

Prarancang Pabrik Fatty Acid Methyl Ester (FAME) dari Mikroalga *Chlorella* Sp. Untuk Optimalisasi Energi Terbarukan

Rr. Tsaniya Faza Al-machzum Azmi¹, Tun Sriana^{1*}

¹ Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, Jawa Tengah, Indonesia

ABSTRAK

Konsumsi BBM solar subsidi di Indonesia mencapai 17.5 juta kiloliter pada tahun 2023, melebihi kuota sebesar 103.37% berdasarkan data BPH Migas. Untuk mengatasi masalah ketergantungan ini, produksi *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) dari mikroalga *chlorella* sp. menjadi solusi potensial, mengingat kandungan lipid mikroalga yang tinggi (53%) dan waktu pertumbuhan yang cepat (7 hari). Pabrik FAME dirancang dengan kapasitas 12,600 KL/Tahun dirancang untuk memenuhi kekurangan FAME sebesar 0.5% pada tahun 2029. Proses produksi FAME melibatkan konversi minyak nabati melalui reaksi esterifikasi dan transesterifikasi, sementara bahan baku mikroalga dikembangkan menggunakan metode *close pond tubular horizontal photobioreactor*. Perancangan pabrik ini dilakukan dengan metode perhitungan neraca massa dan panas, serta perhitungan desain peralatan kilang, didukung dengan simulasi proses menggunakan *software* Aspen Plus. Hasil simulasi menunjukkan produk utama berupa FAME dengan kemurnian 99.8% dengan kapasitas 38,226 liter/hari, serta produk samping berupa gliserol, padatan alga, dan K₂SO₄. Hasil Analisis ekonomi yakni POT 5.5 tahun, ROI 18.09%, BEP 37.31%, SDP 20.01%, Keuntungan setelah pajak \$21,211,416.27, IRR 17%, dan NPV \$63,351,413.66. Analisis sensitivitas pabrik mampu bertahan 40% kenaikan harga bahan baku dan 10% penjualan produk menurun. Berdasarkan hasil analisis teknis dan ekonomi, pabrik terbukti layak untuk diimplementasikan dengan mempertimbangkan aspek keselamatan proses sebagai bagian dari optimalisasi energi terbarukan.

Kata kunci: Mikroalga *Chlorella* sp., FAME, Esterifikasi, Transesterifikasi, Simulasi Aspen Plus

 tun.sriana@gmail.com

1. Pendahuluan

Ketahanan energi menjadi salah satu isu nasional di Indonesia seiring meningkatnya kebutuhan energi dalam negeri. Konsumsi tersebut didominasi dari sektor transportasi, industri, dan pembangkit listrik. Hal tersebut

dibuktikan dari data BPH Migas yang menyatakan bahwa konsumsi BBM solar subsidi sepanjang 2023 mencapai 17.5 juta kiloliter atau 103.37% melebihi kuota yang ditetapkan [1]. Cadangan bahan bakar fosil akan terus menurun sehingga perlu upaya untuk mengatasi masalah tersebut. Selain memper-

timbangkan faktor kelangkaan, faktor lingkungan juga harus diperhatikan. Kenaikan suhu bumi yang diakibatkan oleh pemanasan global dan emisi gas rumah kaca menjadi penegas untuk kebutuhan energi yang ramah lingkungan [2]. Salah satu solusi potensial adalah penggunaan *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) dari mikroalga yang memiliki kandungan lipid tinggi dan waktu pertumbuhan yang cepat [3].

FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*) adalah bahan bakar biodiesel yang dihasilkan dari transesterifikasi minyak nabati, termasuk minyak yang diperoleh dari mikroalga. Proses transesterifikasi ini mengubah minyak nabati menjadi ester metil asam lemak, yang merupakan komponen utama biodiesel [4]. Mikroalga adalah organisme fotosintetik mikroskopis yang dapat menghasilkan minyak nabati dengan kandungan lipid yang tinggi [5]. Penyebaran dan penggunaan *Fatty Acid Methyl Esters* (FAME) sebagai bahan bakar biodiesel di Indonesia telah berkembang seiring dengan upaya pemerintah untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mempromosikan energi terbarukan.

Biodiesel merupakan bahan bakar nabati yang bersifat *renewable*, *biodegradable*, dan rendah emisi jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Produksi FAME di Indonesia didominasi berbahan baku kelapa sawit. Persaingan bahan baku kelapa sawit terjadi pada sektor pangan dan kebutuhan energi. Oleh karena itu perlu adanya pembaharuan energi yang tidak berdampak pada sektor lain [6].

Perbandingan lahan dan produksi lipid ditampilkan pada Tabel 1. Berdasarkan tabel 1 dapat dilihat bahwa mikroalga memiliki potensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan tumbuhan lain. Mikroalga dapat memproduksi biomassa dua kali lipat selama 24 jam dengan lahan yang relatif kecil. Kandungan minyak dalam biomassa kering mikroalga dapat mencapai 80% beratnya [7]. Namun, secara umum mikroalga dapat menghasilkan lipid sebesar 20-50%. Produktivitas lipid adalah jumlah lipid yang dihasilkan per unit volume mikroalga per hari [7]. Keunggulan lain yang bisa didapatkan dari mikroalga adalah kemampuannya menyerap CO₂ lebih tinggi [8].

