COSTING: Journal of Economic, Business and Accounting
Volume 9 Nomor 5, Tahun 2026
e-ISSN : 2597-5234

BIAYA PENGENDALIAN MONOGLISERIDA DAN IMPLIKASI FISKALNYA BAGI IMPLEMENTASI B50 DI INDONESIA: ANALISIS TEKNO-EKONOMI BERBASIS LITERATUR

THE COST OF MONOGLYCERIDE CONTROL AND ITS FISCAL IMPLICATIONS FOR B50 IMPLEMENTATION IN INDONESIA: A LITERATURE-BASED TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS

Anindita Mahendra[1]*, Silviana Silviana[2], Sulistyo[3]
Program Studi Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia[1]
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia[2]
Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia[3]
mahendra.anindita@gmail.com[1]

ABSTRACT

Indonesia's B50 mandate requires palm biodiesel (B100) with at most 0.47 wt% monoglyceride (MG), yet no quantification of the cost of this limit or of its effect on biodiesel incentives was found in the literature searched. This study maps the literature evidence, estimates the additional compliance cost of each MG reduction method and links it to the market index price (HIP) and B50 incentive needs. The method has four stages: (1) a structured literature search in OpenAlex and Scopus reported following PRISMA 2020; (2) a targeted technical search on two-step transesterification, selective alkaline washing, partial-stream vacuum distillation and magnesium silicate adsorption; (3) cost modelling of reducing MG from 0.60% to 0.47% in a hypothetical reference plant using mass balances and sensitivity analysis; and (4) linking costs to the HIP formula and incentive scenarios. First, none of the 83 included reports (80 studies) estimated MG reduction costs. Second, per litre of on-specification B100 (2026 prices), additional costs are IDR 13–118/L for two-step transesterification with a new reactor, IDR 29–153/L for selective alkaline washing and IDR 37–254/L for vacuum distillation; optimising an existing two-step plant costs IDR 1–39/L if the target is reached without equipment modification, and the exploratory adsorption estimate is IDR 791–3,310/L. Third, these three methods cost 1–20% of the USD 85/t HIP conversion component and, if all 20.1 million kL per year of B100 for B50 requires treatment and costs are fully passed through, raise incentive needs by IDR 0.3–5.1 trillion per year. These preliminary estimates need plant-data validation.
Keywords: *B50; quality compliance cost; market index price; biodiesel incentive; monoglyceride; techno-economic analysis*

ABSTRAK

Mandatori B50 menuntut biodiesel sawit (B100) dengan kandungan monogliserida (MG) maksimum 0,47% massa, tetapi kuantifikasi biaya untuk mencapai batas tersebut dan dampaknya terhadap insentif biodiesel belum ditemukan dalam literatur yang ditelusuri. Studi ini bertujuan memetakan bukti literatur, mengestimasi biaya tambahan kepatuhan per metode penurunan MG, dan mengaitkannya dengan harga indeks pasar (HIP) serta kebutuhan insentif B50. Metode terdiri atas empat tahap: (1) penelusuran literatur terstruktur di OpenAlex dan Scopus yang dilaporkan mengikuti PRISMA 2020; (2) pencarian teknis terarah untuk parameter empat metode, yaitu transesterifikasi dua tahap, pencucian alkali selektif, distilasi vakum sebagian aliran, dan adsorpsi magnesium silikat; (3) pemodelan biaya untuk menurunkan MG dari 0,60% ke 0,47% pada pabrik pembanding hipotetis berbasis neraca massa dan analisis sensitivitas; serta (4) penghubungan biaya dengan formula HIP dan skenario insentif. Pertama, dari 83 laporan (80 studi) yang diinklusi, tidak satu pun mengestimasi biaya penurunan MG. Kedua, biaya tambahan per liter B100 yang memenuhi spesifikasi (harga 2026) adalah Rp 13–118/L untuk transesterifikasi dua tahap dengan reaktor baru, Rp 29–153/L untuk pencucian alkali selektif, dan Rp 37–254/L untuk distilasi vakum; optimasi pabrik yang sudah dua tahap memerlukan Rp 1–39/L bila target tercapai tanpa modifikasi peralatan, sedangkan estimasi eksploratif adsorpsi Rp 791–3.310/L. Ketiga, biaya ketiga metode berbasis proses setara 1–20% komponen konversi HIP sebesar USD 85/t dan, bila seluruh kebutuhan B100 untuk B50 sebesar 20,1 juta kL per tahun memerlukan perlakuan serta biaya diteruskan penuh, menambah kebutuhan insentif Rp 0,3–5,1 triliun per tahun. Hasil ini estimasi awal yang perlu divalidasi dengan data pabrik.
Kata kunci: B50; biaya kepatuhan mutu; harga indeks pasar; insentif biodiesel; monogliserida; analisis tekno-ekonomi

1. Pendahuluan

Indonesia meningkatkan kewajiban pencampuran biodiesel secara bertahap dari B20, B30, B35, B40 (Halimatussadiah dkk., 2021; Fitrady dkk., 2026), hingga penetapan pencampuran 50% (B50) melalui Keputusan Menteri ESDM Nomor 257.K/EK.01/MEM.E/2026 (Kementerian ESDM, 2026). Standar dan mutu bahan bakar campuran B50 ditetapkan melalui Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor 75.K/MG.06/DJM/2026, yang untuk spesifikasi biodiesel murni (B100) merujuk pada Keputusan Menteri ESDM 257.K/EK.01/MEM.E/2026 (Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2026). Batas kandungan monogliserida (MG) pada B100 untuk B50 yang dipakai dalam studi ini dengan demikian bersumber dari Lampiran keputusan menteri tersebut, yang ditetapkan melalui Diktum KEDUA dan diberlakukan untuk pencampuran 50% melalui Diktum KETIGA: parameter nomor 17, monogliserida, maksimum 0,47% massa, dengan metode uji SNI 7182:2024 dan perubahannya serta ASTM D6584 (Kementerian ESDM, 2026). Karena ASTM D6584 mengukur monogliserida total, batas ini berlaku untuk MG total, bukan hanya MG jenuh. Kebijakan ini bertujuan menekan impor solar, menyerap produksi minyak sawit domestik, dan menurunkan emisi, tetapi sekaligus memperbesar kebutuhan pasokan B100 yang memenuhi spesifikasi mutu.

Dari sisi teknis, komponen minor dalam biodiesel, terutama MG jenuh dan *steryl glucosides* (SG), dikenal sebagai penyebab utama terbentuknya presipitat di atas titik kabut, penyumbatan filter, dan gangguan operasi pada suhu rendah (Dunn, 2009; Chupka dkk., 2014). Pada biodiesel sawit yang kaya asam lemak jenuh, presipitat dapat terbentuk selama produksi dan penyimpanan meskipun produk telah memenuhi standar EN 14214 (Na-Ranong & Kitchaiya, 2014). Penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa jumlah presipitat pada campuran biodiesel sawit–solar meningkat seiring kandungan MG jenuh, porsi biodiesel, dan menurunnya suhu penyimpanan (Ghaizani dkk., 2018), sehingga batas MG perlu ditetapkan berdasarkan pengukuran presipitat pada campuran yang dituju (Paryanto dkk., 2019a; Paryanto dkk., 2019b). Kandungan MG sendiri ditentukan oleh kesempurnaan reaksi transesterifikasi dan jenis bahan baku, sehingga parameter ini ditambahkan ke spesifikasi biodiesel nasional sejak era B20 (Aisyah dkk., 2018). Konsekuensinya, makin tinggi porsi biodiesel dalam campuran, makin besar tuntutan pengendalian MG pada B100.

Pengendalian MG tidak bebas biaya. Penurunan MG dapat ditempuh melalui penyempurnaan reaksi transesterifikasi, pemurnian lanjut seperti distilasi vakum, adsorpsi, dan pencucian selektif, sedangkan filtrasi dingin terutama memisahkan SG (Na-Ranong & Kitchaiya, 2014). Setiap opsi berpotensi menambah biaya modal, energi, bahan penolong, dan kehilangan rendemen. Di Indonesia, biaya tersebut berinteraksi langsung dengan kebijakan harga: harga indeks pasar (HIP) biodiesel ditetapkan dari harga CPO ditambah nilai konversi tetap USD 85/t berdasarkan Keputusan Menteri ESDM Nomor 3.K/EK.05/DJE/2024 beserta perubahannya (Kementerian ESDM, 2024; Kementerian ESDM, 2025), dan selisih kurang antara HIP solar dan HIP biodiesel ditutup dengan dana perkebunan yang dihimpun dari pungutan ekspor sawit dan dikelola Badan Pengelola Dana Perkebunan (BPDP, sebelumnya BPDPKS) berdasarkan Pasal 18 Peraturan Presiden

Nomor 132 Tahun 2024, yang juga menetapkan bahwa HIP biodiesel dihitung dengan formula dari Menteri ESDM (Pemerintah Republik Indonesia, 2024). Dengan demikian, keputusan spesifikasi mutu pada B50 memiliki dimensi ekonomi dan fiskal yang langsung, termasuk pertanyaan tentang siapa yang menanggung biaya kepatuhan.

Kajian sebelumnya terpisah ke dalam dua kelompok. Tinjauan teknologi membahas bahan baku, proses, dan pemurnian biodiesel serta mencatat dominasi biaya bahan baku (Silviana dkk., 2022), tetapi tidak menghitung biaya pengendalian komponen minor tertentu. Studi ekonomi kebijakan membahas mandat, subsidi, dan dampak makro, tetapi memperlakukan mutu bahan bakar sebagai asumsi teknis. Dalam penelusuran ini belum ditemukan kajian yang menghubungkan spesifikasi MG dengan biaya produksi, formula HIP, dan beban insentif dalam satu kerangka.

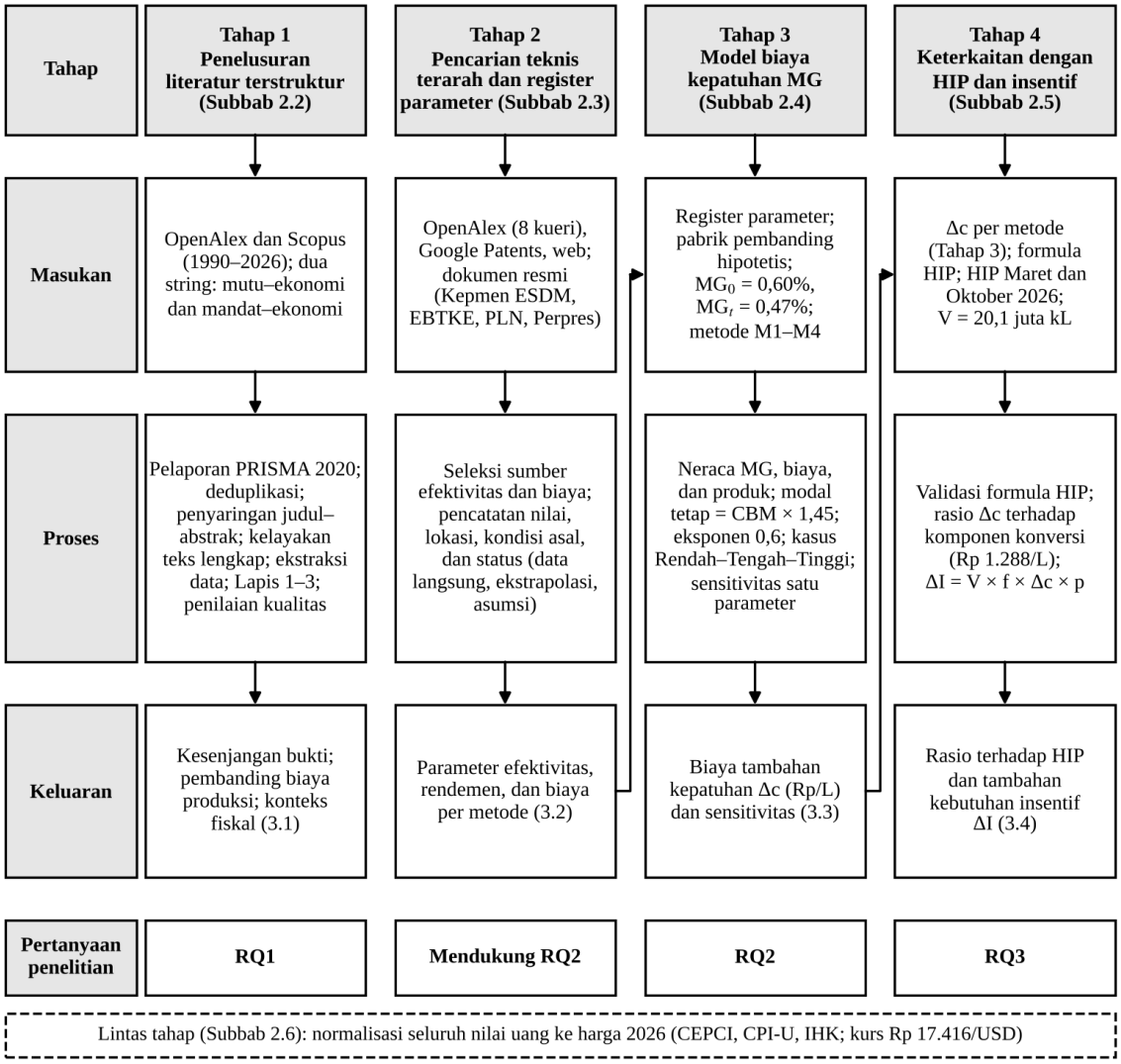
Studi ini bertujuan memetakan bukti literatur tentang biaya pengendalian mutu biodiesel sawit, mengestimasi biaya tambahan kepatuhan untuk mencapai batas MG B50 dengan masing-masing metode penurunan MG, dan mengaitkan biaya tersebut dengan formula HIP serta kebutuhan insentif B50. Tujuan tersebut dicapai melalui analisis tekno-ekonomi berbasis literatur yang disusun dalam empat tahap berurutan, dan tiga pertanyaan penelitian (RQ) dirumuskan mengikuti urutan tahapan itu: (RQ1) apa yang telah dilaporkan literatur tentang biaya pengendalian mutu, struktur biaya produksi, dan konteks fiskal biodiesel sawit, termasuk apakah sudah tersedia estimasi biaya penurunan MG; (RQ2) berapa biaya tambahan kepatuhan untuk mencapai batas MG B50 pada B100 sawit dengan masing-masing metode penurunan MG; dan (RQ3) bagaimana biaya tersebut berhubungan dengan formula HIP dan kebutuhan insentif B50. Kontribusi utama studi ini adalah estimasi orde besaran biaya per metode dengan parameter yang terdokumentasi dan diuji sensitivitasnya, serta keterkaitan biaya tersebut dengan komponen konversi HIP dan beban insentif, dengan seluruh nilai biaya dinormalisasi ke harga 2026. Bagian 2 menguraikan keempat tahap metode, Bagian 3 menyajikan hasil dengan urutan yang sama, Bagian 4 membahas posisi dan implikasi hasil, dan Bagian 5 menyimpulkan jawaban atas ketiga RQ.

