

## OPTIMASI PRODUKSI BIODIESEL BERBASIS MINYAK NABATI MENGGUNAKAN ASPEN HYSYS

### OPTIMIZATION OF VEGETABLE OIL-BASED BIODIESEL PRODUCTION BY USING ASPEN HYSYS

Firda Dimawarnita<sup>1\*)</sup>, Afifah Nur Arfiana<sup>1)</sup>, Sri Mursidah<sup>1)</sup>, Syarifah Rohana Maghfiroh<sup>1)</sup>, Prayoga Suryadarma<sup>2\*)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Pascasarjana Teknik Industri Pertanian, Institut Pertanian Bogor

<sup>2)</sup>Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor

Jl. Raya Dramaga, Babakan, Dramaga, Bogor 16680, Indonesia

\*E-mail: [dimawarnitafirda@apps.ipb.ac.id](mailto:dimawarnitafirda@apps.ipb.ac.id); [prayoga@apps.ipb.ac.id](mailto:prayoga@apps.ipb.ac.id)

Makalah: Diterima 16 Februari 2021; Diperbaiki 29 Maret 2021; Disetujui 20 April 2021

#### ABSTRACT

*Biodiesel is a mono-alkyl ester derived from fatty acids that produced from vegetable oil or animal fat. It is known to be environmentally friendly, does not pollute the air, easily biodegradable, and renewable. Therefore, biodiesel has great prospects to develop in overcoming the limited oil production. Esterification of fatty acids contained in vegetable oil is one way to produce biodiesel. Then, transesterification process separates glycerin from vegetable oil. Based on SNI 7182: 2015, the minimum purity standard for biodiesel is 96.5%. The high purity standard is a challenge in designing the biodiesel production process. Therefore, we need a biodiesel production process design for optimization. Optimization process must consider the composition of the material, the type of reaction, the type of reactor, and the material stream in order to produce the higher purity of biodiesel. This study aimed to optimize biodiesel production through process simulation. The expected biodiesel product was methyl oleate (C<sub>19</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>) with triolein (C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>) as feed. Simulations were carried out using the HYSYS software for three different scenarios. The simulation results were expected to provide an overview of the design of the biodiesel production process that can meet the purity standard. Based on the three simulated scenarios, the 3rd scenario was chosen as the best biodiesel production process with a purity of 96.5%. In addition, the heat exchanger was used to help reduce the energy requirement from outside the system.*

*Keywords: biodiesel, hysys, production optimization, vegetable oil*

#### ABSTRAK

Biodiesel merupakan mono-alkil ester yang berasal dari asam lemak minyak nabati atau lemak hewan, sehingga ramah lingkungan, tidak mencemari udara, mudah terbiodegradasi, dan dapat diperbaharui. Oleh karena itu, biodiesel sangat prospektif untuk dikembangkan dalam mengatasi permasalahan terbatasnya produksi minyak bumi. Salah satu cara untuk memproduksi biodiesel adalah melalui proses esterifikasi asam lemak minyak nabati atau proses transesterifikasi trigliserida dengan alkohol untuk membentuk metil ester dan gliserol. Berdasarkan SNI 7182:2015, kemurnian biodiesel adalah minimal 96,5%. Tingginya standar kemurnian yang ditetapkan menjadi tantangan dalam melakukan rekayasa perancangan proses produksi biodiesel. Oleh karena itu, diperlukan suatu perancangan proses produksi biodiesel untuk optimasi. Optimasi dilakukan dengan memperhatikan komposisi bahan, jenis reaksi, jenis reaktor yang digunakan, dan aliran bahan agar dapat memengaruhi hasil produksi biodiesel. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi produksi biodiesel melalui simulasi proses agar dihasilkan biodiesel yang memenuhi standar kemurnian. Produk biodiesel yang diharapkan berupa metil oleat (C<sub>19</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>) dengan umpan berupa triolein (C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>). Simulasi dilakukan menggunakan *software HYSYS* dalam tiga skenario yang berbeda. Hasil simulasi diharapkan dapat memberikan gambaran desain proses produksi biodiesel yang dapat memenuhi standar kemurnian. Berdasarkan tiga skenario simulasi, skenario ke-3 terpilih sebagai proses produksi biodiesel terbaik dengan kemurnian sebesar 96,5%. Selain itu, penggunaan penukar panas membantu mengurangi kebutuhan energi dari luar sistem.

Kata kunci: biodiesel, optimasi produksi, minyak nabati, hysys

#### PENDAHULUAN

Kebutuhan bahan bakar minyak bumi terus naik seiring dengan meningkatnya konsumsi energi dunia. Namun peningkatan tersebut tidak diimbangi oleh persediaan minyak bumi yang memadai. Hal ini disebabkan minyak bumi merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui karena proses pembentukannya memerlukan waktu yang cukup

lama. Bahan bakar ini diperkirakan akan habis jika dieksploitasi terus-menerus, sehingga dibutuhkan suatu alternatif sumber energi yang dapat diperbaharui. Salah satu sumber energi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif adalah biodiesel (Hindryawati *et al.*, 2014). Biodiesel merupakan mono-alkil ester yang berasal dari asam lemak minyak nabati atau lemak hewani sehingga ramah lingkungan. Emisi gas buang dari pembakaran

biodiesel relatif lebih rendah dibandingkan emisi bahan bakar konvensional. Jika diproduksi secara efisien, biodiesel bahkan mendekati netral karbon (Janajreh *et al.*, 2015).

Biodiesel dapat diproduksi melalui sintesis dari asam lemak yang berasal dari minyak nabati seperti minyak kelapa sawit, kedelai, bunga matahari, kacang tanah, jarak pagar dan beberapa jenis minyak tumbuhan lainnya. Pada umumnya biodiesel disintesis dari ester asam lemak dengan rantai karbon antara C6-C22. Salah satu cara untuk memproduksi biodiesel adalah dengan esterifikasi asam lemak minyak nabati atau transesterifikasi trigliserida dengan alkohol. Proses ini menghasilkan dua produk yaitu metil ester (biodiesel) dan gliserin yang merupakan produk samping (Rahayu, 2005).

Komponen utama minyak nabati adalah trigliserida yang merupakan ikatan rangkap asam lemak jenuh dan tak jenuh. Tiap jenis minyak nabati memiliki komposisi asam lemak yang berbeda-beda. Sebagai contoh minyak sawit mengandung asam lemak jenuh dan tak jenuh dalam jumlah yang sama. Kandungan asam lemak terdiri dari asam oleat 42%, linoleat 9%, palmitat 43%, stearat 4%, dan miristat 2% (Bailey, 1996). Namun, berdasarkan SNI 7182:2015, kemurnian biodiesel minimal yang ditetapkan adalah sebesar 96,5%.

Tingginya standar kemurnian yang ditetapkan menjadi tantangan dalam melakukan rekayasa perancangan proses produksi biodiesel agar diperoleh tingkat kemurnian biodiesel yang optimal. Oleh karena itu diperlukan suatu pemilihan proses produksi biodiesel serta simulasi prosesnya dengan memperhatikan komposisi bahan, jenis reaksi, jenis reaktor yang digunakan, dan aliran bahan yang dapat mempengaruhi hasil produksi biodiesel. Pemilihan proses akan menjadi dasar untuk melakukan simulasi proses. Melalui simulasi proses, optimasi kemurnian biodiesel dapat dilakukan. Untuk melakukan optimasi proses, maka diperlukan serangkaian simulasi *trial error* baik dalam perhitungan parameter maupun jenis peralatan yang digunakan dalam produksi biodiesel.

Riset ini bertujuan untuk mengoptimasi proses produksi biodiesel yang berfokus pada kemurnian. Namun untuk melakukan optimasi proses produksi biodiesel, diperlukan serangkaian simulasi untuk mengetahui apakah suatu proses produksi dapat bekerja dan menghasilkan produk yang diharapkan. Salah satu perangkat yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi proses adalah *software HYSYS*. Menurut Sopurta *et al.* (2014), HYSYS merupakan perangkat lunak buatan *Aspen Technologies Inc.* yang sangat berguna dalam *process sizing* dan simulasi. HYSYS mampu memodelkan suatu sistem proses secara detail. Dengan menggunakan program tersebut, maka perhitungan yang kompleks dapat diselesaikan secara efisien. Dari sejumlah simulasi proses yang akan dilakukan, diharapkan diperoleh suatu rancangan rekayasa proses produksi biodiesel yang memiliki *output* yang optimal.