Tabel 1. Perbandingan Lahan dan Produksi Lipid [6]

Komoditas	Yield minyak	Area Lahan (ha)
Jagung	172	1540
Kedelai	446	594
Kanola	1190	223
Jarak	1892	140
Kelapa	2689	99
Kelapa sawit	5950	45
Mikroalga	136900	2

Sampai saat ini, produksi FAME di Indonesia saat ini masih didominasi oleh kelapa sawit, yang bersaing dengan sektor pangan. Oleh karena itu, penelitian ini di-fokuskan pada pengembangan pabrik FAME berbahan baku mikroalga untuk mengurangi ketergantungan pada kelapa sawit dan bahan bakar fosil, guna mencapai optimalisasi energi terbarukan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2. Metode

Pada tahap awal penelitian, dilakukan studi literatur mengenai sifat fisik dan kimia

mikroalga untuk memilih jenis yang tepat berdasarkan kandungan minyaknya. Selain itu, pemilihan metode kultivasi yang efektif dan pemilihan proses kilang dilakukan dengan metode konsep *scoring*. Konsep *scoring* merupakan tahapan pemberian nilai berdasarkan kualitas dari subkriteria tiap konsepnya. Dalam metode ini, setiap alternatif konsep diberi nilai atau skor berdasarkan kriteria tertentu, seperti efisiensi, biaya, kemudahan implementasi, dan keberlanjutan. Skor tersebut kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan total nilai, yang digunakan sebagai dasar untuk memilih konsep terbaik.

Metode ini memungkinkan pemilihan yang lebih objektif karena setiap

kriteria konsep dievaluasi secara terukur dan sistematis. Tabel 2 menunjukkan beberapa jenis konversi FAME yang dapat digunakan.

Tabel 2. Proses Konversi FAME [3]

Jalur/Produksi	Bahan Baku	Jenis Bahan Bakar	Generasi	Hambatan dalam Pencampuran
Esterifikasi & Transesterifikasi <i>Hydroprocessing</i>	Kelapa sawit, minyak jelantah jarak pagar, alga	Biodiesel/ <i>Fatty Acid Methyl Ester</i> (FAME) <i>Hydrotreated</i> dan <i>Hydroprocessed Esters & Fatty Acids</i>	Pertama	5% - 10% di sebagian besar negara Tidak Ada

Berdasarkan tabel 2, terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk konversi biomassa mikroalga menjadi FAME yakni esterifikasi, transesterifikasi dan *hydroprocessing*. Metode konsep *scoring* digunakan untuk menentukan metode terbaik. Selain metode yang telah diuraikan sebelumnya, penelitian ini juga menerapkan perhitungan *sizing* peralatan, yang difokuskan pada peralatan utama yang berpengaruh dalam proses, seperti *photobioreactor* (media kultivasi), reaktor, kolom, dan tanki. Selain itu, dilakukan juga perhitungan neraca masa dan neraca panas untuk memastikan keseimbangan energi dalam sistem. Beberapa rumus yang digunakan dalam perhitungan tersebut adalah:

- Menghitung neraca masa [9]
 $Massa\ masuk = Massa\ Keluar$ (1)
 - Menghitung neraca panas [9]
 $Panas\ masuk = Panas\ Keluar$ (2)
 - Menghitung volume photobioreactor [10]
 $Volume = \phi \times r^2 \times panjang$ (3)
 - Menghitung sizing reaktor [11]
1. Menentukan diameter dan tinggi reaktor
 $V_{reaktor} = V_{shell} + V_{head}$
 $V_{shell} = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H$
 $V_{head} = 2 (V_{dish} + V_{sf})$
 $V_{dish} = 0,000049 D^3$
 $V_{sf} = \frac{\pi}{4} \times D^3 \times \frac{sf}{144}$
 $V_{reaktor} = \left(\frac{\pi}{4} \times D^3\right) + (2 \times 0,0164032 D^3)$ (4)

2. Menentukan Tebal Dinding (Shell) Reaktor

$$t_s = \frac{P \cdot r_i}{f \cdot E - 0,6P} + C \quad (5)$$

3. Menentukan Tebal Head

$$t = \frac{0,885 \cdot P \cdot rc}{f \cdot E - 0,1P} + C \quad (6)$$

- Menghitung sizing kolom [12]

1. Menghitung volume vapor

$$V_{vapor} = n_{total} \times \frac{P_o}{P} \times V_{mx} \frac{T}{T_o} \quad (7)$$

2. Menentukan perbandingan massa dan luas permukaan (w/A)

$$\frac{w}{A} = K \sqrt{pv(pl - pv)} \quad (8)$$

3. Menentukan diameter kolom

$$D = \frac{\sqrt{4A}}{\pi} \quad (9)$$

- Menghitung sizing tanki [12]

1. Menentukan jumlah dan volume tanki
 - Volume total stock : Kapasitas x ketahanan stock
 - Jumlah tanki : tergantung perusahaan
 - Volume tiap tanki : volume total/ jumlah tanki