2. Metode

2.1 Desain dan tahapan penelitian

Studi ini merupakan analisis tekno-ekonomi berbasis literatur, yaitu estimasi biaya yang seluruh parameternya bersumber dari literatur, data resmi, dan asumsi yang dinyatakan secara eksplisit, tanpa pengukuran langsung di pabrik. Penelitian dilaksanakan dalam empat tahap berurutan (Gambar 1). Tahap 1, penelusuran literatur terstruktur, memetakan bukti ekonomi yang tersedia serta menghasilkan pembanding biaya produksi dan konteks fiskal untuk menjawab RQ1. Tahap 2, pencarian teknis terarah, mengumpulkan parameter efektivitas, rendemen, dan biaya metode penurunan MG ke dalam register parameter. Tahap 3 memakai register tersebut dalam model biaya kepatuhan MG untuk menjawab RQ2. Tahap 4 menghubungkan biaya per liter dari Tahap 3 dengan formula HIP dan skenario insentif untuk menjawab RQ3. Normalisasi harga ke tahun 2026 diterapkan pada seluruh tahap (Subbab 2.6). Studi ini semula dirancang sebagai tinjauan sistematis bukti ekonomi. Karena Tahap 1 tidak menemukan satu pun studi yang mengkuantifikasi biaya

penurunan MG, fokus studi dialihkan ke estimasi tekno-ekonomi, sedangkan penelusuran dipertahankan sebagai tinjauan literatur terstruktur yang langkah dan hasilnya didokumentasikan agar dapat ditelusuri, tetapi tidak dimaksudkan sebagai tinjauan sistematis yang lengkap.



Gambar 1. Tahapan penelitian: masukan, proses, dan keluaran setiap tahap serta keterkaitannya dengan pertanyaan penelitian dan subbab hasil. Tahap 2 tidak menjawab pertanyaan penelitian secara langsung, tetapi menyediakan parameter bagi model biaya pada Tahap 3 (RQ2). Panah antarkolom menunjukkan keluaran satu tahap yang menjadi masukan tahap berikutnya.

2.2 Tahap 1: Penelusuran literatur terstruktur

Penelusuran literatur terstruktur dirancang dan dilaporkan mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020 (Page dkk., 2021) sejauh relevan dengan tujuannya. Unsur yang diterapkan dan dilaporkan adalah sumber informasi, strategi pencarian lengkap, kriteria kelayakan, proses seleksi, ekstraksi data, penilaian kualitas, dan diagram alir seleksi; protokol terdaftar, seleksi oleh dua penelaah independen, penilaian risiko

bias formal, dan meta-analisis tidak dilakukan, sehingga penelusuran ini tidak diklaim sebagai tinjauan sistematis lengkap. Penelusuran dilakukan pada 15 Oktober 2026 di OpenAlex dan Scopus untuk publikasi 1990–2026 dalam bahasa Inggris dan Indonesia dengan dua string. String 1 menggabungkan blok sawit, biodiesel, mutu atau pemurnian (termasuk monoglyceride, precipitate, *cold soak*, filter blocking, purification, distillation), dan ekonomi (cost, economic, *techno-economic*, feasibility, NPV, IRR, *payback*, price). String 2 menggabungkan blok sawit atau Indonesia, biodiesel, mandat atau insentif (mandate, B30–B50, subsidy, incentive), dan ekonomi (cost, economic, feasibility, price, fiscal, welfare). Karena kedua string mewajibkan istilah ekonomi, penelusuran ini ditujukan untuk bukti ekonomi; bukti teknis untuk parameter model dicari secara terpisah pada Tahap 2 (Subbab 2.3). Kriteria inklusi meliputi bahan baku turunan sawit, topik produksi, pemurnian, atau pengendalian mutu biodiesel FAME atau ekonomi kebijakan mandatori biodiesel sawit, dan sedikitnya satu indikator ekonomi terukur (kriteria lengkap pada Tabel S4a). Rekaman digabungkan dan dideduplikasi berdasarkan DOI dan judul, lalu penyaringan judul dan abstrak, penilaian teks lengkap, ekstraksi data, dan penilaian kualitas dilakukan oleh penulis pertama. Laporan yang teks lengkapnya tidak diperoleh dinilai dari abstrak, ditandai †, dan dinilai ulang bila teks lengkapnya diperoleh kemudian (15 laporan dinilai ulang pada 20 Oktober 2026), dan hanya dipakai untuk pemetaan dan konteks; laporan yang kemungkinan berasal dari penelitian yang sama dikelompokkan pada tingkat studi. String pencarian lengkap disajikan pada Suplemen S2, sedangkan diagram alir seleksi format PRISMA 2020 dan kriteria kelayakan disajikan pada Suplemen S4.

Laporan terinklusi dikelompokkan ke dalam tiga lapis: Lapis 1, studi yang mengaitkan biaya secara langsung dengan MG atau presipitasi; Lapis 2, studi tekno-ekonomi produksi dan pemurnian biodiesel sawit; dan Lapis 3, studi ekonomi kebijakan mandatori di Indonesia (3a) dan negara penghasil sawit lain (3b). Negara atau konteks didefinisikan sebagai lokasi kasus atau asal data. Dua penyimpangan dari kriteria awal dicatat: Imaniar (2024), studi HVO yang dipertahankan karena satu-satunya yang menjadikan batas MG sebagai dasar keputusan ekonomi, dengan ketentuan pengecualian yang ditambahkan setelah teks lengkapnya dibaca; dan Young dkk. (2015), studi rute etanol yang lolos penyaringan meskipun tidak memenuhi definisi FAME. Keduanya hanya dipakai sebagai konteks. Sintesis dilakukan secara naratif dan tabulasi; angka yang dikutip hanya diambil dari laporan teks lengkap, dan studi yang menopang angka pembanding dinilai dengan lima kriteria sederhana (Suplemen S6). Keluaran tahap ini dipakai untuk menjawab RQ1 dan sebagai pembanding bagi hasil model pada Bagian 4.

2.3 Tahap 2: Pencarian teknis terarah dan register parameter

Parameter teknis model diambil dari pencarian teknis terarah yang terpisah dari penelusuran literatur ekonomi pada Tahap 1 dan tidak mewajibkan istilah ekonomi. Sumber-sumber utama semula diidentifikasi secara tidak sistematis selama penyusunan model; untuk keterlacakan, pencarian tersebut kemudian dijalankan ulang dan didokumentasikan pada 19 Oktober 2026. Pencarian utama dilakukan di OpenAlex pada judul dan abstrak (1990–2026) dengan delapan

kueri untuk keempat metode secara keseluruhan (satu sampai dua kueri per metode dan dua kueri umum) dalam bahasa Inggris dan Indonesia, misalnya two-step transesterification monoglyceride, biodiesel distillation monoglyceride, adsorption saturated monoglyceride biodiesel, dan monogliserida biodiesel; pencarian ini menghasilkan 155 rekaman (143 unik) yang disaring berdasarkan judul dan abstrak. Karena paten, tesis, dan dokumen vendor kurang terindeks di OpenAlex, pencarian dilengkapi dengan Google Patents dan mesin pencari web umum. Sumber dibedakan menurut fungsinya. Sumber efektivitas teknis dipilih bila melaporkan MG total atau MG jenuh sebelum dan sesudah perlakuan secara kuantitatif dan metodenya dapat ditambahkan pada pabrik transesterifikasi alkali; jenis MG, bahan baku, dan kondisi operasi dicatat untuk setiap sumber. Sumber parameter ekonomi, seperti biaya peralatan, harga adsorben, dan biaya vendor, dipilih bila melaporkan nilai biaya dengan satuan, skala, dan tahun dasar yang dapat ditelusuri, tanpa disyaratkan memuat data MG. Artikel bertelaah sejawat diutamakan; tesis, paten, dan dokumen vendor hanya dipakai bila tidak ada artikel yang menyediakan parameter tersebut, dan bahan baku non-sawit ditandai sebagai ekstrapolasi. Bila beberapa sumber melaporkan nilai berbeda, nilai-nilai itu dijadikan batas rendah dan tinggi parameter, bukan dipilih salah satu; misalnya kapasitas adsorpsi MG jenuh 81,7 mg/g (Srikwanjai dkk., 2021) dan 38,0 mg/g pada laporan tesis terkait (Srikwanjai, 2019) membentuk rentang 38,0–81,7 mg/g. Kueri, sumber yang ditelaah, keputusan, dan alasannya disajikan pada Suplemen S7.

Setiap parameter yang diperoleh dicatat dalam register parameter (Suplemen S5) bersama nilai, satuan, sumber, lokasi dalam sumber, kondisi penelitian asal, alasan penerapan, dan statusnya. Status parameter dibedakan menjadi data langsung dari sumber, data resmi, parameter yang diekstrapolasi dari kondisi penelitian lain, formula, dan asumsi skenario peneliti, sehingga keberadaan rujukan tidak disamakan dengan tervalidasinya angka. Setiap parameter diberi nilai rendah, tengah, dan tinggi untuk dipakai pada Tahap 3, dan ringkasan bukti efektivitas setiap metode yang dihasilkan tahap ini disajikan pada Subbab 3.2.

2.4 Tahap 3: Model biaya kepatuhan MG

2.4.1 Pabrik pembanding dan target kepatuhan

Yang dihitung adalah biaya tambahan kepatuhan mutu, yaitu selisih biaya antara pabrik pembanding dan pabrik yang sama setelah ditambah satu metode penurunan MG hingga memenuhi batas B50 (MG ≤0,47% massa (Kementerian ESDM, 2026; Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2026)). Pabrik pembanding adalah kondisi hipotetis, bukan gambaran rata-rata industri nasional, yaitu transesterifikasi alkali satu tahap dengan pemisahan gliserol, pencucian atau *dry washing*, dan pengeringan vakum tanpa distilasi FAME, yang menghasilkan B100 dengan MG 0,60%. Nilai ini adalah asumsi skenario, bukan hasil pengukuran: satu studi dalam penelusuran literatur hanya menyatakan bahwa MG FAME masih di atas 0,55% (Imaniar, 2024). MG awal 0,55% dan 0,70% diuji sebagai sensitivitas, sedangkan pabrik yang produknya sudah memenuhi 0,47% tidak menanggung biaya kepatuhan tambahan. Indikator utama adalah biaya untuk mencapai target MG ≤0,47%; target 0,30% hanya

disajikan sebagai sensitivitas dalam Suplemen S5.

