

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

**PRODUKSI BIODIESEL NON-KATALITIK DARI *PALM FATTY ACID*
DISTILLATE PADA *BUBBLE COLUMN REACTOR* DENGAN
TEKNOLOGI *FINE BUBBLE***

MAHARANI DEWI SOLIKHAH



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA
PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “**Produksi Biodiesel Non-Katalitik dari *Palm Fatty Acid Distillate* pada *Bubble Column Reactor* dengan Teknologi *Fine Bubble***” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Maharani Dewi Solikhah
F1603222018

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

MAHARANI DEWI SOLIKHAH. Produksi Biodiesel Non-Katalitik dari *Palm Fatty Acid Distillate* pada *Bubble Column Reactor* dengan Teknologi *Fine Bubble* Dibimbing oleh Y. ARIS PURWANTO, DYAH WULANDANI, SONI SOLISTIA WIRAWAN, dan ANTO TRI SUGIARTO.

Biodiesel merupakan alternatif bahan bakar diesel yang potensial, namun biaya bahan baku masih mendominasi biaya produksi, mencapai 75–90%. Pemanfaatan *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD) sebagai bahan baku berkadar asam lemak tinggi dapat menekan biaya produksi. Akan tetapi, proses konvensional menggunakan katalis asam homogen memerlukan biaya tinggi untuk material tahan korosi dan pengolahan limbah. Oleh karena itu, dikembangkan proses esterifikasi non-katalitik menggunakan *superheated methanol vapor* (SMV) dalam *bubble column reactor* pada tekanan atmosfer. Penelitian ini bertujuan mengembangkan teknologi produksi biodiesel dari PFAD dengan konversi di atas 90% melalui optimasi kondisi operasi dan desain reaktor. Penggunaan *packing* pada reaktor menghasilkan kadar FAME 97,5% dan konversi di atas 90% pada 270 °C selama 180 menit. Untuk meningkatkan luas kontak antarfasa, dikembangkan “*Swirl Flow Nozzle Biodiesel*” yang mampu menghasilkan *fine bubbles* dalam medium biodiesel dengan rasio Q_l/Q_g sebesar 1074–5616, ukuran *nanobubbles* sebesar 900–1350 nm, dan *microbubbles* sebesar 35–50 μm . Produksi biodiesel non-katalitik dengan proses SMV menggunakan *fine bubbles* dapat menghasilkan konversi hingga 97,6%. Model RSM polynomial orde dua ($R^2 = 0,964$) menunjukkan temperatur dan waktu reaksi sebagai faktor dominan, dengan kondisi optimum pada 248,5 °C selama 91,2 menit yang menghasilkan produk biodiesel dengan kadar FFA sebesar 0,07%. Analisis tekno-ekonomi menunjukkan biaya produksi proses ini 21% lebih rendah dibandingkan metode katalitik konvensional.

Kata Kunci: biodiesel non-katalitik, PFAD, *fine bubbles*, *swirl flow*



SUMMARY

MAHARANI DEWI SOLIKHAH. Non-Catalytic Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate in a Bubble Column Reactor with Fine Bubble Technology. Supervised by Y. ARIS PURWANTO, DYAH WULANDANI, SONI SOLISTIA WIRAWAN, and ANTO TRI SUGIARTO.

Biodiesel is a promising alternative to conventional diesel fuel; however, feedstock cost remains the dominant component, accounting for approximately 75–90% of total production costs. The utilization of Palm Fatty Acid Distillate (PFAD), a low-cost feedstock with high free fatty acid content, offers significant potential to reduce production expenses. Nevertheless, conventional PFAD conversion processes employ homogeneous acid catalysts, which require expensive corrosion-resistant materials and waste treatment systems. Therefore, a non-catalytic esterification process using superheated methanol vapor (SMV) in a bubble column reactor under atmospheric pressure was developed. This study aimed to develop a PFAD-based biodiesel production technology with conversion above 90% through optimization of operating conditions and reactor design. The application of packing in the reactor achieved a FAME content of 97.5% and conversion above 90% at 270 °C for 180 minutes. To enhance interfacial contact area, a “Swirl Flow Nozzle Biodiesel” was developed to generate fine bubbles in biodiesel medium, producing Q_l/Q_g ratios of 1074–5616, nanobubbles of 900–1350 nm, and microbubbles of 35–50 μm . Non-catalytic biodiesel production using the SMV process using fine bubbles can achieve conversions of up to 97.6%. The second-order polynomial RSM model ($R^2 = 0.964$) shows reaction temperature and time as the dominant factors, with optimum conditions at 248.5 °C for 91.2 minutes, producing biodiesel with FFA content of 0.07%. Techno-economic analysis shows that the production costs of this process are 21% lower than those of conventional catalytic methods.