2. Menentukan pemilihan tinggi tanki

3. Menentukan diameter tanki

$$Luas\ penampang = \frac{Tinggi\ efektif}{Volume\ tiap\ tanki} \quad (10)$$

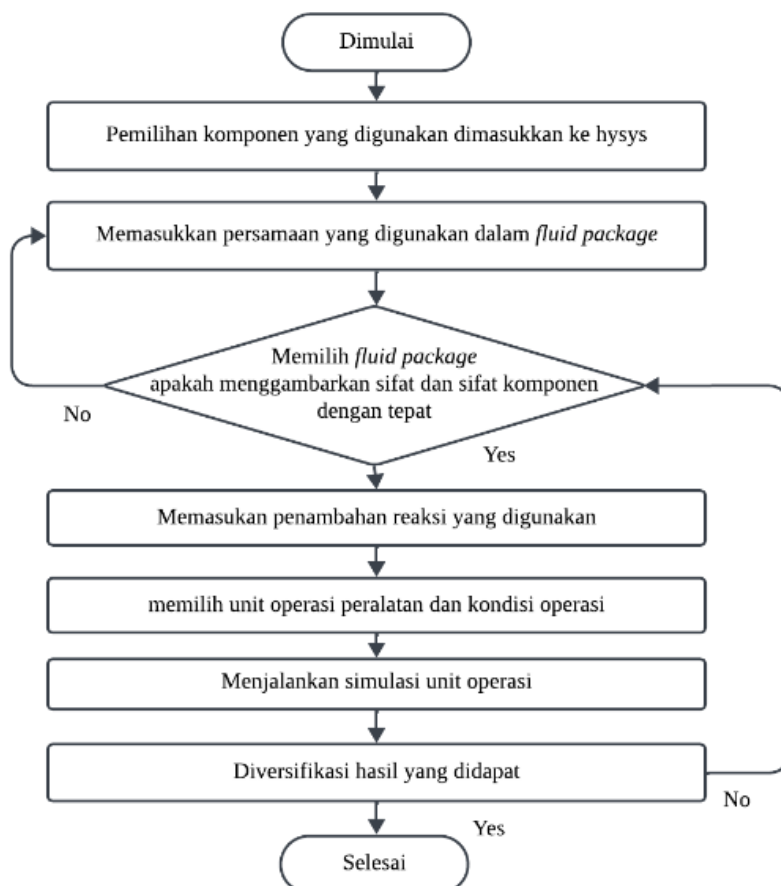
$$Diameter\ tanki = \sqrt[2]{\frac{4 \times luas\ penampang}{\pi}} \quad (11)$$

4. Menentukan tinggi *bundwall*

$$\text{Diameter bundwall} = \sqrt[2]{\text{luas penampang}} \quad (12)$$

Metode simulasi proses dilakukan dengan *software* aspen plus. Variabel operasi yang di-

input berdasarkan hasil perhitungan neraca massa, neraca panas, dan desain peralatan. Selain itu, untuk parameter operasi lainnya ditetapkan berdasarkan studi literatur. Gambar 1 menunjukkan alur kerja dalam melakukan simulasi proses.



Gambar 1. *Flowchart* Proses Simulasi Pembuatan FAME Menggunakan Simulator Aspen Plus

Flowchart ini menggambarkan alur kerja dalam melakukan simulasi proses. Proses dimulai dengan pemilihan komponen, persamaan reaksi, penambahan unit operasi, dan kondisi operasi. Hasil simulasi kemudian dievaluasi dan diversifikasi jika diperlukan. Metode penelitian ini melibatkan simulasi kondisi operasi berdasarkan hasil perhitungan untuk memastikan kesesuaiannya, serta membandingkan hasil perhitungan dengan hasil simulasi menggunakan Aspen Plus.

3. Hasil

Kandungan minyak mikroalga yang tinggi merupakan salah satu alasan untuk dikem-

bangkannya produksi FAME. Kandungan asam lemak disetiap mikroalga menghasilkan karakteristik yang berbeda, sehingga perlu memilih jenis yang tepat. Tabel 3 menunjukkan bahwa *chlorella sp.* adalah jenis mikroalga yang terkenal dengan kandungan minyaknya yang tinggi [13]. Jenis mikroalga ini cocok untuk dibudidayakan di Indonesia karena kemudahan pengembangbiakan di daerah tropis. Beberapa mikroalga lain memiliki kandungan minyak yang lebih tinggi dari *chlorella* seperti *Botryococcusbraunii*. Namun jenis mikroalga tersebut tidak cocok dikembangkan karena memiliki massa pertumbuhan yang lambat. Dengan demikian, je-

nis mikroalga terpilih adalah jenis mikroalga *chlorella sp.*

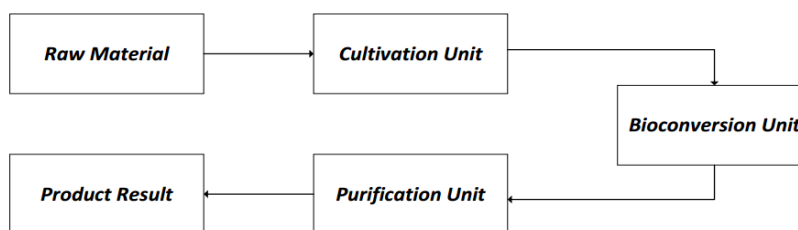
Tabel 3. Kandungan Minyak Mikroalga [13]

Jenis Mikroalga	Kandungan minyak (%)	Produktivitas lipid (mgL ⁻¹ hari ⁻¹)
<i>Chlorella sp.</i>	28–53	42.1
<i>Botryococcusbraunii</i>	25–75	5.50
<i>Nannochloropsis hal</i>	31–68	54.80
<i>Scenedesmus obliquus</i>	30–50	40–54
<i>Pavlova salina</i>	12–30	34.8
<i>Chlamydomonas sp.</i>	21–27	10–20
<i>Phorphyridium cruentum</i>	9–14	34.80

Penentuan lokasi pembangunan pabrik menjadi salah satu faktor penting. Perancangan pabrik direncanakan akan berdiri di Tegal, Jawa Tengah. Pertimbangan pemilihan Tegal sebagai tempat pendirian pabrik adalah adanya potensi bibit mikroalga *chlorella sp.* di waduk cacaban sebesar 47.896% [14]. Selain itu, lahan di daerah Tegal didominasi perkebunan dan persawahan sehingga memungkinkan untuk didirikannya pabrik. Keterseediaan energi dan utilitas air penunjang pabrik juga tersedia.

