

Available online at: <http://reactor.poltekatiptdg.ac.id/>

REACTOR
Journal of Research on Chemistry and Engineering

| ISSN Online 2746-0401 |



Studi Simulasi Konseptual Kinerja Filter Koaleser Berbasis Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) untuk Pemisahan Biodiesel-Air

Laudi Adytia Pratama¹, Hafshah Dwiyantri Sutopo¹, Oktrison¹, Harmiwati NH¹

¹ Program Studi Teknologi Rekayasa Bioproses Energi Terbarukan, Politeknik ATI Padang, Jl. Bungo Pasang, Tabing, Padang, 25171, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: March 27, 2026
Revised: May 18, 2026
Available online: June 2, 2026

KEYWORDS

Biodiesel, Coalescer Filter, OPEFB, Water Separation

CORRESPONDENCE

Name: Harmiwati NH
E-mail: harmiwati@poltekatiptdg.ac.id

ABSTRACT

This study aims to theoretically evaluate the performance of a liquid-liquid (biodiesel-water) separation system using an Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB)-based coalescer filter through a conceptual computational simulation approach. The separation design evaluation was conducted using SuperPro Designer software in batch operation mode with key operating conditions set at a temperature of 60°C. The modelling covered the entire stages, starting from the transesterification reactor, water washing, to the final separation in the coalescer filter unit (P-5). The equipment's performance was evaluated based on the mass fraction profile of the final product compared to the waste stream content. The simulation model projected that the OPEFB coalescer filter shows potential to operate as a heavy and light phase separator based on ideal thermodynamic assumptions. The conceptual product stream composition was dominated by Fatty Acid Methyl Ester (FAME) approaching 100% (>99.99%), with a theoretical water separation efficiency reaching 99.989%, while water, methanol, glycerol, and residual catalyst were comprehensively isolated into the heavy phase (waste) stream. It must be explicitly noted that this is a preliminary simulation study; no physical OPEFB coalescer has been fabricated or experimentally tested, and no analytical confirmation of the critical biodiesel-quality parameters has been conducted. The design of the OPEFB coalescer filter is theoretically feasible in separating post-washing biodiesel-water emulsions, highlighting the necessity to proceed to the physical fabrication and empirical testing stages for actual process validation.

PENDAHULUAN

Ketergantungan pada bahan bakar fosil yang kian menipis dan merusak lingkungan memicu percepatan pengembangan sumber energi alternatif seperti biodiesel sebagai solusi kebutuhan energi primer manusia. Selain sifatnya yang mudah terurai (*biodegradable*), biodiesel menjadi opsi menarik karena emisinya jauh lebih rendah partikulat dan karbon monoksida, sehingga jauh lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar konvensional [1].

Biodiesel memiliki karakteristik fisik yang serupa dengan bahan bakar diesel. Biodiesel tersusun atas

campuran monoalkil ester dari asam lemak rantai panjang. Senyawa ini dihasilkan melalui reaksi transesterifikasi, yaitu reaksi antara trigliserida (dari minyak atau lemak) dengan alkohol rantai pendek seperti metanol atau etanol, yang dibantu oleh suatu katalis [2]. Reaksi transesterifikasi menghasilkan *crude biodiesel* yang kemudian diproses kembali untuk menghilangkan berbagai impuritas yang masih terkandung di dalam biodiesel dan akan menyisakan residu air terikat. Meskipun memiliki karakteristik fisik yang serupa, biodiesel merupakan bahan bakar beroksigen dengan rantai C₁₆-C₁₈ yang memiliki nilai kalor lebih rendah. Perbedaan kimiawi ini menyebabkan biodiesel bersifat lebih higroskopis, sehingga pengelolaan kandungan air

menjadi jauh lebih krusial dibandingkan pada bahan bakar diesel konvensional untuk mencegah degradasi [3].

Keberadaan air merupakan kontaminan kritis dalam biodiesel yang harus diminimalisir sebelum mencapai sistem injeksi mesin. Air dapat masuk melalui sisa proses pemurnian yang tidak sempurna maupun akibat sifat higroskopis biodiesel yang menyerap kelembapan selama penanganan dan penyimpanan. Akumulasi air ini tidak hanya memicu pertumbuhan mikroba yang mendegradasi kualitas bahan bakar, tetapi juga menyebabkan korosi logam dan penurunan efisiensi pembakaran. Oleh karena itu, standar kualitas di Indonesia menetapkan ambang batas kadar air yang semakin ketat seiring peningkatan rasio campuran, yakni maksimal 500 ppm untuk B20, 350 ppm untuk B30, dan 325 ppm untuk implementasi B35 [3].