Keywords: non-catalytic biodiesel, PFAD, fine bubbles, swirl flow



© Hak Cipta Milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



**PRODUKSI BIODIESEL NON-KATALITIK DARI *PALM FATTY ACID*
DISTILLATE PADA *BUBBLE COLUMN REACTOR* DENGAN
TEKNOLOGI *FINE BUBBLE***

MAHARANI DEWI SOLIKHAH

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Doktor Ilmu Keteknikan Pertanian

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR**

2026

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

1. Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc.Agr
2. Dr. Ir. Dadan Kusdiana, M.Sc.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

1. Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc.Agr
2. Dr. Ir. Dadan Kusdiana, M.Sc.



Judul Disertasi : Produksi Biodiesel Non-Katalitik dari *Palm Fatty Acid Distillate* pada *Bubble Column Reactor* dengan Teknologi *Fine Bubble*

Nama : Maharani Dewi Solikhah

NIM : F1603222018

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Disetujui oleh:

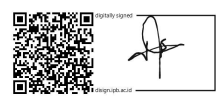
Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Y. Aris Purwanto, M.Sc.



Pembimbing 2:

Dr. Ir. Dyah Wulandani, M.Si.



Pembimbing 3:

Prof. Dr. Ir. Soni Solistia Wirawan, M.Eng.



Pembimbing 4:

Dr Anto Tri Sugiarto, B.Eng, M.Eng.



Diketahui oleh:

Ketua Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian

Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastira M.Agr.

NIP 196110191986011002



Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi

Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr.

NIP. 196105021986031002



Tanggal Ujian Tertutup: 10 Juni 2026

Tanggal lulus

Tanggal Ujian Terbuka: 7 Juli 2026



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala Karunia-Nya sehingga disertasi ini berhasil diselesaikan dengan judul **“Produksi Biodiesel Non-Katalitik dari Palm Fatty Acid Distillate pada Bubble Column Reactor dengan Teknologi Fine Bubble”**.

Penulisan disertasi ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Y. Aris Purwanto, M.Sc., Dr. Ir. Dyah Wulandani, M.Si., Prof. Dr. Ir. Soni Solistia Wirawan, M.Eng. dan Dr. Anto Tri Sugiarto, B.Eng, M.Eng. selaku komisi pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dukungan, dan masukan yang berharga selama proses penelitian dan penulisan disertasi ini.
2. Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc.Agr. dan Dr. Ir. Dadan Kusdiana, M.Sc. selaku penguji luar komisi pembimbing pada ujian tertutup dan terbuka atas bimbingan dan saran yang konstruktif untuk memperbaiki dan menyempurnakan disertasi ini.
3. Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastira M.Agr. selaku ketua program studi TEP dan Dr. Liyantono, STP, M.Agr. selaku sekretaris program studi TEP, serta seluruh dosen dan tendik di Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, atas bantuan, arahan, dan dukungan selama menempuh studi.
4. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) melalui Direktorat Manajemen Talenta yang telah memberikan dukungan melalui beasiswa Degree by Research.
5. Badan Pengelola Dana Perkebunan (BPDP) yang telah memberikan dukungan dana riset melalui GRS K23 No PRJ-67/DPKS/2023.
6. PT Primus Sanus Cooking Oil Industrial (PT Priscolin) atas dukungan bahan baku PFAD.
7. Prof. Dr. Cuk Supriyadi Ali Nandar selaku Kepala Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi (PRKKE) BRIN tahun 2022 – 2024 sekaligus Kepala Organisasi Riset Energi dan Manufaktur (2024 – sekarang) serta Tata Sutardi, PhD. selaku Kepala PRKKE BRIN tahun 2024 – 2025, yang telah memberikan izin, kesempatan serta dukungan bagi penulis untuk melaksanakan tugas belajar.
8. Dr. Jan Setiawan, M.Si. selaku Kepala Pusat Riset tempat penulis saat ini bertugas yaitu Pusat Riset Teknologi Bahan Bakar (PRTBB) BRIN, terima kasih atas dukungan, izin, dan



kesempatan bagi penulis dalam melaksanakan studi doktoral. Demikian pula kepada Dr. Hari Setiaprja selaku Plt. Kepala PRTBB (2025 – 2026).