2.4.2 Metode penurunan MG dan konfigurasi penerapan

Empat metode penurunan MG yang diidentifikasi pada Tahap 2 dimodelkan, yaitu transesterifikasi dua tahap dengan pemisahan gliserol antartahap (M1), pencucian alkali selektif (M2), distilasi vakum FAME (M3), dan adsorpsi dengan magnesium silikat (M4). Filtrasi dingin dan sentrifugasi tidak dimodelkan karena terutama memisahkan SG, bukan MG total (Na-Ranong & Kitchaiya, 2014; Tang dkk., 2010). Karena proses kontinu industri umumnya sudah memakai transesterifikasi dua tahap (Pisarello dkk., 2018), biaya M1 dihitung untuk dua konfigurasi: M1a, pabrik satu tahap yang perlu menambah reaktor dan dekanter; dan M1b, pabrik yang sudah dua tahap sehingga hanya biaya optimasi operasi (katalis, listrik, dan kehilangan FAME) yang dihitung. Biaya M1b hanya berlaku bila target dapat dicapai dengan perubahan operasi yang diasumsikan tanpa modifikasi peralatan. Proporsi pabrik nasional pada masing-masing konfigurasi tidak diketahui, sehingga tidak disusun satu angka biaya nasional untuk M1. Transesterifikasi dua tahap dan adsorpsi diterapkan pada seluruh aliran, sedangkan pencucian alkali dan distilasi vakum, yang menurunkan MG jauh di bawah target, cukup diterapkan pada sebagian aliran lalu dicampur dengan aliran yang tidak diolah. Hanya operasi yang benar-benar ditambahkan yang dihitung (Tabel 1); bila suatu pabrik sudah memiliki operasi tersebut, komponen modalnya bukan biaya kepatuhan baru. Adsorpsi diperlakukan sebagai estimasi eksploratif. Kapasitas yang tersedia di literatur hanya untuk MG jenuh (Srikwanjai dkk., 2021), sehingga dosis dihitung seolah seluruh penurunan 0,13 poin persentase dicapai dari MG jenuh; porsi MG jenuh dalam MG awal dan keberlakuan kapasitas tersebut pada konsentrasi akhir yang dituju belum diketahui, sehingga kepatuhan MG total dengan adsorpsi belum terverifikasi.

Tabel 1. Operasi yang ditambahkan terhadap pabrik pembanding (transesterifikasi satu tahap, MG 0,60%)

Metode	Operasi yang ditambahkan	Sudah ada di pembanding (tidak dihitung)	Cara mencapai ≤0,47%
M1a Transesterifikasi dua tahap (pabrik satu tahap)	Reaktor tahap 2, dekanter antartahap, sedikit tambahan katalis	Reaktor tahap 1, pemulihan metanol, pencucian, pengeringan	Seluruh aliran
M1b Optimasi pabrik yang sudah dua tahap	Perubahan operasi (dosis dan pembagian katalis serta metanol); tanpa peralatan baru	Seluruh peralatan dua tahap	Seluruh aliran; bersyarat target tercapai
M2 Pencucian alkali selektif	Tangki reaksi alkali, dua sentrifus, pengering, olah air limbah	Pencucian dan pengering yang ada	25–50% aliran diolah lalu dicampur
M3 Distilasi vakum FAME	Kolom distilasi vakum, pemanas, sistem vakum	Seluruh unit hulu	22–34% aliran didistilasi lalu dicampur
M4 Adsorpsi Mg-silikat (eksploratif)	Tangki aduk dan filter; adsorben sekali pakai	Filter akhir yang ada	Seluruh aliran, dosis 16,0–34,4 kg/t; kepatuhan MG total belum terverifikasi

2.4.3 Neraca massa dan basis biaya

Model memakai tiga neraca. Neraca MG menentukan banyaknya aliran yang harus diolah agar produk akhir tepat memenuhi target. Untuk pencucian alkali dan distilasi vakum, fraksi aliran yang diolah (x) dihitung dari neraca massa MG terhadap massa produk yang benar-benar kembali: $x = (MG_0 - MG_t) / [MG_0 - (1 - L)\cdot MG_o - L\cdot MG_t]$, dengan $MG_0 = 0{,}60\%$, $MG_t = 0{,}47\%$, MG_o kandungan MG aliran olahan setelah pemisahan, dan L fraksi massa aliran olahan yang keluar (MG yang dipisahkan dan kehilangan FAME pada pencucian alkali, atau residu distilasi). Bila MG awal sudah memenuhi target, perlakuan tambahan bernilai nol; bila neraca menunjukkan target tidak tercapai walaupun seluruh aliran diolah, model menandainya sebagai tidak layak alih-alih membatasi fraksi pada 100%. Untuk adsorpsi, dosis diselesaikan bersama MG yang terserap, cairan yang tertahan, dan massa produk akhir, dengan pendekatan bahwa cairan yang tertahan pada ampas berkomposisi sama dengan produk; adsorben ditambahkan dari luar dan bukan bagian massa umpan. Untuk M2, M3, dan estimasi eksploratif M4, neraca massa dipakai untuk memeriksa pencapaian target, dan MG produk akhir hasil neraca bernilai 0,47% pada seluruh skenario lembar kerja. Untuk M1a dan M1b, pencapaian batas diperlakukan sebagai asumsi kinerja berdasarkan kondisi eksperimen terpilih yang menghasilkan MG akhir 0,34–0,43% (Pisarello dkk., 2018), sehingga masih memerlukan validasi pada B100 sawit. Neraca biaya menghitung seluruh biaya per ton umpan operasi tambahan, termasuk nilai ekonomi seluruh massa yang keluar dari aliran produk, yaitu FAME yang hilang, MG yang dipisahkan pada pencucian alkali dan adsorpsi, residu distilasi (dengan atau tanpa kredit nilai jual), dan cairan biodiesel yang tertahan pada adsorben. Neraca produk menghitung massa B100 memenuhi spesifikasi yang keluar per ton umpan setelah kehilangan tersebut. Seluruh hasil dinyatakan per liter B100 produk yang memenuhi spesifikasi, yaitu biaya per ton umpan dibagi fraksi produk lalu dikonversi dengan densitas formula HIP; basis ini sama dengan basis volume B100 pada Tahap 4. Persamaan lengkap setiap neraca tersedia pada Suplemen S5.

2.4.4 Komponen biaya, biaya modal, dan asumsi finansial

Komponen biaya terdiri atas modal tahunan, bahan penolong, energi, pengolahan limbah, dan nilai FAME yang hilang. Biaya acuan reaktor dan kolom pemurnian FAME diambil dari biaya modul terpasang (bare module) pada pabrik 8 kt/th (Cho dkk., 2012) yang sudah mencakup instalasi, sehingga hanya ditambahkan kontingensi dan fasilitas penunjang sesuai rasio pada sumber yang sama (faktor 1,45), tanpa faktor instalasi tambahan. Biaya ini dieskalasi dengan CEPCI dan diskalakan dengan kaidah enam per sepuluh (eksponen 0,6) (Peters dkk., 2003; Turton dkk., 2018) terhadap kapasitas unit yang benar-benar dibangun, sehingga untuk unit sebagian aliran faktornya x^0,6 dan bukan x. Rasio penskalaan adalah Q/8 untuk unit seluruh aliran (M1a), yaitu 31–92 kali, dan x·Q/8 untuk unit distilasi sebagian aliran (M3), yaitu sekitar 10–20 kali (23 kali pada skenario LEMIGAS). Rasio M1a jauh melampaui, dan rasio M3 berada pada atau di atas, rentang sekitar sepuluh kali yang umumnya dianjurkan untuk kaidah ini (Peters dkk., 2003), sehingga hasilnya merupakan ekstrapolasi awal; eksponen 0,5 dan 0,7 diuji sebagai sensitivitas pilihan peneliti, bukan rentang yang tervalidasi. Kapasitas pabrik diambil dari sebaran

kapasitas 34 pabrik biodiesel aktif yang dilaporkan Ditjen EBTKE, dengan total 20,26 juta kL (Direktorat Jenderal EBTKE, 2023): kuartil atas 732 kt/th untuk kasus Rendah, median 407 kt/th untuk kasus Tengah, dan kuartil bawah 250 kt/th untuk kasus Tinggi. Kuartil dihitung dengan metode inklusif (setara QUARTILE.INC) setelah kapasitas setiap pabrik dikonversi dari kL ke ton dengan densitas 0,87 t/kL, tanpa pembulatan di dalam model; data 34 pabrik dan perhitungannya disajikan pada Suplemen S5. Pabrik kecil 100 kt/th diuji sebagai sensitivitas. Biaya modal dibagi produksi aktual, yaitu kapasitas terpasang dikalikan utilisasi 70–95%. Modal tahunan dihitung dengan faktor pemulihan modal pada tingkat diskonto riil 8–12% dan umur ekonomi analisis 15–20 tahun, ditambah pemeliharaan dan asuransi aset 3–5% CAPEX per tahun; ketiganya adalah asumsi skenario analisis, bukan kondisi pasar yang teramati.

2.4.5 Harga utilitas, nilai produk, dan residu

Nilai FAME didekati dengan HIP biodiesel 2026 sebesar Rp 13.980–15.072/L (Direktorat Jenderal EBTKE, 2026a; Direktorat Jenderal EBTKE, 2026b). Kehilangan produk dinilai sebagai kehilangan nilai ekonomi, dengan HIP sebagai proksi nilai produk; pendekatan ini bukan pengukuran biaya marjinal produksi pengganti. FAME yang hilang, MG yang dipisahkan pada pencucian alkali dan adsorpsi, serta cairan yang tertahan pada adsorben dinilai penuh dengan nilai FAME tersebut tanpa kredit penjualan. Residu distilasi diperlakukan berbeda karena masih dapat dijual, tetapi harga jual bersihnya belum tersedia, sehingga diuji dua skenario: residu dijual dengan potongan 30–50% dari nilai FAME, sehingga yang hilang hanya 30–50% nilainya, dan residu tanpa kredit, sehingga seluruh nilainya hilang. Harga panas memakai skenario harga gas USD 6–12/MMBtu, bukan rentang tarif aktual pabrik biodiesel: USD 6/MMBtu adalah batas atas harga gas bumi tertentu di titik serah pengguna menurut Peraturan Presiden Nomor 121 Tahun 2020 (Pemerintah Republik Indonesia, 2020), sedangkan harga yang berlaku pada 2026 dan status pabrik biodiesel sebagai penerima belum diverifikasi, dan USD 9–12/MMBtu adalah asumsi untuk pabrik bukan penerima. Kebutuhan panas distilasi diturunkan dari pemanasan sensibel umpan dan penguapan distilat dengan memperhitungkan pemulihan panas dan kehilangan panas 10% (persamaan pada Suplemen S5), sehingga diperoleh 0,42–0,87 GJ/t umpan. Harga listrik memakai tarif industri I-4/TT Rp 996,74/kWh (PT PLN (Persero), 2026) hingga tarif rerata tertimbang I-3/TM untuk operasi 24 jam. Tarif I-3/TM dihitung sebagai $(20 \times 1.035{,}78 + 4 \times K \times 1.035{,}78)/24$, dengan tarif LWBP Rp 1.035,78/kWh (PT PLN (Persero), 2026), asumsi empat jam waktu beban puncak per hari, dan asumsi $K = 1{,}5$ dalam rentang 1,4–2 yang ditetapkan, sehingga diperoleh Rp 1.122/kWh; dengan $K = 2$ nilainya Rp 1.208/kWh. Karena konsumsi listrik operasi tambahan kecil, perbedaan tarif ini menggeser biaya kurang dari Rp 1/L.

2.4.6 Skenario dan analisis sensitivitas

Setiap parameter memiliki nilai rendah, tengah, dan tinggi. Kasus Rendah dan Tinggi menggabungkan seluruh nilai yang paling menguntungkan atau paling tidak menguntungkan dan merupakan batas skenario, bukan interval kepercayaan statistik; kasus Tengah adalah titik tengah rentang, bukan kondisi yang paling mungkin. Parameter yang belum didukung data langsung diuji melalui

sensitivitas satu parameter terhadap kasus Tengah, yaitu utilisasi, kehilangan FAME atau nilai residu, kredit residu, kapasitas adsorpsi, kapasitas pabrik, nilai FAME, MG awal, kondisi pabrik pembanding, dan eksponen penskalaan. Untuk pencucian alkali, yang data kehilangan FAME-nya tidak tersedia dalam sumber yang digunakan, dihitung pula batas kehilangan maksimum agar metode ini tetap lebih murah daripada metode lain. Lembar kerja model dan seluruh skenario tersedia pada Suplemen S5.