Pada skala industri, umumnya penurunan kadar air agar memenuhi standar dilakukan menggunakan teknologi *vacuum dryer*. Meskipun begitu, aplikasinya pada unit pengolahan kapasitas menengah dan kecil seringkali tidak efisien akibat konsumsi energi spesifik yang sangat tinggi, mencapai rentang 0,5 hingga 5 kWh/kg air yang diuapkan [4]. Selain beban energi yang besar, proses penghilangan kadar air dengan sistem vakum memerlukan pemanasan pada temperatur tinggi, yakni sekitar 125°C hingga 145°C, yang berisiko memicu degradasi termal dan oksidasi pada komponen FAME dalam biodiesel [4]. Selain teknologi vakum, upaya pengembangan metode pemisahan kontaminan biodiesel juga telah dieksplorasi menggunakan sistem dekanter berbasis elektrokoagulasi yang mampu mencapai efisiensi separasi gliserol hingga 98,32% [5]. Meskipun metode elektrokoagulasi efektif dalam mempercepat pemisahan fase, pendekatan tersebut masih memerlukan input energi listrik dan penanganan elektroda secara periodik. Keterbatasan ini mendorong pengembangan teknologi pemisahan yang lebih sederhana dan hemat energi untuk skala kecil dan menengah. Sebagai alternatif yang lebih efisien, penggunaan sistem filter koaleser menawarkan metode pemisahan fase cair-cair yang mengandalkan interaksi permukaan media filter untuk mempercepat pemisahan fase berat dan ringan secara alami dengan memanfaatkan gaya gravitasi. Metode ini dipilih karena kapabilitasnya dalam memisahkan emulsi air dari biodiesel tanpa memerlukan energi termal yang tinggi. Hal ini krusial karena penggunaan panas pada kondisi vakum (cara konvensional) berisiko menurunkan stabilitas oksidasi biodiesel [6]. Selain itu, teknologi pemisahan mekanis seperti koaleser lebih efisien secara energi bagi industri dibandingkan sistem termal [7]. Meskipun optimasi pada tahap pencucian telah dilakukan untuk meminimalkan pengotor, biodiesel hasil pencucian tetap memerlukan

unit pemisahan akhir untuk menghilangkan kadar air sisa secara konsisten [8].

Efektivitas pemisahan emulsi biodiesel-air sangat bergantung pada sifat permukaan media filter. Saat ini, teknologi koaleser komersial masih didominasi oleh media sintetis seperti polimer polipropilen [9] atau material berbasis kaca [10]. Meskipun efektif, media sintetis memiliki kelemahan berupa biaya produksi yang tinggi dan jejak karbon yang besar dalam proses manufakturnya [11]. Sebaliknya, serat alam seperti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) menawarkan alternatif berkelanjutan karena bersifat *biodegradable* dan memiliki afinitas permukaan yang baik untuk memfasilitasi penggabungan tetesan (*coalescence*) fase terdispersi [12]. Kondisi ini berbanding terbalik dengan fokus optimasi koaleser saat ini yang masih terpaku pada penggunaan media sintetis kompleks yang rentan terhadap penurunan performa akibat akumulasi residu pada operasi kontinu [9], [13]. Faktanya, integrasi serat alam berbasis selulosa seperti TKKS ke dalam sistem penurunan kadar air untuk memenuhi standar ketat SNI hingga kini masih sangat jarang dieksplorasi [14].

Dalam sistem koaleser, mekanisme pemisahan air diawali dengan proses intersepsi, dimana butiran air emulsi ditangkap oleh permukaan serat selulosa yang hidrofilik [11]. Setelah menempel, butiran-butiran air tersebut mengalami proses koalesensi, yaitu penggabungan butiran kecil menjadi butiran yang lebih besar akibat tumbukan dan gaya tarik antar molekul air. Butiran air yang telah membesar kemudian akan mengalami sedimentasi akibat gaya gravitasi [10]. Secara molekuler, gugus hidroksil (-OH) pada selulosa TKKS memiliki afinitas yang kuat terhadap molekul air melalui pembentukan ikatan hidrogen [15]. Selain interaksi kimiawi tersebut, struktur anyaman serat yang acak menciptakan jalur *tortuosity* yang memperbesar peluang tumbukan antar butiran. Menurut Guo et. al 2023, jaringan serat yang kompleks ini meningkatkan efisiensi penangkapan droplet melalui mekanisme pemisahan fase yang mengandalkan sifat permukaan media filter, sehingga memicu proses koalesensi atau penggabungan droplet hingga mencapai massa kritis untuk sedimentasi secara alami [16]. Dengan memanfaatkan media filter berbasis limbah lokal seperti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), teknologi koaleser ini diharapkan mampu menurunkan kadar air secara efektif dengan konsumsi energi yang jauh lebih rendah karena memanfaatkan gaya gravitasi, menjadikannya pilihan yang lebih ekonomis dan berkelanjutan untuk skala produksi kecil dan menengah.

Pemilihan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebagai media filter koaleser didasari oleh berbagai

keunggulan karakteristik serat alam, di antaranya memiliki sifat hidrofilik alami yang kuat dengan komposisi kimia seperti pada **Error! Reference source not found.**, ketersediaan yang melimpah, serta sifatnya yang dapat diperbarui dan ramah lingkungan (*biodegradable*) [12]. Penggunaan limbah biomassa ini memberikan nilai tambah ekonomis sekaligus solusi berkelanjutan bagi industri biodiesel dibandingkan penggunaan media filter sintetis [17]. Integrasi media filter berbasis serat alam (TKKS) dalam sistem koaleser ini menjadi krusial untuk mengisi celah teknologi antara sistem pemurnian vakum yang memerlukan intensitas energi tinggi serta penggunaan media filter sintetis yang memiliki keterbatasan pada efisiensi biaya operasional. Pendekatan ini tidak hanya menawarkan kapabilitas separasi yang kompetitif secara mekanis, tetapi juga mendukung keberlanjutan industri biodiesel melalui pemanfaatan limbah biomassa lokal yang bersifat *biodegradable*.