9. Rekan-rekan di PRTBB maupun PRKKE serta Ex BTBRD BPPT (Engineering Center), khususnya rekan-rekan di Kelompok Riset Pengembangan dan Pemanfaatan Biofuel, terima kasih atas pengertian, dukungan, dan semangatnya.
10. Teman-teman di Program Doktor Ilmu Keteknikan Pertanian khususnya Angkatan 2022 dan 2023: Yunisa, Yulni, Nunik, Edo, Bang Sudir, Pak Puji, Pak Diang, Pak Adji, Pak Husen, Bu Ana, Pak Harianto, Pak Syafiandi, Bintang, terima kasih atas kebersamaan dan diskusi selama menempuh studi doktoral;
11. Teman-teman di IPB yang juga banyak membantu selama studi doktor, terutama sesama bimbingan di CCF: Pak Andi, Pak Hendri, Widya, Pak Ridwan, Pak Hata, Pak Omil, Pak Furqon, Mbak Sari, Mbak Verra, Pak Zaki;
12. Rekan-rekan di IKABI (Ikatan Ahli Bioenergi Indonesia), terima kasih atas diskusi tiada henti untuk kemajuan bioenergi di Indonesia
13. Keluarga tercinta, terutama suami Helmi Diponegoro dan ananda Salman Khalif Diponegoro serta ayahanda Bapak Busron Masduki (alm) dan ibunda Ibu Ani Wardhani, saudara kandung mbak Ninda, mbak Lia, dan Vierta, serta seluruh keluarga besar, terima kasih atas doa, motivasi, serta dukungan moral yang senantiasa menguatkan penulis dalam menyelesaikan studi doktoral.
14. Sahabat-sahabat: Ais (almh.), Evri, Lia, Candra, Diana, Adek, Nunung, Afwa, Wika yang membersamai dan menyemangati
15. Seluruh pihak yang berkontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses penelitian dan penulisan disertasi, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang konstruktif sangat penulis harapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga disertasi ini dapat memberikan manfaat, baik bagi pengembangan ilmu pengetahuan maupun penerapannya di bidang ilmu keteknikan pertanian.