2.5 Tahap 4: Keterkaitan dengan formula HIP dan skenario insentif

HIP biodiesel dihitung dari rata-rata harga CPO KPB ditambah komponen konversi tetap USD 85/t, dikalikan faktor 870 kg/m³, lalu ditambah ongkos angkut (Kementerian ESDM, 2024; Direktorat Jenderal EBTKE, 2026a). Penerapan formula ini dalam model diuji dengan data resmi HIP Maret 2026: rata-rata harga CPO KPB Rp 14.639/kg dan kurs Rp 16.819/USD menghasilkan Rp 13.980/L, dan data HIP Oktober 2026 (Rp 15.820/kg; Rp 17.702/USD) menghasilkan Rp 15.072/L; keduanya sama dengan HIP yang ditetapkan (Direktorat Jenderal EBTKE, 2026a; Direktorat Jenderal EBTKE, 2026b). Biaya per liter dari Tahap 3 dibandingkan dengan komponen konversi sebesar USD 85/t atau Rp 1.288/L (Kementerian ESDM, 2024) sebagai indikator pelengkap; rasio ini hanya menunjukkan skala biaya, karena komponen tersebut mencakup seluruh biaya pengolahan dan bukan marjin laba. Penerusan biaya ke insentif mengikuti Pasal 18 Peraturan Presiden Nomor 132 Tahun 2024, yang menetapkan bahwa selisih kurang antara HIP solar dan HIP biodiesel ditutup dengan dana perkebunan (Pemerintah Republik Indonesia, 2024). Implikasi fiskal dinyatakan sebagai skenario bersyarat $\Delta I = V \times f \times \Delta c \times p$, dengan V volume B100 untuk B50 sebesar 20,1 juta kL (Fitrady dkk., 2026), f proporsi volume yang memerlukan perlakuan tambahan, Δc biaya tambahan per liter, dan p proporsi biaya yang diteruskan ke insentif melalui penyesuaian komponen konversi. Skenario dihitung untuk f = 25%, 50%, dan 100% dengan p = 1 pada setiap metode. Hasilnya merupakan estimasi orde besaran berbasis parameter literatur dan asumsi, bukan estimasi dengan tingkat akurasi yang tervalidasi; seluruh formula tersedia dalam Suplemen S5.

2.6 Normalisasi harga ke tahun 2026

Seluruh angka biaya yang dikutip dinormalisasi ke harga 2026 agar dapat dibandingkan. Tahun dasar biaya ditetapkan dari pernyataan studi; bila tidak dinyatakan, dipakai tahun terbit dikurangi satu. Biaya modal dalam USD dieskalasi dengan *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI) (Chemical Engineering, 2026), sedangkan biaya per unit, harga, dan subsidi dalam USD dieskalasi dengan indeks harga konsumen Amerika Serikat (CPI-U) (U.S. Bureau of Labor Statistics, 2026). Nilai dalam rupiah dieskalasi dengan indeks harga konsumen Indonesia yang disusun dari laju inflasi tahunan (World Bank, 2026; Badan Pusat Statistik, 2026). Nilai dalam mata uang lain dikonversi ke USD dengan kurs tahun dasar lalu dieskalasi dengan CPI-U. Konversi antara USD dan rupiah memakai kurs rerata Januari–September 2026 sebesar Rp 17.416/USD (X-Rates, 2026). Karena CEPCI 2025 dan 2026 belum tersedia sebagai data primer yang dapat diakses, dipakai estimasi 812,8, yaitu nilai 2024 sekitar 800 dikalikan kenaikan rerata 1,6% pada 2025 (Chemical Engineering, 2026), dan inflasi Indonesia 2026 diproksikan

dengan inflasi tahunan September 2026 (3,28%). Nilai asli, tahun dasar, indeks, dan faktor eskalasi setiap butir disajikan pada Suplemen S3.

3. Hasil

3.1 Bukti literatur: kesenjangan, pembanding biaya, dan konteks fiskal

Penelusuran menghasilkan 460 rekaman (OpenAlex 218; Scopus 242). Setelah penghapusan 125 duplikat, 335 rekaman disaring dan 86 laporan dicari teks lengkapnya. Sebanyak 83 laporan diinklusi, yaitu 74 laporan teks lengkap dan 9 laporan berbasis abstrak; tiga laporan kemungkinan berasal dari penelitian yang sama dengan laporan lain (Harahap dkk. (2017)† dengan Harahap dkk. (2019); Applanaidu dkk. (2015a) dengan Applanaidu dkk. (2013); Abidin dkk. (2014) dengan Applanaidu dkk. (2015b)), sehingga 83 laporan mewakili 80 studi (diagram alir pada Gambar S1). Sebanyak 50 laporan berkonteks Indonesia, 15 Malaysia, dan sembilan Thailand; 41 laporan terbit pada 2021–2026. Berdasarkan lapis, terdapat satu laporan Lapis 1, 21 Lapis 2, 43 Lapis 3a, dan 18 Lapis 3b (Tabel S4b). Dari 20 studi yang menopang angka pembanding, hanya 8 yang menyatakan tahun dasar biaya dan 8 yang sepenuhnya mewakili B100 sawit Indonesia (Suplemen S6).

Temuan utama penelusuran adalah kesenjangan bukti: hanya satu studi yang secara eksplisit menjadikan batas MG sebagai dasar keputusan ekonomi. Imaniar (2024) menyatakan bahwa FAME tidak dapat dicampur melebihi B30 karena kadar air (sekitar 500 ppm) dan MG (di atas 0,55%) yang dinilai masih tinggi, dengan risiko penyumbatan filter dan kegagalan pompa, lalu menilai *hydrotreated vegetable oil* (HVO) sebagai alternatif untuk B40–B50 dengan *benefit cost ratio* 1,83 dan biaya modal USD 833 juta (harga 2026). Pernyataan tentang MG dalam studi tersebut merupakan latar belakang penulis, bukan hasil pengujian, sehingga perlu dibaca sebagai indikasi persepsi risiko mutu dalam pengambilan keputusan investasi. Tujuh studi lain mengaitkan mutu dengan biaya secara tidak langsung (Tabel 2), misalnya penyumbatan filter pada campuran tinggi (Syauqi dkk., 2022; Halimatussadiah dkk., 2021) dan biaya modal kolom distilasi yang menghasilkan MG di bawah 0,01% m/m (Cho dkk., 2012). Studi proses yang melaporkan MG sangat rendah setelah distilasi atau hidrolisis (Cho dkk., 2012; Heer & Gaikar, 2016) tidak memisahkan biaya yang secara khusus ditujukan untuk menurunkan MG dari biaya pemurnian umum, dan tidak satu pun studi menghitung biaya marjinal untuk menurunkan MG dari satu tingkat ke tingkat yang lebih rendah. Kesenjangan inilah yang dijawab melalui estimasi pada Subbab 3.3.

Tabel 2. Studi yang mengaitkan mutu biodiesel atau MG dengan aspek ekonomi (nilai uang dalam harga 2026)

Studi	Lapis	Keterkaitan mutu/MG	Temuan ekonomi
Imaniar (2024)	1 (kontekstual, studi HVO)	FAME dinilai tidak dapat >B30 karena MG >0,55% dan kadar air 500 ppm (pernyataan penulis)	HVO untuk B40–B50: BCR 1,83; CAPEX USD 833 juta
Halimatussadiah dkk. (2021)	3a	Penyumbatan filter ≥B20; keausan injektor pada B50	Campuran RBDPO menaikkan biaya produksi dan subsidi
Syauqi dkk. (2022)	3a	Batas presipitat SNI longgar → penyumbatan dan penggantian filter; B50 tidak memenuhi densitas	Biaya terlevelisasi FAME USD 0,81/L; mandat FAME tinggi dinilai tidak menguntungkan
Cho dkk. (2012)	2	Distilasi FAME: MG <0,01% m/m	Kolom pemurnian USD 0,24 juta dari modal USD 2,26 juta
Heer & Gaikar (2016)	2	Hidrolisis hulu: gliserida tersisa 0,07% m/m	Utilitas USD 196–217/t biodiesel
Im-orb dkk. (2021)	2	Distilasi menghasilkan FAME 99,5%	Kolom distilasi USD 8,25 juta dari biaya modul USD 9,46 juta
Sembiring dkk. (2015)	2	Pemurnian (*bleaching*, *dry washing*, filtrasi) dalam ISBL	Kerangka biaya ISBL + OSBL + biaya umum − nilai gliserol
Subramaniam dkk. (2025)	3b	Spesifikasi solar dasar disesuaikan untuk pencampuran PME	Penurunan biaya produk dan aditif (kualitatif)

Sebagai pembanding struktur biaya, bahan baku merupakan komponen biaya paling dominan di seluruh studi tekno-ekonomi. Pada studi FAME, porsinya berkisar 57% pada proses PFAD non-katalitik (Cho dkk., 2012), 75% pada distilasi reaktif PFAD (Simasatitkul & Arpornwichanop, 2017), sekitar 79–80% pada pabrik di Malaysia dan Indonesia (Ong dkk., 2012; Harahap dkk., 2019), 80–89% pada pabrik skala kecil-menengah di Indonesia (Solikhah dkk., 2017), sekitar 83% pada desain pabrik 68 kt/th di Indonesia (Panjaitan, 2025), hingga sekitar 95% pada proses terintensifikasi (Im-orb dkk., 2021). Akibatnya, kelayakan sangat sensitif terhadap harga CPO: kenaikan harga CPO USD 0,15/kg menaikkan biaya biodiesel sekitar USD 0,07/L (harga 2026) (Ong dkk., 2012), dan pabrik biodiesel merugi saat harga CPO tinggi dan harga jual biodiesel rendah (Panjaitan, 2025). Ukuran biaya per liter yang dilaporkan studi tidak seragam, sehingga dibedakan menurut jenisnya (harga 2026). Studi yang melaporkan biaya produksi atau biaya terlevelisasi per liter berada pada kisaran USD 0,44–1,01/L, yaitu biaya produksi setara Rp 7.722–11.481/L atau USD 0,44–0,66/L pada pabrik 50 t/hari di Indonesia Solikhah dkk. (2017), biaya terlevelisasi USD 0,81/L (Syauqi dkk., 2022), biaya produksi USD 0,82–1,01/L (Ocampo Batlle dkk., 2021), biaya produksi USD 0,90–0,96/L pada empat wilayah Kolombia (Rincón dkk., 2015), dan biaya produksi USD 0,92/L pada proses konvensional (Treeyawetchakul, 2020). Harga impas tidak digabungkan dengan ukuran tersebut; contohnya, Harahap dkk. (2019) melaporkan harga impas USD 0,79/L untuk konfigurasi biorefineri. Karena dieskalasi dengan indeks agregat dan berbeda skala serta konfigurasi, nilai-nilai ini hanya pembanding indikatif terhadap HIP biodiesel Oktober 2026 sebesar Rp 15.072/L (Direktorat Jenderal EBTKE, 2026b), bukan biaya aktual pabrik Indonesia pada 2026. Solikhah dkk. (2017) membandingkan biaya produksinya dengan harga jual setara Rp 12.672/L berdasarkan formula HIP saat itu (harga CPO ditambah USD 125/t). Indikator kelayakan sangat bervariasi menurut skala, konfigurasi, dan asumsi

harga (Tabel S4c), dan pada sebagian desain unit distilasi menjadi pos terbesar biaya modal peralatan (Im-orb dkk., 2021) meskipun kontribusinya terhadap biaya per liter kecil.

