

BAB 2

Tinjauan Pustaka

Perubahan iklim merupakan faktor-faktor yang menghambat proses pembangunan berkelanjutan, sehingga energi terbarukan menjadi prioritas global untuk menghadapi dampak perubahan tersebut [1], selain itu kebijakan energi terbarukan solusi dalam memenuhi kebutuhan energi berkelanjutan, dan mengurangi emisi gas rumah kaca [2]. Dalam konteks ini, teknologi penggunaan energi terbarukan merupakan langkah strategis, untuk memastikan keberlanjutan energi dan pengurangan emisi karbon. Berbagai sumber energi terbarukan telah dikembangkan secara global, antara lain tenaga surya dengan teknologi *photovoltaic* (PV), tenaga angin dengan turbin angin modern, tenaga air melalui pembangkit listrik tenaga air (PLTA), biomassa, serta panas bumi (*geothermal*). Masing-masing sumber tersebut memiliki karakteristik dan potensi pemanfaatan yang berbeda-beda sesuai dengan kondisi geografis, industri, dan kebutuhan energi suatu wilayah.

Ditinjau dari kondisi karakteristik industri, diantara berbagai alternatif energi terbarukan tersebut, biodiesel menempati posisi strategis terutama untuk sektor transportasi dan industri berat, karena kompatibilitasnya dengan mesin diesel yang sudah ada. Salah satu sektor yang sangat potensial dalam pemanfaatan biodiesel adalah industri pertambangan. Operasional alat berat yang bergantung pada mesin diesel menjadikan sektor ini sebagai target utama dalam strategi transisi energi berbasis biodiesel. Dengan tingkat konsumsi bahan bakar yang tinggi dan kebutuhan operasi 24 jam, industri pertambangan di Indonesia, khususnya pertambangan batu bara, menghadirkan peluang besar dalam pengembangan dan optimalisasi teknologi biodiesel. Implementasi biodiesel di sektor ini tidak hanya

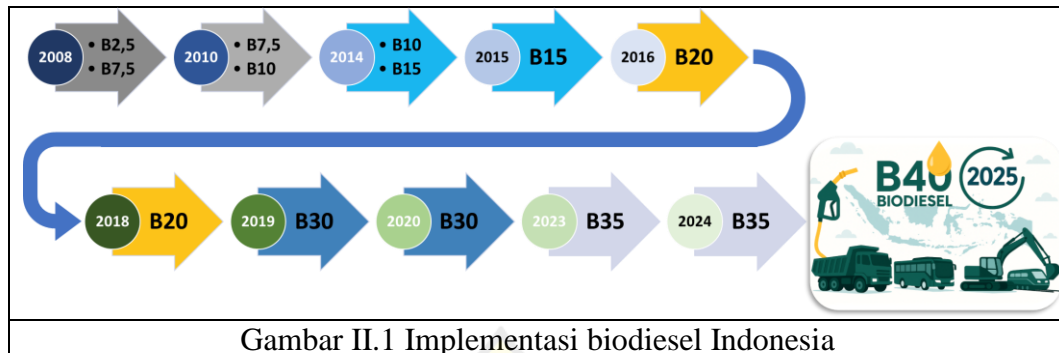
mendukung pengurangan emisi karbon, tetapi juga mendorong kemandirian energi nasional melalui pemanfaatan sumber daya lokal yang terbarukan.

Dalam beberapa tahun terakhir, tren global menunjukkan peningkatan penggunaan biodiesel sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil [3][4], terutama dalam sektor alat berat yang beroperasi di industri pertambangan dan konstruksi [5], serta transportasi [6]. Transisi menuju bahan bakar berkelanjutan, khususnya biodiesel, menjadi semakin penting untuk mengurangi emisi karbon dan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan bahan bakar konvensional atau *fossil fuel* [7]. Dengan meningkatnya kebutuhan akan solusi energi yang ramah lingkungan, biodiesel dinilai sebagai pilihan yang menjanjikan, berpotensi menggantikan bahan bakar fosil, dimana karakteristik fisik dan kimia biodiesel seperti densitas energi, viskositas, kalori, *flash point*, dan angka setana, serta dapat mempertahankan kinerja *engine* yang sebanding dengan bahan bakar fosil [8][9][10].

Namun, meskipun biodiesel memiliki keuntungan dalam hal pengurangan emisi, tantangan utama tetap ada, yaitu dampaknya terhadap keandalan *engine*. Alat berat yang beroperasi dalam kondisi ekstrim dan dalam durasi operasi yang panjang, seringkali mengalami masalah *performance* dan keausan komponen, yang dapat berakibat pada peningkatan frekuensi pemeliharaan dan biaya operasional. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana penggunaan biodiesel mempengaruhi *performance* dan durabilitas *engine* alat berat dalam konteks operasional yang berat, agar dapat diimplementasikan secara efektif di industri tanpa mengurangi *performance* dan keandalan alat berat tersebut.

Dominasi biodiesel dalam bauran energi terbarukan semakin penting, terutama di negara-negara dengan potensi besar bahan baku nabati, seperti Indonesia, yang terus mengembangkan kebijakan dan teknologi untuk mendorong produksi serta konsumsi biodiesel secara berkelanjutan. Di Indonesia, aplikasi penggunaan biodiesel dilakukan bertahap, hal ini dilakukan sesuai dengan edaran pemerintah Indonesia berdasarkan perkembangan teknis dan sumber daya bahan bakar [11][12][13][14], sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II.1. Peningkatan kadar biodiesel diperkuat oleh pemerintah, seperti siaran pers Kementerian ESDM Nomor: 033.Pers/04/SJI/2023 tentang "Program B35 Segera Diluncurkan Februari 2023"

[15] dan ditahun yang sama pemerintah menyiapkan mandatori rencana aplikasi B40 [16].



Gambar II.1 Implementasi biodiesel Indonesia

Pemerintah Indonesia telah menginisiasi berbagai kebijakan strategis dalam mendorong pemanfaatan energi terbarukan, khususnya biodiesel. Sejak tahun 2008, kebijakan mengenai bahan bakar nabati (BBN) telah diatur dan terus dikembangkan melalui tahapan mandatori yang berkesinambungan. Tabel berikut merangkum program dan kebijakan biodiesel dari tahun 2008 hingga 2024, termasuk implementasi B2.5 hingga rencana pelaksanaan B40, yang menunjukkan konsistensi dan progresivitas Indonesia dalam transisi energi berbasis biodiesel, secara rinci kebijakan yang dikeluarkan pemerintah Indonesia dapat dilihat pada Tabel II.1.