Bogor, Juli 2026

Maharani Dewi Solikhah



DAFTAR ISI

RINGKASAN i

SUMMARY ii

PRAKATA vii

DAFTAR ISI ix

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR TABEL xiv

DAFTAR LAMPIRAN xv

DAFTAR ISTILAH xvi

I. PENDAHULUAN 1

 1.1 Latar Belakang 1

 1.2 Rumusan Masalah 2

 1.3 Hipotesis 2

 1.4 Tujuan 3

 1.5 Manfaat 3

 1.6 Kebaruan 4

II. TINJAUAN PUSTAKA 5

 2.1 Biodiesel 5

 2.2 PFAD sebagai Bahan Baku Biodiesel 8

 2.3 Metode Produksi Biodiesel 10

 2.4 *Bubble Column Reactor* untuk Produksi Biodiesel 12

 2.5 *Type Nozzle* untuk Pembentukan *Fine bubbles* 15

III. METODE 18

 3.1 Kerangka Pemikiran 18

 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian 19

 3.3 Alat dan Bahan 19

 3.4 Prosedur Penelitian 21

IV. ANALISIS EFEK PENGGUNAAN *PACKING* DALAM *BUBBLE COLUMN REACTOR* UNTUK PRODUKSI BIODIESEL NON-KATALITIK 23

 4.1 Latar belakang 23

 4.2 Metode 24

 4.2.1 Efek penggunaan packing terhadap reaksi 24

 4.2.2 Efek waktu reaksi 25

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

4.2.3	Analisis efek temperatur reaksi.....	26
4.3	Hasil dan Pembahasan	26
4.3.1	Pengaruh Penggunaan Packing.....	26
1.	<i>Flow regime</i>	27
2.	<i>Pressure drops</i>	27
3.	<i>Interfacial area</i>	28
4.3.2	Pengaruh Waktu Reaksi	29
4.3.3	Pengaruh Temperatur Reaksi	34
4.4	Kesimpulan dan saran.....	37
V. ANALISIS EFEK PENGGUNAAN FINE BUBBLES PADA BUBBLE COLUMN REACTOR UNTUK PRODUKSI BIODIESEL NON-KATALITIK.....		38
5.1	Latar Belakang	38
5.2	Metode	39
5.2.1	Disain <i>nozzle fine bubbles</i>	39
5.2.2	Penentuan Ukuran <i>Bubble</i>	40
5.2.3	Analisis Karakteristik <i>Fine bubble</i>	40
5.2.4	Eksperimen Produksi Biodiesel.....	42
5.3	Hasil dan Pembahasan	43
5.3.1	Disain dan Karakteristik <i>Swirl Flow Nozzle</i> untuk Aplikasi Biodiesel	43
5.3.2	Aplikasi <i>Fine bubbles</i> untuk Produksi Biodiesel Non-katalitik.....	46
5.4	Kesimpulan dan Saran.....	49
VI. ANALISIS OPTIMASI PRODUKSI BIODIESEL NON-KATALITIK DENGAN BUBBLE COLUMN REACTOR.....		50
6.1	Latar Belakang	50
6.2	Metode	51
6.2.1	Eksperimen pada berbagai temperatur reaksi	51
6.2.2	Eksperimen pada berbagai laju alir metanol.....	51
6.2.3	Eksperimen untuk evaluasi kondisi optimum.....	51
6.2.4	Analisis hasil.....	51
6.3	Hasil dan Pembahasan	52
6.3.1	Eksperimen pada berbagai temperatur reaksi	53
6.3.2	Eksperimen pada berbagai laju alir metanol.....	56
6.3.3	Analisis optimasi kondisi operasi	58
6.3.4	Alur Proses Produksi Biodiesel Non-Katalitik.....	70
6.4	Kesimpulan dan Saran.....	71
VII. ANALISIS KEEKONOMIAN DAN KEBERLANJUTAN.....		73

7.1	Latar Belakang	73
7.2	Metode	74
7.3	Hasil dan Pembahasan	75
7.3.1	Aliran Proses Produksi	75
7.3.2	Asumsi dan Biaya-Biaya	76
7.3.3	Analisis Kelayakan	79
7.3.4	Analisis Biaya, Penghematan, dan Keberlanjutan	80
7.3.5	Potensi Pemanfaatan Teknologi	83
7.4	Kesimpulan dan Saran	85
VIII.	PEMBAHASAN UMUM.....	86
8.1	Analisis Efek Penggunaan <i>Packing</i> dalam BCR	87
8.2	Analisis Efek Penggunaan <i>Fine bubbles</i> pada BCR	88
8.3	Analisis Optimasi Produksi Biodiesel pada BCR	89
8.4	Analisis Keberlanjutan dan Keekonomian	91
IX.	KESIMPULAN UMUM DAN SARAN.....	93
	DAFTAR PUSTAKA	95
	LAMPIRAN.....	105
	RIWAYAT HIDUP	142



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Reaksi Transesterifikasi 5

Gambar 2 Reaksi Esterifikasi..... 5

Gambar 3 Proses dalam pabrik minyak goreng (diadaptasi dari Neste Oil)..... 9

Gambar 4 PFAD berwujud padat dalam temperatur ruang..... 10

Gambar 5 *Process flow diagram* pada teknologi biodiesel Lurgi..... 11

Gambar 6 Berbagai jenis *packing* 14

Gambar 7 Definisi *fine bubble* sesuai ISO/TC 281 14

Gambar 8 Model nozzle venturi dengan berbagai sudut divergensi (Jiang *et al.* 2021)..... 17

Gambar 9 *Swirl flow nozzle* untuk menghasilkan *nanobubbles* (Alam et al. 2022a) 17

Gambar 10 Kerangka pemikiran penelitian 18

Gambar 11 Skematik BCR untuk produksi biodiesel non-katalitik (a) tanpa *fine bubble Nozzle* (b) dengan *fine bubble nozzle*..... 19

Gambar 12 Rangkaian peralatan BCR untuk produksi biodiesel non-katalitik 20

Gambar 13 Peralatan uji karakteristik sampel (a) alat titrasi otomatis untuk uji kandungan FFA (b) alat uji kadar FAME 20

Gambar 14 Prosedur dalam pengambilan data produksi biodiesel dari PFAD dengan *bubble column reactor* 21

