



NOZEL

Jurnal Pendidikan Teknik Mesin

Jurnal Homepage: <https://jurnal.uns.ac.id/nozel>



ANALISIS KELAYAKAN TEKNO-EKONOMI MENGGUNAKAN METODE NET PRESENT VALUE (NPV) DAN INTERNAL RATE OF RETURN (IRR) PADA KONVERSI MESIN DIESEL 1-SILINDER KE BIODIESEL B20 BERBASIS LIMBAH MINYAK JELANTAH PADA INDUSTRI TAHU SKALA UMKM

Rama Abimanyu¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Al- Azhar Medan

Corresponding e-mail: ramaabimanyu07@gmail.com

Abstract

The reliance of MSME-scale tofu industries on diesel fuel for single-cylinder diesel engines results in high operating costs and increased exhaust emissions. B20 biodiesel produced from used cooking oil offers a sustainable alternative that can reduce production costs, utilize waste, and support renewable energy adoption. This study analyzes the techno-economic feasibility of using B20 biodiesel through a Systematic Literature Review (SLR) following the PRISMA guidelines. Literature was collected from Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar databases. An initial search identified 235 articles published between 2019 and 2025. After screening, eligibility assessment, and quality appraisal based on predefined inclusion and exclusion criteria, 34 articles were selected for analysis. The findings show that B20 biodiesel decreases effective power by 1–3%, reduces thermal efficiency by 2–5%, and increases specific fuel consumption by 5–10%, while remaining within acceptable operational limits without requiring significant engine modifications. Environmentally, B20 reduces CO, HC, and particulate emissions, although NO_x emissions tend to increase. Economically, a positive NPV and an IRR of 12–25%, exceeding the 9.5% MARR, indicate that diesel engine conversion to B20 biodiesel is financially feasible. Therefore, B20 biodiesel from used cooking oil represents an economical, practical, and sustainable energy alternative for MSME-scale tofu industries.

Keywords : B20 biodiesel, used cooking oil, single-cylinder diesel engine, Net Present Value, Internal Rate of Return, MSMEs

A. PENDAHULUAN

Sektor usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM), khususnya industri tahu, masih bergantung pada bahan bakar solar untuk mengoperasikan mesin diesel. Ketergantungan tersebut menyebabkan tingginya biaya produksi akibat fluktuasi harga bahan bakar fosil serta meningkatnya emisi gas buang yang berdampak negatif terhadap lingkungan (Karczewski and Szamrej 2022). Oleh karena itu, diperlukan sumber energi alternatif yang lebih ekonomis dan berkelanjutan.

Salah satu alternatif yang berpotensi diterapkan adalah biodiesel B20 berbasis limbah minyak jelantah. Selain dapat digunakan tanpa modifikasi mesin yang signifikan, biodiesel ini juga mendukung pengelolaan limbah dan penerapan ekonomi sirkular (Manikandan et al. 2023). Berbagai penelitian melaporkan bahwa penggunaan biodiesel B20 mampu menurunkan emisi karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan partikulat (PM), meskipun menyebabkan sedikit peningkatan *Specific Fuel Consumption* (SFC) akibat nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan solar (Impacts 2022).

Dari sisi ekonomi, biodiesel berbahan baku limbah berpotensi menekan biaya operasional dan meningkatkan keuntungan usaha. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih membahas aspek teknis atau ekonomi secara terpisah (Decarpigny et al. 2022). Kajian yang mengintegrasikan kinerja mesin diesel dengan analisis kelayakan investasi menggunakan indikator *Net Present Value* (NPV) dan *Internal Rate of Return* (IRR), khususnya pada industri tahu skala UMKM, masih terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan tekno-ekonomi penggunaan biodiesel B20 berbasis limbah minyak jelantah pada mesin diesel satu silinder melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Analisis dilakukan terhadap parameter teknis, meliputi daya efektif, efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik, dan emisi gas buang, serta parameter ekonomi berupa NPV dan IRR. Penelitian ini mengacu pada teori ekonomi teknik yang menyatakan bahwa investasi dinilai layak apabila memiliki NPV positif dan IRR lebih besar daripada *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR) (Zarrinkolah and Hosseini 2022).