Tahun	Program dan Kebijakan	Keterangan
2008	Permen ESDM No. 32/2008	Pengaturan penyediaan, pemanfaatan, dan tata niaga biofuel sebagai bahan bakar lain.
2008–2010	B2,5 – B7,5	Implementasi awal campuran biodiesel.
2014	Roadtest B20	Uji ketahanan kendaraan bermotor diesel dengan B20 hingga 40.000 km.
2015	Permen ESDM No. 12/2015	Perubahan atas Permen No. 32/2008. Mengatur pentahapan mandatori BBN. Sosialisasi & roadshow B20 di Sumatera–Jawa–Bali.
2015	B10 – B15	Tahap lanjutan pencampuran biodiesel.
2016	Implementasi B20	Mandatori sektor PSO melalui insentif BPDPKS. Non-PSO: mandatori tanpa insentif.

2018	Perluasan & Spek B30	Perluasan insentif ke Non-PSO per 1 Sep 2018. Pelaksanaan railtest KAI. Penyusunan spek B100 untuk uji B30.
2019	Uji Jalan B30	Pengujian kereta api, alat berat, alutsista, dll. Penerbitan SNI Biodiesel revisi SNI tahun 2015.
2020	Target Implementasi B30	Target nasional penggunaan campuran biodiesel B30 secara luas.
2023-2024	Implementasi B35	Siaran pers Kementerian ESDM Nomor: 033.Pers/04/SJI/2023 tentang "Program B35 Segera Diluncurkan Februari 2023"
2024	Target Implementasi B40	Siaran pers Kementerian ESDM Nomor: 417.Pers/04/SJI/2024 tentang "Menteri ESDM: B40 Bisa Jalan Tahun Depan"

Aplikasi energi terbarukan akan berjalan optimal dengan evaluasi dan pengembangan sistem energi terbarukan meliputi: Ketersediaan, Efisiensi, Keterjangkauan, Keberlanjutan, dan Tata Kelola [17]. Ketersediaan memastikan bahwa sumber daya energi dapat diakses secara konsisten untuk memenuhi kebutuhan. Efisiensi berfokus pada pemanfaatan energi yang optimal dengan meminimalkan pemborosan dan meningkatkan output. Keterjangkauan menekankan pentingnya biaya yang terjangkau bagi konsumen serta efisiensi dalam investasi infrastruktur.

Keberlanjutan mengedepankan dampak lingkungan dan sosial dari penggunaan energi, mendukung solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam jangka panjang. Terakhir, Tata Kelola mengacu pada pengelolaan dan regulasi yang baik, memastikan bahwa sistem energi dikelola secara transparan, adil, dan sesuai dengan standar yang berlaku. Strategi utama mencapai hal tersebut adalah melalui regulasi pemerintah dan perawatan perangkat aplikasi biodiesel dengan *Predictive maintenance*, bertujuan memprediksi potensi kegagalan dan menjadwalkan pemeliharaan. Sehingga, kegagalan atau kerusakan dapat diprediksi dan menekan *breakdown uschedule*.

2.1 Adopsi Biodiesel di Pertambangan

Penggunaan diesel berbasis fosil di tambang batu bara terbuka menimbulkan risiko lingkungan, meningkatkan emisi gas rumah kaca, serta meningkatkan konsumsi energi dan biaya operasional, terutama untuk kebutuhan bahan bakar alat berat. Penggunaan biodiesel dapat mengurangi emisi berbahaya, dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Studi membandingkan dampak lingkungan antara diesel fosil dan *biodiesel-blend* di industri pertambangan di empat wilayah tambang (Kanada, Polandia, Zambia, dan Australia) dilakukan melalui *life cycle assessment* (LCA). Penggunaan biodiesel menyebabkan perubahan dalam pengurangan potensi pemanasan global -22.5%, eutrofikasi -6.1%, asidifikasi -18.9%, dan toksisitas manusia -21.0% [18].

Industri pertambangan saat ini mengadopsi penggunaan biodiesel sebagai alternatif energi, khususnya untuk kendaraan angkut seperti truk dan alat muat. Penggunaan biodiesel menjadi salah satu solusi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan target penurunan emisi karbon, terutama dalam aktivitas penanganan material dan transportasi di tambang [19]. Penggunaan bahan bakar alternatif seperti biodiesel pada industri pertambangan berkontribusi dalam peningkatan efisiensi energi dan penerapan sistem manajemen energi, sehingga dapat menekan konsumsi bahan bakar dan menekan emisi [20]. Pemerintah Indonesia menetapkan kebijakan mandatori biodiesel sawit sejak 2006 untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil. Campuran biodiesel meningkat dari B2,5 menjadi B30 dalam 10 tahun. Kebijakan ini mendorong pertumbuhan konsumsi domestik dan industri biodiesel. Meski sempat terkendala, komitmen pemerintah terus menguat. Program ini terbukti menjadi instrumen kunci dalam keberhasilan pengembangan biodiesel nasional [21].

2.1.1 Biodegradasi dan Ramah Lingkungan

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif berbasis biomassa yang tergolong dalam kategori energi terbarukan yang bersifat *biodegradable* dan ramah lingkungan, menjadikannya pilihan yang lebih aman bagi ekosistem dibandingkan bahan bakar fosil [22]. Dibuat dari sumber terbarukan seperti minyak nabati, lemak hewani, minyak jelantah, serta mikroorganisme penghasil minyak, dan sumber

penghasil minyak nabati dan hewani lainnya, biodiesel dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme dalam lingkungan. Hal ini mengurangi risiko pencemaran tanah dan air saat terjadi tumpahan bahan bakar. Selain itu, biodiesel memiliki kandungan sulfur yang sangat rendah dan menghasilkan emisi gas rumah kaca lebih rendah, sehingga turut berkontribusi dalam pengendalian perubahan iklim.

Biodiesel semakin dikenal sebagai bahan bakar ramah lingkungan karena sifatnya yang dapat terurai secara hayati (*biodegradable*) dan berasal dari sumber terbarukan. Beberapa studi terkait dampak lingkungan biodiesel banyak dilakukan, salah satunya penelitian dampak biodiesel dari minyak jelantah (WCO) melalui proses transesterifikasi dengan katalis natrium hidroksida. Hasil biodiesel diuji sifat fisikokimianya dan menunjukkan yield mencapai 83,3% seiring peningkatan dosis katalis. Selain biodiesel, gliserol hasil samping berhasil dimurnikan secara sederhana dan digunakan untuk pembuatan bioplastik yang terbukti dapat terurai di tanah dalam 180 hari dan melalui fotodegradasi dalam 60 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan WCO untuk biodiesel dan bioplastik merupakan solusi ramah lingkungan [23].