Produk biodiesel yang dikaji pada paper ini adalah metil oleat (C<sub>19</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>), dengan bahan baku utama berupa triolein (C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>). Asam oleat memiliki kadar sebesar 59% pada minyak nabati seperti *Canola oil*, sedangkan sisanya 44% adalah asam linoleat (Kostik *et al.*, 2013). Triolein merupakan trigliserida simetris yang berasal dari gliserol dan tiga unit asam lemak tak jenuh asam oleat, maka dalam simulasi ini triolein dipilih karena karakteristiknya yang menyerupai trigliserida.

Beberapa penelitian terdahulu mengenai optimasi proses produksi biodiesel dari berbagai macam bahan baku telah banyak dilakukan. Saputri *et al.* (2015) menggunakan katalis zeolit alam teraktivasi pada tahap transesterifikasi untuk optimasi produksi biodiesel dari sawit *off grade*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemurnian yang diperoleh mencapai 92,04% pada kondisi dengan konsentrasi katalis zeolit alam teraktivasi 3%. Menurut Rizqi *et al.* (2017), persentase katalis berpengaruh nyata pada produksi biodiesel. Kemudian Putri *et al.* (2018) menggunakan proses ekstraksi reaktif untuk mengoptimalkan proses pembuatan biodiesel biji jarak pagar dengan rendemen yang dihasilkan sebesar 12,80%.

Pada umumnya optimasi proses produksi biodiesel dilakukan dengan mengaplikasikan berbagai macam katalis dengan berbagai konsentrasi tertentu atau dengan memodifikasi proses. Optimasi proses dengan melakukan simulasi terlebih dahulu memberikan peluang manfaat untuk mengetahui kondisi optimal sebelum proses produksi berlangsung. Simulasi menggunakan Aspen HYSYS telah dilakukan oleh Abdurakhman *et al.* (2017) untuk produksi biodiesel limbah minyak goreng dengan reaktor membran. Aspen HYSYS berhasil diterapkan untuk menganalisis alternatif terbaik dalam produksi biodiesel secara efektif dan efisien (Giwa *et al.*, 2018). Selanjutnya Adeniyi *et al.* (2018) mengidentifikasi faktor yang perlu diperhatikan dalam simulasi proses produksi biodiesel menggunakan HYSYS yaitu faktor proses seperti suhu, rasio metanol-minyak dan penggunaan katalis. Model simulasi produksi menggunakan Aspen HYSYS menurut Giwa *et al.* (2019), mampu merepresentasikan proses dengan sangat baik. Berdasarkan penelitian terdahulu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan simulasi optimasi proses produksi biodiesel dengan fokus pada peningkatan kemurnian biodiesel sesuai standar SNI 7182:2015.

## METODE PENELITIAN

Tahapan untuk melakukan simulasi proses meliputi penentuan BFD, PFD, dan simulasi menggunakan software.

### **Block Flow Diagram (BFD)**

BFD dapat digunakan untuk memecah sistem yang rumit menjadi tahapan/sektor prinsip

yang lebih logis. BFD menjelaskan aliran material umum di seluruh pabrik sehingga dapat membantu mengarahkan pekerja untuk menuju produk dan zona operasi penting dari suatu fasilitas (Peters *et al.*, 2003). BFD memberikan gambaran keseluruhan proses dengan setiap langkah operasi utama diwakili oleh satu blok. BFD juga dapat menunjukkan beberapa parameter operasi penting, seperti laju aliran dan suhu (Sutton, 2015). Pada penelitian ini BFD didasarkan pada beberapa studi literatur mengenai proses produksi biodiesel. BFD menjadi acuan untuk pemilihan proses.

### **Process Flow Diagram (PFD)**

PFD merupakan teknik utama untuk merinci informasi proses dan desain. PFD menunjukkan urutan aliran melalui sistem melalui berbagai peralatan (seperti perpipaan, instrumentasi, dan desain peralatan) dan merinci sambungan aliran, laju aliran dan komposisi serta kondisi operasi. PFD lebih rinci dan menyampaikan lebih banyak informasi daripada BFD yang hanya memberikan gambaran umum tentang arus informasi. PFD akan mencakup juga penjelasan unit proses seperti bagian pencampuran, evaporasi, separasi yang akan dipertimbangkan dalam dalam model untuk mensimulasikan secara akurat.

### **Simulasi HYSYS**

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi proses menggunakan Aspen Hysys 10. Simulasi yang dilakukan didasarkan dari beberapa scenario PFD. Penelitian diawali dengan studi pustaka mengenai kondisi yang mempengaruhi proses produksi biodiesel. Selanjutnya *fluid packages* yang digunakan untuk melakukan simulasi proses produksi biodiesel ditentukan. *Fluid packages* yang digunakan adalah *The Non-Random-Two-Liquid (NRTL) Ideal*. Data yang digunakan untuk melakukan simulasi diperoleh dari studi literatur terkait yang meliputi *Flow Diagram* (Diagram Alir), parameter pengoperasian umpan masuk, komposisi *crude oil*, kondisi unit operasi dan utilitas.

Prosedur simulasi proses meliputi: penentuan komponen-komponen kimia yang digunakan, pemilihan model termodinamik yang sesuai, pemilihan satuan-satuan pengendalian yang sesuai untuk digunakan dalam proses serta penentuan masukan (kecepatan aliran, suhu, tekanan dan keadaan lainnya) (Aditya dan Putra, 2009). Informasi untuk sebagian besar komponen seperti *methanol*, air, *oleic acid*, *gliserol* dan *methyl oleate* telah tersedia dalam *component library* HYSYS. Satuan operasi utama dalam proses produksi biodiesel ini adalah reaktor satuan pemisahan dan pemurnian produk. Sehingga untuk desain reaktor perlu dipertimbangkan aspek-aspek yang akan mempengaruhi kinerja reaktor yang selanjutnya berpengaruh juga terhadap hasil produksi yang diperoleh. Pembuatan biodiesel juga dipengaruhi oleh suhu operasi dan waktu

pencampuran atau kecepatan pencampuran, sehingga faktor-faktor tersebut dipertimbangkan dalam melakukan simulasi.

Dalam melakukan simulasi proses produksi biodiesel menggunakan Aspen Hysys, simulasi dibuat dalam suatu *process flow diagram* (PFD), dimana PFD disimulasikan dengan menggunakan acuan dari suatu *block flow diagram* (BFD) yang didapat dari literatur. Sebelum dilakukan simulasi berupa PFD pada Aspen Hysys, sebagai referensi opsi proses produksi biodiesel, digunakan tiga sumber referensi BFD.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Pemilihan Proses Produksi Biodiesel**

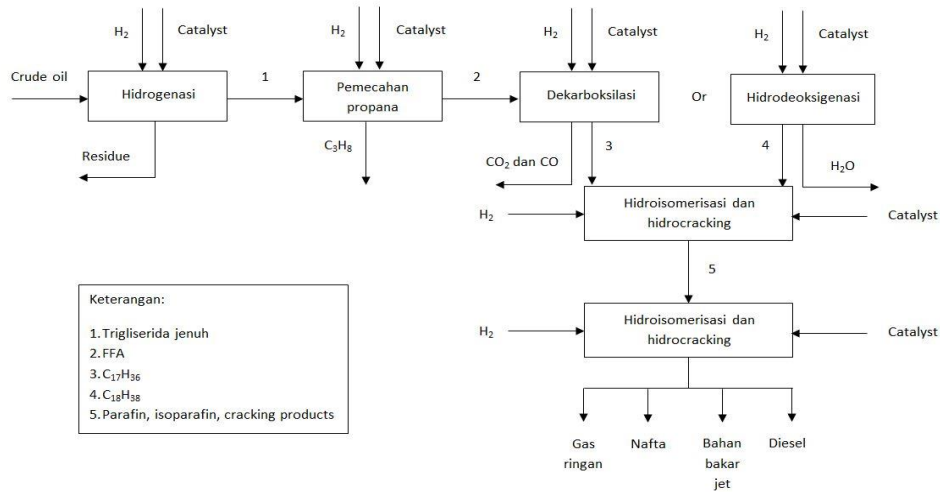
Sebelum melakukan pemilihan proses, digunakan beberapa referensi metode pembuatan biodiesel dari beberapa literatur. Beberapa metode pembuatan biodiesel tersebut digambarkan ke dalam suatu BFD. Dengan menggunakan BFD, pemilihan proses dapat dilakukan lebih mudah dikarenakan diagram tersebut menunjukkan keseluruhan aliran proses dan dapat menjelaskan apakah proses layak dilakukan dari sejumlah alternatif proses. Blok diagram adalah diagram dari sebuah sistem, di mana bagian utama atau fungsi yang diwakili oleh blok dihubungkan dengan garis, yang menunjukkan hubungan dari blok (Liu *et al.*, 2018). BFD adalah bentuk paling sederhana dari diagram alir yang digunakan dalam industri. Blok dalam BFD dapat mewakili apa pun mulai dari satu peralatan hingga seluruh pabrik.