Gambar 15 Kadar FFA (a) dalam produk (b) dalam reaktor..... 31

Gambar 16 Komposisi methyl ester (a) dalam produk (b) dalam RO pada temperatur reaksi 250 °C, %wt, menunjukkan kandungan metil miristat (C14:0-ME), metil palmitat (C16:0-ME), metil stearat (C18:0-ME), metil oleat (C18:1-ME), dan metil linoleat (C18:2-ME)..... 31

Gambar 17 Komposisi methyl ester (a) dalam produk (b) dalam RO pada temperatur reaksi 250 °C, gram 32

Gambar 18 *Swirl Flow Nozzle Biodiesel* 39

Gambar 19 Ilustrasi tahapan karakterisasi *microbubble* dengan metode PIV (Alam *et al.* 2018) 41

Gambar 20 USAF 1951 resolution test chart untuk kalibrasi pixel ke micrometer..... 42

Gambar 21 (a) Peralatan uji Particle Size Analyzer (b) Prinsip kerja DLS 42

Gambar 22 (a) *Swirl Flow Nozzle Biodiesel* untuk menghasilkan *fine bubble* (b) *Nozzle fine bubble* terpasang pada BCR untuk produksi biodiesel 43

Gambar 23 Hasil pengukuran *fine bubble* dengan (a) PSA (b) PIV analysis (Solikhah et al. 2026b) 45

Gambar 24 (a) Produk dari proses produksi biodiesel tanpa katalis dengan metode SMV-*Fine bubbles* (T = 200 °C) tiap 30 menit waktu reaksi. (b) Kadar FFA (%m/m) pada umpan (■), produk tanpa *fine bubble* (FB) (●) dan dengan FB (▲) (Solikhah et al. 2026b) 47

Gambar 25 Kromatogram GC/FID yang membandingkan standar FAME Mix (garis hitam), dan sampel 6 (garis merah muda) 48

Gambar 26 Laju produksi pada berbagai temperatur reaksi 53

Gambar 27 Profil penurunan kadar FFA berbagai temperatur reaksi 54

Gambar 28 Konversi dan yield reaksi pada berbagai temperatur pada laju alir methanol 4 g/menit	54
Gambar 29 Perbandingan konversi reaksi pada berbagai teknologi (A) Katalitik (Chongkhong et al. 2017), (B) Non-Katalitik Tanpa <i>Fine bubble</i> 200 °C (Solikhah et al. 2026b), (C) Non-Katalitik Tanpa <i>Fine bubble</i> 210 °C (Solikhah et al. 2024), (D) Non-Katalitik dengan <i>Fine bubble</i> 200 °C (Solikhah et al. 2026b), (E) Non-Katalitik dengan <i>Fine bubble</i> 225 °C, (F) Non-Katalitik dengan <i>Fine bubble</i> 250 °C	55
Gambar 30 Profil penurunan kadar FFA dalam berbagai laju alir methanol pada temperatur reaksi 225 °C (a) perunanan FFA sejak kondisi umpan (b) perbesaran data sejak menit ke-30 sampai 180	57
Gambar 31 Konversi dan Yield reaksi pada berbagai laju alir pada temperatur reaksi 225 °C	57
Gambar 32. Contour plot pengaruh temperatur dan waktu reaksi terhadap kadar FFA	67
Gambar 33 Permukaan tiga dimensi pengaruh temperatur dan waktu reaksi terhadap kadar FFA	67
Gambar 34 Perbandingan yield pada berbagai kondisi reaksi	69
Gambar 35 Perbandingan konversi pada berbagai kondisi reaksi	69
Gambar 36 Kromatogram dari sampel produk dari reaksi pada temperatur reaksi 250 °C, laju alir metanol 3 g/menit, menit ke-90	70
Gambar 37 Alur proses produksi biodiesel non-katalitik pada BCR dengan <i>fine bubbles</i>	71
Gambar 38 Diagram alir skematis yang membandingkan produksi biodiesel katalitik konvensional dengan jalur uap metanol superpanas (SMV) tanpa katalis	73
Gambar 39 Diagram alir proses produksi biodiesel non-katalitik dari PFAD melalui proses SMV dengan aplikasi <i>fine bubbles</i> kapasitas 15 ton/hari	76
Gambar 40 Alur proses produksi biodiesel non-katalitik pada BCR dengan <i>fine bubbles</i> secara kontinyu	91