Dalam perspektif kebijakan energi terbarukan dan ramah lingkungan, integrasi biodiesel sebagai bagian dari bauran energi nasional sejalan dengan target dekarbonisasi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar impor. Biodiesel tidak hanya menjadi solusi jangka pendek terhadap krisis energi, tetapi juga investasi strategis dalam sistem energi rendah karbon jangka panjang. Dengan kata lain, biodiesel menawarkan kombinasi antara *technical feasibility*, *environmental compatibility*, dan *renewable potential*, menjadikannya komponen penting dalam agenda transisi energi berkelanjutan.

2.1.2 Implementasi Biodiesel dalam Transisi Energi Terbarukan

Biodiesel berperan penting dalam transisi energi terbarukan sebagai bahan bakar rendah karbon, terutama untuk sektor yang sulit dialiri listrik seperti transportasi berat dan industri yang menggunakan engine disel. Di sektor industri transportasi dan pertambangan, yang mengandalkan alat berat dengan konsumsi energi tinggi, biodiesel menjadi solusi strategis untuk mengurangi emisi karbon tanpa perlu perubahan besar pada infrastruktur mesin. Implementasi biodiesel di sektor ini tidak

hanya mendukung target dekarbonisasi nasional, tetapi juga menawarkan manfaat teknis dan ekonomi dalam jangka panjang.

Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel pada mesin diesel dapat menurunkan emisi partikulat, hydro carbon (HC), dan carbon monoxide (CO), meskipun disertai sedikit penurunan daya dan peningkatan konsumsi bahan bakar serta emisi NO_x [24]. Tantangan utama implementasi biodiesel secara luas meliputi keterbatasan ketersediaan bahan baku, fluktuasi harga minyak bumi, dan minimnya dukungan kebijakan pemerintah. Tinjauan ini menyoroiti perkembangan biodiesel secara global, khususnya dari sudut pandang keberlanjutan. Adopsi biodiesel yang lebih luas dapat dicapai melalui penguatan pasokan bahan baku, stabilisasi harga, serta dukungan regulasi yang lebih memadai untuk mendukung transisi energi bersih.

Di Indonesia, permintaan energi terbarukan meningkat seiring dengan konsumsi energi yang terus tumbuh. Sektor transportasi menjadi penyumbang terbesar konsumsi energi, diikuti oleh sektor industri dan rumah tangga. Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang besar, mencapai 419 GW, termasuk 75 GW energi hidro, 23,7 GW energi geotermal, 32,6 GW bioenergi, 207,8 GW energi surya, 60,6 GW energi angin, dan 19,3 GW mikro hidro [25]. Pada awal 2020, Indonesia meluncurkan kelanjutan tahapan program biodiesel ke B30 dan peningkatan B35, dan seterusnya, sebagai upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan melindungi pasar kelapa sawit Indonesia. Namun, kelapa sawit mendapat kritik internasional karena dampak lingkungan yang ditimbulkan. Penelitian ini menganalisis apakah investasi dalam biofuel berbasis kelapa sawit *Palm oil based biofuel* (POBB) dapat membantu Indonesia mencapai tujuan lingkungan dan finansialnya [26].

Indonesia berkomitmen menghentikan dini PLTU batu bara demi mengurangi degradasi lingkungan dan emisi CO₂, hal ini juga seiring dengan aplikasi biodiesel untuk transportasi dan industri dengan mesin diesel. Indonesia memiliki potensi besar dalam produksi bioenergi berkat luasnya lahan pertanian dan ketersediaan biomassa, dengan limbah biomassa mencapai sekitar 146,7 juta ton pada 2023. Wilayah potensial utama mencakup Kalimantan, Sumatera, dan Sulawesi.

Komoditas utama adalah kelapa sawit, namun juga terdapat inisiatif produksi biodiesel dari jagung dan mikroorganisme. Pada 2022, produksi biodiesel Indonesia mencapai 9,68 juta kL, dengan target alokasi 11,02 juta kL, dan ekspor meningkat dari 28.000 kL (2020) menjadi 250.000 kL (2022). Pemerintah, melalui Kementerian ESDM, mendorong pengembangan bioenergi dengan kapasitas terpasang sekitar 1,8 GW dan investasi besar, seperti pabrik katalis "Merah Putih" senilai Rp. 286 miliar yang mulai beroperasi sejak 2023 [27].

Pemerintah sering kali mengeluarkan regulasi dan insentif untuk mendorong penggunaan energi terbarukan, termasuk biodiesel, sebagai bagian dari strategi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Kebijakan penggunaan biodiesel Indonesia dilakukan bertahap dari B10 di 2011 hingga kedepan ke B40-B100 [13]. Kebijakan seperti subsidi untuk produksi biodiesel, pengurangan pajak, dan mandat pencampuran biodiesel dengan bahan bakar fosil dapat meningkatkan daya tarik ekonomi bagi produsen dan konsumen [28][29]. Selain itu, program dukungan untuk penelitian dan pengembangan teknologi biodiesel yang lebih efisien juga dapat berkontribusi pada inovasi dalam industri ini. Namun, perubahan kebijakan atau ketidakpastian dalam regulasi dapat menimbulkan risiko bagi investasi dan pertumbuhan industri biodiesel.

2.1.3 Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca

Masalah polusi dan pemanasan global yang disebabkan oleh limbah industri dan emisi gas rumah kaca mendorong upaya pengurangan emisi tersebut. Biodiesel yang mudah terurai berpotensi mengurangi polusi dan memberikan solusi energi berkelanjutan [30]. Pengurangan emisi GRK menjadi salah satu fokus utama dalam pengembangan energi terbarukan, termasuk melalui pemanfaatan biodiesel. Bahan bakar biodiesel terbukti mampu menurunkan emisi GRK secara signifikan dibandingkan dengan diesel fosil. Biodiesel yang dihasilkan dari minyak nabati mampu mengurangi emisi hingga 40–69%, sementara bahan baku dari limbah seperti minyak goreng bekas, minyak jagung sulingan, dan lemak hewan bahkan dapat menurunkan emisi hingga 79–86%. Secara umum, proses produksi biodiesel cenderung menghasilkan emisi yang lebih rendah dibanding fosil [31].

Studi analisis proses produksi biodiesel dari sisi emisi GRK menunjukkan bahwa total emisi GRK dapat diturunkan hingga 35% dibandingkan bahan bakar fosil. Emisi biodiesel dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis teknologi produksi dan bahan baku yang digunakan. Penggunaan biodiesel dapat menurunkan emisi CO₂ hingga 78%, CO 43%, SO₂ 100%, PM₁₀ 32%, dan hidro karbon volatil 63%, meskipun emisi NO_x meningkat 13%. Selain itu, biodiesel terbukti lima kali lebih cepat terurai secara alami dibandingkan solar, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan dan berkontribusi pada transisi energi berkelanjutan menuju ekonomi hijau dan netral karbon [32].