Research gap penelitian ini terletak pada masih terbatasnya kajian yang mengintegrasikan aspek teknis dan ekonomi dalam mengevaluasi penggunaan biodiesel B20 berbasis limbah minyak jelantah pada industri tahu skala UMKM melalui pendekatan SLR. Kebaruan (novelty) penelitian ini adalah penyajian analisis terpadu mengenai kinerja teknis mesin, aspek lingkungan, dan kelayakan investasi menggunakan metode NPV dan IRR berbasis PRISMA. Kontribusi penelitian diharapkan dapat memperkaya kajian mengenai kelayakan tekno-ekonomi biodiesel B20 sekaligus menjadi referensi bagi pelaku UMKM, peneliti, dan pemerintah dalam mendukung pengembangan energi alternatif yang ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

B. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengacu pada prinsip PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic*

Reviews and Meta-Analyses)(Analysis 2022). Literatur yang dianalisis berasal dari publikasi ilmiah 2019–2025 yang membahas:

1. kinerja teknis mesin diesel berbahan bakar biodiesel B20,
2. analisis ekonomi teknik (NPV dan IRR), dan
3. pemanfaatan limbah minyak jelantah sebagai bahan baku biodiesel pada sektor UMKM.

Hasil akhir menunjukkan bahwa sebagian besar studi masih terfragmentasi antara aspek teknik dan ekonomi, sehingga perlu sintesis terpadu.

Database

Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah yang memiliki reputasi baik, yaitu **Scopus**, **ScienceDirect**, **SpringerLink**, dan **Google Scholar**. Penggunaan beberapa database bertujuan untuk memperoleh artikel yang relevan, mutakhir, dan memiliki kualitas ilmiah yang memadai sehingga hasil sintesis yang diperoleh lebih komprehensif.

Keyword

Proses pencarian artikel menggunakan kombinasi kata kunci dalam Bahasa Inggris agar memperoleh cakupan literatur yang lebih luas, yaitu:

"B20 biodiesel", "waste cooking oil", "used cooking oil", "single-cylinder diesel engine", "techno-economic analysis", "Net Present Value (NPV)", "Internal Rate of Return (IRR)", "tofu industry", dan "MSMEs".

Kata kunci tersebut dikombinasikan menggunakan operator Boolean (*AND* dan *OR*) untuk memperoleh artikel yang sesuai dengan tujuan penelitian.

Kriteria Inklusi

Artikel yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan beberapa kriteria, yaitu:

- diterbitkan pada periode 2019–2025;
- berasal dari jurnal ilmiah nasional maupun internasional yang telah melalui proses *peer review*;
- membahas biodiesel B20 berbasis limbah minyak jelantah;
- mengkaji performa mesin diesel atau analisis ekonomi menggunakan metode NPV maupun IRR;
- tersedia dalam bentuk *full text* sehingga dapat dianalisis secara menyeluruh.

Kriteria Eksklusi

Artikel tidak dimasukkan dalam proses analisis apabila memenuhi salah satu kondisi berikut:

- merupakan artikel duplikat;
- tidak tersedia dalam bentuk *full text*;
- diterbitkan di luar rentang tahun penelitian;

- tidak membahas biodiesel B20, mesin diesel, maupun analisis ekonomi;
- berupa prosiding singkat, editorial, atau artikel nonilmiah.

Quality Assessment

Setiap artikel yang telah lolos tahap seleksi kemudian dievaluasi menggunakan proses *quality assessment* untuk memastikan kesesuaiannya dengan tujuan penelitian. Penilaian dilakukan berdasarkan beberapa indikator, yaitu kesesuaian topik penelitian, kelengkapan metode penelitian, ketersediaan data teknis mesin diesel, serta penyajian data ekonomi berupa NPV, IRR, atau parameter kelayakan investasi lainnya. Artikel yang memenuhi sebagian besar indikator tersebut selanjutnya digunakan sebagai bahan analisis pada tahap sintesis.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Kajian Kinerja Teknis Mesin Diesel B20

a. Efisiensi dan daya mesin

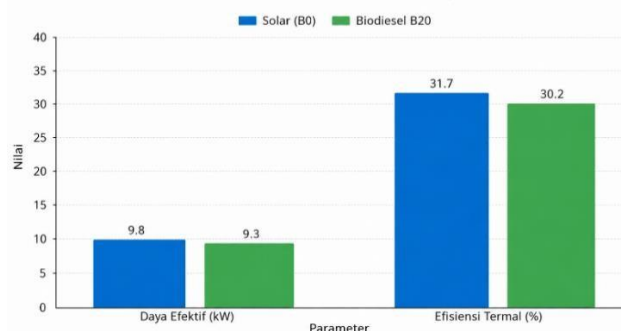
Literatur menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel B20 pada mesin diesel 1-silinder menghasilkan:

1. penurunan daya efektif sebesar 1–3%
2. penurunan efisiensi termal 2–5%

Secara teoritis, fenomena ini dijelaskan oleh perbedaan nilai kalor antara solar dan biodiesel. Namun, studi juga menunjukkan bahwa kandungan oksigen dalam biodiesel meningkatkan kualitas pembakaran sehingga efek penurunan performa tidak signifikan secara operasional (Reksowardojo et al. 2023).