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Minyak nabati <i>edible</i> dan <i>non-edible</i> yang potensial untuk bahan baku biodiesel (Soerawidjaja dan Tahar 2003)	6
Tabel 2	Komposisi asam lemak dalam berbagai minyak nabati (Yaakob <i>et al.</i> 2014)	7
Tabel 3	Pengaruh penggunaan <i>packing</i> terhadap komposisi FFA, MG, DG, TG, dan FAME dalam sampel pada temperatur reaksi 240 °C (Solikhah et al. 2026a)	28
Tabel 4	Pengaruh waktu reaksi terhadap komposisi FFA, MG, DG, TG, dan FAME dalam sampel pada temperatur reaksi 250 °C	30
Tabel 5	Pengaruh temperatur reaksi terhadap komposisi FFA, MG, DG, TG, dan FAME dalam sampel	35
Tabel 6	Perbandingan standar mutu biodiesel dan hasil dari studi ini	36
Tabel 7	Laju produksi pada berbagai laju alir methanol pada temperatur reaksi 225 °C	56
Tabel 8	Laju produksi pada berbagai kondisi reaksi, g/menit.....	58
Tabel 9	Profil kadar FFA dalam produk pada berbagai kondisi reaksi, %wt.....	59
Tabel 10	Hasil analisis model regresi linier	60
Tabel 11	Hasil analisis model interaksi dua faktor (<i>Two-Factor Interaction</i> / 2FI)	62
Tabel 12	Hasil analisis model polinomial orde kedua	64
Tabel 13	<i>Analysis of Variance</i>	66
Tabel 14	Yield dan konversi reaksi pada berbagai kondisi reaksi, %wt	68
Tabel 15	Kadar FAME di dalam sampel produk, %	70
Tabel 16	<i>Typical mass balance</i> pada proses produksi biodiesel non-katalitik dari PFAD melalui proses SMV dengan aplikasi <i>fine bubbles</i> kapasitas 15 ton/hari (kg/jam)	76
Tabel 17	<i>Design specification</i> untuk tiap peralatan	77
Tabel 18	Kebutuhan sistem pemanas	78
Tabel 19	Biaya investasi pabrik biodiesel non-katalitik dari PFAD melalui proses SMV dengan aplikasi <i>fine bubbles</i> kapasitas 15 ton/hari	78
Tabel 20	Biaya operasi dan pemeliharaan per tahun	79
Tabel 21	Perbandingan komponen harga berdasarkan HIP dan hasil studi ini	80
Tabel 22	Perbandingan hasil studi Tran et al dan studi ini	81
Tabel 22	Perbandingan biaya bahan baku dan biaya konversi (tanpa biaya bahan baku	81
Tabel 24	Perbandingan komponen biaya investasi Tran et al (2018) dan studi ini, ribu USD	82

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Logbook Eksperimen Produksi Biodiesel	105
Lampiran 2. Laporan Hasil Uji Kadar FFA	106
Lampiran 3. Prosedur Kerja Pengambilan Ukuran Gelembung Menggunakan Metode Particle Image Velocimetry (PIV).....	107
Lampiran 4. Analisis Tekno-Ekonomi	135
Lampiran 5. Publikasi diterbitkan di Journal of Sustainable Energy & Fuels, 2026, Volume 10, 633 (Terindeks Scopus Q1)	139
Lampiran 6. Publikasi diterbitkan di Journal of Results in Engineering, 2026, Volume 29,108678 (Terindeks Scopus Q1)	140
Lampiran 7. Publikasi diterbitkan di Prosiding (terindeks Scopus) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, Vol. 1354, No. 1, p. 012005, IOP Publishing	141



DAFTAR ISTILAH

APROBI	Asosiasi Produsen Biofuel Indonesia
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BCR	<i>Bubble Column Reactor</i>
BRIN	Badan Riset dan Inovasi Nasional
BSN	Badan Standardisasi Nasional
EN	<i>Europäische Norm or European Standard</i>
ESDM	Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementerian di Republik Indonesia
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Ester</i>
FFA	<i>Free fatty acid</i>
g	acceleration due to gravity, $m\ s^{-2}$
GAPKI	Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PFAD	<i>Palm Fatty Acid Distillate</i>
Q_g	<i>gas flow rate</i> , $m^3\ min^{-1}$
Q_l	<i>liquid flow rate</i> , $m^3\ min^{-1}$
SMV	<i>Superheated Methanol Vapor</i>
SNI	Standar Nasional Indonesia
<i>Greek</i>	
μ	Viskositas, $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
ρ	Densitas, $kg\ m^{-3}$
v	bubble rising velocity of the surface, $m\ s^{-1}$

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.