Penentuan kapasitas pabrik FAME dilakukan berdasarkan data konsumsi solar dan produksi FAME di Indonesia. Berdasarkan data konsumsi solar subsidi 3 tahun terakhir, dila-

kukan proyeksi konsumsi solar pada tahun 2029 yang diperkirakan mencapai 25.813 juta KL. Dengan mempertimbangkan produksi FAME saat ini, terdapat kekurangan produksi sebesar 8.0339 KL pada tahun 2029. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, dibutuhkan kapasitas produksi tambahan sebesar 35% dari kekurangan tersebut, yaitu 2.8118 juta KL. Pabrik biodiesel yang tergolong baru akan mengambil sekitar 0.5% dari kekurangan yakni 12,610 KL yang akan dipenuhi melalui bahan baku mikroalga. Perancangan awal unit proses adalah mendesain blok flow diagram proses pembuatan FAME. Tujuan adanya BFD adalah untuk memperjelas alur proses. Gambar 2 menunjukkan alur proses *block flow diagram* (BFD).



Gambar 2. Blok Flow Diagram Proses FAME

Berdasarkan BFD tersebut, terdapat lima tahapan utama dalam proses pembuatan FAME. Tahap pertama adalah pengolahan *raw material*, di mana inokulan mikroalga *chlorella sp.* dipantau kualitasnya di laboratorium dan dihitung kuantitasnya sesuai dengan media perkembangbiakan. Tahapan kedua adalah *cultivation unit*, di mana inokulan mikroalga berkembang biak selama 7 hari da-

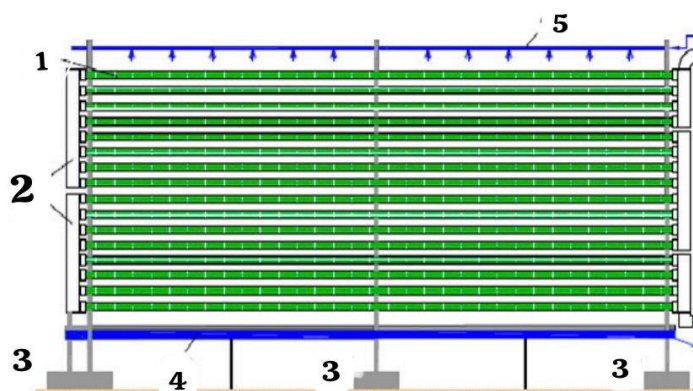
lam *photobioreactor*. Selain itu, tahap ini juga dilakukan flokulasi dan pemisahan padatan mikroalga dan air. Tahapan ketiga adalah *bioconversion unit*, di mana konversi biomas menjadi minyak dan FAME. Tahapan keempat adalah *purification unit* yang bertujuan untuk pemurnian produk dari pengotor berupa air dengan metode distilasi. Tahapan kelima adalah *testing unit*, di mana

kualitas produk diuji sesuai standar SNI yang berlaku. Tahapan terakhir adalah *product result*, di mana produk yang telah melalui tahap pengujian dan memenuhi standar siap untuk didistribusikan kepada konsumen.

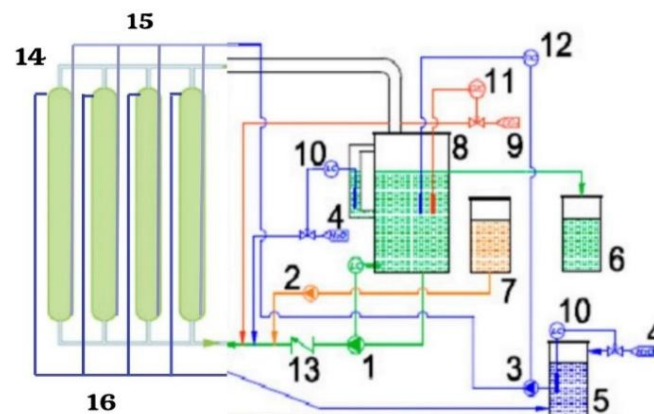
Setelah melakukan desain proses secara umum, perlu dilakukan pemilihan metode kultivasi dan proses konversi dengan konsep *scoring*. Pemilihan proses dilakukan pada 2 metode konversi. *Hydroprocessing* cenderung menghasilkan FAME dengan kualitas yang lebih tinggi, termasuk stabilitas oksidasi yang lebih baik dan kemampuan untuk memenuhi standar emisi yang ketat, sementara transesterifikasi mungkin memiliki kualitas produk yang lebih bervariasi tergantung pada kualitas bahan baku dan kondisi reaksi. Transesterifikasi umumnya lebih murah dan lebih sederhana dari segi infrastruktur dan operasi. Di sisi lain, *hydroprocessing* memerlukan investasi yang lebih besar dalam peralatan dan operasi, sehingga biayanya lebih tinggi dan prosesnya lebih kompleks. Transesterifikasi umumnya lebih fleksibel dalam hal bahan baku yang dapat digunakan, sementara *hydroprocessing* memerlukan bahan baku yang lebih murni. Dengan demikian, hasil pemilihan proses pada 2 metode kon-

versi menunjukkan esterifikasi transesterifikasi memiliki nilai yang lebih unggul sehingga proses tersebut yang dipilih. Berdasarkan hasil konsep *scoring* dari pemilihan metode kultivasi mikroalga, metode kultivasi yang digunakan adalah *Close Pond Tubular Horizontal Photobioreactor Outdoor* karena memiliki nilai yang lebih unggul dalam hal produktivitas, kualitas, dan kebutuhan lahan yang minim [10]. Gambar 3 dan 4 menunjukkan detail desain *photobioreactor*.