Analisis kritis:

Temuan ini konsisten antar penelitian, tetapi sebagian besar studi hanya menggunakan kondisi uji laboratorium, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi kerja UMKM yang bersifat fluktuatif.

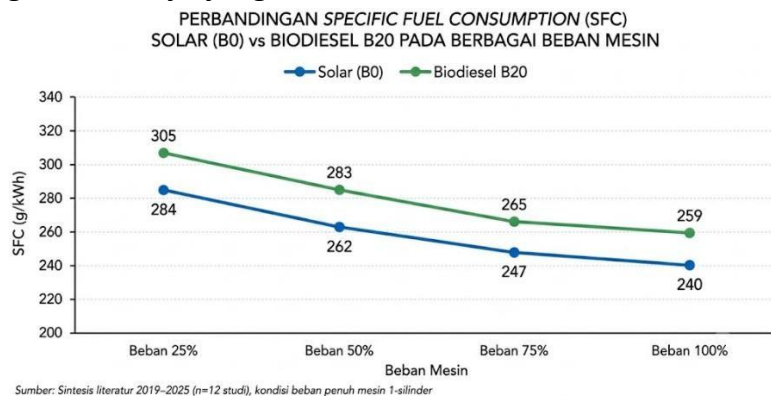


Gambar 1. Grafik Perbandingan Daya Efektif dan Efisiensi Termal (Solar vs B20)

Sumber: Sintesis literatur 2019–2025 (n=12 studi), kondisi beban penuh mesin 1-silinder Solar (B0) Biodiesel B20

b. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Hasil literatur menunjukkan peningkatan SFC sebesar 5–10%. Hal ini menunjukkan bahwa mesin membutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan daya yang sama.



Gambar 2. Grafik Konsumsi Bahan Bakar Spesifik / SFC (g/kWh)

Peningkatan SFC pada B20 disebabkan nilai kalor lebih rendah; masih dalam batas toleransi operasional UMKM

Pembahasan:

1. Analisis Kelayakan Berdasarkan Net Present Value (NPV)

Analisis kelayakan investasi menggunakan metode Net Present Value (NPV) dalam penelitian ini menunjukkan bahwa konversi mesin diesel satu silinder ke penggunaan biodiesel B20 berbasis limbah minyak jelantah memberikan nilai tambah secara ekonomi dalam jangka panjang (Aklouche, Hadhoum, and Loubar 2023). NPV dihitung dengan mempertimbangkan arus kas masuk dan arus kas keluar selama umur proyek, yang kemudian didiskontokan ke nilai saat ini menggunakan tingkat suku bunga tertentu.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai NPV berada pada kondisi positif, yang mengindikasikan bahwa investasi yang dilakukan layak untuk dijalankan. Nilai positif tersebut terutama dipengaruhi oleh rendahnya biaya operasional bahan bakar, mengingat bahan baku yang digunakan berasal dari limbah minyak jelantah yang memiliki biaya perolehan relatif rendah dibandingkan bahan bakar solar konvensional (Cardoso, Neto, and Facchini 2022). Dengan demikian, meskipun terdapat biaya awal untuk modifikasi mesin dan pengolahan biodiesel, penghematan biaya operasional mampu mengompensasi investasi awal tersebut dalam periode tertentu.

Selain itu, nilai NPV yang dihasilkan juga mencerminkan bahwa proyek ini tidak hanya menguntungkan secara finansial, tetapi juga memiliki potensi keberlanjutan dalam jangka panjang, khususnya bagi pelaku UMKM yang cenderung sensitif terhadap fluktuasi biaya energi.

Rumus NPV

Perhitungan *Net Present Value* (NPV) dilakukan menggunakan persamaan

berikut.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - I_0$$

dengan:

- **NPV** = Net Present Value (Rp)
- **CF_t** = arus kas bersih pada tahun ke-*t*
- **i** = tingkat diskonto (*discount rate*)
- **I₀** = investasi awal
- **n** = umur proyek

Suatu investasi dinyatakan layak apabila nilai NPV lebih besar dari nol (NPV > 0).