Penggunaan biodiesel efektif mengurangi emisi CO₂, dan partikel berbahaya lainnya. Perhitungan emisi karbon dilakukan berdasarkan konsumsi bahan bakar, karena emisi CO₂ meningkat seiring dengan jumlah bahan bakar yang digunakan. Berdasarkan metode yang dikembangkan oleh Tarulescu et al. [33][34], perhitungan emisi CO₂ melibatkan faktor emisi standar untuk beberapa jenis bahan bakar, yaitu 0.249 ton CO₂/MWh untuk mesin dengan pengapian busi (*spark ignition*), 0.267 ton CO₂/MWh untuk mesin dengan pengapian kompresi (*compression ignition*), dan 0.000 ton CO₂/MWh untuk bahan bakar nabati (*biofuel*). Persamaan yang digunakan adalah Rumus 1.

$X_{Used\ Fuel} = D \times C_{average} \times Y$	(1)
--------------------------------------------------	-----

Dimana, D merupakan durasi unit operasi (dalam *hour meter*), C_{average} adalah konsumsi bahan bakar rata-rata (*litre per hour*), Y merupakan faktor konversi energi untuk jenis bahan bakar (dalam kWh/liter). Yakni, Y = 9.2 untuk bensin dan Y=10 untuk diesel. Dari formulasi 1 dapat dihitung besaran emisi CO₂ dengan perhitungan Rumus 2.

$Emissions\ CO_2 = X_{Used\ Fuel} \times Emissions_{Factor}$	(2)
--------------------------------------------------------------	-----

2.1.4 Kemandirian dan Keamanan Energi

Kekhawatiran besar terkait keamanan energi dan pengurangan dampak lingkungan mendorong semua pihak untuk mengembangkan sumber energi alternatif yang tepat [35]. Sumber energi fosil di bumi terbatas, sehingga kebutuhan akan sumber daya terbarukan seperti biodiesel semakin meningkat [36]. Biodiesel sebagai sumber energi terbarukan memiliki peran penting dalam menciptakan kemandirian dan

keamanan energi suatu negara. Mengingat ketergantungan yang tinggi terhadap impor bahan bakar fosil, pengembangan biodiesel dapat mengurangi ketergantungan tersebut dengan memanfaatkan sumber daya lokal, seperti minyak kelapa sawit, minyak jarak, atau limbah minyak nabati, dan sumber lain sebagainya. Selain itu, produksi biodiesel dapat meningkatkan ketahanan energi nasional karena bahan baku yang digunakan lebih mudah diakses dan diproduksi secara domestik.

Penggunaan biodiesel membawa berbagai manfaat bagi Indonesia, baik dari aspek ekonomi, sosial, maupun lingkungan. Pemerintah Indonesia telah mengeluarkan Keputusan Presiden No. 5/2006 tentang Kebijakan Energi Nasional dan Keputusan Presiden No. 1/2006 tentang Bahan Bakar Nabati (BBN) [37]. Hal ini menjadi landasan kebijakan dalam peningkatan produksi biodiesel, Indonesia dapat menciptakan pasokan energi yang lebih stabil dan terjangkau, serta mengurangi volatilitas harga energi global. Keberadaan biodiesel juga mendukung diversifikasi sumber energi yang lebih ramah lingkungan, sehingga berkontribusi pada keberlanjutan sektor energi di masa depan. Hal ini didukung dengan potensi peningkatan produksi minyak sawit Indonesia [24], sebagaimana ditunjukkan pada Tabel II.2 berikut.

Negara	Produksi (1000 MT)
Indonesia	47.000
Malaysia	19.000
Thailand	3.280
Colombia	1.900
Nigeria	1.500
Guatemala	920
Papua New Guinea	820
Cote d'Ivoire	600
Honduras	595
Brazil	585

2.1.5 Peluang Pengembangan Ekonomi

Dengan meningkatnya populasi dunia, permintaan global akan mineral juga meningkat, hal ini berdampak pada peningkatan konsumsi energi. Kondisi lokasi tambang yang umumnya jauh dari wilayah perkotaan dan sektor industri tambang umumnya ditopang oleh peralatan dengan penggerak bermesin diesel, praktis operasional tambang sangat bergantung pada bahan bakar fosil. Sehingga, potensi

aplikasi energi terbarukan di sektor tambang sangat tinggi, khususnya penggunaan biodiesel pada operasionalnya. Penggunaan energi terbarukan dapat menciptakan lapangan kerja baru, mengurangi pencemaran lingkungan, dan mendorong ekonomi sirkular [38]. Semua faktor ini memberikan dampak positif terhadap indikator pembangunan berkelanjutan.

Indonesia memiliki keunggulan komparatif dalam pengembangan biodiesel, karena didukung oleh ketersediaan bahan baku kelapa sawit dan dukungan kebijakan nasional seperti mandatori biodiesel yang terus ditingkatkan. Sektor pertambangan, khususnya tambang batu bara, merupakan konsumen bahan bakar diesel dalam jumlah besar, menjadikannya sektor yang sangat potensial dalam implementasi biodiesel skala besar. Namun, untuk saat ini total biaya produksi biodiesel sebagian besar berasal dari bahan baku, yang menyebabkan biaya produksi biodiesel hampir lebih besar dibandingkan dengan biaya diesel komersial (solar) [39]. Ketersediaan *feedstock* di pasar juga berperan penting dalam menentukan harganya, dimana bahan baku yang melimpah dan mudah diakses cenderung lebih murah. Selain itu, faktor musiman dan fluktuasi harga komoditas global juga memengaruhi harga *feedstock*. Penggunaan *feedstock* non pangan yang lebih murah dan berkelanjutan kini menjadi fokus industri untuk menekan biaya produksi biodiesel serta mengurangi dampak pada industri pangan.

Penggunaan biodiesel di Indonesia menjadi fokus pemerintah saat ini dengan ditunjang bahan baku yang memadai. Dari banyaknya pilihan bahan baku, minyak sawit memiliki keunggulan dibandingkan minyak nabati lainnya, dan dapat diproduksi secara berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan implementasi kebijakan mandatori peningkatan kadar biodiesel dimasa yang akan datang oleh pemerintah sebagai bagian dari substitusi campuran bahan bakar fosil [40]. Selama beberapa tahun terakhir, industri biodiesel menunjukkan peningkatan dari segi kapasitas dan volume produksi. Penggunaan biodiesel memberikan dampak positif seperti penurunan impor solar, pengurangan emisi CO₂, serta peningkatan nilai tambah dari *crude palm oil* (CPO) dan tenaga kerja [13].