Tabel 1. Komposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit

Komposisi Kimia	Persentase
Selulosa	35-45%,
Hemiselulosa	20-40%
Lignin	10%

(Sumber: Gozal et al. [18])

Dalam upaya menjembatani transisi dari desain teoritis ke implementasi fisik, penggunaan perangkat lunak simulasi menjadi instrumen krusial untuk memvalidasi kelayakan proses secara komprehensif. Sejauh ini, banyak pengembangan produksi biodiesel masih terbatas pada analisis potensi bahan baku secara regional [19], namun seringkali melewatkan tahap validasi teknis terhadap efisiensi alat yang dirancang. Oleh karena itu, penggunaan *SuperPro Designer* dalam penelitian ini berfungsi untuk memodelkan neraca massa dan energi secara presisi, sekaligus mengevaluasi kinerja teknis unit koaleser dalam berbagai skenario operasi [20]. Pendekatan simulasi ini memberikan landasan data yang valid untuk memprediksi efisiensi pemisahan tanpa risiko kegagalan desain pada skala eksperimental. Dengan demikian, hasil simulasi ini tidak hanya menjadi data pembanding bagi perhitungan manual, tetapi juga sebagai protokol validasi awal untuk memastikan rancang bangun sistem pemurnian biodiesel mampu memenuhi spesifikasi standar mutu SNI secara teoritis sebelum dilanjutkan ke tahap fabrikasi fisik.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk merancang unit filter koaleser menggunakan media Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebagai upaya efisiensi pemurnian biodiesel. Kinerja rancangan ini dievaluasi secara komputasi melalui simulasi pada perangkat lunak *SuperPro Designer* untuk memvalidasi

efisiensi pemisahan fase air-biodiesel berdasarkan analisis neraca massa. Adapun parameter keberhasilan dalam perancangan ini difokuskan pada kemampuan unit dalam menghasilkan kualitas biodiesel yang memenuhi standar mutu SNI 7182:2015, terutama pada parameter kadar air maksimal sebesar 0,05%-v.

METODOLOGI

Penelitian ini merupakan studi simulasi proses yang difokuskan pada pemodelan pemisahan fasa cair-cair. Pendekatan metodologi diterapkan secara sistematis untuk memvalidasi kelayakan operasional dan mengevaluasi tingkat efisiensi pemisahan emulsi biodiesel-air secara komputasional. Rangkaian tahapan dalam penelitian ini mencakup penentuan instrumen perangkat lunak, perumusan batas kondisi operasi termodinamika, hingga eksekusi neraca massa komprehensif yang dijabarkan secara terstruktur pada sub-bab berikut ini.

Pemilihan Perangkat Lunak dan Pendekatan Pemodelan

Dalam pemodelan sistem pemisahan cair-cair ini, estimasi kesetimbangan fasa termodinamika dikalkulasi menggunakan model paket properti (*property package*) **UNIFAC (Universal Quasichemical Functional Group Activity Coefficients)** yang tersedia dalam *SuperPro Designer*. Pemilihan model ini didasarkan pada kemampuannya yang teruji dalam memprediksi koefisien aktivitas campuran sistem non-ideal dan cairan polar/non-polar, yang sangat krusial untuk mengevaluasi interaksi antara molekul FAME (non-polar) dengan air, metanol, dan gliserol (polar) selama proses pemisahan. Perlu dicatat bahwa pendekatan simulasi *in-silico* ini berfokus pada analisis kesetimbangan massa makroskopis dan termodinamika pemisahan ideal, serta belum memasukkan variabel dinamika fluida mikroskopis (seperti tegangan antarmuka, kinetika koalesensi tetesan, atau perilaku pembasahan spesifik pada pori serat TKKS).

Penentuan Komponen Kimia

Langkah awal dalam simulasi adalah mendefinisikan komponen-komponen murni dan campuran yang terdapat dalam proses. Seluruh spesifikasi bahan kimia diregistrasikan ke dalam *database* sistem agar kalkulasi properti termodinamika dan fisik dapat berjalan dengan presisi. Komponen utama yang terlibat dalam keseluruhan simulasi pemisahan ini antara lain:

Tabel 2. Data *Pure Components* untuk Parameter Proses

No	Komponen	Rumus Kimia	Berat Molekul (gr/gmol)
1	Minyak Goreng Sawit (Tripalmitin)	C ₅₁ H ₉₈ O ₆	885
2	Metanol	CH ₃ OH	32,042
3	Kalium Hidroksida	KOH	56,106
4	<i>Fatty Acid Methyl Ester</i> (FAME) atau Biodiesel	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	296,330
5	Gliserol	C ₃ H ₈ O ₃	92,094
6	Air	H ₂ O	18,015

Penentuan Diagram Alir Proses

Tahapan proses dimodelkan secara terpadu melalui penyusunan diagram alir. Alur simulasi ini memproyeksikan tahapan operasional dari reaktor hingga tahap akhir pemurnian, yang meliputi:

Tabel 3. Data Unit untuk Proses Simulasi

No	Unit	Fungsi	Kondisi Operasi
1	<i>Stirred Reactor</i>	Untuk tempat proses terjadinya reaksi transesterifikasi	Suhu 60°C dan waktu 60 menit
2	<i>Component Splitting</i>	Untuk tempat pemisahan awal setelah proses reaksi transesterifikasi	Waktu 120 menit
3	<i>Stirred Reactor</i>	Untuk tempat proses pencucian	Suhu 60°C dan waktu 60 menit
4	<i>Component Splitting</i>	Untuk tempat pemisahan setelah proses pencucian	Waktu 60 menit
5	<i>Component Splitting</i>	Untuk tempat pemisahan biodiesel-air (Filter Koaleser)	Waktu 30 menit

Pelaksanaan Simulasi dan Validasi Desain

Setelah melengkapi konfigurasi parameter operasional, seperti laju masuk, waktu tinggal, dan suhu operasi, simulasi neraca massa dijalankan. Fokus utama dari

simulasi dan validasi perancangan ini dititikberatkan secara khusus pada kinerja pemisahan di unit filter koaleser. Untuk memastikan kelayakan operasional desain secara teoritis, rancangan sistem dinyatakan valid jika memenuhi dua parameter evaluasi utama berikut yang diekstrak dari laporan simulasi *SuperPro Designer*:

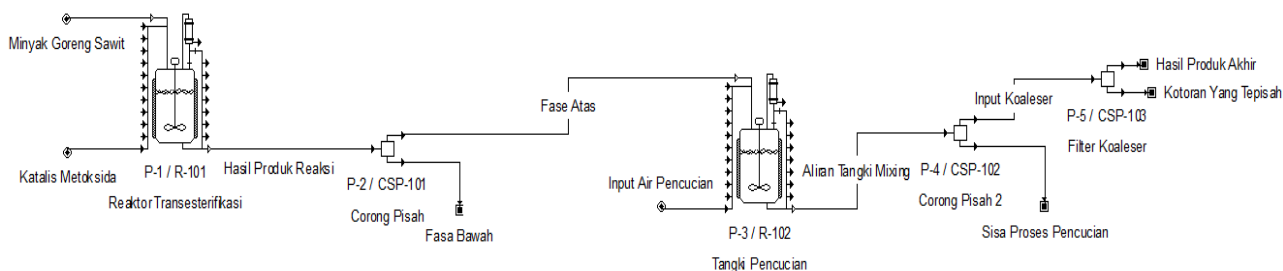
1. Efisiensi Pemisahan Air: Parameter ini mengukur persentase air dan kelembapan yang berhasil dipisahkan dari emulsi biodiesel pasca-pencucian oleh unit koaleser. Efisiensi yang tinggi memvalidasi kemampuan serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dalam menangkap dan menggabungkan butiran air.
2. Komposisi Aliran Output (Fraksi FAME dan Limbah): Keberhasilan desain diukur melalui distribusi komposisi pada dua aliran keluar koaleser. Sistem dinyatakan layak secara operasional jika fasa ringan (produk utama) didominasi oleh fraksi FAME dengan kemurnian tinggi (mendekati 100% atau >99,99%), sementara pengotor dominan seperti air, sisa metanol, dan gliserol terisolasi secara komprehensif ke dalam aliran fasa berat (limbah).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan ini menggunakan evaluasi kinerja alat pemisah cair-cair berbasis koalesensi mekanis menggunakan simulasi *SuperPro Designer*. Analisis dititikberatkan pada kemampuan desain perangkat komputasional dalam memisahkan fasa campuran *crude* biodiesel dan air pasca-pencucian.

Pemodelan Diagram Alir Proses

Sistem Produksi dan pemisahan dikonstruksi ke dalam antarmuka perangkat lunak dalam mode *batch*. Rangkaian proses dimodelkan mulai dari unit reaktor transesterifikasi (P-1), unit pemisahan awal (P-2), tangki pencucian basah (P-3), unit pemisahan air cucian (P-4), hingga unit pemisahan biodiesel-air atau Filter Koaleser (P-5), seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.

**Gambar 1.** Diagram Alir Proses Simulasi *SuperPro Designer*

Karakteristik Umpan Masuk Filter Koaleser

Fluida yang dialirkan menuju filter koaleser (P-5) bersumber dari keluaran unit P-4. Aliran umpan ini memproyeksikan kondisi emulsi *crude* biodiesel yang masih menahan fraksi air dan sisa reaktan tersuspensi. Hasil kalkulasi perangkat lunak mencatat laju alir massa total umpan sebesar 3124,50 gr/batch.

Meskipun komponen *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) telah mendominasi komposisi umpan sebesar 99,70%, sistem masih mendeteksi keberadaan impuritas polar yang wajib dipisahkan untuk memenuhi standar baku mutu. Impuritas tersebut terdiri atas metanol sisa sebesar 0,23% (7,15 gr/batch), gliserol sebesar 0,04% (1,24 gr/batch), residu pencucian berupa air sebesar 0,03% (0,94 gr/batch), serta katalis Kalium Hidroksida (KOH) sebesar 0,002% (0,06 gr/batch).

