/h. Setelah mendapatkan hasil dari produk, pada simulasi ini juga dapat mengetahui diameter dan tinggi reaktor dengan menginput volume liquid.

Tabel 6. Perbandingan Massa *Microalgae Chlorella sp* dan Methanol dengan Dimensi Reaktor.

Massa (kg)		Volume	Dimensi reaktor (m)	
Microalgae	*Methanol*	Liquid (m^3)	Diameter	Tinggi
1	3	0,004812	0,1599	0,2398
2	6	0,009624	0,2014	0,3021
3	9	0,01454	0,2311	0,3466
4	12	0,01925	0,2539	0,3806
5	15	0,02406	0,2733	0,41



Gambar 5. Grafik Perbandingan Massa *Microalgae Chlorella sp* dengan Dimensi Reaktor.

Pada desain reaktor untuk perbandingan rasio massa mikroalga *chlorella sp* dan methanol (1:3) sebanyak 2 kg dan 6 kg didapatkan volume reaktor 9,7 L. Saat melakukan *scale up* atau *scale down* tetap menggunakan rasio massa (1:3) dengan perbandingan massa yang berbeda seperti yang terdapat pada **Tabel 7**. Jika massa yang dinaikkan dua kali lipat pada **Gambar 5.** menunjukkan bahwa nilai dari diameter dan tinggi reaktor tidak naik dua kali lipat. Sehingga dari **Tabel 7.** dapat dilihat nilai diameter dan tinggi silinder dengan rasio massa mikroalga yang berbeda-beda. Diameter perhitungan yaitu diameter reaktor 0,22 m, tinggi reaktor 0,536 m sehingga hasil simulasi selisih dengan perhitungan tidak jauh berbeda.

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang yang berjudul "*design, construction and performance evaluation of a mini-scale batch reactor for biodiesel production: A case study of shea butter"* didapatkan hasil kapasitas yang digunakan sebesar 6,5 L untuk membuat desain reaktor dengan parameter perhitungan spesifikasi alat yang sudah disertakan pada **Tabel 3.** [11]. Perbedaan dari desain reaktor pembuatan biodiesel yang dirancang yaitu dari segi bahan baku desain sebelumnya menggunakan minyak kacang menggunakan proses transesterifikasi. Parameter operasi yang digunakan memvariasikan suhu yaitu 40, 50, dan 60^{o}C dengan kecepatan pengaduk 200, 800 dan 1400 rpm. Desain yang kami lakukan menggunakan bahan baku mikroalga *chlorella sp* dengan proses in-situ transesterifikasi dengan parameter operasi dengan suhu 60^{o}C dan kecepatan pengaduk 300 rpm.

Pada studi desain reaktor in-situ transesterifikasi untuk proses dan produksi teknologi biodiesel dari *microalgae chlorella sp* dimensi untuk dimensi reaktor yang didapatkan tidak berbeda jauh dengan penelitian sebelumnya didasarkan pada perhitungan dimensi tangki yang tidak berbeda jauh juga dimensi pengaduk. Akan tetapi, jika ditinjau dari hasil penelitian laboratorium dengan *experiment* yang tertera pada **Tabel 4.** dapat dilihat untuk bahan baku mikroalga *chlorella sp.* kering sebanyak 100 gram menghasilkan biodiesel mentah 7,09 gram. Berbeda dengan hasil simulasi dimana untuk bahan baku mikroalga chlorella sp 2000 gram menghasilkan biodiesel 1625 gram, seperti yang tertera pada **Tabel 5.** Seharusnya untuk reaktor yang didesain menggunakan bahan baku 2000 gram berdasarkan perbandingan hasil penelitian yang tertera di **Tabel 4.** akan menghasilkan 141,8 gram sehingga perlu dipertimbangkan untuk hasil yg diperoleh serta harga bahan baku yang cukup mahal.

KESIMPULAN

Desain reaktor in-situ transesterifikasi untuk proses dan produksi biodiesel dari mikroalga *chlorella sp* yaitu reaktor sistem *batch* dengan pengaduk dan kapasitas reaktor yang kecil pada suhu operasi 60^{o}C, tekanan 1 atm, waktu reaksi 4 jam dengan bantuan katalis H_2SO_4. Dimensi reaktor *in-situ Transesterifikasi* untuk proses dan produksi teknologi biodiesel dari mikroalga *chlorella sp*. pada perbandingan massa mikroalga 2 kg dan methanol 6 kg diperoleh volume reaktor 9,7 L. Hasil perhitungan dimensi yang diperoleh yaitu diameter reaktor 0,22 m, tinggi reaktor 0,536 m, tinggi penyangga 1,7954 m, tebal tutup atas 0,047 m, tebal tutup bawah 0,047 m dan daya yang dikonsumsi 1 Hp.