Dari sisi fiskal, insentif dibiayai pungutan ekspor yang bergantung pada harga CPO. Dalam harga 2026, kebutuhan subsidi historis setara Rp 1.911–4.385/L pada 2009–2014 (Ermawati, 2015), alokasi untuk B30 pada 2020 setara Rp 49,9 triliun (Veza dkk., 2021), dan dalam simulasi dana tidak cukup membiayai insentif B30 pada kondisi kebijakan saat itu (Silalahi dkk., 2020). Pendapatan BPDP berfluktuasi dari setara Rp 17,8 triliun (2018) ke nol pada 2019 ketika tarif pungutan ekspor sawit untuk sementara ditetapkan nol, Rp 83,3 triliun (2021), lalu Rp 27,1 triliun (2024), dengan margin di atas kebutuhan subsidi hanya sekitar 14% pada sebagian skenario (Fitrady dkk., 2026). Data kapasitas nasional berbeda menurut sumber: Fitrady dkk. (2026) mengutip sekitar 15,6 juta kL, sedangkan Ditjen EBTKE mencatat kapasitas terpasang aktif 20,26 juta kL dan konsumsi domestik 13,1 juta kL pada 2023; tabel yang sama mencantumkan 20,64 juta kL untuk 2025, yang diperlakukan sebagai angka ke depan, bukan realisasi (Direktorat Jenderal EBTKE, 2023). Rasio konsumsi domestik terhadap kapasitas pada 2023 sekitar 65%. Rasio ini bukan utilisasi produksi, karena tidak memperhitungkan produksi untuk ekspor dan perubahan persediaan, dan tidak menunjukkan utilisasi setiap pabrik. Dibandingkan kebutuhan B100 untuk B50 sekitar 20,1 juta kL (Fitrady dkk., 2026), kedua angka kapasitas menunjukkan bahwa rasio tersebut akan jauh lebih tinggi selama B50; karena itu utilisasi pabrik diperlakukan sebagai parameter skenario terpisah dalam model. Rincian indikator fiskal disajikan pada Tabel S4d.

3.2 Parameter teknis metode penurunan MG

Pencarian teknis terarah pada Tahap 2 menghasilkan bukti untuk keempat metode yang dimodelkan, dengan kemampuan dan struktur biaya yang berbeda; tiga di antaranya dilaporkan menurunkan MG total, sedangkan data adsorpsi hanya tersedia untuk MG jenuh. Metode M1, yaitu transesterifikasi dua tahap dengan pemisahan gliserol antartahap, menurunkan gliserida tak terkonversi dan menghasilkan MG akhir 0,34–0,43% massa pada kondisi percobaan terpilih tanpa menambah total katalis secara berarti (Pisarello dkk., 2018). Efektivitasnya bergantung pada dosis dan pembagian katalis serta metanol, pemisahan gliserol, dan kondisi reaksi; pada dosis katalis tahap kedua yang lebih rendah, MG akhir masih 0,50–0,66% (Pisarello dkk., 2018), sehingga proses dua tahap tidak otomatis menjamin pencapaian target. Rentang yang dipakai mewakili kondisi yang mencapai target, dan penerapannya pada biodiesel sawit diperlakukan sebagai ekstrapolasi. Prinsip yang sama, yaitu memindahkan gliserol selama reaksi, telah diuji pada turunan sawit: reaktor deglyserolisasi kontinu dengan palm stearin dilaporkan menghasilkan kadar ester tinggi dan layak secara ekonomi (Suppalakpanya dkk., 2026). Studi tersebut hanya dinilai dari abstraknya, yang tidak melaporkan kandungan MG, sehingga dikutip sebagai konteks dan angkanya tidak dipakai sebagai parameter M1. Metode M2, yaitu pencucian alkali selektif yang menghidrolisis MG dan memisahkannya dengan sentrifus, dilaporkan menurunkan MG 44–86% (GEA Mechanical Equipment GmbH, 2018), tetapi baru tersedia sebagai paten tanpa

data rendemen dan contohnya diuji pada biodiesel kedelai dan rapeseed, bukan sawit. Metode M3, yaitu distilasi vakum FAME, menghilangkan MG hingga di bawah deteksi (Tang dkk., 2010) atau di bawah 0,01% massa (Cho dkk., 2012), dengan biaya pengolahan yang dilaporkan vendor USD 25–30 per ton distilat (Sulzer, 2025); nilai vendor ini dipakai sebagai pembanding eksternal, bukan masukan model. Metode M4, yaitu adsorpsi dengan magnesium silikat atau silika gel, menyerap MG jenuh (bukan MG total) dengan kapasitas sekitar 80 mg/g pada dosis 5% massa, dan zeolit alam teraktivasi asam pada dosis 10% massa menurunkan MG jenuh dari 0,70 menjadi 0,35% massa (Srikwanjai dkk., 2021); *dry washing* dengan adsorben juga lazim dipakai untuk pemurnian umum biodiesel (Silviana dkk., 2022).

Untuk distilasi, efektivitasnya juga didukung data FAME dari RBDPO di pabrik percontohan LEMIGAS, dalam konteks skenario B40 yang memakai FAME distilat dengan MG ≤0,3% massa: kolom 30 pelat menurunkan MG dari 0,83 menjadi 0,17% massa pada fraksi distilat ringan, sedangkan alat satu pelat pada 5 mmHg menghasilkan MG 0,29% pada perolehan distilat 86% volume dan 0,59% pada perolehan 90% (Fuad & Kurniawan, 2022). Data ini menunjukkan bahwa kinerja pemisahan sangat bergantung pada peralatan. Untuk adsorpsi, porsi MG jenuh pada biodiesel sawit dilaporkan sekitar 50% MG total (Fuad & Kurniawan, 2022), sehingga penurunan 0,13 poin persentase dari MG awal 0,60% setara dengan menghilangkan sekitar 43% MG jenuh; besaran ini masih dalam kisaran penurunan MG jenuh yang dilaporkan (Srikwanjai dkk., 2021), tetapi belum diuji untuk mencapai batas MG total. Satu-satunya data MG total yang terjaring, yaitu diatomit terdoping MnO_2 yang menghilangkan 28,9% MG pada dosis 2% massa (Saengprachum, 2009), menunjukkan orde dosis yang serupa, tetapi data ini berasal dari adsorben dan bahan baku berbeda. Secara keseluruhan, data MG transesterifikasi dua tahap berasal dari minyak kedelai (Pisarello dkk., 2018) dan data pencucian alkali dari contoh paten pada biodiesel kedelai dan rapeseed (GEA Mechanical Equipment GmbH, 2018), sehingga penerapan kedua metode pada B100 sawit memerlukan validasi; status setiap parameter dicatat pada register parameter (Suplemen S5).

3.3 Biaya tambahan kepatuhan per metode

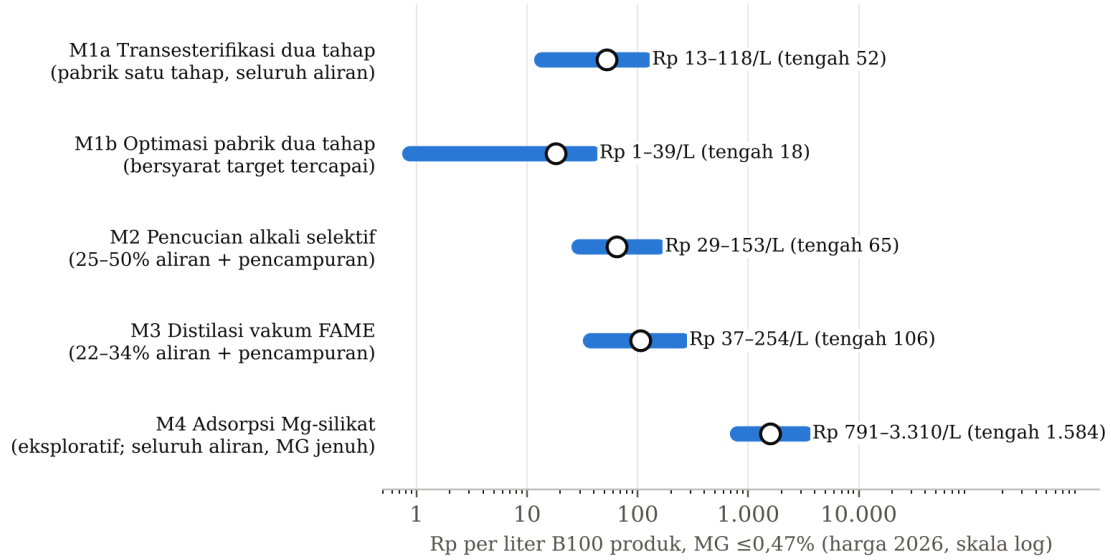
Tabel 3. Biaya tambahan kepatuhan untuk mencapai MG ≤0,47% per liter B100 produk yang memenuhi spesifikasi (harga 2026)

Metode	Bukti MG (bahan baku)	Komponen biaya dominan	Rp/L Rendah–Tinggi	Rp/L Tengah	% komponen konversi HIP
M1a Transesterifikasi dua tahap (pabrik satu tahap)	MG total 0,34–0,43% pada eksperimen terpilih (minyak kedelai; ekstrapolasi ke sawit) (Pisarello dkk., 2018)	Modal reaktor dan dekanter	13–118	52	1–9%
M1b Optimasi pabrik yang sudah dua tahap	Sama dengan M1a; bersyarat target tercapai tanpa modifikasi peralatan	Katalis, kehilangan FAME	1–39	18	0,1–3%
M2 Pencucian alkali selektif	MG total turun 44–86% (paten; biodiesel kedelai dan rapeseed; ekstrapolasi ke sawit) (GEA Mechanical Equipment GmbH, 2018)	Kehilangan FAME, modal sentrifus	29–153	65	2–12%
M3 Distilasi vakum FAME	MG total <0,01% pada distilasi FAME PFAD; 0,83→0,17–0,29% pada FAME RBDPO, dengan perolehan distilat 86% volume pada alat satu pelat; di bawah batas deteksi pada uji distilasi vakum (Cho dkk., 2012; Fuad & Kurniawan, 2022; Tang dkk., 2010)	Nilai residu, panas, modal	37–254	106	3–20%
M4 Adsorpsi Mg-silikat (eksploratif)	Hanya MG jenuh: 38,0–81,7 mg/g (Srikwanjai dkk., 2021; Srikwanjai, 2019); MG total belum diuji	Adsorben	791–3.310	1.584	61–257%

M1b hanya berlaku bila target dapat dicapai melalui perubahan operasi tanpa modifikasi peralatan; proporsi pabrik pada konfigurasi M1a dan M1b tidak diketahui. M4 adalah estimasi eksploratif yang mengasumsikan seluruh penurunan dicapai dari MG jenuh; angka ini bukan biaya kepatuhan MG total yang terverifikasi.

Pada target yang sama (MG ≤0,47%), tiga metode berbasis proses, yaitu M1a, M2, dan M3, berada pada orde besaran yang sama, yaitu Rp 13–254/L per liter produk atau kurang dari 2% HIP Oktober 2026 (Tabel 3, Gambar 2), dengan asumsi transesterifikasi dua tahap memerlukan reaktor baru dan distilasi memakai kolom industri. Kisaran ketiganya saling tumpang-tindih, sehingga urutan transesterifikasi dua tahap, pencucian alkali selektif, dan distilasi vakum bergantung pada asumsi. Pada kasus Tengah, transesterifikasi dua tahap (Rp 52/L) dan pencucian alkali (Rp 65/L) lebih murah daripada distilasi vakum (Rp 106/L). Pada pabrik yang sudah dua tahap, biaya optimasi (M1b) adalah Rp 1–39/L, tetapi angka ini hanya berlaku bila target dapat dicapai dengan perubahan operasi tanpa modifikasi peralatan, yang belum dibuktikan untuk pabrik sawit. Distilasi menjadi kompetitif karena cukup diterapkan pada 22–34% aliran; bila seluruh aliran didistilasi, biayanya Rp 154–718/L (Suplemen S5). Distilasi juga menghapus SG dan pengotor lain (Tang dkk., 2010), sehingga tidak seluruh biayanya dapat diatribusikan pada MG. Bila kinerja pemisahan alat satu pelat LEMIGAS (Subbab 3.2) dipakai sebagai pengganti asumsi kolom industri (residu 2–5%, MG distilat ≤0,2%), dengan perolehan distilat 86% volume diperlakukan sebagai residu 14% massa melalui pendekatan densitas setara dan MG distilat 0,29%, fraksi aliran yang harus didistilasi naik menjadi 46% dan biaya distilasi pada kasus Tengah menjadi sekitar Rp 479/L, atau 3% HIP.

Karena itu, kisaran distilasi pada Tabel 3 berlaku untuk kolom distilasi industri dan perlu diverifikasi dengan data rendemen pabrik. Estimasi eksploratif untuk adsorpsi magnesium silikat, yang hanya berlaku bila seluruh penurunan dicapai dari MG jenuh, menghasilkan Rp 791–3.310/L karena dosis adsorben 16,0–34,4 kg/t untuk memisahkan 1,31 kg MG per ton umpan (Srikwanjai dkk., 2021; National Biodiesel Education Program, 2011). Dalam asumsi model ini adsorpsi merupakan opsi termahal, tetapi angka tersebut bukan biaya kepatuhan MG total yang terverifikasi.