2.2 Analisis Biodiesel dan Aplikasi

2.2.1 Karakteristik Biodiesel

Karakteristik dari proses transesterifikasi biodiesel akan menghasilkan *properties* biodiesel seperti densitas energi, viskositas, kalori, *flash point*, *lubricity high frequency reciprocating rig* (HFRR), angka setana, dan sifat pembakaran biodiesel hampir setara dengan diesel fosil [8][9][10][41][42][43]. Secara spesifik karakteristik biodiesel dapat ditunjukkan pada Tabel II.3 berikut.

Tabel II.3 Perbandingan biodiesel dan diesel fosil

Bahan Bakar	Ref.	Properti					
		Density at 15 °C (kg/m ³)	Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)	Calorific value (MJ/kg)	Flash point (°C)	Cetane index	Lubricity HFRR (microns)
Diesel Fosil	[9]	835.07	2.51	42.57	58	45.73	370.2
Biodiesel 0-	[43]	830	3.20 ± 0.01	42.8	66	50	-
Diesel 100	[41]	838	3.22	43	67	49	-
Biodiesel	[9]	863.71	5.82	41.27	165	46.93	175
Biodiesel	[43]	920-	4.25 ± 0.03	36.9	128.2	37-40	-
100-Diesel 0	[41]	962	4.4	37.58	142	56	-
B10	[9]	832.4	2.54	42.41	59.5	47.95	363.4
Biodiesel 10-	[42]	843.9	3.7	42	73	-	-
Diesel 90	[41]	840	3.31	42.26	71	50	-
B20	[9]	829.68	2.59	42.29	60.2	49.93	349.6
Biodiesel 20-	[43]	920-	3.21 ± 0.01	41.6	78.4	37-40	-
Diesel 80	[41]	962	3.47	41.84	75	51	-
B30	[9]	829.1	2.62	42.08	61.1	51	324.1
Biodiesel 30-	[41]	848	3.56	41	80	52	-
Diesel 70	[8]	855.1	3.789	41.636	80	54.2	242.5
B40	[9]	828.5	2.66	41.92	62.3	51.2	303.6
Biodiesel 40-	[41]	852	3.67	41.03	84	53	-
Diesel 60	[8]	864	3.821	43.935	81	53.7	235
B50	[9]	827.19	2.69	41.86	62.8	53.9	280.8
Biodiesel 50-	[41]	857	3.76	41.29	89	54	-
Diesel 50	[10]	859.5	4.933	N/A	120	-	-

Sebagaimana data tabel diatas, biodiesel memiliki karakteristik perbedaan dari diesel fosil, seperti densitas dan viskositas lebih tinggi yang memengaruhi aliran dan injeksi bahan bakar, serta beberapa parameter lainnya. Detail perbedaan ditunjukkan pada Tabel II.4 dibawah ini.

Tabel II.4 Karakteristik biodiesel terhadap diesel fosil

Properti	Karakteristik Biodiesel
----------	-------------------------

<i>Density at 15 °C (kg/m³)</i>	Biodiesel sedikit lebih padat, yang bisa memengaruhi aliran bahan bakar dan efisiensi pembakaran
<i>Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)</i>	Viskositas biodiesel lebih tinggi, berpotensi menyebabkan masalah injeksi jika tidak dioptimalkan
<i>Calorific value (MJ/kg)</i>	Energi yang dihasilkan biodiesel lebih rendah, berpotensi menurunkan performa mesin dibanding diesel fosil
<i>Flash point (°C)</i>	Titik nyala biodiesel lebih tinggi, meningkatkan keamanan penanganan dan penyimpanan
<i>Cetane index</i>	Biodiesel memiliki indeks setana lebih tinggi, memberikan pembakaran yang lebih cepat dan halus
<i>Lubricity, (microns)</i>	HFRR Biodiesel meningkatkan pelumasan, mengurangi keausan komponen injeksi dan mesin

Penggunaan biodiesel sebagai bahan bakar alternatif dalam berbagai sektor, termasuk industri dan transportasi, memberikan banyak manfaat dari sisi keberlanjutan dan pengurangan emisi. Namun, salah satu tantangan utama dalam implementasinya adalah aspek kebersihan bahan bakar. Kebersihan biodiesel (*Cleanliness*) sangat menentukan kinerja dan keandalan mesin, terutama pada sistem injeksi modern yang sangat sensitif terhadap kontaminan. Beberapa isu kebersihan yang umum ditemukan pada biodiesel meliputi kontaminasi partikel, pembentukan endapan, kandungan air yang tinggi, dan pelarutan sedimen dalam tangki bahan bakar.

Biodiesel sering kali mengandung partikel padat mikro maupun makro, seperti sisa-sisa dari proses produksi, kontaminasi selama distribusi, atau degradasi bahan bakar saat penyimpanan. Partikel-partikel ini dapat menyumbat filter bahan bakar, saluran injeksi, dan menyebabkan penurunan efisiensi pembakaran. Untuk memantau tingkat kebersihan bahan bakar, dilakukan pengujian menggunakan standar internasional seperti ISO 4406 (Tabel II.5), yang memberikan klasifikasi tingkat kebersihan berdasarkan jumlah partikel per mililiter pada berbagai ukuran (misalnya $\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$, dan $\geq 14 \mu\text{m}$) [44]. Pemantauan dan filtrasi berlapis menjadi langkah mitigasi utama untuk menjamin kualitas bahan bakar sebelum masuk ke sistem pembakaran. Parameter yang berlakunya untuk kualitas biodiesel layak untuk digunakan harus memenuhi batas kebersihan maksimum untuk bahan

bakar diesel yang ditetapkan oleh *Worldwide Fuels Charter* adalah 18/16/13 untuk partikel berukuran 4 μm , 6 μm , dan 14 μm secara berurutan [44][45].