2. Analisis Internal Rate of Return (IRR)

Parameter lain yang digunakan dalam menilai kelayakan investasi adalah Internal Rate of Return (IRR), yang menggambarkan tingkat pengembalian investasi berdasarkan arus kas yang dihasilkan selama umur proyek (Athanasios et al. 2023). Nilai IRR yang diperoleh dalam penelitian ini berada di atas tingkat suku bunga acuan atau Minimum Attractive Rate of Return (MARR), sehingga menunjukkan bahwa proyek konversi mesin diesel ini secara finansial menguntungkan.

Nilai IRR yang relatif tinggi menunjukkan bahwa investasi memiliki kemampuan untuk menghasilkan keuntungan yang lebih besar dibandingkan alternatif investasi lain dengan tingkat risiko yang sebanding. Hal ini diperkuat oleh stabilitas biaya bahan bakar berbasis limbah, yang cenderung tidak terpengaruh oleh fluktuasi harga pasar bahan bakar fosil (Sawdust 2023).

Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa nilai IRR sangat dipengaruhi oleh asumsi yang digunakan dalam perhitungan, seperti harga bahan bakar, biaya operasional, dan umur proyek (Model et al. 2022). Oleh karena itu, interpretasi hasil IRR harus dilakukan secara hati-hati dengan mempertimbangkan kondisi riil di lapangan.

Rumus IRR

Nilai *Internal Rate of Return* (IRR) merupakan tingkat suku bunga yang menyebabkan nilai NPV sama dengan nol, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} - I_0$$

Dalam praktiknya, nilai IRR dapat diperoleh menggunakan metode interpolasi berikut.

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} (i_2 - i_1)$$

Suatu investasi dinilai layak apabila nilai IRR lebih besar daripada *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR).

3. Analisis Sensitivitas terhadap Variabel Ekonomi

Untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif, dilakukan analisis sensitivitas terhadap beberapa variabel kunci yang mempengaruhi kelayakan investasi, seperti harga bahan bakar, biaya produksi biodiesel, dan kapasitas produksi industri tahu. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana perubahan parameter tersebut dapat mempengaruhi nilai NPV dan IRR.

Hasil analisis menunjukkan bahwa variabel harga bahan bakar memiliki pengaruh paling signifikan terhadap kelayakan investasi. Ketika harga solar meningkat, maka penggunaan biodiesel berbasis limbah menjadi semakin kompetitif, sehingga nilai NPV meningkat dan IRR menjadi lebih tinggi (Kamil and Almarashda 2023). Sebaliknya, jika biaya pengolahan limbah minyak jelantah meningkat secara signifikan, maka keuntungan ekonomi yang diperoleh akan

menurun.

Selain itu, kapasitas produksi juga menjadi faktor penting, di mana semakin besar skala produksi, maka efisiensi ekonomi yang diperoleh akan semakin tinggi akibat adanya skala ekonomi (economies of scale). Hal ini menunjukkan bahwa penerapan teknologi ini akan lebih optimal jika diterapkan pada UMKM dengan tingkat produksi yang stabil dan berkelanjutan.

4. Implikasi Teknis dan Ekonomi pada UMKM

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konversi mesin diesel ke biodiesel B20 berbasis limbah minyak jelantah memiliki implikasi yang signifikan, baik dari sisi teknis maupun ekonomi (Xu et al. 2022). Dari sisi teknis, penggunaan biodiesel tidak memerlukan perubahan besar pada mesin, sehingga relatif mudah diimplementasikan oleh pelaku UMKM. Sementara

itu, dari sisi ekonomi, pengurangan biaya bahan bakar menjadi faktor utama yang mendorong peningkatan efisiensi usaha.

Lebih lanjut, pemanfaatan limbah minyak jelantah juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan, sehingga mendukung konsep produksi bersih (clean production) pada industri tahu. Dengan demikian, teknologi ini tidak hanya layak secara finansial, tetapi juga relevan dalam konteks pembangunan berkelanjutan.