Sesuai yang sudah dijelaskan pada bagian Pendahuluan, paper ini melakukan kajian produksi biodiesel menggunakan bahan baku triolein dan produk biodiesel yang diharapkan adalah metil oleat. Beberapa referensi proses produksi biodiesel digunakan sebagai alternatif untuk pemilihan proses. BFD dari beberapa alternatif proses produksi biodiesel ditunjukkan pada Gambar 1, 2, dan 3.

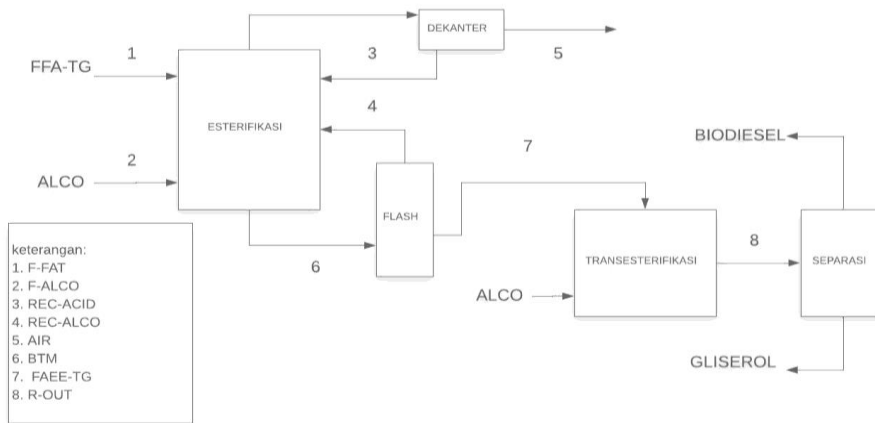
Wang (2016) melakukan proses produksi biodiesel menggunakan cara *hydroprocess* dua tahap yaitu *hydro-isomerization* dan *hydrocracking* yang dapat dilihat pada Gambar 1. Proses tersebut juga umum dijumpai pada produksi diesel dengan bahan baku non-nabati seperti minyak bumi. Pada konsep tersebut, proses *bio-refinery* dibagi menjadi enam bagian yaitu: (1) *Fruit Dehulling*; (2) Pembakaran *Shell*; (3) Ekstraksi Minyak; (4) *Press Cake Pyrolysis* (5) Peningkatan Minyak; (5) *Oil Upgrading*; (6) Pemisahan Produk. Konsep tersebut menghasilkan harga jual bahan bakar jet minimum (MJSP) dari skenario yaitu menjadi \$5,42/gal berdasarkan pada kapasitas pabrik 2.400 metrik ton bahan baku per hari. Produk samping yang diperoleh dari proses tidak hanya signifikan mengurangi biaya produksi tetapi juga membuat seluruh energi proses menjadi *self-sustainable*.

Pada skenario minyak, dimana minyak menjadi bahan awal dan prosesnya dimulai dari bagian *oil upgrading*. Skenario minyak ini menawarkan MJSP sebesar \$ 5,74/gal dengan model lebih rendah tetapi biaya operasional yang lebih tinggi. Perbedaan MJSP untuk skenario buah dan minyak disebabkan oleh biaya bahan baku, biaya

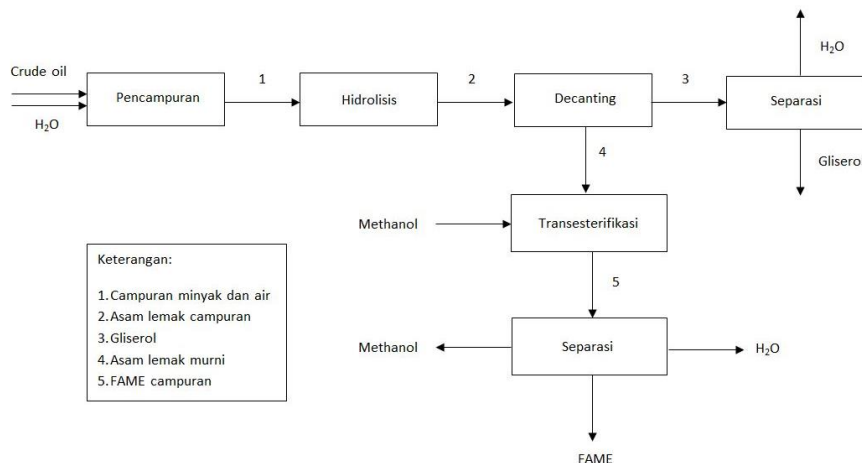
modal kilang, kredit produk sampingan dan biaya energi. Berdasarkan analisis sensitivitas, harga bahan baku, kandungan minyak, kapasitas pabrik, konstruksi reaktor dan penggunaan katalis merupakan parameter penting yang mengontrol harga bahan bakar yang diproduksi.



Gambar 1. BFD produksi biodiesel dengan *hydroprocess* (Wang, 2016)



Gambar 2. BFD produksi biodiesel melalui esterifikasi-transesterifikasi (Yusuf *et al.*, 2011)



Gambar 3. BFD produksi Biodiesel melalui hidrolisis-transesterifikasi (Adeniyi *et al.*, 2018)

Yusuf *et al.* (2011) menyusun BFD proses produksi biodiesel melalui reaksi esterifikasi-transesterifikasi dengan menggunakan katalis heterogen yang ditunjukkan pada Gambar 2. Penggunaan katalis heterogen dianggap lebih efisien dikarenakan dapat menghindari tahap netralisasi. Selain itu, penelitian tersebut juga menggunakan teknik *Reactive Distillation* (RD) untuk memproduksi biodiesel. Teknik RD merupakan teknik yang menggabungkan reaksi kimia dan pemisahan produk menjadi satu langkah yang memiliki beberapa keunggulan dibandingkan produksi biodiesel konvensional.

BFD selanjutnya ditunjukkan oleh Gambar 3. Adeniyi *et al.* (2018) melakukan proses produksi biodiesel melalui hidrolisis dan esterifikasi-transesterifikasi. Pada dasarnya, proses produksi biodiesel pada Gambar 2 dan Gambar 3 hampir sama, namun yang membedakan adalah pada BFD ketiga. Minyak nabati mengalami reaksi hidrolisis terlebih dahulu sebelum mengalami esterifikasi-transesterifikasi. Asam lemak dapat diperoleh dengan proses pemutusan struktur trigliserida dengan hidrolisis. Menurut Abdulloh *et al.* (2016), salah satu usaha untuk meningkatkan nilai ekonomis minyak nabati adalah menghidrolisis minyak menjadi asam lemaknya sehingga asam lemak yang terkandung di dalam minyak jarak pagar bisa dimanfaatkan lebih lanjut. Namun Adhani *et al.* (2016) menyatakan bahwa kadar asam lemak bebas yang tinggi dapat menghambat reaksi pembentukan biodiesel, karena katalis akan bereaksi dengan asam lemak bebas membentuk sabun. Selain itu sabun yang dihasilkan akan mempersulit separasi pemurnian biodiesel. Menurut Irawan *et al.* (2013), tahap pemurnian minyak dengan mengurangi kadar asam lemak bebas sangat penting dilakukan untuk dapat menghasilkan biodiesel dengan kualitas tinggi. Oleh karena itu, proses produksi yang ditunjukkan pada BFD ketiga ini akan menerapkan separasi sebanyak dua kali agar pemurnian biodiesel dari asam lemaknya.