Gambar 2. Biaya tambahan kepatuhan untuk mencapai MG ≤0,47% per liter B100 produk yang memenuhi spesifikasi (harga 2026, skala logaritmik; garis = kasus Rendah–Tinggi, titik = kasus Tengah)

Sensitivitas satu parameter terhadap kasus Tengah menunjukkan bahwa kehilangan FAME atau nilai residu merupakan pemicu terbesar untuk pencucian alkali (Rp 45–85/L) dan distilasi (Rp 74–151/L; Rp 479/L bila kinerja pemisahan setara alat laboratorium satu pelat (Fuad & Kurniawan, 2022)), kapasitas pabrik 100–732 kt/th (Rp 45–78/L) dan utilisasi (Rp 48–58/L) paling berpengaruh pada transesterifikasi dua tahap, sedangkan kapasitas adsorpsi menentukan biaya adsorpsi (Rp 1.166–2.487/L). Perubahan nilai FAME dalam rentang HIP Maret–Oktober 2026 menggeser biaya kurang dari Rp 6/L. Pada pabrik yang sudah dua tahap, biaya M1 pada kasus Tengah turun menjadi sekitar Rp 18/L karena reaktor kedua tidak perlu dibangun; angka ini bersyarat pada tercapainya target melalui perubahan operasi. MG awal 0,55% dan 0,70% menggeser biaya pencucian alkali menjadi Rp 44–102/L, distilasi Rp 75–151/L, dan adsorpsi Rp 975–2.811/L. Biaya transesterifikasi dua tahap tidak berubah dalam model karena diterapkan pada seluruh aliran dengan kebutuhan katalis dan energi yang diasumsikan tetap; ini konsekuensi asumsi model, bukan bukti bahwa kebutuhan nyata tidak berubah. Eksponen penskalaan 0,5–0,7 mengubah biaya M1 menjadi Rp 41–69/L dan distilasi Rp 101–113/L. Bila residu distilasi tidak memiliki nilai jual, biaya distilasi menjadi Rp 188/L. Pencucian alkali tetap lebih murah daripada transesterifikasi dua tahap pada pabrik satu tahap selama kehilangan FAME tidak melebihi sekitar 0,3% massa aliran yang diolah, dan lebih murah daripada

distilasi sampai sekitar 1,4%; karena paten tidak melaporkan rendemen, urutan ini belum dapat dipastikan. Sebagai pemeriksaan kewajaran, bukan validasi, biaya distilasi model untuk seluruh aliran setara USD 10–47 per ton distilat (Tengah USD 24/t) bila mencakup modal tahunan, utilitas, pemeliharaan, dan nilai residu yang hilang, atau USD 5–21/t (Tengah USD 11/t) tanpa nilai residu; vendor melaporkan USD 25–30/t tanpa merinci cakupan biayanya (Sulzer, 2025).

3.4 Implikasi terhadap HIP dan kebutuhan insentif

Dibandingkan dengan komponen konversi HIP sebesar Rp 1.288/L, biaya metode berbasis proses (M1a, M2, dan M3) setara 1–20% dan biaya optimasi pabrik yang sudah dua tahap (M1b) 0,1–3%, sedangkan estimasi eksploratif adsorpsi 61–257%. Rasio ini menunjukkan skala biaya kepatuhan relatif terhadap satu komponen formula harga, bukan bukti kemampuan produsen menyerapnya. Implikasi fiskal disajikan sebagai skenario bersyarat (Tabel 4); setiap baris tabel adalah skenario alternatif untuk satu metode dan tidak dijumlahkan. Bila seluruh volume B100 untuk B50 sebesar 20,1 juta kL (Fitrady dkk., 2026) memerlukan perlakuan tambahan dan seluruh biaya diteruskan ke insentif (f = 100%, p = 1), kebutuhan insentif bertambah Rp 0,3–5,1 triliun per tahun untuk M1a, M2, dan M3, Rp 0,02–0,8 triliun per tahun untuk M1b, dan Rp 15,9–66,5 triliun per tahun untuk estimasi eksploratif adsorpsi. Pada cakupan 25% volume, misalnya bila perlakuan hanya diperlukan oleh pabrik yang MG-nya belum memenuhi batas, tambahan untuk M1a, M2, dan M3 turun menjadi Rp 0,07–1,3 triliun per tahun. Sebagai pembanding, pendapatan BPDP 2024 setara Rp 27,1 triliun dalam harga 2026 (Fitrady dkk., 2026).

Tabel 4. Skenario tambahan kebutuhan insentif B50 (triliun Rp per tahun, harga 2026; $\Delta I = V \times f \times \Delta c \times p$ dengan V = 20,1 juta kL dan p = 1)

Metode	f = 25%	f = 50%	f = 100%
M1a Transesterifikasi dua tahap (pabrik satu tahap)	0,07–0,59	0,13–1,18	0,27–2,37
M1b Optimasi pabrik dua tahap (bersyarat)	<0,01–0,20	<0,01–0,39	0,02–0,79
M2 Pencucian alkali selektif	0,15–0,77	0,29–1,54	0,59–3,08
M3 Distilasi vakum FAME	0,19–1,28	0,37–2,56	0,75–5,11
M4 Adsorpsi Mg-silikat (eksploratif)	3,97–16,63	7,95–33,27	15,90–66,53

Setiap baris adalah skenario alternatif untuk satu metode dan tidak dijumlahkan antarbaris. Nilai <0,01 menunjukkan biaya positif yang lebih kecil daripada Rp 0,01 triliun per tahun, bukan nol.

4. Pembahasan

4.1 Posisi estimasi terhadap literatur

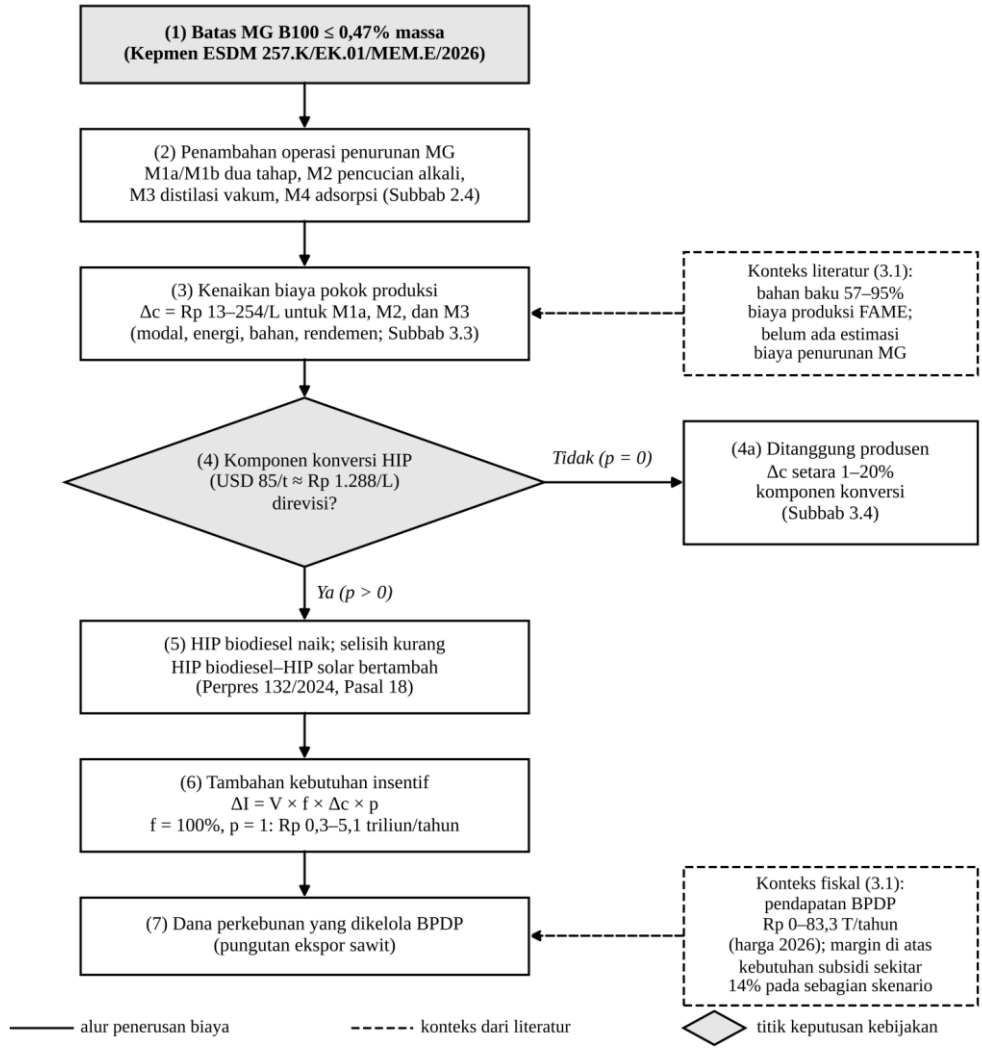
Hasil Subbab 3.1 menunjukkan hampir tidak adanya bukti ekonomi yang secara langsung mengaitkan biaya dengan kandungan MG. Literatur teknis telah lama menunjukkan peran MG jenuh dalam pembentukan presipitat dan penyumbatan filter (Dunn, 2009; Chupka dkk., 2014; Paryanto dkk., 2019a), dan literatur ekonomi telah memetakan biaya produksi serta beban insentif secara rinci, tetapi kedua arus literatur ini belum bertemu. Akibatnya, pembuat kebijakan belum memiliki

dasar kuantitatif untuk menilai berapa tambahan biaya per liter yang timbul bila batas MG B100 diperketat untuk B50. Estimasi pada Subbab 3.3 mengisi kekosongan ini dengan orde besaran awal, tetapi tetap bergantung pada parameter literatur dan asumsi yang perlu divalidasi dengan data pabrik di Indonesia.

Dibandingkan dengan pembanding biaya produksi dari literatur, biaya tambahan kepatuhan MG relatif kecil. Bahan baku menyumbang 57–95% biaya produksi pada studi FAME, dan kenaikan harga CPO USD 0,15/kg saja menaikkan biaya biodiesel sekitar USD 0,07/L (Ong dkk., 2012), atau sekitar Rp 1.200/L, sedangkan biaya metode berbasis proses (M1a, M2, dan M3) pada skenario utama berada pada Rp 13–254/L atau kurang dari 2% HIP; skenario distilasi dengan kinerja pemisahan alat satu pelat mencapai sekitar 3% HIP. Dengan demikian, biaya pengendalian MG bukan penentu utama biaya produksi, tetapi tetap relevan karena muncul pada seluruh volume yang memerlukan perlakuan. Kesenjangan ini juga terlihat dari distribusi studi: 21 laporan Lapis 2 sebagian besar adalah simulasi proses di Thailand, Brasil, dan Asia lainnya, sedangkan studi Indonesia lebih banyak berada pada ranah kebijakan makro. Selain itu, sebagian presipitat pada biodiesel sawit dapat bersumber dari SG, bukan MG (Na-Ranong & Kitchaiya, 2014), sehingga analisis biaya pengendalian presipitat idealnya membedakan kontribusi masing-masing komponen minor.

4.2 Mekanisme penerusan biaya dan pihak yang menanggung

Gambar 3 merangkum mekanisme penerusan biaya yang disusun dari hasil Subbab 3.3–3.4, formula HIP, dan literatur. Batas MG yang lebih ketat mendorong tambahan operasi penurunan MG, yang menaikkan biaya pokok produksi melalui biaya modal, energi, bahan penolong, dan kehilangan rendemen. Namun, kenaikan biaya pokok tidak otomatis masuk ke HIP, karena komponen konversi dalam formula HIP bernilai tetap USD 85/t; perubahan terakhir melalui Keputusan Menteri ESDM Nomor 290.K/EK.05/MEM.E/2025 menyangkut titik serah, titik suplai, moda, dan batas maksimal ongkos angkut, sedangkan nilai konversi tetap USD 85/t (Kementerian ESDM, 2025). Selama nilai konversi tidak direvisi, biaya kepatuhan MG ditanggung produsen. Biaya baru diteruskan ke selisih HIP dan insentif BPDP bila regulator menaikkan nilai konversi, dan insentif itu sendiri bergantung pada pendapatan yang sangat dipengaruhi harga serta volume ekspor CPO (Fitrady dkk., 2026; Silalahi dkk., 2020).



Gambar 3. Diagram alir penerusan biaya pengendalian MG ke HIP dan kebutuhan insentif biodiesel. Kotak bernomor menunjukkan urutan mekanisme, belah ketupat menunjukkan titik keputusan kebijakan (revisi komponen konversi, dinyatakan dengan parameter p), dan kotak bergaris putus menunjukkan konteks dari literatur.