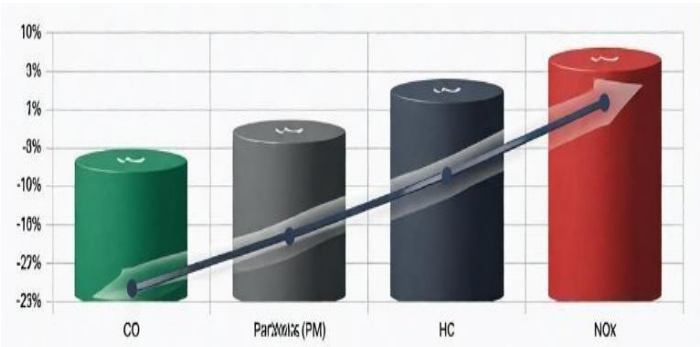
5. Sintesis Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan integratif antara analisis termodinamika dan tekno-ekonomi memberikan gambaran yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi kelayakan konversi mesin diesel(Magelli et al. 2021). Meskipun terdapat keterbatasan dari sisi nilai kalor bahan bakar, keunggulan ekonomi yang dihasilkan mampu menjadikan teknologi ini sebagai solusi yang aplikatif bagi industri tahu skala UMKM.

2. Emisi Gas Buang

Sebagian besar penelitian melaporkan:

- 1. penurunan CO 20–30%
- 2. penurunan partikulat (PM)
- 3. peningkatan NOx pada kondisi tertentu



Gambar 3. Grafik Perubahan Emisi B20 vs Solar (%) — Positif = Peningkatan

Tabel 1. Data Emisi Biodiesel

Parameter Emisi	Perubahan Emisi	Penjelasan
CO (Carbon Monoxide)	Menurun 20–30%	Kandungan oksigen dalam biodiesel meningkatkan proses oksidasi karbon sehingga pembakaran lebih sempurna.
Partikulat (PM)	Menurun 15–52%	Biodiesel menghasilkan pembakaran yang lebih bersih

HC (Hidrokarbon)	Menurun 10–19%	Kandungan oksigen pada biodiesel membantu mengurangi bahan bakar yang tidak terbakar sempurna.
Nox (Nitrogen Oxides)	Meningkat 5–12%	Temperatur pembakaran yang lebih tinggi meningkatkan laju pembentukan NOx melalui mekanisme thermal NOx.

Analisis reflektif:

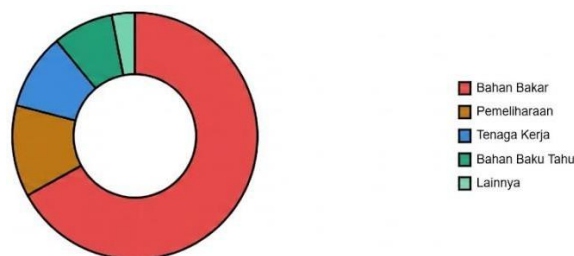
Hasil ini menunjukkan adanya trade-off antara efisiensi lingkungan dan emisi NOx. Secara teori combustion kinetics, peningkatan NOx disebabkan oleh temperatur pembakaran yang lebih tinggi akibat oksigen tambahan dalam biodiesel.

3. Hasil Kajian Ekonomi Teknik

1 Struktur Biaya

Literatur menunjukkan bahwa komponen biaya utama dalam konversi biodiesel meliputi:

1. biaya bahan bakar (dominan 60–75%)
2. biaya operasional dan pemeliharaan
3. investasi awal sistem konversi



Gambar 3. Grafik Struktur Biaya Operasional

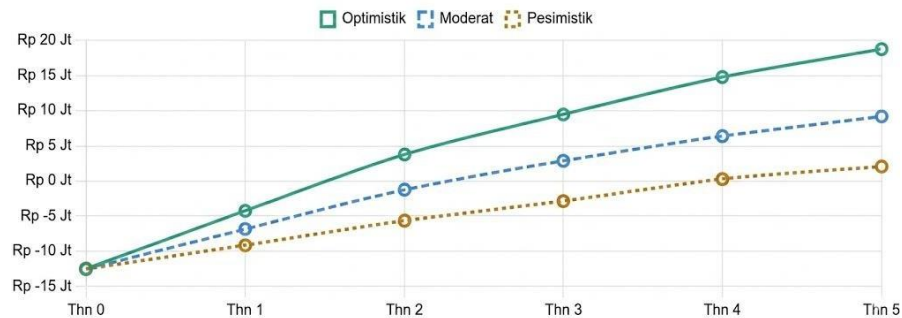
Pembahasan:

Studi menunjukkan bahwa penggunaan minyak jelantah dapat menurunkan biaya bahan bakar hingga 20–40%. Namun, sebagian penelitian tidak memasukkan biaya pengumpulan dan pengolahan limbah, yang secara ekonomi dapat menjadi faktor signifikan pada skala UMKM.