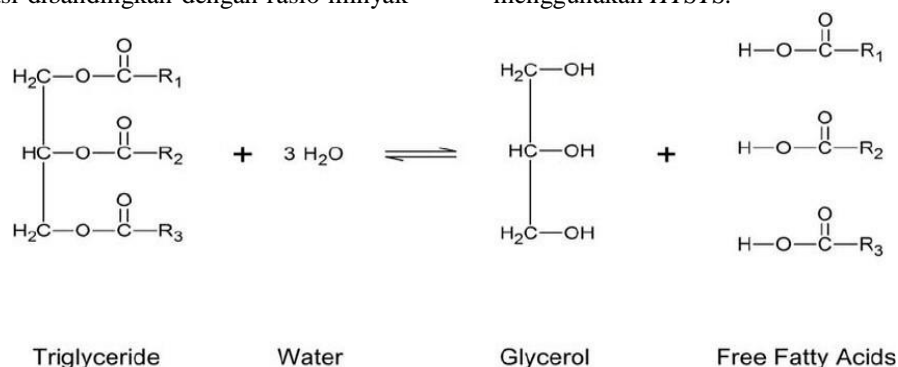
Berdasarkan konsep Adeniyi *et al.* (2018), menghasilkan rasio metanol-minyak ditemukan memiliki pengaruh yang signifikan pada reaksi transesterifikasi dibandingkan dengan rasio minyak-

air pada hidrolisis. Model linear yang dikembangkan terbukti dapat menjadi prediktor yang baik dari rasio bahan baku terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Selain itu, berdasarkan *surface plot* yang dilakukan, terungkap bahwa kedua rasio bahan baku tidak menunjukkan pengaruh yang bersifat kombinatorial yang signifikan satu sama lain. *Design expert* 10.0 yang digunakan untuk memprediksi dan mengoptimasi rasio bahan baku menghasilkan nilai optimum rasio bahan baku metanol-minyak yaitu 2,667 dan rasio air-minyak sebesar 1. Hasil optimasi juga menunjukkan *yield* biodiesel yang diprediksi sebesar 10,0938 kg/jam. Simulasi ASPEN Plus dengan rasio bahan baku optimum memberikan simulasi *yield* sebesar 10,095 kg/jam menunjukkan perbedaan sebesar 0,012%.

Teknik yang digunakan sebagai acuan dalam melakukan simulasi proses produksi biodiesel adalah BFD berdasarkan Adeniyi *et al.* (2018). Proses produksi biodiesel melalui tahap hidrolisis dan esterifikasi-transesterifikasi terpilih dikarenakan proses relatif sederhana dan mudah, serta menghasilkan *by-product* bernilai tinggi seperti gliserol. BFD pada Gambar 3 tersebut tersebut dijadikan sebagai referensi dalam pembuatan PFD dan simulasi pada penelitian ini.

Namun sebelum dibuat PFD dan proses produksi disimulasikan, perlu ditetapkan konsep produk biodieselnnya. Pada paper ini, produk biodiesel yang diharapkan berupa metil oleat (C<sub>19</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>) yang berasal dari umpan berupa triolein (C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>). Triolein digunakan dikarenakan komponen tersebut tersedia dalam *component library* HYSYS dan menyerupai trigliserida yang merupakan komponen terbesar dalam minyak nabati.

Berdasarkan proses produksi terpilih, triolein direaksikan dengan air dalam reaksi hidrolisis. Proses hidrolisis dapat dilihat pada persamaan Gambar 4. Reaktan yang digunakan yaitu air (H<sub>2</sub>O) untuk proses hidrolisis minyak dan metanol untuk proses transesterifikasi. Pembuatan biodiesel dipengaruhi oleh suhu operasi dan waktu pencampuran atau kecepatan pencampuran, sehingga faktor-faktor tersebut dipertimbangkan dalam melakukan simulasi menggunakan HYSYS.



Gambar 4. Reaksi hidrolisis trigliserida (Setyoprato, 2013)

Menurut Aditya dan Putra (2009), prosedur simulasi proses meliputi: penentuan komponen-komponen kimia yang digunakan, pemilihan model termodinamik yang sesuai, pemilihan satuan-satuan pengendalian yang sesuai untuk digunakan dalam proses serta penentuan masukan (kecepatan aliran, suhu, tekanan dan keadaan lainnya). Informasi untuk sebagian besar komponen seperti methanol, air, *oleic acid*, gliserol dan *methyl oleate* telah tersedia dalam komponen *library HYSYS*. Menurut Santana *et al.* (2010), diantara satuan operasi utama dalam proses produksi biodiesel ini ialah reaktor satuan pemisahan dan pemurnian produk. Sehingga untuk desain reaktor perlu dipertimbangkan aspek-aspek yang akan mempengaruhi kinerja reaktor yang selanjutnya berpengaruh juga terhadap hasil produksi yang diperoleh.

### Optimasi Kemurnian Produksi Biodiesel melalui Simulasi Proses

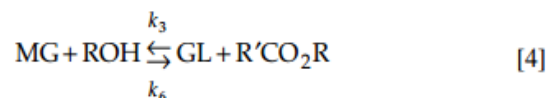
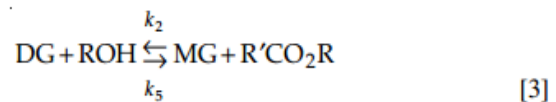
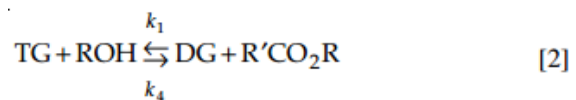
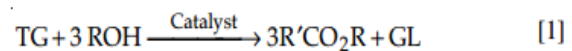
Menggunakan referensi BFD terpilih, simulasi proses produksi biodiesel dari minyak nabati dilakukan dengan tahap hidrolisis dan tahap esterifikasi-transesterifikasi. Tahapan umum dalam proses produksi terpilih berdasarkan BFD dimulai dari umuan berupa triolein dengan *mass flow* sebesar 1020 kg/h mengalami pencampuran pada suhu 25°C dengan air (H<sub>2</sub>O) dengan *mass flow* 9,98 kg/h pada suatu *mixer*. Hasil pencampuran triolein dan air tersebut kemudian dipanaskan menggunakan *heater* hingga suhu 70°-90°C untuk mempercepat reaksi hidrolisis. Menurut Agra *et al.* (1973), dalam suatu hidrolisis, agar zat pereaksi dapat saling bertumbukan dengan sebaik-baiknya, maka perlu adanya pencampuran. Selain itu, menurut Patle *et al.* (2014), peningkatan suhu akan meningkatkan tumbukan antar partikel sehingga akan lebih cepat berlangsung dan konversi yang dihasilkan juga lebih tinggi. Untuk proses batch, hal ini dapat dicapai dengan bantuan pengaduk atau alat pengocok. Selain itu, pengaruh suhu terhadap kecepatan reaksi mengikuti persamaan Arrhenius, dimana semakin tinggi suhu maka semakin cepat jalannya reaksi.

Selanjutnya, hidrolisis dilakukan menggunakan reaktor *Gibbs* selama 3-6 jam. Menurut Adeniyi *et al.* (2018), reaktor *Gibbs* digunakan sebagai reaktor hidrolisis dan reaktor ini tidak memerlukan informasi stoikiometri tentang reaktan dan produk karena dalam *software* ASPEN Plus atau HYSYS akan dihitung secara otomatis melalui minimisasi metode energi bebas *Gibbs*. Reaksi hidrolisis yang terjadi merupakan reaksi kesetimbangan (*equilibrium*) antara minyak nabati dan air sehingga menghasilkan asam lemak (*oleic acid*) dan air (H<sub>2</sub>O). Asam lemak yang terbentuk masih bercampur dengan gliserol, sedangkan komponen yang diperlukan dalam proses produksi biodiesel selanjutnya hanyalah asam lemak murninya saja. Selanjutnya dilakukan pemisahan komponen asam lemak murni dari gliserol menggunakan suatu

*separator*. Sebagai hasil samping, gliserol masih dapat dimanfaatkan dan memiliki nilai ekonomis yang tinggi. Menurut Appleby (2005), gliserol digunakan dalam pembuatan obat, kosmetik, pasta gigi, busa uretan, resin sintesis dan lain-lain. Sejumlah besar pemrosesan tembakau dan makanan juga menggunakan gliserol, baik dalam bentuk gliserin ataupun gliseridanya.