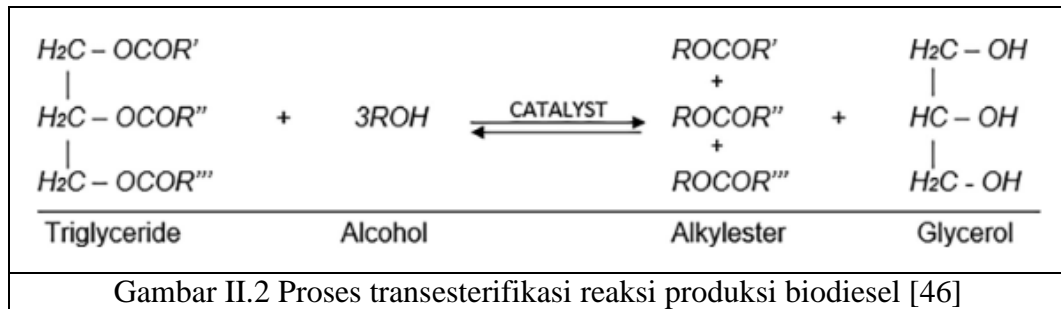
Tabel II.5 Skala angka ISO 4406 [44]

Jumlah Partikel dalam Milimeter		Skala Angka
Lebih dari	Hingga dan termasuk	
2.500.000		>28
1.300.000	2.500.000	28
640.000	1.300.000	27
320.000	640.000	26
160.000	320.000	25
80.000	160.000	24
40.000	80.000	23
20.000	40.000	22
10.000	20.000	21
5.000	10.000	20
2.500	5.000	19
1.300	2.500	18
640	1.300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11

2.2.2 Proses Produksi Biodiesel

Proses produksi biodiesel yang paling umum dilakukan adalah transesterifikasi. Secara teknis, biodiesel dihasilkan melalui proses transesterifikasi yang mengubah minyak nabati atau lemak hewani menjadi ester alkil, dimana minyak nabati atau lemak hewani bereaksi dengan alkohol (biasanya metanol) dan katalis (baik asam maupun basa) [46][47][48] untuk menghasilkan biodiesel dan gliserol sebagai produk sampingan. Sebagaimana dijelaskan pada Gambar II.2, proses ini dimulai dengan tahap pencampuran bahan baku minyak dan katalis dengan alkohol, dilanjutkan dengan pemanasan untuk mempercepat reaksi. Setelah reaksi selesai, campuran dipisahkan menjadi dua lapisan: lapisan atas berupa biodiesel dan lapisan bawah berupa gliserol. Biodiesel kemudian dimurnikan dengan pencucian dan pengeringan untuk menghilangkan sisa-sisa katalis dan alkohol. Metode ini umum digunakan karena relatif sederhana, biaya yang lebih rendah, dan kompatibel dengan berbagai jenis minyak nabati atau lemak hewani. Efisiensi proses dan

kualitas biodiesel sangat dipengaruhi oleh jenis katalis, suhu, waktu reaksi, dan rasio bahan.



Dalam proses produksi biodiesel dipengaruhi oleh tingkat ketersediaan *feedstock*, bahan baku biodiesel dapat dibagi menjadi empat kategori, sebagaimana dijelaskan pada Tabel II.6 [49]. Bahan baku yang mudah dibudidayakan dan produktivitasnya tinggi, seperti minyak sawit dan lemak hewani. Untuk *feedstock* yang memerlukan perawatan lebih dan memiliki produktivitas lebih rendah, seperti minyak kedelai dan rapeseed. Sedangkan untuk bahan baku yang sulit dibudidayakan dan produktivitasnya rendah, seperti minyak ganggang dan minyak nyamplung. Klasifikasi ini penting untuk menentukan strategi pemilihan *feedstock* yang optimal dalam produksi biodiesel berkelanjutan.

Tabel II.6 *Feedstock* biodiesel

Kategori	Jenis Bahan Baku	Contoh	Keterangan
Minyak yang Dapat Dimakan (<i>Edible Oils</i>)	Minyak dari sumber pangan	Kelapa, Sawit, Kedelai, Jagung	Minyak ini mudah diakses dan umum digunakan, tetapi bersaing dengan kebutuhan pangan manusia.
Minyak yang Tidak Dapat Dimakan (<i>Non-Edible Oils</i>)	Minyak dari tanaman non-pangan	Jatropha, Biji Tembakau, Biji Kopi	Lebih ramah lingkungan karena tidak mengganggu rantai pasokan pangan, tetapi terkadang sulit dibudidayakan.
Lemak Hewani (<i>Animal Fats</i>)	Lemak dan minyak dari hewan	Lemak Ayam, Lemak Sapi, Minyak Ikan	Sumber limbah industri yang dapat diolah kembali menjadi biodiesel, membantu pengurangan limbah.

Minyak Mikroba (<i>Microbial Oils</i>)	Minyak dari mikroorganisme dan alga	<i>Chlorella</i> , <i>Nannochloropsis</i> , <i>Nostoc</i>	Dianggap sebagai sumber masa depan karena dapat tumbuh cepat, tetapi teknologi pengolahannya masih mahal.
---------------------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

Produksi biodiesel disesuaikan dengan teknologi reaktor yang sesuai dengan tujuan efisien. Tabel II.7 menjelaskan beberapa jenis reaktor yang umum digunakan termasuk reaktor batch, reaktor kontinu, dan reaktor pemrosesan berbasis mikro. *Reaktor batch* sering dipilih untuk skala kecil karena fleksibilitas dan kemudahan operasionalnya, sementara reaktor kontinu lebih efisien untuk produksi berskala besar. Reaktor berbasis mikro memiliki keuntungan dalam pengendalian suhu dan waktu reaksi, meningkatkan efisiensi proses. Pemilihan teknologi reaktor yang tepat sangat memengaruhi *yield* biodiesel dan biaya operasional.

Tabel II.7 Teknologi reaktor produksi biodiesel

Jenis Reaktor	Deskripsi	Keunggulan	Kekurangan
<i>Batch Reactor</i>	Proses dilakukan dalam satu batch pada satu waktu di satu wadah	Fleksibel, mudah dioperasikan, cocok untuk skala kecil	Waktu reaksi lebih lama, efisiensi lebih rendah
<i>Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)</i>	Bahan baku dan produk mengalir secara kontinu dengan pengadukan terus-menerus	Efisiensi tinggi, cocok untuk produksi skala besar	Investasi awal tinggi, kompleksitas operasional
<i>Fixed Bed Reactor</i>	Bahan baku mengalir melalui katalis padat dalam reaktor	Efisiensi konversi tinggi, stabil, pemisahan produk mudah	Sensitif terhadap fouling dan pressure drop
<i>Supercritical Reactor</i>	Menggunakan kondisi superkritis (suhu dan tekanan tinggi) untuk transesterifikasi	Tidak memerlukan katalis, waktu reaksi sangat singkat	Investasi awal mahal, membutuhkan kondisi operasi ekstrem
<i>Ultrasonic Reactor</i>	Menggunakan gelombang ultrasonik untuk meningkatkan kecepatan reaksi	Mempercepat reaksi, efisiensi tinggi, konsumsi energi rendah	Belum umum di industri besar, biaya peralatan lebih tinggi
<i>Microwave-Assisted Reactor</i>	Memanfaatkan energi gelombang mikro untuk	Pengendalian suhu yang baik, mengurangi waktu reaksi	Memerlukan peralatan khusus, skala komersial terbatas

memanaskan reaksi
secara langsung

2.2.3 Aplikasi dan Market Biodiesel

Biodiesel telah menjadi salah satu pilar utama dalam strategi energi nasional Indonesia, khususnya sebagai bagian dari upaya diversifikasi energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Penerapan biodiesel di Indonesia paling dominan dilakukan pada sektor transportasi darat, terutama untuk kendaraan bermesin diesel yang digunakan dalam logistik, angkutan barang, hingga armada pemerintahan. Selain itu, sektor industri dan pembangkit listrik berbasis diesel *engine* juga mulai mengintegrasikan biodiesel sebagai campuran bahan bakar. Di sektor pertambangan dan perkebunan, biodiesel digunakan untuk alat berat seperti *dump truck*, *excavator*, dan *genset* di lokasi terpencil yang tidak terjangkau jaringan listrik PLN.