2. Analisis NPV

Hasil sintesis menunjukkan bahwa:

1. NPV sebagian besar studi bernilai positif
2. Nilai NPV meningkat pada skenario harga bahan baku rendah



Gambar 4. Proyeksi NPV Kumulatif per Skenario (Rp Juta, 5 Tahun)

Tabel 4. Data Analisis NPV — Skenario Komprehensif

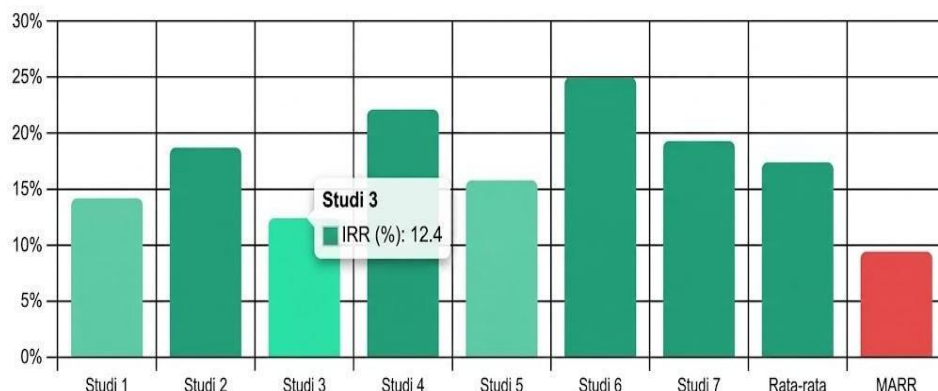
Skenario	Investasi Awal (Rp)	NPV 5 Th (Rp)	Payback Period	Kelayakan
Optimistik	12.500.000	+18.750.000	1.8 tahun	✓ Layak
Moderat	12.500.000	+9.200.000	2.9 tahun	✓ Layak

Interpretasi teoritis:

Menurut teori ekonomi teknik (Blank & Tarquin), NPV positif menunjukkan proyek layak secara finansial. Namun, validitas hasil sangat bergantung pada asumsi discount rate dan stabilitas harga energi.

3. Analisis IRR

Nilai IRR berada pada rentang 12–25%, lebih tinggi dari tingkat bunga acuan.



Gambar 4. Nilai IRR per Studi vs MARR Acuan (9.5%)

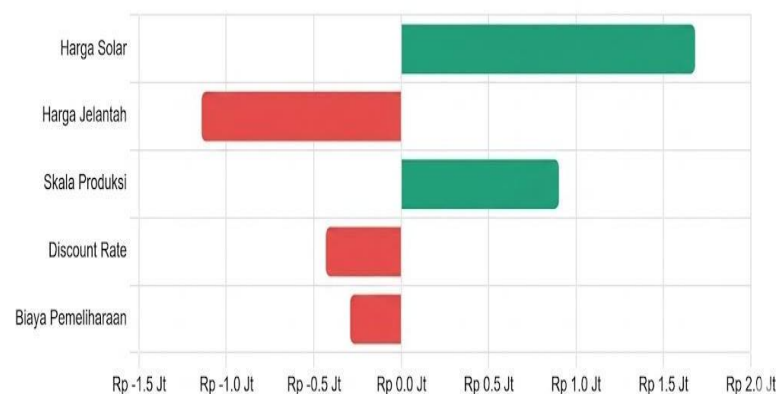
Pembahasan kritis:

Meskipun secara matematis proyek dinyatakan layak, banyak studi menggunakan asumsi deterministik tanpa mempertimbangkan risiko fluktuasi bahan baku, sehingga IRR cenderung bersifat optimistik.

4. Analisis Sensitivitas

Variabel paling berpengaruh:

1. harga minyak jelantah
2. harga solar
3. skala produksi UMKM



Gambar 5. Grafik Sensitivitas NPV terhadap Perubahan Variabel Kunci ($\pm 30\%$)

Tabel 5. Data Analisis Sensitivitas

Variabel	Pengaruh terhadap NPV	Tingkat sensitivitas
Harga Solar (naik 10%)	NPV naik +18.2%	● Sangat Tinggi
Harga Minyak Jelantah (naik 10%)	NPV turun -12.4%	□ Tinggi
Skala Produksi (naik 10%)	NPV naik +9.8%	□ Sedang
Biaya Pemeliharaan (naik 10%)	NPV turun -3.2%	□ Rendah
Discount Rate (naik 1%)	NPV turun -4.7%	□ Sedang

Analisis:

Sensitivitas tinggi menunjukkan bahwa sistem sangat bergantung pada kondisi pasar lokal. Ini memperkuat bahwa model ekonomi tidak bersifat robust tanpa dukungan kebijakan rantai pasok limbah.