Asam oleat murni yang dihasilkan masih memiliki suhu yang sangat tinggi ( $\pm$  antara 79°C sampai 200°C) sehingga tidak dapat langsung diproses pada tahap transesterifikasi. Suatu *cooler* dibutuhkan untuk membantu menurunkan suhu asam lemak murni tersebut hingga mencapai suhu 25°C. Secara simultan, methanol yang telah dipanaskan dengan *mass flow* sebesar 1030 kg/h dimasukkan reaktor tertutup baru kemudian ditambahkan *oleic acid* murni. Sistem harus tertutup total untuk menghindari penguapan methanol. Reaksi dilakukan pada suhu 25°C dengan lama reaksi adalah 1 – 8 jam. Pemberian methanol berlebih diperlukan untuk memastikan konversi yang sempurna. Methanol akan bereaksi dengan *oleic acid* dalam suatu reaksi transesterifikasi membentuk biodiesel berupa *methyl oleate* dan sisa methanol yang tidak bereaksi akan menguap.

Mekanisme reaksi yang digunakan pada tahap transesterifikasi ini merupakan reaksi kinetik pada suatu reaktor *Continuous Stirrer Tank Reactor* (CSTR). Konstanta kinetik reaksi dapat dicari dengan metode *fitting curve*. Model reaksi kinetik terbaik yang digunakan untuk simulasi proses adalah model kinetik orde dua. Reaksi kinetika yang digunakan dalam set reaksi CSTR adalah reaksi transesterifikasi sebagai berikut (Darnoko dan Cheryan, 2000)



Tabel 1 menunjukkan bahwa energi aktivasi yang dibutuhkan agar reaksi tersebut berlangsung, dalam suatu reaksi maka kecepatan reaksi yang paling lambat akan sangat mempengaruhi waktu reaksi. Nilai-nilai tersebut dimasukkan kedalam kinetika reaksi yang digunakan untuk konversi biodiesel pada reaktor CSTR.

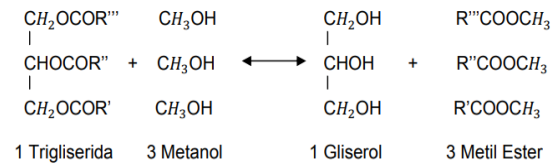


Tabel 1. Nilai energi aktivasi untuk reaksi transesterifikasi (Darnoko dan Cheryan, 2000)

Reaksi	E <sub>a</sub> (kcal/mol)	R <sup>2</sup>
TG → DG	14,7	0,9959
DG → MG	14,2	0,9998
MG → GL	6,4	0,7457

Hasil dari reaksi transesterifikasi pada reaktor CSTR berupa *methyl oleate* yang merupakan produk biodiesel dan hasil samping berupa methanol dalam fase uap secara terpisah. Selanjutnya *methyl oleate* disimpan ke dalam tangki penyimpanan. Tahapan proses dari BPD tersebut dibuat ke dalam suatu PFD yang selanjutnya disimulasikan dengan bantuan *software HYSYS*. Gambar 5 menggambarkan PFD untuk simulasi skenario 1 yang dimana merupakan keseluruhan *engineering process* yang didasarkan dari BFD terpilih.

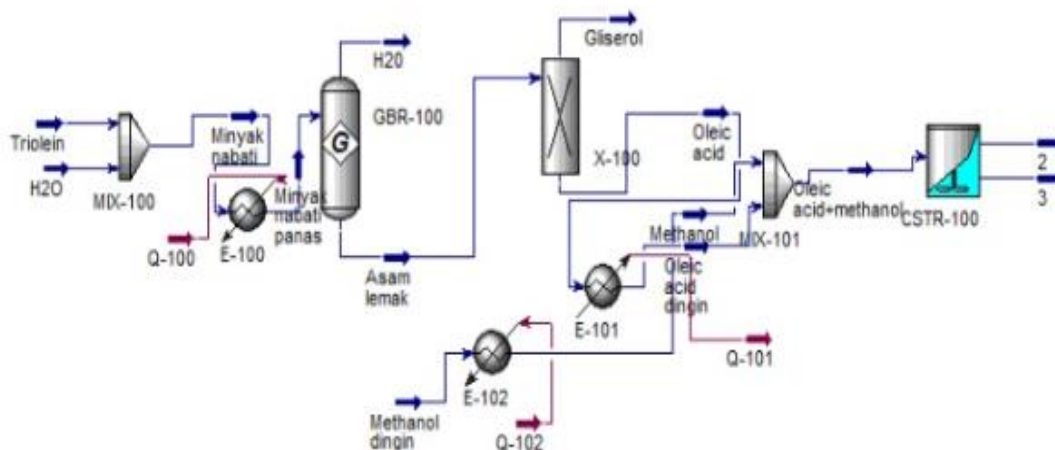
Berdasarkan hasil simulasi, PFD skenario 1 menghasilkan campuran larutan biodiesel yang di dalamnya masih memiliki komposisi seperti *oleic acid*, *methanol*, *methyl oleate*, sedikit air, dan sisa triolein yang tidak habis bereaksi. Produk biodiesel yang diharapkan adalah larutan biodiesel yang memiliki fraksi *methyl oleate* yang tinggi. Dari hasil simulasi PFD skenario 1, fraksi mol *methyl oleate* dalam campuran larutan biodiesel hanya sebesar 0,0831 dengan total *mass flow* biodiesel sejumlah 1034 kg/h dan total *molar flow* biodiesel sebesar 2,101 kg.mole/h, sehingga kemurnian dari *methyl oleate* adalah 5%. Kemurnian tersebut masih sangat kecil dan jauh dari standar kemurnian biodiesel yang ditetapkan oleh SNI. Perhitungan kemurnian dalam paper ini didasarkan pada persamaan reaksi kimia stoikiometri dalam produksi biodiesel (Yusuf *et al.*, 2011).



Berdasarkan reaksi tersebut, perbandingan molekul minyak nabati (triglisericida) dengan *methyl ester* (biodiesel) adalah 1:3, sehingga contoh perhitungan kemurnian biodiesel untuk skenario 1 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{mol triolein} &= \frac{1,152 \text{ kg.mole/h}}{1020 \text{ kg/h}} = 1,1294 \times 10^{-3} \text{ mole} \\
 \text{mol campuran biodiesel} &= \frac{2,101 \text{ kg.mole/h}}{1034 \text{ kg/h}} = 2,0319 \times 10^{-3} \text{ mole} \\
 \text{fraksi mol methyl oleate} &= 0,831 \\
 \text{kemurnian} &= \frac{1 \times \text{mol methyl oleate}}{3 \times \text{mol triolein}} \times 100\% \\
 &= \frac{1 \times 0,831 \times 2,0319 \times 10^{-3} \text{ mole}}{3 \times 1,1294 \times 10^{-3} \text{ mole}} \times 100\% \\
 &= 5\%
 \end{aligned}$$

Selain hasil *material stream*, Hysys juga menampilkan kebutuhan energi dan jumlah energi yang keluar dari system. Berdasarkan keterangan pada aliran energi, *heater* pertama yang melakukan pemanasan terhadap minyak nabati membutuhkan *feed* berupa energi sebesar  $1,112 \times 10^5$  kJ/h, kemudian *cooler* yang melakukan pendinginan terhadap *oleic acid* menghasilkan energi sebesar  $1,295 \times 10^5$  kJ/h, dan *heater* kedua yang melakukan pemanasan terhadap methanol membutuhkan *feed* energi sebesar  $1,656 \times 10^6$  kJ/h.