DAFTAR PUSTAKA

[1] T. T. Mamo dan Y. S. Mekonnen, "Microwave-Assisted Biodiesel Production from Microalgae, Scenedesmus Species, Using Goat Bone–Made Nano-catalyst," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 2019, doi: 10.1007/s12010-019-03149-0.

[2] C. Soolany, A. H. Tambunan, R. Sudradjat, P. Studi, dan T. Mesin, "Kajian Pengunaan Static Mixing Reactor Pada Proses Produksi Biodiesel Secara Katalitik Dengan Sistem Continue (Assessment of Static Mixing Reactor on Biodiesel Production by Using Catalytic a Continuous System)," vol. 33, no. 3, hal. 261–272, 2015.

[3] L. Widodo, I. M. Ihsan, dan A. D. Santoso, "Profitabilitas Biodiesel dari Biomasa Mikroalga," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 19, no. 1, hal. 117, 2018, doi: 10.29122/jtl.v19i1.2551.

[4] V. C. Akubude, K. N. Nwaigwe, dan E. Dintwa, "Production of biodiesel from microalgae via nanocatalyzed transesterification process: A review," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, no. 2, hal. 216–225, 2019, doi: 10.1016/j.mset.2018.12.006.

[5] B. B. He dan Z. Bi, "In situ Microalgal Biomass Processing for Biodiesel Production," vol. 20, no. June, 2015.

[6] A. W. Giwa, S. O. Giwa, dan E. A. Olugbade, "Application of Aspen HYSYS process simulator in green energy revolution: A case study of biodiesel production," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 2, hal. 569–581, 2018.

[7] F. Rahmah, "Desain reaktor dan simulasi pirolisis untuk produksi bio-oil dari cangkang kelapa sawit dengan sistem self-pyrolysis," 2018.

[8] S. Ula, F. Maghfurah, S. Abdullah, dan A. H. K, "Perencanaan desain reaktor biodiesel sistem batch untuk produksi biodiesel skala industri kecil," vol. 8, no. 2, hal. 169–176, 2019.

[9] S. E. Prasetya, "Rancang bangun dan pengujian reaktor berpengaduk statis untuk produksi biodiesel secara kontinyu sigit eko prastya," 2015.

[10] M. Tabatabaei *et al.*, "Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 74, hal. 239–303, 2019, doi: 10.1016/j.pecs.2019.06.001.

[11] E. O. Ajala, F. Aberuagba, A. M. Olaniyan, M. A. Ajala, M. O. Sunmonu, dan M. M. Odewole, "Design, construction and performance evaluation of a mini-scale batch reactor for biodiesel production: A case study of shea butter," *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 5, hal. 1066–1075, 2018, doi: 10.14456/sjst-psu.2018.132.

[12] C. V. Viêgas *et al.*, "A route to produce renewable diesel from algae: Synthesis and characterization of biodiesel via in situ transesterification of Chlorella alga and its catalytic deoxygenation to renewable diesel," *Fuel*, vol. 155, no. April, hal. 144–154, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.03.064.

[13] H. Hindarso dan M. Edy, "Biodiesel Production From the Microalgae N annochloropsis by Microwave Using CaO and MgO Catalysts," vol. 4, no. 1, hal. 72–76, 2015, doi: 10.14710/ijred.4.1.72-76.

[14] M. Rafaelina, Y. Rustam, dan S. Amini, "Pertumbuhan Dan Aktivitas Antioksidan Dari Mikroalga," *Bioma*, vol. 11, no. 1, hal. 12, 2015, doi: 10.21009/bioma11(1).2.

[15] E. Y. Nindyawati, I. N. Andriani, dan Y. W. Mirzayanti, "Produksi Biodiesel dari Minyak Mikroalga Chlorella Sp dengan Proses Transesterifikasi Menggunakan Katalis KOH," 2019.

[16] J. Mann, "Transport processes and unit operations," *The Chemical Engineering Journal*, vol. 20, no. 1. hal. 82, 1980, doi: 10.1016/0300-9467(80)85013-1.

[17] K. D. Peters, Max S. Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers: , Ronald West, Max Peters : 0639785503897: Amazon.com: Book*. 1991.