4. Integrasi Temuan Teknis dan Ekonomi

Hasil sintesis menunjukkan bahwa terdapat hubungan langsung antara:

1. penurunan efisiensi teknis → peningkatan SFC → perubahan biaya operasional
2. kualitas bahan bakar → performa mesin → kelayakan ekonomi

Pembahasan integratif:

Secara sistemik, studi literatur menunjukkan bahwa evaluasi hanya pada aspek teknis atau ekonomi secara terpisah tidak cukup untuk menggambarkan kelayakan aktual. Integrasi keduanya diperlukan untuk memperoleh model keputusan yang realistis bagi UMKM.

5. Analisis Kesenjangan Penelitian (Research Gap)

Berdasarkan sintesis literatur, ditemukan beberapa gap utama:

1. Fragmentasi pendekatan penelitian
Sebagian besar studi hanya fokus pada aspek teknik atau ekonomi, bukan integrasi keduanya.
2. Kurangnya konteks UMKM nyata
Studi lebih banyak dilakukan pada skala laboratorium atau industri besar.
3. Tidak adanya model biaya komprehensif
Biaya pengumpulan dan pengolahan limbah sering diabaikan.
4. Minimnya studi berbasis SLR terintegrasi NPV–IRR–kinerja mesin
Belum ada model konseptual terpadu yang menghubungkan ketiga aspek tersebut secara sistematis.

D. PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur sistematis, konversi mesin diesel satu silinder ke biodiesel B20 berbasis limbah minyak jelantah pada industri tahu skala UMKM terbukti layak secara teknis maupun ekonomi. Dari sisi teknis, penggunaan biodiesel B20 hanya menyebabkan penurunan daya efektif sebesar 1–3% dan efisiensi termal 2–5% dengan peningkatan SFC sebesar 5–10%, namun masih dalam batas toleransi operasional dan tidak memerlukan modifikasi signifikan pada mesin. Dari sisi lingkungan, biodiesel B20

mampu menurunkan emisi CO, partikulat, dan hidrokarbon secara signifikan, meskipun terdapat peningkatan NOx sebagai konsekuensi suhu pembakaran yang lebih tinggi.

Dari sisi ekonomi, nilai NPV yang positif pada seluruh skenario dan nilai IRR sebesar 12–25% yang melampaui MARR acuan 9,5% mengindikasikan bahwa investasi ini menguntungkan dalam jangka menengah hingga panjang, terutama ketika bahan baku limbah minyak jelantah dapat diperoleh dengan biaya rendah. Analisis sensitivitas juga menegaskan bahwa harga solar dan ketersediaan minyak jelantah merupakan variabel paling kritis terhadap kelayakan investasi. Secara keseluruhan, pendekatan integratif antara analisis teknis dan ekonomi terbukti menghasilkan gambaran kelayakan yang lebih komprehensif dan realistis dibandingkan kajian yang dilakukan secara terpisah.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat dikemukakan adalah sebagai berikut:

1. Bagi Pelaku UMKM

Konversi mesin diesel ke biodiesel B20 berbasis minyak jelantah disarankan untuk segera dipertimbangkan, terutama bagi UMKM dengan skala produksi yang stabil, karena potensi penghematan biaya bahan bakar dapat mencapai 20–40% dibandingkan solar konvensional.

2. Bagi Peneliti Selanjutnya

Diperlukan penelitian berbasis data lapangan (*field study*) langsung pada industri tahu skala UMKM untuk memvalidasi parameter teknis dan ekonomi yang selama ini masih banyak diperoleh dari kondisi laboratorium. Selain itu, perlu dikembangkan model analisis yang memuat biaya pengumpulan dan pengolahan limbah minyak jelantah secara komprehensif agar hasil analisis lebih akurat.

3. Pengembangan Model Terpadu

Penelitian lanjutan disarankan untuk membangun model konseptual terpadu yang menghubungkan kinerja mesin (termodinamika), analisis emisi, dan kelayakan ekonomi (NPV–IRR) secara sistematis, guna mengisi kesenjangan penelitian (*research gap*) yang ditemukan dalam kajian ini.

4. Bagi Pemerintah dan Pemangku Kebijakan

Diperlukan dukungan kebijakan yang mendorong pengelolaan rantai pasok limbah minyak jelantah secara terstruktur agar ketersediaan bahan baku biodiesel lebih stabil dan biaya perolehannya dapat ditekan, sehingga kelayakan ekonomi konversi mesin tidak terlalu rentan terhadap fluktuasi pasar.