Meskipun kalkulasi neraca massa mendeteksi keberadaan air dan impuritas sisa, penting untuk digarisbawahi bahwa pemodelan umpan ini merupakan penyederhanaan konseptual. Dalam proses transesterifikasi aktual yang dikatalisasi basa (seperti KOH), potensi pembentukan sabun (saponifikasi) akibat tingginya asam lemak bebas atau *Free Fatty Acid* (FFA) sangat krusial untuk dievaluasi. Sabun bertindak sebagai surfaktan penstabil emulsi yang dapat menghambat proses pemisahan fasa cair-cair (*phase disengagement*). Oleh karena itu, simulasi ini berjalan pada asumsi ideal bahwa tahap pencucian (*water washing*) sebelumnya telah mereduksi kandungan sabun hingga batas ekuilibrium yang tidak mengganggu tegangan antarmuka pada unit koaleser.

Selain itu, representasi material TKKS dalam sistem ini diasumsikan tidak menggunakan biomassa mentah (*raw material*). Untuk mencapai fungsi koalesensi mekanis yang stabil, serat TKKS secara praktis diasumsikan telah melewati tahapan pra-perlakuan (*pretreatment*) terstandarisasi, seperti pengeringan termal, fraksinasi ukuran, dan delignifikasi parsial, guna mengoptimalkan porositas, mencegah degradasi mekanis, serta mengekspos gugus fungsi hidrofilik pada selulosa secara maksimal.

Kinerja Pemisahan Fasa Ringan (Produk Biodiesel)

Di dalam unit filter koaleser (P-5), simulasi dikunci pada parameter operasi isothermal dengan suhu pemanasan konstan 60°C dan tekanan 1 atm. Evaluasi keberhasilan desain filter koaleser diukur dari kemampuannya memisahkan fasa ringan (biodiesel murni) ke aliran atas (*top stream*). Hasil komputasi komposisi produk keluaran dirangkum pada tabel berikut ini.

Tabel 4. Komposisi Laju Alir Fasa Ringan

Komponen	Laju Alir Massa (gr/batch)	Fraksi Massa (%)	Konsentrasi (gr/L)
FAME (Biodiesel)	3115,12	>99,99	880
Gliserol	<0,01	<0,01	<0,01
Metanol	<0,01	<0,01	<0,01
Air	<0,01	<0,01	<0,01
Total	3115,12	100	-

(Sumber: Hasil Simulasi *SuperPro Designer*)

Tabel ini mengonfirmasi kinerja pemisahan yang optimal. Fraksi FAME terekstraksi murni secara komputasi hingga menyentuh angka fraksi massa >99,99%. Molekul FAME yang bersifat non-polar memiliki viskositas dan gravitasi spesifik yang lebih rendah dibandingkan impuritas, sehingga dengan mudah meloloskan diri ke atas tumpukan matriks koaleser. Sisa air dan gliserol pada fasa ini tereduksi secara sempurna hingga level jejak kuantitas (*trace amount*) yang dapat diabaikan keberadaannya.

Isolasi Impuritas pada Fasa Berat (Arus Limbah)

Untuk membuktikan bahwa sistem mematuhi hukum kekekalan massa dan tidak terjadi kehilangan material secara tak terdefinisi, evaluasi dilakukan terhadap arus fasa berat (*bottom stream*) yang mengisolasi impuritas dari produk utama.

Tabel 5. Komposisi Laju Alir Fasa Berat

Komponen	Laju Alir Massa (gr/batch)	Fraksi Massa (%)	Konsentrasi (gr/L)
KOH	0,06	0,63	5,14
Gliserol	1,24	13,21	108,32
Metanol	7,15	76,20	624,78
Air	0,94	9,96	81,71
Total	9,38	100	-

(Sumber: Hasil Simulasi *SuperPro Designer*)

Distribusi komponen secara komprehensif pada Tabel 5 merepresentasikan rekonstruksi neraca massa (*mass*

balance) inlet-outlet yang konsisten dari blok unit P-5. Konsentrasi impuritas polar yang mendominasi aliran bawah (*bottom stream*) ini mengonfirmasi kelogisan pemisahan termodinamika pada perangkat lunak, di mana fasa berat bertindak sebagai jalur pembuangan absolut tanpa menduplikasi nilai aliran produk fasa ringan.

Analisis komputasi pada tabel ini menyatakan bahwa unit filter koaleser secara agresif memisahkan total massa impuritas sebesar 9,38 gr/*batch*. Seluruh komponen pada arus limbah ini (metanol, gliserol, air, dan KOH) merupakan senyawa-senyawa polar hidrofilik. Secara teoritis mekanika fluida, material serat selulosa seperti TKKS diasumsikan memiliki afinitas yang tinggi dalam menahan laju molekul polar tersebut, sehingga memicu persentuhan (koalesensi) fasa emulsi air. Setelah *droplet* air bergabung menjadi volume yang lebih makro, perbedaan gravitasi spesifik menarik fasa berat ini turun menuju pembuangan bawah tanpa membawa molekul biodiesel (FAME 0%).

Secara komputasional, hasil simulasi pada Tabel 5 menunjukkan ketiadaan FAME (0%) pada fasa berat. Namun, hasil ini perlu didiskusikan lebih kritis karena merepresentasikan batas kesetimbangan termodinamika ideal (*ideal equilibrium limit*) di dalam perangkat lunak. Secara fisik dan empiris, pemisahan absolut 100% sangat sulit dicapai. Dalam operasi nyata di lapangan, kemungkinan terjadinya *entrainment* (terbawanya sebagian kecil fasa ringan ke dalam fasa berat) atau pembentukan emulsi sekunder akibat turbulensi mikroskopis tetap ada, sehingga fasa berat diproyeksikan masih akan menyisakan FAME dalam jumlah jejak (*trace amount*).