Gambar 5. Simulasi PFD produksi biodiesel skenario 1

Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat sejumlah  $1,295 \times 10^5$  kJ/h energi yang terbuang dimana di sisi lain proses tersebut membutuhkan sejumlah  $1.767 \times 10^6$  kJ/h energi. Oleh karena itu, diusulkan PFD skenario 2 yang bertujuan untuk memanfaatkan energi yang terbuang dari system dan diharapkan dapat mengurangi kebutuhan energi system.

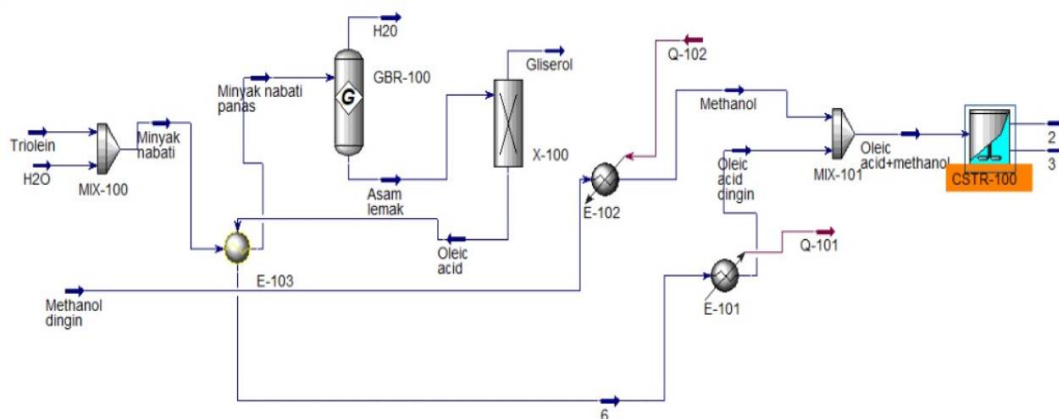
Pada simulasi PFD skenario 2, proses modifikasi yang dilakukan yaitu *oleic acid* panas yang dihasilkan dari reaksi hidrolisis dan separasi akan dialirkan ke suatu *heat exchanger* dimana energi panas dari *oleic acid* tersebut digunakan untuk melakukan pemanasan minyak nabati. Selanjutnya, *oleic acid* panas akan dialirkan ke *cooler* untuk mengalami penurunan suhu. Menurut Sitompul (1993), *cooler* merupakan suatu alat penukar panas yang digunakan untuk mendinginkan atau menurunkan suhu cairan atau gas dengan menggunakan suatu fluida sebagai media pendingin.

Kakac dan Liu (2002) menyatakan bahwa *heat exchanger* adalah suatu alat yang dimana terjadi aliran perpindahan panas diantara dua fluida atau lebih pada temperatur yang berbeda dimana fluida tersebut keduanya mengalir didalam sistem. Dan hal tersebut sejalan dengan pernyataan Sitompul (1993), bahwa *heat exchanger* memanfaatkan panas suatu aliran fluida untuk pemanasan aliran fluida yang lain sehingga terjadi dua fungsi sekaligus yaitu memanaskan fluida yang dingin dan mendinginkan fluida yang panas. Selanjutnya, dalam PFD skenario 2, dilakukan simulasi dimana *oleic acid* panas dialirkan terlebih dahulu ke *heat exchanger* sebelum dilakukan pendinginan, sehingga *heater* pertama yang digunakan untuk melakukan pemanasan minyak nabati dapat dieliminasi. Dengan menggunakan *heat exchanger* tersebut, diharapkan *oleic acid* dapat digunakan sebagai fluida panas yang berfungsi memanaskan minyak nabati sehingga energi tersebut termanfaatkan. *Heat exchanger* umum yang digunakan dalam sistem industri untuk mendapatkan peningkatan nilai ekonomis. PFD untuk simulasi skenario 2 ditunjukkan pada Gambar 6.

Berdasarkan simulasi PFD skenario 2 tersebut, pengaruh penggunaan *heat exchanger* adalah mengakibatkan suhu minyak nabati setelah pemanasan adalah  $90^\circ\text{C}$  dimana suhu tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan suhu minyak nabati setelah pemanasan pada skenario 1 yang hanya sebesar  $70^\circ\text{C}$ . Dengan semakin tingginya suhu, reaksi hidrolisis yang berlangsung pada reaktor *Gibbs* semakin optimal dan *oleic acid* yang dihasilkan juga memiliki suhu yang lebih tinggi yaitu  $109,7^\circ\text{C}$  dibandingkan dengan hasil pada simulasi skenario 1 yang hanya sebesar  $79,92^\circ\text{C}$ . Selanjutnya, suhu produk biodiesel yang dihasilkan juga lebih tinggi yaitu  $84,53^\circ\text{C}$  dibandingkan suhu biodiesel pada simulasi skenario 1 yang hanya sebesar  $75,93^\circ\text{C}$ .

Dalam hal aliran energi, skenario 2 menunjukkan bahwa energi panas yang dihasilkan dari proses pendinginan *oleic acid* sebesar  $3,996 \times 10^4$  kJ/h. Sebelum *oleic acid* tersebut dialirkan ke *cooler*, akan terlebih dahulu dialirkan ke *heat exchanger* untuk memanaskan minyak nabati sebelum dihidrolisis pada reaktor *Gibbs*, sehingga proses pemanasan minyak nabati tersebut tidak membutuhkan tambahan energi dari luar sistem lagi. Energi panas yang diperlukan sebagai *feed* untuk proses pemanasan methanol adalah sebesar  $1,403 \times 10^6$  kJ/h dimana energi tersebut merupakan kebutuhan energi yang ditambahkan dari luar sistem. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa kebutuhan energi yang harus ditambahkan dari luar sistem pada PFD skenario 2 lebih sedikit dibandingkan dengan PFD skenario 1 yaitu sebesar  $1,403 \times 10^6$  kJ/h dari yang sebelumnya  $1.767 \times 10^6$  kJ/h.

PFD skenario 2 menghasilkan juga campuran larutan biodiesel yang di dalamnya masih memiliki komposisi seperti *oleic acid*, *methanol*, *methyl oleate*, sedikit air, dan sisa triolein yang tidak habis bereaksi. Fraksi mol *methyl oleate* dalam campuran biodiesel sebesar 0,1781 dengan total *mass flow* biodiesel 1066 kg/h dan total *molar flow* biodiesel sebesar 2,961 kg.mole/h, sehingga dengan langkah menghitung seperti sebelumnya maka kemurnian dari *methyl oleate* adalah 14,6%.



Gambar 6. Simulasi PFD produksi biodiesel skenario 2



Terjadi peningkatan persentase kemurnian yang dihasilkan dibandingkan dengan skenario 1, namun kemurnian tersebut juga masih belum memenuhi standar kemurnian biodiesel yang ditetapkan oleh SNI, sehingga optimasi perlu dilakukan kembali. Berdasarkan analisis fraksi mol dari komposisi yang terdapat pada produk biodiesel, masih terdapat fraksi mol methanol dan triolein yang sangat tinggi. Hal tersebut disebabkan dikarenakan air yang dicampurkan dengan triolein pada reaksi hidrolisis sudah habis terkonversi terlebih dahulu sehingga tidak semua triolein terkonversi menjadi asam lemak.

Triolein yang tidak terkonversi atau tidak tereaksikan tersebut terkandung sampai menjadi produk akhir biodiesel. Selain itu, dikarenakan triolein yang tidak terkonversi sepenuhnya, *oleic acid* yang dihasilkan tidak optimal sehingga saat direaksikan dengan methanol, *oleic acid* habis terkonversi dan methanol masih banyak terkandung pada produk biodiesel. Berdasarkan hasil simulasi HYSYS, komposisi fraksi mol triolein pada produk biodiesel adalah sebesar 0,3267 dan fraksi mol methanol pada produk biodiesel adalah sebesar 0,4656.