Mekanisme pada Gambar 3 menunjukkan bahwa insidensi biaya kepatuhan MG ditentukan oleh desain formula HIP. Selama komponen konversi USD 85/t tidak direvisi, biaya tambahan ditanggung produsen; besarnya setara 1–20% komponen tersebut untuk M1a, M2, dan M3. Komponen konversi mencakup seluruh biaya pengolahan dan bukan marjin laba, sehingga rasio ini belum menunjukkan apakah produsen mampu menyerapnya; jawabannya memerlukan data biaya dan marjin aktual pabrik. Bila komponen konversi dinaikkan, beban berpindah ke BPDP dan, secara tidak langsung, ke petani dan eksportir sawit melalui pungutan ekspor (Silalahi dkk., 2020). Bila sebagian dibebankan ke harga jual campuran, konsumen non-PSO yang menanggung (Silalahi dkk., 2020). Dalam konteks fiskal yang marginnya tipis, biaya yang kecil per liter menjadi signifikan bila dikalikan volume B50:

setiap Rp 100/L yang diteruskan ke selisih HIP menambah kebutuhan insentif sekitar Rp 2 triliun per tahun. Karena itu, pilihan teknologi dan proporsi volume yang memerlukan perlakuan merupakan variabel fiskal, bukan semata keputusan teknis produsen.

Analisis biaya perlu diimbangi sisi manfaat. Literatur mencatat bahwa mutu campuran tinggi yang tidak terkendali menimbulkan penyumbatan filter, penggantian filter yang lebih sering, dan keausan injektor (Syauqi dkk., 2022; Halimatussadiah dkk., 2021), tetapi tidak ada yang mengkuantifikasi biaya tersebut per liter. Manfaat pengendalian MG mencakup biaya perawatan kendaraan dan peralatan yang terhindarkan, berkurangnya waktu henti, dan terjaganya penerimaan publik terhadap mandat. Selama manfaat ini belum dikuantifikasi, batas MG belum dapat dinilai dengan analisis biaya-manfaat penuh; estimasi pada Subbab 3.3 baru menyediakan sisi biaya.

4.3 Implikasi kebijakan

Estimasi biaya dan literatur yang ditelusuri mengarah pada tiga opsi yang berkaitan langsung dengan MG. Pertama, verifikasi biaya kepatuhan: regulator dapat meminta data neraca massa, energi, dan rendemen dari produsen yang menerapkan perbaikan proses, sehingga penyesuaian harga didasarkan pada biaya terukur, bukan estimasi. Verifikasi oleh Kementerian ESDM sebelum pembayaran selisih kurang yang sudah diatur dalam Pasal 18 ayat (5)–(7) Peraturan Presiden Nomor 132 Tahun 2024 (Pemerintah Republik Indonesia, 2024) dapat menjadi saluran pengumpulan data tersebut. Kedua, prioritas perbaikan proses: penyempurnaan reaksi melalui transesterifikasi dua tahap dan pencucian alkali selektif merupakan kandidat berbiaya rendah untuk memenuhi batas 0,47%, dengan syarat efektivitasnya divalidasi pada B100 sawit; distilasi vakum sebagian aliran menjadi pilihan bila diperlukan batas yang lebih ketat atau penghapusan SG sekaligus; sedangkan adsorpsi, yang biayanya baru dapat diestimasi secara eksploratif dari data MG jenuh, lebih tepat diposisikan sebagai pemurnian akhir untuk pengotor lain sampai efektivitasnya terhadap MG total terverifikasi. Ketiga, penyesuaian komponen konversi secara bersyarat: bila biaya terverifikasi melampaui kemampuan serap produsen, komponen konversi dapat ditinjau dengan konsekuensi fiskal yang dapat dihitung melalui skenario pada Tabel 4. Sebagai usulan kebijakan lanjutan, spesifikasi berbasis suhu atau risiko yang memperketat batas hanya di wilayah dan musim berisiko presipitasi tinggi (Paryanto dkk., 2019b) dapat dikaji karena berpotensi memperkecil proporsi volume yang memerlukan perlakuan (f); selama batas nasional 0,47% berlaku untuk seluruh B100, pengurangan cakupan perlakuan seperti ini belum dapat diterapkan. Keberlanjutan sumber dana insentif tetap menjadi prasyarat, mengingat pendapatan BPDP sangat bergantung pada harga dan volume ekspor CPO (Fitrady dkk., 2026; Silalahi dkk., 2020).

4.4 Keterbatasan dan penelitian lanjutan

Keterbatasan studi ini diuraikan menurut tahap penelitian. Pertama, pada Tahap 1, penelusuran literatur terstruktur terbatas pada dua basis data dan belum mencakup penelusuran menyeluruh laporan LEMIGAS, APROBI, atau BPDP, 9 laporan hanya dinilai dari abstrak, dan dua penyimpangan kriteria inklusi tercatat; karena itu penelusuran ini dipakai untuk menunjukkan kesenjangan bukti dan konteks, bukan

sebagai tinjauan sistematis. Kedua, pada Tahap 2, parameter teknis berasal dari pencarian teknis terarah yang terdokumentasi (Suplemen S7) dan sejumlah literatur abu-abu, termasuk paten dan dokumen vendor, bukan dari tinjauan sistematis kedua; data MG transesterifikasi dua tahap berasal dari minyak kedelai, data pencucian alkali dari contoh paten pada biodiesel kedelai dan rapeseed, dan kapasitas adsorpsi yang tersedia hanya untuk MG jenuh, sehingga estimasi adsorpsi bersifat eksploratif. Ketiga, pada Tahap 3, MG awal 0,60% dan konfigurasi pabrik pembanding adalah asumsi skenario, proporsi pabrik nasional pada konfigurasi satu atau dua tahap tidak diketahui, biaya peralatan diskalakan melampaui rentang kapasitas sumbernya, kehilangan FAME pada pencucian alkali belum dilaporkan, dan fraksi residu distilasi pada data FAME sawit dari alat laboratorium satu pelat jauh lebih besar (sekitar 14%, dari perolehan distilat 86% volume dengan pendekatan densitas setara) daripada asumsi kolom industri. Keempat, pada Tahap 4, skenario fiskal mengasumsikan penerusan biaya penuh ($p = 1$) dan cakupan volume f yang belum diketahui, sedangkan normalisasi harga memakai indeks agregat, nilai CEPCI 2025–2026 yang masih berupa estimasi, dan tahun dasar yang diasumsikan untuk sebagian studi, sehingga nilai 2026 bersifat indikatif.

Penelitian lanjutan disarankan mencakup: (1) validasi estimasi biaya penurunan MG dengan data neraca massa, energi, rendemen, dan konfigurasi aktual pabrik B100 sawit di Indonesia, termasuk proporsi pabrik yang sudah memenuhi batas 0,47%; (2) analisis biaya-manfaat yang membandingkan batas MG tunggal nasional dengan spesifikasi berbasis suhu atau risiko regional; (3) kuantifikasi manfaat berupa biaya di sisi pengguna yang terhindarkan, seperti penggantian filter dan waktu henti, agar batas MG dapat dinilai dengan analisis biaya-manfaat penuh; dan (4) integrasi biaya kepatuhan mutu ke dalam model fiskal insentif biodiesel untuk mendukung penetapan spesifikasi B50 yang efisien secara ekonomi.

5. Kesimpulan

Studi ini mengkaji biaya pengendalian MG agar B100 sawit memenuhi batas 0,47% massa untuk implementasi B50 melalui analisis tekno-ekonomi berbasis literatur yang terdiri atas empat tahap, yaitu penelusuran literatur terstruktur, pencarian teknis terarah, pemodelan biaya kepatuhan pada pabrik pembanding hipotetis, serta penghubungan biaya dengan formula HIP dan skenario insentif. Hasil yang diperoleh merupakan estimasi orde besaran yang bertumpu pada parameter literatur, data resmi, dan asumsi yang terdokumentasi dalam register parameter. Sesuai dengan tiga tujuan penelitian, kesimpulan studi ini adalah sebagai berikut.

1. Literatur ekonomi biodiesel sawit yang ditelusuri belum menyediakan estimasi biaya penurunan MG, karena hanya satu studi yang menjadikan batas MG sebagai dasar keputusan ekonomi dan tidak satu pun menghitung biaya marjinal penurunan MG.
2. Biaya tambahan untuk menurunkan MG B100 sawit dari 0,60% ke batas B50 sebesar 0,47% pada harga 2026 diestimasi sebesar Rp 13–118/L untuk transesterifikasi dua tahap dengan reaktor baru, Rp 29–153/L untuk pencucian alkali selektif, dan Rp 37–254/L untuk distilasi vakum sebagian aliran per liter produk, sedangkan optimasi pada pabrik yang

sudah dua tahap hanya memerlukan Rp 1–39/L bila target tercapai tanpa modifikasi peralatan.

3. Biaya transesterifikasi dua tahap dengan reaktor baru, pencucian alkali selektif, dan distilasi vakum tersebut setara 1–20% komponen konversi USD 85/t dalam formula HIP dan menambah kebutuhan insentif B50 sebesar Rp 0,3–5,1 triliun per tahun apabila seluruh volume B100 memerlukan perlakuan dan biayanya diteruskan penuh melalui revisi komponen konversi.

Pendanaan, Konflik Kepentingan, dan Ketersediaan Data

Penelitian ini didukung oleh Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia (Kemendiktisaintek) melalui skema Penelitian Tesis Magister (PTM) tahun 2026 dengan Kontrak Nomor 254-35/UN7.D2/PP/IV/2026, yang dikelola oleh Program Studi Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro. Pemberi dana tidak berperan dalam desain, pelaksanaan, analisis, interpretasi, maupun publikasi studi ini. Para penulis menyatakan tidak memiliki kepentingan finansial atau hubungan pribadi yang dapat memengaruhi hasil yang dilaporkan dalam artikel ini. Daftar laporan terinklusi, string pencarian, konversi harga, diagram alir dan tabel tambahan penelusuran literatur, lembar kerja model biaya dan register parameter, penilaian kualitas studi, dan dokumentasi pencarian teknis tersedia sebagai Suplemen S1–S7.

Daftar Pustaka

Abidin, N. Z., Applanaidu, S.-D., & Sapiri, H. (2014). The dynamic model on the impact of biodiesel blend mandate (B5) on Malaysian palm oil domestic demand: A preliminary finding. *AIP Conference Proceedings*. https://doi.org/10.1063/1.4903628

Aisyah, L., Wibowo, C. S., Bethari, S. A., Ufidian, D., & Anggarani, R. (2018). Monoglyceride contents in biodiesel from various plants oil and the effect to low temperature properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 316*, 012023. https://doi.org/10.1088/1757-899X/316/1/012023

Applanaidu, S. D., Abidin, N. Z., Sapiri, H., & Zabid, M. F. M. (2015b). Impact of Various Palm-Based Biodiesel Blend Mandates on Malaysian Crude Palm Oil Stock and Price: A System Dynamics Approach. *Asian Social Science*. https://doi.org/10.5539/ass.v11n25p190

Applanaidu, S. D., Ali, A., & Alias, M. H. (2013). Impact of biodiesel blend mandate (B10) on the Malaysian palm oil industry. Dalam Prosiding Persidangan Kebangsaan Ekonomi Malaysia ke-VIII (PERKEM VIII), Jilid 2 (hlm. 766–777), Johor Bahru, 7–9 Juni 2013. ISSN 2231-962X. https://www.ukm.my/fep/perkem/pdf/perkemVIII/PKEM2013_3D3.pdf.

Applanaidu, S.-D., Abidin, N. Z., & Ali, A. M. (2015a). B2, B7 or B10: Which palm-based blend mandate wise to be chosen in Malaysia?. *AIP Conference Proceedings*. https://doi.org/10.1063/1.4937021

Badan Pusat Statistik. (2026). Perkembangan indeks harga konsumen September 2026 (Berita Resmi Statistik No. 94/10/Th. XXIX, 1 Oktober 2026). Jakarta: BPS.