Aplikasi biodiesel di sektor pertambangan menjadi sangat potensial karena tingginya konsumsi bahan bakar dan kebutuhan akan solusi energi yang lebih bersih. Dengan adopsi teknologi pendukung dan penyesuaian spesifikasi mesin, penggunaan biodiesel pada alat berat dinilai mampu menurunkan emisi karbon dan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan bahan bakar konvensional atau *fossil fuel* [7], tanpa menurunkan performa operasional dan dapat mempertahankan kinerja *engine* yang sebanding dengan bahan bakar fosil [8][9][10]. Beberapa perusahaan tambang besar di Indonesia mulai mengadopsi penggunaan biodiesel sebagai bagian dari program sustainability dan efisiensi energi. Selain mengurangi emisi karbon dan partikulat, penggunaan biodiesel juga mendukung pemenuhan standar lingkungan dalam perizinan tambang dan pelaporan ESG (Environmental Social Governance). Namun, tantangan teknis seperti kualitas bahan bakar, kestabilan penyimpanan, serta dampaknya terhadap sistem injeksi bahan bakar dan filter masih menjadi isu penting. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan prediktif dalam perawatan dan evaluasi performa alat berat saat menggunakan biodiesel.

Pasar biodiesel Indonesia ditopang oleh kapasitas produksi domestik yang besar, dengan bahan baku utama berasal dari CPO. Indonesia memiliki keunggulan kompetitif dalam penyediaan *feedstock* biodiesel, sebagai produsen kelapa sawit

terbesar di dunia dengan produksi CPO terus meningkat, dari 21,96 juta ton pada 2010 menjadi 45,58 juta ton pada 2022 [50]. Dari sisi permintaan, kebijakan mandatori biodiesel hingga target implementasi B35, B40, dan seterusnya terus ditingkatkan menciptakan pasar domestik yang kuat. Namun demikian, pasar biodiesel juga menghadapi tantangan, seperti fluktuasi harga CPO, isu keberlanjutan lingkungan [51][52], serta resistensi dari pelaku industri yang khawatir terhadap dampak teknis pada performa mesin. Oleh karena itu, strategi penguatan hilirisasi, insentif fiskal, serta peningkatan kualitas bahan bakar melalui standarisasi mutu dan pengawasan distribusi menjadi aspek krusial dalam menjamin keberlanjutan pasar biodiesel di Indonesia.

2.2.4 Dampak Penggunaan Biodiesel pada Mesin Alat Berat

Penggunaan biodiesel dengan kadar campuran tinggi pada mesin alat berat memberikan dampak teknis yang kompleks dan beragam. Dari sisi positif, biodiesel memiliki sifat menurunkan koefisien gesek dan laju keausan spesifik, pelumasan yang lebih baik dibandingkan solar (*fossil fuel*) [53]. Selain itu, kandungan oksigen alami pada biodiesel berkontribusi terhadap pembakaran yang lebih bersih, sehingga emisi gas buang seperti CO dan PM cenderung lebih rendah [54]. Namun, di sisi lain, biodiesel juga memiliki beberapa kelemahan teknis yang harus diantisipasi. Sifat higroskopis biodiesel menyebabkan kecenderungan menyerap air lebih tinggi, yang dapat memicu korosi pada sistem bahan bakar dan menurunkan kualitas bahan bakar selama penyimpanan [55]. Penggunaan biodiesel juga berisiko meningkatkan pembentukan endapan atau kerak pada injektor dan filter bahan bakar akibat degradasi oksidatif dan pelarutan residu lama di dalam tangki. Oleh karena itu, pemantauan kualitas bahan bakar, penggantian filter secara berkala, dan peningkatan sistem pemeliharaan menjadi aspek krusial dalam penerapan biodiesel pada alat berat di sektor industri seperti pertambangan atau konstruksi.

Peningkatan rasio campuran biodiesel secara signifikan menurunkan torsi (-13,0%), daya mesin (-15,0%), emisi CO₂ (-24,1%), dan CO (-17,5%). Namun, konsumsi bahan bakar meningkat (+5,2%) serta emisi NO juga meningkat (+11,0%) [56]. Penggunaan bahan bakar 100% CPO pada mesin diesel putaran rendah memberikan harapan sebagai alternatif energi terbarukan, namun hasil pengujian menunjukkan bahwa pemakaiannya secara terus-menerus memberikan

sejumlah dampak negatif terhadap kinerja dan keandalan mesin. Salah satu temuan utama adalah penurunan daya mesin, yang ditunjukkan dengan berkurangnya gross power dan indicated horsepower (IHP). Hal ini berkaitan erat dengan sifat fisik CPO, seperti viskositas yang tinggi dan kandungan oksigen yang lebih besar dibanding solar, yang menyebabkan proses pembakaran menjadi kurang sempurna [57].

Pembakaran yang tidak sempurna ini tidak hanya mempengaruhi output tenaga, tetapi juga menyebabkan terbentuknya residu atau endapan di beberapa komponen penting mesin seperti *cylinder head*, *piston*, katup, dan nosel injektor. Endapan ini berpotensi mempercepat keausan komponen, menyumbat saluran bahan bakar atau udara, serta meningkatkan risiko kerusakan mesin dalam jangka panjang. Lebih lanjut, kualitas oli pelumas mengalami degradasi akibat pencampuran dengan senyawa sisa pembakaran dari CPO. Oli yang terkontaminasi akan kehilangan fungsi pelumasannya secara optimal, sehingga gesekan antar komponen mesin meningkat dan menyebabkan kerusakan yang lebih cepat [57].