5. Pengendalian NOx

Mengingat adanya peningkatan emisi NOx pada penggunaan B20, penelitian lanjutan perlu mengkaji teknologi atau aditif yang dapat menekan emisi NOx tanpa mengorbankan keunggulan emisi lainnya.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil penelitian. Pertama, seluruh analisis disusun berdasarkan hasil sintesis literatur sehingga belum melibatkan pengujian langsung pada industri tahu skala UMKM. Kedua, data ekonomi yang digunakan berasal dari berbagai penelitian dengan asumsi biaya, harga bahan bakar, dan tingkat suku bunga yang berbeda sehingga hasil analisis dapat bervariasi sesuai kondisi di lapangan. Ketiga, sebagian besar penelitian yang dianalisis masih dilakukan pada skala laboratorium, sehingga diperlukan penelitian lanjutan berbasis data lapangan untuk memvalidasi hasil kajian ini pada kondisi operasional yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aklouche, Fatma Zohra, Loubna Hadhoum, and Khaled Loubar. 2023. "A Comprehensive Study on Effect of Biofuel Blending Obtained from Hydrothermal Liquefaction of Olive Mill Waste." 16(6):1–16.
- Analysis, Gap. 2022. "Construction 4.0 Technologies and Decision-Making: A Systematic Review and Gap Analysis." 12(12):1–19.
- Athanasiou, Costas, Christos Drosakis, Gaylord Kabongo Booto, and Costas Elmasides. 2023. "Economic Feasibility of Power / Heat Cogeneration by Biogas – Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Integrated Systems." 16(1):1–30.
- Cardoso, Geraldo, De Oliveira Neto, and Francesco Facchini. 2022. "Circular Economy Approach on Energy Cogeneration in Petroleum Refining." 15(5):1–15.
- Decarpigny, C., Abdulhadi Aljawish, C. His, Bertrand Fertin, Muriel Bigan, Pascal Dhulster, Michel Millares, and R. Froidevaux. 2022. "Bioprocesses for the Biodiesel Production from Waste Oils and Valorization of Glycerol." 15(9):1–30.
- Impacts, Environmental. 2022. "Biodiesel Emissions: A State-of-the-Art Review on Health and Environmental Impacts." 15(18):1–24.
- Kamil, Mohammed, and Fatima M. Almarashda. 2023. "Economic Viability and Engine Performance Evaluation of Biodiesel Derived from Desert Palm Date Seeds." 16(3):1–22.
- Karczewski, Mirosław, and Grzegorz Szamrej. 2022. "Experimental Assessment of the Impact of Replacing Diesel Fuel with CNG on the Concentration of Harmful Substances In." 15(13):1–26.
- Magelli, Matteo, Giuseppe Boccardo, Nicola Bosso, Pierangelo Farina, Andrea Tosetto, Francesco Mocera, and Aurelio Soma. 2021. "Feasibility Study of a Diesel-Powered Hybrid DMU." 29:1–14.
- Manikandan, Gurunathan, P. Rajesh Kanna, Dawid Taler, and Tomasz Sobota. 2023. "Review of Waste Cooking Oil (WCO) as a Feedstock for Biofuel — Indian Perspective." 16(4):1–17.
- Model, Projects A. Multi-objective Optimization, Lei Gao, Zhen-yu Zhao, and Cui Li. 2022. "An Investment Decision-Making Approach for Power Grid." 15(3):1–20.
- Reksowardojo, Iman K., Hari Setiaprada, Siti Yubaidah, Dieni Mansur, and Agnes K. Putri. 2023. "A Study on Utilization of High-Ratio Biodiesel and Pure Biodiesel in NOZEL, Volume 09 Nomor 02, Mei 2027, 145 – 161
<https://doi.org/10.20961/nozel.v9i2.123384>

- Advanced Vehicle Technologies.” 16(2):1–14.
- Sawdust, Wood. 2023. “Technoeconomic Feasibility of Bioenergy Production from Wood Sawdust.” 16(4):1–18.
- Xu, Hui, Longwen Ou, Yuan Li, Troy R. Hawkins, and Michael Wang. 2022. “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Biodiesel and Renewable Diesel Production in the United States.” 56(12):1–10. doi: 10.1021/acs.est.2c00289.
- Zarrinkolah, Mohammad Taghi, and Vahid Hosseini. 2022. “Detailed Analysis of the Effects of Biodiesel Fraction Increase Reactivity-Controlled Compression Ignition.” 15(3):1–17.