Close pond tubular horizontal photobioreactor terdiri dari beberapa komponen penting. Pipa kaca (1) digunakan untuk menampung dan mengedarkan media kultur yang dibutuhkan untuk pertumbuhan alga. *Manifold* (2) bertujuan untuk mendistribusikan medium kultur secara merata melalui pipa kaca. Pipa-pipa ini ditopang oleh penyangga pipa (3) yang memastikan pipa-pipa tersebut stabil dan tersusun dengan baik. Air pendingin dikumpulkan oleh kolektor air pendingin (4) yang membantu mengatur suhu di dalam pipa. Selain itu, pipa pendingin yang dilengkapi dengan penyemprot (5) menyemprotkan air untuk membantu menjaga suhu yang diinginkan dalam sistem. Gambar 4 menunjukkan *photobioreactor* dalam 1 sistem.



Gambar 3. Detail *Close Pond Tubular Horizontal Photobioreactor*



Gambar 4. *Close Pond Tubular Horizontal Photobioreactor*

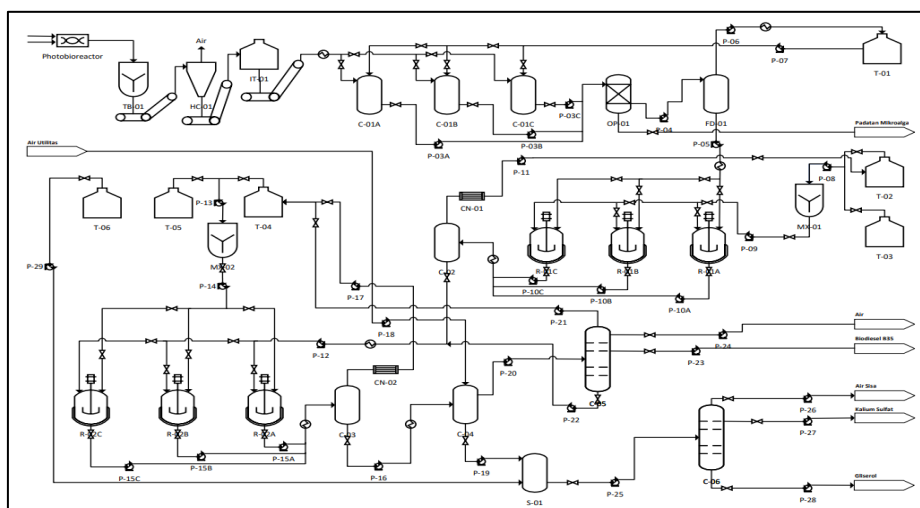
Reaktor fotobiologi horizontal tubular tertutup ini dilengkapi dengan beberapa komponen penting. Pompa kultur (1) digunakan untuk mengedarkan medium kultur, sedangkan pompa nutrisi (2) bertugas menambahkan nutrisi ke dalam sistem. Pompa air pendingin (3) mengalirkan air dari inlet air (4) ke tangki air pendingin (5). Biomassa yang dipanen disimpan dalam tangki biomassa (6), sementara nutrisi disimpan dalam tangki nutrisi (7). Tangki degasser (8) berfungsi untuk menghilangkan gas dari medium kultur, dengan CO₂ masuk melalui inlet CO₂ (9). *Level controller* (10) mengatur ketinggian medium, indikator pH *controller* (11) memantau kadar pH, dan indikator *temperature controller* (12) memantau suhu. Katup non-kembali (13) memastikan aliran medium satu arah. Sistem ini juga terdiri dari pipa kaca (14), pipa pendingin dengan penyempit

(15), dan kolektor air pendingin (16) untuk menjaga suhu yang stabil dalam reaktor.

Setelah mengetahui metode kultivasi dan konversi proses yang tepat, perhitungan ukuran untuk peralatan *photobioreactor*, reaktor, kolom, dan tangki dapat menunjang prarancang pabrik. Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan peralatan tersebut berdasarkan rumus yang tercantum pada bagian metodologi. Berdasarkan tabel 4, perhitungan menunjukkan bahwa perbandingan diameter dan tinggi dari setiap peralatan tidak jauh berbeda, sehingga keselamatan dalam pengoperasian alat dapat dikendalikan. Tahap selanjutnya dalam desain pabrik adalah menentukan diagram alur proses dengan pemilihan peralatan yang tepat. Gambar 5 menunjukkan diagram alur proses tersebut.

Tabel 4. Rekapitulasi hasil perhitungan peralatan kilang

Peralatan	Volume	Diameter	Tinggi
<i>Photobioreactor</i>	816.7 liter	25.5 cm	-
Reaktor Esterifikasi	2184.4 liter	1.38 m	1.38 m
Reaktor Transesterifikasi	2772.03 liter	1.5 m	1.5 m
Kolom Purification C5	12783.83 ft ³	2.2 m	4.47 m
Kolom Purification C6	10665 ft ³	1.35 m	2.79 m
Tanki produk FAME	3149.9 ft ³	6.2 m	4.87 m
Tanki Padatan Mikroalga	351.39 ft ³	3.88 m	2.44 m
Tank Gliserol	234.37 ft ³	3.16 m	2.43 m



Gambar 5. *Process Flow Diagram*

FAME diproduksi secara semi kontinu dengan bahan baku mikroalga *chlorella sp.* Mikroalga ini dikultivasi selama 7 hari dengan menggunakan *photobioreactor* yang terdiri dari 4 pipa yang terhubung ke 1 sistem. Setiap harinya, dibutuhkan 196011.36 liter bahan baku yang setara dengan 3 sistem *photobioreactor*. Air digunakan sebagai medium perkembangbiakan alga dan dialirkan melalui pipa. Untuk mengurangi biaya operasi proses, sebagian air didapatkan dari hasil pemisahan *hydrocyclone*. Selain itu, unit utilitas juga diperlukan untuk menunjang produksi dan mengurangi biaya produksi. Alga akan mengendap di bagian bawah *hydrocyclone* dan diperoleh sebagai produk *underflow*. Sedangkan sebagian besar air akan terpisah di bagian atas *hydrocyclone*. Air akan diperoleh sebagai *supernatant* pada *overflow*.