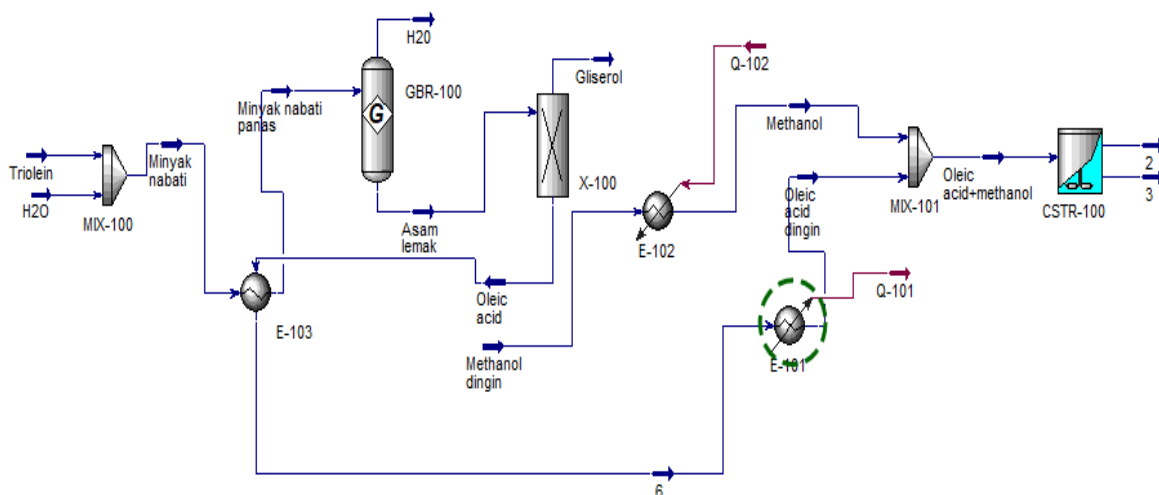
Kemurnian biodiesel berdasarkan simulasi PFD skenario 2 masih rendah dikarenakan reaksi yang tidak optimal, sehingga diusulkan PFD skenario 3 sebagai bentuk optimasi. Dalam rangka mengatasi kehabisan air yang direaksikan pada tahap hidrolisis, dilakukan modifikasi berupa penambahan *mass flow* air menjadi 80 kg/h dan pengurangan umpan triolein menjadi 950 kg/h dengan harapan perubahan konsentrasi tersebut dapat mempengaruhi triolein agar bereaksi secara optimal. Gambar 7 menunjukkan simulasi PFD skenario 3 yang difokuskan dalam optimasi kemurnian.

Berdasarkan hasil simulasi PFD skenario 3, campuran larutan biodiesel yang dihasilkan memiliki komposisi yang didominasi oleh *methyl oleate* dan

sedikit *oleic acid*, *methanol*, dan air. Tidak adanya kandungan triolein pada produk biodiesel yang dihasilkan menandakan bahwa triolein sudah habis bereaksi. Fraksi mol *methyl oleate* dalam campuran biodiesel sebesar 0,9454 dengan total *mass flow* biodiesel 746 kg/h dan total *molar flow* biodiesel sebesar 2,568 kg.mole/h. Dengan langkah menghitung seperti sebelumnya maka kemurnian dari *methyl oleate* adalah 96,5%. Kemurnian tersebut sudah memenuhi standar kemurnian biodiesel yang ditetapkan oleh SNI.

Dalam hal aliran energi, skenario 3 menunjukkan bahwa energi panas yang dihasilkan dari proses pendinginan *oleic acid* sebesar  $1,937 \times 10^5$  kJ/h dimana sama seperti yang terjadi pada skenario 2 bahwa sebelum *oleic acid* dialirkan pada *cooler*, energi panasnya dimanfaatkan untuk memanaskan minyak nabati dengan menggunakan *heat exchanger*. Sedangkan untuk energi panas yang diperlukan untuk proses pemanasan methanol adalah sebesar  $2,047 \times 10^6$  kJ/h dimana energi tersebut merupakan kebutuhan energi yang ditambahkan dari luar sistem.

Tabel 2 menunjukkan rangkuman *material stream* dan komposisi dari segi fraksi mol pada masing-masing umpan dan produk akhir yang dihasilkan untuk masing-masing skenario sehingga dapat dibandingkan untuk setiap skenario PFD. Berdasarkan Tabel 2, dapat dilihat kondisi parameter-parameter seperti suhu, tekanan, *molar flow*, dan *mass flow* pada setiap jenis komponen material pada setiap skenario yang disimulasikan menggunakan *software HYSYS*. Selain itu, terdapat pula rangkuman fraksi mol untuk setiap komponen material selama aliran proses. Fraksi mol tersebut menyatakan perbandingan jumlah mol zat terlarut atau pelarut terhadap jumlah mol larutan atau sebagai bagian mol dalam jumlah mol larutan, sehingga fraksi mol tersebut merupakan salah satu satuan konsentrasi larutan.



Gambar 7. Simulasi PFD produksi biodiesel skenario 3

Tabel 2. Perbandingan aliran dan komposisi material hasil simulasi

Material	Plan	Parameter					Fraksi Mol				
		Suhu (°C)	Tekanan (kPa)	Molar Flow (kgmole/h)	Mass Flow (kg/h)	<i>Oleic Acid</i>	<i>Metanol</i>	Metil oleat	Air	<i>Glycerol</i>	Triolein
Triolein (feed)	1	25	101	1,15	1020	0	0	0	0	0	1
	2	25	101	1,15	1020	0	0	0	0	0	1
	3	25	101	1,07	950	0	0	0	0	0	1
Air (feed)	1	25	101	0,55	9,98	0	0	0	1	0	0
	2	25	101	0,55	9,98	0	0	0	1	0	0
	3	25	101	4,44	80	0	0	0	1	0	0
Minyak Nabati	1	25	101	1,70	1030	0	0	0	0,32	0	0,67
	2	25	101	1,70	1030	0	0	0	0,32	0	0,67
	3	25	101	5,51	1030	0	0	0	0,80	0	0,19
Minyak Nabati Panas	1	70	101	1,70	1030	0	0	0	0,32	0	0,67
	2	90	101	1,70	1030	0	0	0	0,32	0	0,67
	3	90	101	5,51	1030	0	0	0	0,80	0	0,19
<i>Oleic Acid</i> Campur	1	69,29	101	1,70	1030	0,32	0	0	0	0,10	0,56
	2	109,6	101	1,70	1030	0,32	0	0	0	0,10	0,56
	3	184,9	101	4,80	1017	0,66	0	0	0,10	0,22	0
<i>Oleic Acid</i> Murni	1	79,92	101	1,52	1013	0,36	0	0	0	0	0,63
	2	109,7	101	1,52	1013	0,36	0	0	0	0	0,63
	3	196	101	3,21	908,9	1	0	0	0	0	0
<i>Glycerol</i>	1	105	101	0,18	17,01	0	0	0	0	1	0
	2	105	101	0,18	17,01	0	0	0	0	1	0
	3	105	101	1,58	107,8	0	0	0	0,32	0,67	0
Methanol (feed)	1	25	101	32,15	1030	0	1	0	0	0	0
	2	25	101	32,15	1030	0	1	0	0	0	0
	3	25	101	32,15	1030	0	1	0	0	0	0
Biodiesel (product)	1	75,93	101	2,10	1034	0,18	0,27	0,08	0,008	0	0,46
	2	84,53	101	2,96	1066	0,01	0,46	0,17	0,02	0	0,33
	3	216,2	101	2,56	746	0,03	0,01	0,94	0,04	0	0
Methanol (output)	1	75,93	101	31,57	1009	0	0,99	0	0,05	0	0
	2	84,53	101	30,71	977,3	0	0,98	0	0,01	0	0
	3	216,2	101	32,79	1193	0,03	0,88	0,02	0,09	0	0

Tabel 3. Perbandingan aliran energi hasil simulasi

Plan	Jenis Operasi	Aliran Energi (kJ/h)	Kebutuhan energi dari luar sistem (kJ/h)	Energi yang terbuang ke luar sistem (kJ/h)
1	Heater 1	0,11 x 10 <sup>6</sup>	1,76 x 10 <sup>6</sup>	1,29 x 10 <sup>5</sup>
	Cooler	1,29 x 10 <sup>5</sup>		
	Heater 2	1,65 x 10 <sup>6</sup>		
2	Heat Exchanger	-	1,40 x 10 <sup>6</sup>	3,99 x 10 <sup>4</sup>
	Cooler	3,99 x 10 <sup>4</sup>		
	Heater	1,40 x 10 <sup>6</sup>		
3	Heat Exchanger	-	2,04 x 10 <sup>6</sup>	1,93 x 10 <sup>5</sup>

Tabel 3 menunjukkan perbandingan aliran energi yang dihasilkan dari masing-masing simulasi PFD skenario 1, skenario 2, dan skenario 3. Pada PFD skenario 2, kebutuhan energi total dari luar sistem lebih kecil dibandingkan kebutuhan energi total pada skenario 1. Hal tersebut dikarenakan penggunaan *heat exchanger* pada skenario 2 yang dapat mengeliminasi salah satu *heater* pada skenario 1, sehingga pemanfaatan energi panas dari dalam sistem mengurangi kebutuhan energi panas dari luar sistem. Kebutuhan energi pada PFD skenario 3 lebih tinggi dibandingkan kedua skenario sebelumnya dikarenakan reaksi yang berlangsung pada sistem lebih optimal dimana dibuktikan dengan peningkatan kemurnian yang dihasilkan.