Selain itu, penting untuk dicatat bahwa pemodelan ini memiliki keterbatasan inheren. Simulasi *SuperPro Designer* berasumsi pada distribusi aliran fluida yang homogen dan belum memperhitungkan fenomena *fouling* (pengotoran) atau penyumbatan pada pori matriks serat TKKS oleh akumulasi gliserol yang kental seiring berjalannya waktu operasi. Hal ini merupakan batasan yang perlu dievaluasi pada tahap pengujian fisik.

Efisiensi Pemisahan dan Batasan Desain Konseptual

Perancangan komputasional filter koaleser direpresentasikan melalui tingkat efisiensi penurunan fasa air berdasarkan neraca massa awal dan akhir. Berdasarkan kalkulasi laju alir air pada umpan sebesar 0,94 gr/*batch* yang tereduksi menjadi jejak kuantitas pada produk keluaran, model memproyeksikan efisiensi pemisahan air teoretis mencapai 99,99%. Capaian *in silico* ini menunjukkan kelayakan konseptual dari rancang bangun filter koaleser serat TKKS,

menjadikannya landasan yang cukup rasional untuk dilanjutkan ke tahap fabrikasi dan pengujian fisik di laboratorium.

Capaian efisiensi pemisahan air sebesar 99,99% ini menunjukkan keunggulan komparatif ketika disandingkan dengan sistem pemisahan cair-cair konvensional. Sebagai perbandingan, beberapa literatur mencatat bahwa penggunaan filter koaleser komersial berbasis glass fiber atau resin sintetik umumnya menghasilkan efisiensi pemisahan air pada rentang 90% hingga 98% [21], [22]. Tingginya efisiensi pada desain ini diproyeksikan berasal dari tingginya afinitas hidrofilik alami dari selulosa TKKS yang memberikan luas permukaan kontak intersep yang jauh lebih superior dibandingkan material sintetik.

Di luar tingginya angka efisiensi pemisahan air, kualitas akhir biodiesel tidak dapat divalidasi semata-mata dari metrik reduksi air. Meskipun fasa ringan didominasi oleh FAME, kadar impuritas sisa seperti metanol dan gliserol bebas mutlak memerlukan konfirmasi pengujian analitis lanjutan (seperti *Gas Chromatography*) untuk memastikan kepatuhannya terhadap standar mutu SNI Biodiesel.

Lebih lanjut, interpretasi hasil efisiensi pemisahan sebesar 99,99% ini harus dibatasi oleh sifat konseptual dari simulasi (*conceptual placeholder*). Pertama, pemodelan ini dieksekusi dalam mode *batch*, padahal kinerja koaleser berserat secara fundamental sangat bergantung pada dinamika fluida kontinu (*flow-dependent*), seperti kecepatan superfisial (*superficial velocity*) dan waktu kontak. Kedua, simulasi ini belum mendefinisikan parameter rancang bangun fisik yang spesifik, seperti diameter serat, tebal unggun (*bed thickness*), permeabilitas, orientasi aliran, dan batas penurunan tekanan (*allowable pressure drop*). Ketiga, klaim bahwa sifat hidrofilisitas alami dari selulosa TKKS akan secara otomatis memberikan kinerja superior dalam matriks emulsi biodiesel yang kompleks masih memerlukan pembuktian empiris. Dalam operasional fisik di lapangan, viskositas fluida dan keberadaan kontaminan penstabil emulsi dapat memicu masalah operasional seperti retensi berlebih, pembengkakan serat (*swelling*), atau penyumbatan pori (*fouling*) yang berujung pada kegagalan alat (*breakthrough*). Oleh karena itu, simulasi ini berfungsi murni sebagai studi kelayakan awal untuk membenarkan perlunya penyelidikan eksperimental lebih lanjut, bukan sebagai justifikasi kesiapan alat untuk direplikasi di skala industri.

Isolasi Impuritas pada Fasa Berat (Arus Limbah)

Evaluasi kinerja pemurnian berbasis perangkat lunak dalam studi ini menghasilkan persentase pemisahan yang sangat tinggi secara teoretis. Namun, interpretasi hasil tersebut tunduk pada sejumlah batasan mekanistik dan ketidakpastian parameter yang inheren dalam pemodelan ideal. Beberapa faktor kritis operasional yang belum terakomodasi dalam kerangka simulasi komputasional ini meliputi:

1. Stabilitas Material dan Degradasi: Studi ini menggunakan asumsi afinitas hidrofilik statis pada serat TKKS. Pada kenyataannya, biomassa lignoselulosa alami sangat rentan terhadap perubahan struktur fisik dan kimia (*swelling*, pelindian/*leaching*, maupun degradasi mekanis) akibat paparan berulang terhadap biodiesel hangat, metanol, air, dan sisa basa (KOH). Ketiadaan data empiris mengenai siklus umur pakai (*service life*) dan stabilitas dimensi serat merupakan parameter ketidakpastian (*uncertainty parameter*) yang dapat mendistorsi proyeksi efisiensi jangka panjang.
2. Evolusi Ukuran *Droplet* (Droplet Size Evolution): Blok *Component Splitting* mengeksekusi pemisahan makroskopis tanpa memodelkan dinamika populasi *droplet* fasa terdispersi. Keberhasilan alat pemisah sejati (koaleser) sangat bergantung pada perilaku tangkapan mikro (*micro-capture*), pertumbuhan *droplet*, dan pelepasan (*disengagement*) pada permukaan serat, yang tidak dapat diprediksi secara akurat tanpa analisis distribusi ukuran *droplet* inlet dan outlet secara empiris.
3. Analisis Sensitivitas Operasional: Mode simulasi *batch* tunggal pada kondisi isothermal dan tekanan konstan yang digunakan dalam desain konseptual ini tidak mencerminkan sensitivitas alat terhadap fluktuasi profil umpan di dunia nyata. Pemisahan hidrokarbon konvensional terbukti sangat sensitif terhadap beban impuritas inlet, laju alir fluida, rasio residu sabun, dan fluktuasi viskositas emulsi. Tanpa komparasi laju aliran (*continuous-flow testing*) dan evaluasi laju kenaikan hambatan hidrolik (*pressure drop progression*) yang berpotensi memicu kegagalan karena *fouling*, kinerja optimal yang dilaporkan murni bersifat kondisional berdasarkan pengaturan awal simulasi.

Oleh karena itu, desain berbasis *in silico* ini memposisikan dirinya murni sebagai landasan teoretis. Validasi komprehensif, mencakup komparasi kinerja secara kuantitatif (*benchmarking*) dengan media koaleser referensi (misalnya *glass fiber* sintetik), pengukuran tegangan antarmuka, serta penilaian tekno-ekonomi mengenai pengelolaan limbah media filter bekas, menjadi prasyarat mutlak untuk menjembatani batasan

simulasi konseptual menuju kesiapan fabrikasi dan implementasi praktis (*engineering readiness*).

KESIMPULAN

Studi simulasi konseptual ini menunjukkan bahwa unit filter koaleser berbasis Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) memiliki potensi teoretis sebagai alternatif pemisahan emulsi biodiesel-air pasca-pencucian. Berdasarkan pemodelan kesetimbangan massa pada perangkat lunak, desain komputasional ini memproyeksikan efisiensi reduksi kadar air yang signifikan dengan fasa ringan yang terdistribusi ke arah fraksi FAME. Namun, persentase komposisi hasil simulasi ini murni merepresentasikan batas pemisahan termodinamika ideal, dan tidak dapat diklaim ekuivalen dengan parameter kualitas bahan bakar aktual yang diatur dalam standar SNI (seperti angka asam, viskositas, maupun stabilitas oksidasi).

Lebih jauh, kelayakan praktis dari desain konseptual ini masih memiliki keterbatasan absolut karena belum memodelkan parameter hidrodinamika esensial, seperti evolusi ukuran *droplet*, perilaku penurunan tekanan (*pressure drop*), ketahanan mekanis serat TKKS terhadap proses pembengkakan (*swelling*), maupun akumulasi *fouling*. Oleh karena itu, sebelum konsep ini dapat dipertimbangkan untuk fabrikasi fisik skala pilot, penelitian lanjutan yang berfokus pada uji aliran kontinu (*continuous-flow testing*), analisis sensitivitas variabel operasi, serta komparasi tekno-ekonomi secara empiris mutlak diperlukan.

Berdasarkan laju alir air pada umpan sebesar 0,94 gr/*batch* dan sisa air pada produk keluaran sebesar <0,01 gr/*batch*, diperoleh tingkat efisiensi pemisahan air sebesar 99,99%. Nilai rasio isolasi yang tinggi ini memvalidasi kelayakan operasional rancang bangun alat filter koaleser serat TKKS, membuktikan bahwa desain tersebut efektif berdasarkan hasil simulasi *in silico*. Meskipun demikian, kinerja pemisahan yang dihasilkan masih didasarkan pada asumsi kesetimbangan ideal komputasional yang belum mempertimbangkan dinamika mekanis seperti *fouling*. Oleh karena itu, fabrikasi fisik dan validasi eksperimental di laboratorium mutlak diperlukan sebelum klaim kinerja dan tingkat efisiensi alat ini dapat digeneralisasi untuk aplikasi skala industri nyata.