Chemical Engineering. (2026). Inflationary pressures push 2025

CEPCI annual average higher than 2024. https://www.chemengonline.com/inflationary-pressures-push-2025-cepci-annual-average-higher-than-2024/

Cho, H. J., Kim, J., Hong, S. W., & Yeo, Y. (2012). Development of a novel process for biodiesel production from palm fatty acid distillate (PFAD). *Fuel Processing Technology*. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.022

Chupka, G. M., Fouts, L., Lennon, J. A., Alleman, T. L., Daniels, D. A., & McCormick, R. L. (2014). Saturated monoglyceride effects on low-temperature performance of biodiesel blends. *Fuel Processing Technology, 118*, 302–309. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.10.002

Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi. (2023). Buku saku bioenergi tahun 2023. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi. (2026a). Besaran harga indeks pasar bahan bakar nabati jenis biodiesel bulan Maret 2026 (Surat Nomor B-624/EK.05/DJE.B/2026, 27 Februari 2026, beserta lampiran perhitungan). Jakarta: Kementerian ESDM.

Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi. (2026b). Besaran harga indeks pasar bahan bakar nabati jenis biodiesel bulan Oktober 2026 (Surat Nomor B-3157/EK.05/DJE.B/2026, 28 September 2026, beserta lampiran perhitungan). Jakarta: Kementerian ESDM.

Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. (2026). Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor 75.K/MG.06/DJM/2026 tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Solar (B50) yang Dipasarkan di Dalam Negeri. Ditetapkan 25 Juni 2026, berlaku 1 Juli 2026. Jakarta: Kementerian ESDM.

Dunn, R. O. (2009). Effects of minor constituents on cold flow properties and performance of biodiesel. *Progress in Energy and Combustion Science, 35(6)*, 481–489. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.07.002

Ermawati, T. (2015). Analisis subsidi energi dalam pengembangan energi terbarukan. *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan*. https://doi.org/10.14203/jep.23.1.2015.53-65

Fitrady, A., Cahyaningsih, A., & Nugrahaningsih, F. (2026). At what cost? Economic and fiscal trade-offs of Indonesia's biodiesel program. *Energy Policy*. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2026.115134

Fuad, M., & Kurniawan, M. (2022). Production of biodiesel distillate with low monoglycerides for B40 component by using distillation technique with 1 and 30 plates column. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1034, 012006. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1034/1/012006

GEA Mechanical Equipment GmbH. (2018). Method for reducing the content of saturated monoglycerides in a raw biodiesel (Paten WO2018210573A1).

World Intellectual Property Organization. https://patents.google.com/patent/WO2018210573A1/en

Ghaizani, M. A., Abdurrosyid, I., Paryanto, I., & Gozan, M. (2018). Monostearin effects on the formation of precipitate in palm oil biodiesel and petroleum diesel blends with various storage temperature. *E3S Web of Conferences, 52*, 00026. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185200026

Halimatussadiah, A., Nainggolan, D., Yui, S., Moeis, F. R., & Siregar, A. A. (2021). Progressive biodiesel policy in Indonesia: Does the Government's economic proposition hold?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111431

Harahap, F., Silveira, S., & Khatiwada, D. (2017). Integrated biorefinery vs. stand alone biodiesel production in Indonesia – an economic analysis. *Dalam European Biomass Conference and Exhibition Proceedings (25th EUBCE, Stockholm, 12–15 Juni 2017) [Poster]. ISBN 978-88-89407-17-2. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-211489*.

Harahap, F., Silveira, S., & Khatiwada, D. (2019). Cost competitiveness of palm oil biodiesel production in Indonesia. *Energy*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.115

Heer, P. K. K. S., & Gaikar, V. G. (2016). Simulation of a Palm Fatty Acid Distillate-Based Biodiesel Plant Using Homogeneous and Heterogeneous Catalysts. *Chemical Engineering & Technology*. https://doi.org/10.1002/ceat.201600057

Im-orb, K., Arpornwichanop, A., & Simasatitkul, L. (2021). Process intensification approach for design and optimization of biodiesel production from palm fatty acid distillate. *Biotechnology Reports*. https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00622

Imaniar, R. (2024). Implementasi biodiesel HVO di Indonesia: Metode economic benefit cost analysis. *Jurnal Ilmiah Manajemen Ekonomi & Akuntansi (MEA)*. https://doi.org/10.31955/mea.v8i2.4005

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3.K/EK.05/DJE/2024 tentang Harga Indeks Pasar Bahan Bakar Nabati Jenis Biodiesel yang Dicampurkan ke Dalam Bahan Bakar Minyak Jenis Minyak Solar. Jakarta: Kementerian ESDM.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 290.K/EK.05/MEM.E/2025 tentang Perubahan Kedua atas Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3.K/EK.05/DJE/2024 tentang Harga Indeks Pasar Bahan Bakar Nabati Jenis Biodiesel yang Dicampurkan ke Dalam Bahan Bakar Minyak Jenis Minyak Solar. Ditetapkan 20 Agustus 2025. Jakarta: Kementerian ESDM.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2026). Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 257.K/EK.01/MEM.E/2026

tentang Kewajiban Pencampuran Bahan Bakar Nabati Jenis Biodiesel dengan Bahan Bakar Minyak Berupa Minyak Solar sebesar 50% (Lima Puluh Persen) dalam Kerangka Pembiayaan oleh Badan Pengelola Dana Perkebunan. Ditetapkan 17 Juni 2026, berlaku 1 Juli 2026.

Na-Ranong, D., & Kitchaiya, P. (2014). Precipitation above cloud point in palm oil based biodiesel during production and storage. *Fuel, 122*, 287–293. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.003

National Biodiesel Education Program. (2011). Adsorbents (Biodiesel TechNotes TN#14). University of Idaho. https://www.biodieseleducation.org/Literature/TechNotes/TN14_Adsorbents.pdf

Ocampo Batlle, E. A., Escobar Palacio, J. C., Silva Lora, E. E., Bortoni, E. C., & Horta Nogueira, L. A. (2021). Energy, economic, and environmental assessment of the integrated production of palm oil biodiesel and sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127638

Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Honnery, D. (2012). Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production. *Fuel*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.031

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Panjaitan, J. R. H. (2025). Sensitivity Analysis of Biodiesel Production from Crude Palm Oil (CPO) in Indonesia: Evaluation of CPO and Biodiesel Prices in 2024. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1460/1/012006

Paryanto, I., Prakoso, T., & Gozan, M. (2019a). Determination of the upper limit of monoglyceride content in biodiesel for B30 implementation based on the measurement of the precipitate in a biodiesel–petrodiesel fuel blend (BXX). *Fuel, 258*, 116104. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116104

Paryanto, I., Prakoso, T., Susanto, H. B., & Gozan, M. (2019b). The effect of outdoor temperature conditions and monoglyceride content on the precipitate formation of biodiesel-petrodiesel blended fuel (BXX). *Evergreen, 6(1)*, 59–64.

Pemerintah Republik Indonesia. (2020). Peraturan Presiden Nomor 121 Tahun 2020 tentang Perubahan atas Peraturan Presiden Nomor 40 Tahun 2016 tentang Penetapan Harga Gas Bumi.

Pemerintah Republik Indonesia. (2024). Peraturan Presiden Nomor 132 Tahun 2024 tentang Pengelolaan Dana Perkebunan. Ditetapkan 18 Oktober 2024.

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). Plant design and economics for chemical engineers (Edisi ke-5). McGraw-Hill.

Pisarello, M. L., Maquirriain, M., Sacripanti Olalla, P., Rossi, V., & Querini, C. A. (2018). Biodiesel production by transesterification in two steps: Kinetic effect or shift in the equilibrium conversion? *Fuel Processing Technology, 181*, 244–251. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.028

PT PLN (Persero). (2026). Penetapan penyesuaian tarif tenaga listrik (tariff adjustment) bulan Juli–September 2026. Jakarta, 1 Juli 2026.

Rincón, L. E., Valencia, M. J., Hernández, V., Matallana, L. G., & Cardona, C. A. (2015). Optimization of the Colombian biodiesel supply chain from oil palm crop based on techno-economical and environmental criteria. *Energy Economics*. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.10.018

Saengprachum, N. (2009). Purification of biodiesel using natural diatomite and diatomite doped with MnO2 [Tesis magister, Chulalongkorn University]. https://doi.org/10.58837/chula.the.2009.2328

Sembiring, M. T., Sukardi, S., Suryani, A., & Romli, M. (2015). Model Biaya Produksi Biodiesel Berbasis Minyak Sawit. *Jurnal Litbang Industri*. https://doi.org/10.24960/jli.v5i1.663.23-36

Silalahi, F. T. R., Simatupang, T. M., & Siallagan, M. (2020). A system dynamics approach to biodiesel fund management in Indonesia. *AIMS energy*. https://doi.org/10.3934/energy.2020.6.1173

Silviana, S., Anggoro, D. D., Hadiyanto, H., Salsabila, C. A., Aprilio, K., Utami, A. W., Sa'adah, A. N., & Dalanta, F. (2022). A review on the recent breakthrough methods and influential parameters in the biodiesel synthesis and purification. *International Journal of Renewable Energy Development, 11(4)*, 1012–1036. https://doi.org/10.14710/ijred.2022.43147

Simasatitkul, L., & Arpornwichanop, A. (2017). Economic Evaluation of Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate Using a Reactive Distillation. *Energy Procedia*. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.308

Solikhah, M. D., Kismanto, A., Raksodewanto, A., & Peryoga, Y. (2017). Profitability and sustainability of small - Medium scale palm biodiesel plant. *AIP Conference Proceedings*. https://doi.org/10.1063/1.4985532

Srikwanjai, P. (2019). Removal of saturated monoglyceride in biodiesel using adsorption and its effect on low-temperature properties of biodiesel blends [Tesis magister, Chulalongkorn University]. Chulalongkorn University Intellectual Repository. https://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/64986

Srikwanjai, P., Ngampuengpis, W., & Ngamcharussrivichai, C. (2021). Removal of saturated monoglyceride in biodiesel using adsorption and its effect on low-temperature properties of biodiesel blends. *MATEC Web of Conferences, 333*, 09004. https://doi.org/10.1051/matecconf/202133309004

Subramaniam, M., Sarip, S., Kaidi, H. M., & Muhammad-Sukki, F. (2025). Enhancing base-diesel fuel

specification for optimized biodiesel blending in Malaysia. *Sustainable Futures*. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101428

Sulzer. (2025). Biodiesel distillation: Achieve ultra-low sulfur and winter-grade biodiesel with confidence [Halaman web]. https://solutions.sulzer.com/post/biodiesel-distillation-achieve-ultra-low-sulfur-and-winter-grade-biodiesel-with-confidence

Suppalakpanya, K., Nikhom, S., Chimres, N., & Nikhom, R. (2026). Techno-economic evaluation of palm stearin biodiesel production using a continuous deglycerolization reactor. *Biofuels*, Bioproducts and Biorefining. Advance online publication. https://doi.org/10.1002/bbb.70176

Syauqi, A., Halimatussadiah, A., & Purwanto, W. W. (2022). Assessing and choosing the optimum blend of biodiesel, hydrogenated vegetable oil, and petroleum diesel based on sustainability in Indonesia. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*. https://doi.org/10.1002/bbb.2402

Tang, H., De Guzman, R. C., Salley, S. O., & Ng, K. Y. S. (2010). Comparing process efficiency in reducing steryl glucosides in biodiesel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *87*, 337–345. https://doi.org/10.1007/s11746-009-1502-4

Treeyawetchakul, C. (2020). Preliminary Modified Biodiesel Production by Coupling Reactive distillation with a Steam Reformer via Aspen Plus®. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. https://doi.org/10.1088/1757-899x/778/1/012064

Turton, R., Shaeiwitz, J. A., Bhattacharyya, D., & Whiting, W. B. (2018). Analysis, synthesis, and design of chemical processes (Edisi ke-5). Prentice Hall.

U.S. Bureau of Labor Statistics. (2026). Consumer Price Index for All Urban Consumers (CPI-U), U.S. city average [Data set]. https://www.bls.gov/regions/mid-atlantic/data/consumerpriceindexhistorical_us_table.htm

Veza, I., Muhammad, V., Oktavian, R., Djamari, D. W., & Said, M. F. M. (2021). Effect of COVID-19 on Biodiesel Industry: A Case Study in Indonesia and Malaysia. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.15282/ijame.18.2.2021.01.0657

World Bank. (2026). Inflation, consumer prices for Indonesia (FPCPITOTLZGIDN) [Data set]. Federal Reserve Bank of St. Louis. https://fred.stlouisfed.org/series/FPCPITOTLZGIDN

X-Rates. (2026). Monthly average USD to IDR 2026 [Data set]. https://x-rates.com/average/?amount=1&from=USD&to=IDR&year=2026

Young, A. F., Pessoa, F. L. P., & Queiroz, E. M. (2015). Comparison between Biodiesel Production from Soybean Oil and Palm Oil with Ethanol: Design and Economic Evaluation. *Chemical engineering transactions*. https://doi.org/10.3303/cet1543055