Minyak dari mikroalga diekstraksi dengan pelarut n-heksan pada rasio 1:6 (w/v) selama 1 jam pada suhu 70°C. Proses ekstraksi berlangsung secara semi kontinu dilakukan menggunakan 3 ekstraktor secara bergantian untuk memenuhi kebutuhan produksi. Selain itu, 3 ekstraktor memudahkan adanya tahapan pembersihan, persiapan, dan *running*. Ekstraksi ini menghasilkan minyak sebesar 82% dari total lipid. Sisa padatan yang masih mengandung minyak diekstraksi dengan menggunakan *oil press machine*, menghasil-

kan tambahan 91% minyak dari padatan alga. Padatan alga akan dikeringkan dengan sinar matahari dan dapat dijual sebagai alga biomass yang bermanfaat bagi pakan ikan. Minyak yang masih bercampur dengan n-heksan dan sedikit air akan dihilangkan kandungan pelarutnya dengan cara dipisahkan menggunakan *flash drum*. Hasil atas *flash drum* berupa n-heksan akan *direcycle* sedangkan hasil bawah *flash drum* yaitu minyak alga dapat diproses lebih lanjut untuk mendapatkan FAME.

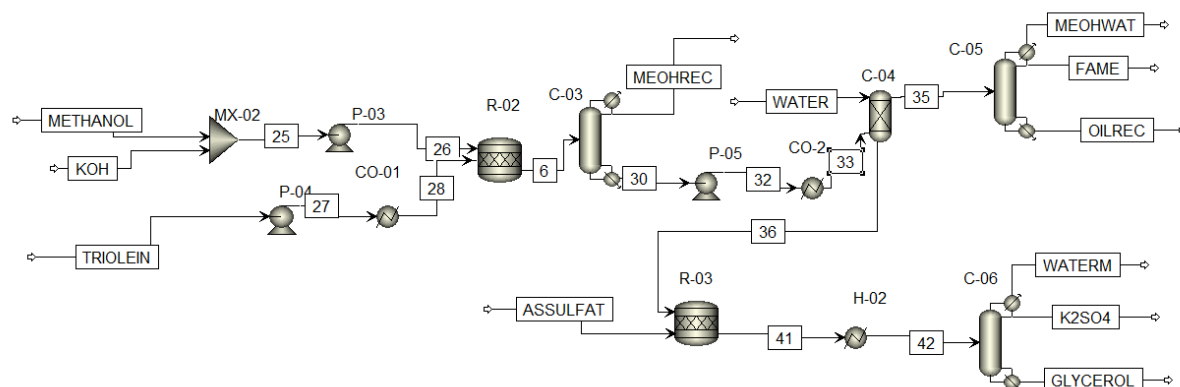
Minyak mikroalga, yang terdiri dari 15% FFA dan 85% trigliserida, diproses melalui esterifikasi dan transesterifikasi. Minyak direaksikan dengan metanol dalam *continuous stirred tank reactor* (CSTR) dengan perbandingan molar 1:40 menggunakan katalis asam, menghasilkan konversi asam lemak sebesar 97%. Metanol yang tidak bereaksi diregenerasi dan *direcycle*. Hasil akhirnya adalah metil ester dan gliserol. Gliserol dipisahkan menggunakan kolom ekstraksi dan dimurnikan hingga konsentrasi 99,99%. Produk metil ester juga dimurnikan hingga kemurnian mencapai 99,8% dan didistribusikan. Adapun neraca masa dan neraca panas perlu dihitung untuk mengetahui proses berlangsung secara seimbang. Tabel 5 menunjukkan nilai hasil perhitungan neraca masa dan neraca panas.

Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Neraca Masa dan Neraca Panas

Peralatan	Neraca Masa		Neraca Panas	
	Masuk (Kg/hr)	Keluar (Kg/hr)	Masuk (KJ/hr)	Keluar (KJ/hr)
Tanki Bioreactor	7351.16	7351.16	0	0
Hydrocyclone	7351.16	7351.16	0	0
Heater	1470.23	1470.23	143238.29	148000
Ekstraktor	10291.62	10291.62	0	0
Oil Press Machine	10291.62	10291.62	17370000	17000000
Flash Drum	10079.02	10079.02	0	0
Mixer	296.08	296.08	0	0
Reak Esterifikasi	1615.02	1615.02	139337.98	127957.78
Kolom regenerasi	1615.02	1615.02	249154.14	330210.80
Cooler	1453.51	1453.51	144694.16	106191.70
Reaktor Transester	2049.46	2049.46	159424.35	184064.79
Kolom Pury FAME	1464.07	1464.07	67475.21	296622.46
Kolom Pury Glyc	1760.94	1760.94	7130	2190

Berdasarkan tabel 5 di atas, neraca masa yang masuk sama dengan neraca masa keluar pada setiap alat. Sementara itu, perhitungan neraca panas tidak sama karena adanya *heat duty* dari *reboiler*, *condenser*, steam, dan reaksi panas. Pembuktian proses pembuatan FAME

dengan metode esterifikasi dan transesterifikasi, dilakukan dengan simulasi proses sederhana menggunakan aplikasi simulator Aspen Plus. Gambar 6 menunjukkan alur diagram proses pada simulator proses.



Gambar 6. Simulasi Aspen Plus

Adapun berdasarkan simulasi yang ditampilkan pada gambar 6, kemurnian produk FAME mencapai 99.8% dan kemurnian produk gliserol mencapai 99.9%. Dalam simulasi masih mengalami kendala dalam pengoperasian dan kandungan awal dari minyak mikroalga *chlorella sp.* sehingga simulasi dilakukan setelah terbentuk Triolein (Triglicerida).