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknologi Rekayasa Bioproses Energi Terbarukan (TRBET), Politeknik ATI Padang, atas dukungan fasilitas akademik yang diberikan, serta kepada seluruh pihak yang telah memberikan arahan dan bimbingan komprehensif selama proses penyelesaian jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Rachmadona, F. S. Nurruyda, H. A. Sumeru, H. D. Kusuma, and D. A. S. L. A. Dewi, "Produksi Biodiesel dari Crude Palm Oil (CPO) dengan Menggunakan Lipase dan Etanol Konsentrasi Rendah," vol. 2, no. 1, Desember 2023.
- [2] A. A. Budiman and S. Samik, "Review Artikel : Produksi Biodiesel Dari Minyak Goreng Bekas Dengan Metode Transesterifikasi Menggunakan Katalis", vol. 12, no. 2, pp. 36-48, Mei 2023.
- [3] S. S. Wirawan, M. D. Solikhah, H. Setiapraja, and A. Sugiyono, "Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives," Jan. 01, 2024, Elsevier Ltd. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113911>.
- [4] B. Herianto, W. Febrina, S. Indrawan, and W. Fitriana, "Pengoptimalan Proses Pemurnian Biodiesel Pada Unit Refinery PT. X," *Jurnal Unitek*, vol. 16, no. 2, 2023.
- [5] L. Mandalini, D. Stivano, D. Nirmala, and A. Akbar, "Rancang Bangun Prototype Dekanter dengan Sistem Elektrokoagulasi untuk Proses Pemisahan Gliserol dalam Crude Biodiesel," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 11, no. 1, 2026.
- [6] A. Pamungkas, M. D. Solikhah, F. T. Pratiwi, Romelan, Matheofani, and S. S. Wirawan, "Investigation of Biodiesel Stability under Vacuum Heating Process," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1187/1/012017>.
- [7] A. K. Paminto, M. Karuniasa, and E. Frimawaty, "Optimization of palm oil biodiesel production: Environmental impact analysis and POME waste utilization," *Applied Environmental Science*, vol. 2, no. 1, 2024, doi: <https://doi.org/10.61511/aes.v2i1.2024.820>.
- [8] N. Azura, T. Prakoso, and M. Pratiwi, "Purification Optimization of Biodiesel Derived from Glyceroxide-Catalyzed Transesterification," *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, vol. 9, no. 2, p. 74, Jan. 2026, doi: <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v9i2.113221>.
- [9] X. Wu, Y. Wang, C. Li, L. Liu, X. Li, and C. Chang, "Multi-Layer Filter Material with a Superoleophobic Pore Size Gradient for the Coalescence Separation of Surfactant-Stabilized Oil-in-Water Emulsions," *Processes*, vol. 13, no. 5, May 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/pr13051600>.
- [10] J. Daglish et al., "A Coalescing Filter for Liquid-Liquid Separation and Multistage Extraction in Continuous-Flow Chemistry," *Org. Process Res. Dev.*, vol. 28, no. 5, pp. 1979–1989, May 2024, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.oprd.4c00012>.
- [11] S. M. Ajayi et al., "Hydrophobic modification of cellulose from oil palm empty fruit bunch: Characterization and application in Pickering emulsions stabilization," *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, vol. 5, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100282>.
- [12] P. Meilina, N. H. Haryanti, and T. N. Manik, "Studi Alkalisasi Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Penguat Komposit Material Akustik.," *Jurnal Natural Scientiae*, vol. 4, no. 1, 2024, doi: <https://doi.org/10.20527/jns.v4i1.12565>.
- [13] A. Krasiniński, S. Kamocki, and M. Stor, "Blocking of Gas–Liquid Coalescing Filters with Accumulated Oil during the On–Off Operation of a Filtration System," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14199006>.
- [14] M. Lippi, L. Riva, M. Caruso, and C. Punta, "Cellulose for the Production of Air-Filtering Systems: A Critical Review," 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15030976>.
- [15] F. Dimawarnita, Y. Faramitha, H. T. Prakoso, I. Puspitasari, D. N. Kalbuadi, and D. Prasetyo, "Characterization of cellulose from oil palm empty fruit bunches by fast delignification process with different solvents," *E-Journal Menara Perkebunan*, vol. 91, no. 2, 2023, doi: <https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v9i2.542>.
- [16] Y. Guo, Z. Guo, and W. Liu, "Bionic multifunctional fibrous materials for efficient oil/water separation," Jul. 01, 2023, John Wiley and Sons Inc. doi: <https://doi.org/10.1002/dro2.75>.
- [17] A. Karimah et al., "A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations," *Journal of Materials Research and Technology*, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>.
- [18] C. Gozal et al., "Valorization of Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) for Bioethanol
DOI: <http://dx.doi.org/10.52759/reactor.v7i1.82>

- Production in Indonesia,” Biosaintifika*, vol. 16, no. 3, pp. 508–517, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v16i3.12099>.
- [19] R. T. Setiadi and N. P. Miefthawati, “*Potential Analysis of Used Cooking Oil as Raw Material for Biodiesel Production in Pekanbaru City Analisis Potensi Minyak Jelantah Sebagai Bahan Baku Produksi Biodiesel di Kota Pekanbaru,” IJEERE: Indonesian Journal of Electrical Engineering and Renewable Energy*, vol. 3, pp. 70–79, 2023, doi: <https://doi.org/10.57152/ijeere.v3i1>.
- [20] S. N. Gebremariam and J. M. Marchetti, “*Process simulation and techno-economic performance evaluation of alternative technologies for biodiesel production from low value non-edible oil,” Biomass Bioenergy*, vol. 149, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106102>.
- [21] S. U. Patel, P. S. Kulkarni, S. U. Patel, and G. G. Chase, “*Glass fiber coalescing filter media augmented with polymeric submicron fibers and modified with angled drainage channels,” Sep. Purif. Technol.*, vol. 120, pp. 230–238, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.10.003>.
- [22] Q. Han and Y. Kang, “*Separation of water-in-oil emulsion with microfiber glass coalescing bed,” J. Dispers. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 11, 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1259073>