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### Kesimpulan

Optimasi kemurnian berdasarkan ketiga simulasi proses, PFD skenario 3 merupakan proses yang terpilih dikarenakan mampu menghasilkan kemurnian biodiesel; mencapai 96,5 % dan telah sesuai dengan standar kemurnian SNI. Penggunaan *heat exchanger* pada PFD skenario 2 dan skenario 3 memberikan efisiensi energi dan secara tidak langsung berdampak secara ekonomi. Kebutuhan energi panas dapat dikurangi melalui penggunaan *heat exchanger* karena dapat memanfaatkan energi panas yang dihasilkan dari sistem dan menggantikan penggunaan *heater* tambahan.

#### Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya, simulasi proses sebaiknya dilakukan dengan mempertimbangkan peran katalis pada reaksi esterifikasi-transesterifikasi. Selain itu, perlu dikaji lebih lanjut mengenai analisis teknoekonomi sehingga informasi yang didapat lebih komprehensif.

### DAFTAR PUSTAKA

Abdulloh, Widati AA, dan Tamamy F. 2016. Hidrolisis minyak jarak pagar menjadi asam lemak bebas menggunakan katalis cao. *Journal Kimia Riset*. 1(1):1-6.  
 Abdurakhman YB, Putra ZA, dan Bilad MR. 2017. Aspen HYSYS Simulation for Biodiesel Production from Waste Cooking Oil using

Membrane Reactor. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 180(012273).

Adeniyi AG, Ighalo JO, dan Eletta OA. 2018. Process integration and feedstock optimisation of a Two-step biodiesel production process from jatropha curcas using aspen plus. *Chemical Product and Process Modeling*. 14(2).

Adhani L, Aziz I, Nurbayti S, Oktaviana CO. 2016. Pembuatan biodiesel dengan cara adsorpsi dan transesterifikasi dari minyak goreng bekas. *Jurnal Kimia VALENSI: Jurnal Penelitian dan Pengembangan Ilmu Kimia*. 2(1):71-80.

Aditya MRP. 2009. Simulasi integrasi proses produk hilir kelapa sawit (biogasoline, biodiesel, biopelumas). [Skripsi]. Depok: Universitas Indonesia.

Agra IB, Warnijati S, dan Pujiyanto B. 1973. Hidrolisa pati ketela rambat pada suhu lebih dari 100°C. *Jurnal Forum Teknik*. 3:115-129.

Appleby DB. 2005. *Gliserol on The Biodiesel Handbook*. Peoria: AOCS Press

Bailey. 1996. *Bailey's Industrial Oil and Fat Product*, 5th ed. USA: Wiley-Interscience Publication.

Darnoko D dan Cheryan M. 2000. Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *JAACS, Journal American Oil Chemists' Society*. 77(12):1263-1267.

Giwa A, Giwa SO, dan Olugbade EA. 2018. Application of Aspen HYSYS process simulator in green energy revolution: a case study of biodiesel production. *ARPN Journal Engineering and Applied Sciences*. 13(2):569-581.

Hindryawati N, Maniam GP, Karim MR, Chong KF. 2014. Transesterification of used cooking oil over alkali metal (Li, Na, K) supported rice husk silica as potential solid base catalyst. *Engineering Science and Technology, and International Journal*. 17:95-103.

Irawan C, Awalia TN, dan Uthami S. 2013. Pengurangan kadar asam lemak bebas (free fatty acid) dan warna dari minyak goreng bekas dengan proses adsorpsi menggunakan campuran serabut kelapa dan sekam padi. *Jurnal Konversi*. 2(2):29-33.

Janajreh I, El-Samad T, Al-Jaberi A, Diouri M. 2015. Transesterification of waste cooking oil:

- kinetic study and reactive flow analysis. *Journal Energy Procedia*. 75:547-553.
- Kakac S dan Liu H. 2002. *Heat exchanger: Selection, Rating, and Thermal Design* (2nd Ed). Florida: CRC Press.
- Kostik V, Memeti S, dan Bauer B. 2013. Fatty acid composition of edible oils and fats. *Journal Hygienic Engineering and Design*. 4:112-116.
- Liu Z dan Karimi IA. 2018. Simulating combined cycle gas turbine power plants in Aspen HYSYS. *Journal Energy Conversion and Management*. 171:1213-1225.
- Patle DS, Sharma S, Ahmad Z, Rangaiah GP. 2014. Multi-objective optimization of two alkali catalyzed processes for biodiesel from waste cooking oil. *Energy conversion and management*. 85:361-372.
- Peters MS, Timmerhaus KD, dan West RE. 2003. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th ed. New York: Mc-Graw Hill.
- Putri RA, Muhammad A, dan Ishak I. 2018. Optimasi proses pembuatan biodiesel biji jarak pagar (*Jatropha Curcas L.*) melalui proses ekstraksi reaktif. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*. 6(2):16-30.
- Rahayu M. 2005. Teknologi proses produksi biodiesel. buku ilmiah : *prospek pengembangan bio-fuel sebagai substitusi bahan bakar minyak*. 17-28.
- Rizqi SA, Adriana, Ananda R, Farisha S. 2017. Optimasi produksi biodiesel dari minyak jelantah dengan katalis cangkang tiram (*crassostrea gigas*). *Jurnal Reaksi*. 15(2): 1-8.
- Santana GCS, Martins PF, Da Silva NDL, Batistella CB, Maciel Filho R., Maciel MW. 2010. Simulation and cost estimate for biodiesel production using castor oil. *Chemical Engineering Research and Design*. 88(5-6): 626-632.
- Saputri H, Helwani Z, dan Rionaldo H. 2015. Optimasi proses produksi biodiesel dari sawit off grade menggunakan katalis zeolit alam teraktivasi pada tahap transesterifikasi. *Jurnal Online Mahasiswa*. 2(2): 1-5.
- Setyoprato P. 2013. Produksi asam lemak dari minyak kelapa sawit dengan proses hidrolisis. *Jurnal Teknik Kimia*. 7(1): 26-31.
- Sitompul TM. 1993. *Alat Penukar Kalor (Heat Exchanger)*. Jakarta: PT Raja Grafindo Persada.
- Sopurta A, Siregar P, dan Estiyanti E. 2014. Perancangan sistem simulasi HYSYS & integrasi dengan programmable logic controller-human machine interface : studi kasus pada plant kolom distilasi etanol-air. *Oto.Ktrl.Inst (J.Auto.Ctrl.Inst)*. 6(1): 2085-2517.
- Sutton I. 2015. Technical Information. Di dalam *Process Risk and Reliability Management* (2<sup>nd</sup> ed.), Operational Integrity Management. Amsterdam: Elsevier Inc. P179-192.
- Wang WC. 2016. Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing hydro-processed renewable jet fuel from jatropha. *Renewable Energy*. 95:63-73.
- Yusuf NN, Kamarudin SK, dan Yaakob Z. 2012. Overview on the production of biodiesel from *Jatropha curcas L.* by using heterogenous catalysts. *Journal Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 6(3): 319-334.