Analisis ekonomi adalah analisis yang penting dalam menentukan kelayakan dari suatu pa-

brik. Secara khusus, analisis ekonomi yang dimaksud adalah penilaian rencana proyek investasi dari segi finansial. Analisis ekonomi yang akan dibahas adalah *Total Capital Investment* (TCI), *Total Production Cost* (TPC), *Cash Flow*, analisis profitabilitas, BEP, SDP, dan analisis sensitifitas. Tabel 6 menunjukkan rekapitulasi hasil perhitungan analisis ekonomi dari prarancang pabrik FAME dari mikroalga *chlorella sp.*

Tabel 6. Rekapitulasi Perhitungan Analisis Ekonomi

Parameter	Simbol	Nilai
<i>Asset Life</i>	N	20 Tahun
<i>Fixed Capital Investment</i>	FCI	\$101,942,026.39
<i>Working Capital</i>	WC	\$15,291,303.96
<i>Total Capital Investment</i>	TCI	\$117,233,330.35
<i>Total Production Cost</i>	TPC	\$59,031,261.00
<i>Revenue</i>	R	\$94,569,578.71
<i>Earning Before Tax</i>	EBT	\$30,302,023.24
<i>Earning After Tax</i>	EAT	\$21,211,416.27
<i>Payout Time</i>	POT	5.5
<i>Return on Investment</i>	ROI	18.09%
<i>MARR</i>	Mar	16%
<i>Break Event Point</i>	BEP	37.31%
<i>Shutdown Point</i>	SDP	20.01%
<i>Interest Rates</i>	I	10%
<i>Net Present Value</i>	NPV	\$63,351,413.66

Dari tabel 6 didapatkan bahwa pabrik FAME menunjukkan hasil analisis ekonomi yang baik. Pabrik dengan total investasi \$117,233,330.35 dan pendapatan tahunan mencapai \$94,569,578.71, pabrik ini memiliki nilai NPV yang positif dan ROI 18.09%, yang lebih tinggi dari suku bunga bank, menunjukkan prospek

yang menjanjikan. Waktu pengembalian modal sekitar 5.5 tahun, dengan nilai risiko yang rendah yaitu BEP 37.31% dan 20.01% mengindikasikan kelayakan finansial yang kuat. Tabel 7 dan 8 menunjukkan analisis sensitivitas dari produk terhadap pembangunan pabrik.

Tabel 7. Pengaruh Parameter Profitabilitas Terhadap Deviasi Harga Bahan Baku

Deviasi	0%	20%	40%	60%
ROR (%)	18.09%	15.69%	13.28%	10.88%
POT (Tahun)	5.5	6.374142957	7.5	9.2
NPV	\$63.351.413,66	\$39.348.257,90	\$15.345.102,15	-\$8.658.053,60
IRR	17%	15%	12%	8.9%

Tabel 7 menunjukkan bahwa analisis sensitivitas mengenai harga penjualan produk. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak perubahan harga jual produk dan deviasi harga penjualan produk terhadap profitabilitas proyek, dengan menggunakan indikator ROR (*Return on Investment*), POT (*Payback Period*), NPV (*Net Present Value*), dan IRR (*Internal Rate of Return*). Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa pabrik mampu bertahan 40% kenaikan harga bahan baku. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai NPV

yang menunjukkan nilai positif, sedangkan pada angka kenaikan 60% angka NPV sudah menunjukkan nilai negatif.

Tabel 8 menunjukkan analisis sensitivitas mengenai penurunan harga jual produk. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa pabrik mampu bertahan ketika 10% penjualan produk menurun. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai NPV yang menunjukkan nilai positif, sedangkan pada angka penurunan 15% angka NPV sudah menunjukkan nilai negatif.

Tabel 8. Pengaruh Parameter Profitabilitas Terhadap Deviasi Harga Jual Produk

Deviasi	0%	-5%	-10%	-15%
ROR (%)	18.09%	15.27%	12.45%	6.80%
POT (Tahun)	5.5	6.548806227	8.0	14.7
NPV	\$63.351.413,66	\$35.172.068,96	\$6.992.724,26	-\$49.365.965,14
IRR	17%	14%	11%	3%

4. Diskusi

Penelitian ini menyatakan bahwa *Chlorella* sp. memiliki kandungan lipid yang cukup tinggi untuk produksi biodiesel, meskipun lebih rendah dari beberapa mikroalga lain yang telah diuji. Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh Gultom, 2018 yang juga melaporkan potensi *Chlorella* sp. sebagai sumber biodiesel. Namun, beberapa studi terdahulu menunjukkan hasil yang lebih bervariasi, yang dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi budidaya dan metode ekstraksi yang digunakan dalam setiap penelitian. Faktor seperti konsentrasi nutrisi dan pencahayaan diketahui dapat mempengaruhi kandungan lipid, yang mengindikasikan perlunya kontrol variable yang lebih ketat di masa depan.

Keterbatasan penelitian ini terutama terletak pada pembahasan skala laboratorium, yang belum tentu dapat mencerminkan efisiensi di skala industri. Implikasi dari penelitian ini adalah perlunya pengembangan metode budidaya yang dapat meningkatkan kesetabilan hasil, serta evaluasi metode konversi yang lebih efisien. Dengan demikian, penelitian ini dapat menunjukan produksi biodiesel yang berkelanjutan.

5. Simpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan analisis data, prarancang pabrik *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) dari mikroalga *Chlorella* sp. menunjukkan kelayakan tinggi untuk direalisasikan. FAME dihasilkan melalui proses esterifikasi dan transesterifikasi minyak nabati dengan kapasitas produksi 12,600 KL/tahun. Mikroalga *Chlorella* sp. dipilih sebagai bahan baku utama karena kandungan minyaknya yang tinggi, produktivitas lipid

yang baik dan masa panen yang relatif singkat, yaitu 7 hari. Pabrik yang direncanakan berlokasi di Tegal, Jawa Tengah, berdekatan dengan sumber bahan baku di Waduk Cacaban, menjadikannya strategis secara geografis dan mengurangi biaya logistik. Proses konversi dilakukan dengan teknologi *close pond tubular horizontal photobioreactor*, yang memastikan produktivitas tinggi dan efisiensi konversi. Produk utama yang dihasilkan adalah FAME dengan kemurnian 99.8% sebanyak 38,226 liter/hari, serta produk samping berupa gliserol, K_2SO_4 , dan alga kering yang memiliki nilai ekonomis tambahan. Hasil simulasi dengan aplikasi Aspen Plus menunjukkan bahwa proses ini mampu menghasilkan produk dengan tingkat kemurnian yang tinggi dan konsumsi energi yang efisien. Hasil Analisis ekonomi yakni POT 5.5 tahun, ROI 18.09%, BEP 37.31%, SDP 20.01%, Keuntungan setelah pajak \$21,211,-416.27, IRR 17%, dan NPV \$63,351,413.66. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa pabrik mampu bertahan 40% kenaikan harga bahan baku dan 10% penjualan produk menurun. Perlu dilakukan studi lanjutan untuk mempertimbangkan lebih jauh aspek keselamatan dan perancangan skala laboratorium. Dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi dan dampak lingkungan, prarancang pabrik ini layak untuk mewujudkan secara optimal dan berpotensi mendukung pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

Referensi

- [1] M. Syaharani, "BPH Migas: Konsumsi Solar 2023 Overkuota, Peralite Hanya 92%," *Katadata.co.id*, 2024. <https://katadata.co.id/berita/energi/659bda200232d/bph-migas->

- konsumsi-solar-2023-overkuota-pertalite-hanya-92 (accessed Sep. 22, 2024).
- [2] J. I. Nurdiana, N. Candrahanifa, N. Kamilalita, and E. N. Hidayah, "Perbandingan Antara Mikroalga *Chlorella* sp dan *Spirulina* plantesis dalam Penurunan Nitrat Fosfat pada Air Limbah Domestik Menggunakan Oxidation Ditch Algae Reactor (Odar)," *Pros. ESEC*, vol. 2, no. 1, pp. 14–19, 2021.
- [3] Gunawan, "Keragaman Dan Karakterisasi Mikroalga Dari Sumber Air Panas Yang Berpotensi Sebagai Sumber Biodiesel," Institut Pertanian Bogor, 2010.
- [4] T. P. P. Dewi, T. Usman, and H. Harlia, "Transesterifikasi Langsung Mikroalga *Chlorella* Sp. Dengan Katalis Abu Tandan Kosong Sawit Yang Diimpregnasikan Pada Zeolit," *JKK J.*, vol. 4, no. 2, pp. 37–43, 2015.
- [5] S. O. Gultom, "Mikroalga: Sumber Energi Terbaru Masa Depan," *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, p. 95, 2018, doi: 10.21107/jk.v11i1.3802.
- [6] Surani and C. P. Asmoro, "Pengaruh Jenis Pelarut Pada Ekstraksi Asam Lemak Dari Mikroalga," *Integr. Lab J.*, vol. 10, no. 1, pp. 48–54, 2022.
- [7] Y. I. Mandik, A. E. Maryuni, F. A. Asmuruf, and B. Cheirsilp, "Investigasi Beberapa Parameter Penentu dalam Proses Flokulasi Mikroalga Laut *Chlorella* sp," *J. LPPM Bid. Sains dan Teknol.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–5, 2022.
- [8] H. Wang, X. Yang, and X. Ou, "A Study on Future Energy Consumption and Carbon Emissions of China's Transportation Sector," *Low Carbon Econ.*, vol. 05, no. 04, pp. 133–138, 2014, doi: 10.4236/lce.2014.54014.
- [9] C. J. Geankoplis, "Transport Processes and Unit Operations." Prentice-hall inc A Simon & Schuster Company, New Jersey, 1978, [Online]. Available: <https://www.pearson.com/us/higher-education/product/Geankoplis-Transport-Processes-and-Unit-Operations-3rd-Edition/9780139304392.html>.
- [10] A. T. S. Haji, Sutan, J. B. R. W, and M. Khotimah, "Desain Fungsional GREEN ROOF ALGAE sebagai Media Kultivasi Mikroalga (*Chlorella* sp) dengan Nutrien Limbah Cair Industri Tahu," *J. Keteknikan Pertan. Trop. dan Biosist.*, vol. 6, no. 1, pp. 79–89, 2018.
- [11] D. Attwood *et al.*, "Process Equipment Design," *Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries*. pp. 31–35, 2006, doi: 10.1002/9780470118849.ch4.
- [12] R. K. Sinnott, *Chimal Engineering Design*. Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [13] H. A. Christiani, I. Ilalqisny, and A. H. Hexa, "Pertumbuhan Mikroalga Hasil Budidaya Skala Laboratorium dengan Media Kultur Limbah Cair Tapioka," in *Prosiding Seminar Nasional*, 2017, pp. 834–844.
- [14] D. Setyowati, D. R. U. S. Rahayu, and A. S. Piranti, "Struktur Komunitas Fitoplanton di Waduk Cacaban Kabupaten Tegal," *BioEksakta J. Ilm. Biol. Unsoed*, vol. 3, no. 3, pp. 163–175, 2021.