2.3 Strategi Perawatan Mesin untuk Penggunaan Biodiesel

Penggunaan biodiesel sebagai bahan bakar alternatif membawa sejumlah manfaat lingkungan, namun juga memunculkan tantangan teknis yang memerlukan penyesuaian strategi perawatan mesin (*engine maintenance*). Biodiesel, khususnya dengan kandungan *metil ester* yang tinggi seperti B30 hingga B100, memiliki karakteristik kimiawi yang berbeda dibandingkan solar, antara lain daya pelarut yang tinggi, kecenderungan menyerap air (*hygroscopic*), serta potensi membentuk endapan pada sistem bahan bakar. Oleh karena itu, strategi perawatan mesin perlu difokuskan pada pencegahan kerusakan dini dan optimalisasi umur pakai komponen mesin. Tabel II.8 menjelaskan beberapa strategi perawatan mesin yang direkomendasikan untuk memastikan performa optimal dan umur panjang mesin diesel yang menggunakan biodiesel.

Tabel II.8 Strategi perawatan mesin	
Strategi Perawatan	Penjelasan
Penggantian filter bahan bakar	Disarankan mengganti filter bahan bakar setelah 50 jam penggunaan awal biodiesel dan selanjutnya mengikuti

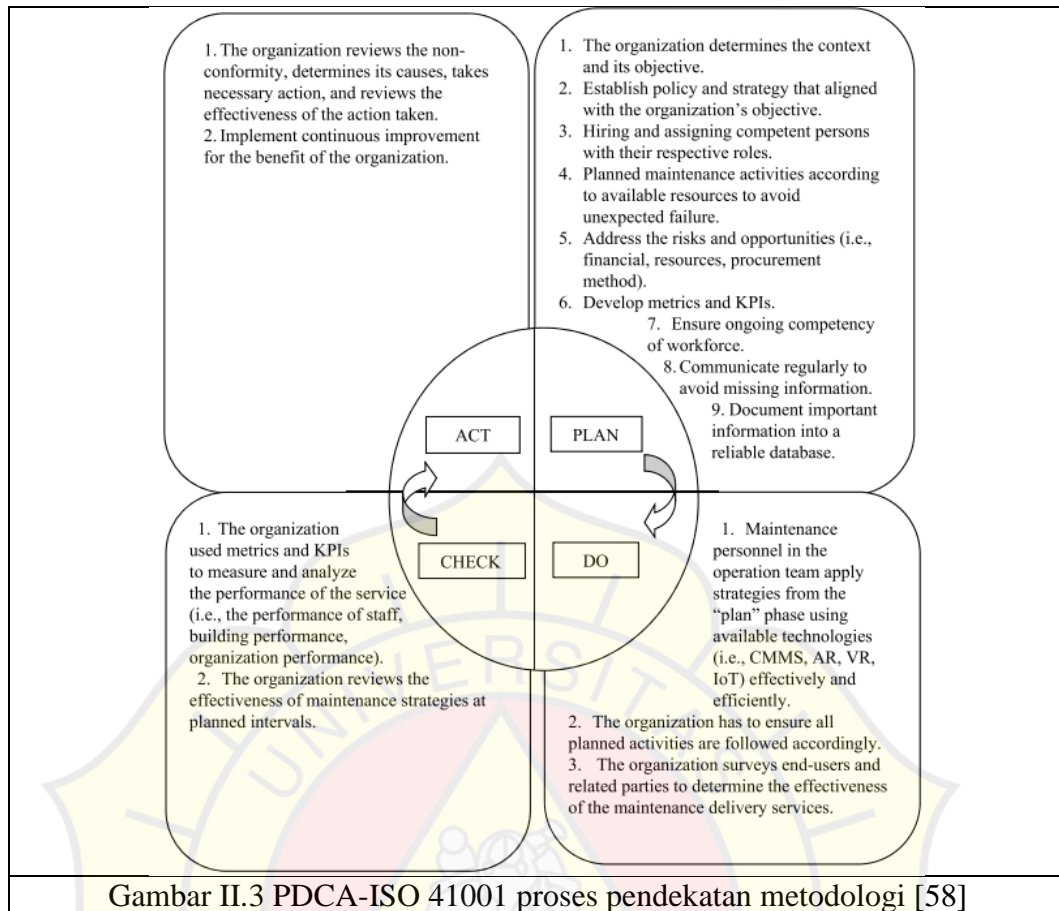
	interval servis reguler minimal setiap 250 jam (sesuai dengan OMM)
Analisis dan penggantian oli	Gunakan oli sesuai spesifikasi, ganti sesuai jadwal. Lakukan analisis oli secara berkala untuk memeriksa kualitas dan tingkat kontaminasi oli mesin, serta catat kadar biodiesel saat pengambilan sampel fuel maupun oil
Pembersihan sistem bahan bakar	Lakukan pembersihan sistem bahan bakar secara berkala, termasuk tangki, pompa, dan injektor, untuk mencegah penumpukan endapan dan pertumbuhan mikroba yang dapat menyebabkan korosi dan penyumbatan
Manajemen penyimpanan biodiesel	Gunakan biodiesel dalam waktu maksimal 6 bulan sejak pembuatan dan hindari menyimpan mesin dengan campuran biodiesel di dalam sistem bahan bakar lebih dari 3 bulan
Penggunaan bahan bakar berkualitas	Pastikan menggunakan biodiesel yang memenuhi standar mutu dan solar dengan kadar sulfur rendah untuk mengurangi risiko pembentukan kerak dan endapan pada sistem bahan bakar
Perawatan filter udara & pendingin	Bersihkan/ganti filter udara, cek sistem pendingin secara rutin
Servis berkala & dokumentasi	Lakukan servis berkala dan catat semua aktivitas perawatan sesuai dengan OMM
On board monitoring (OBM)	OBM mengukur parameter operasional mesin seperti suhu, tekanan injektor, dan emisi gas buang untuk memastikan bahwa mesin bekerja secara efisien dengan biodiesel. Data historical perawatan menjadi rekondasi treatment maintenance untuk mencegah kerusakan

2.3.1 Perancangan Disain *Maintenance*

Perkembangan teknologi industri dan kebutuhan akan efisiensi operasional mendorong diterapkannya pendekatan PdM dalam sistem pemeliharaan peralatan, termasuk pada mesin-mesin berbahan bakar biodiesel. *Predictive maintenance* adalah strategi perawatan berbasis data yang bertujuan untuk mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan sebelum kegagalan terjadi, sehingga *unscheduled breakdown* dan biaya perbaikan dapat diminimalkan. Perancangan kerangka kerja PdM dimulai dengan pengumpulan data *real-time* dari berbagai sensor yang dipasang pada mesin atau sistem, seperti sensor suhu, tekanan, getaran, kualitas oli, dan emisi. Data ini kemudian dikelola dalam sistem pemrosesan data untuk dilakukan analisis diagnostik dan prediksi performa mesin, menggunakan pendekatan seperti *machine learning*, *statistical analysis*, atau model fisik.

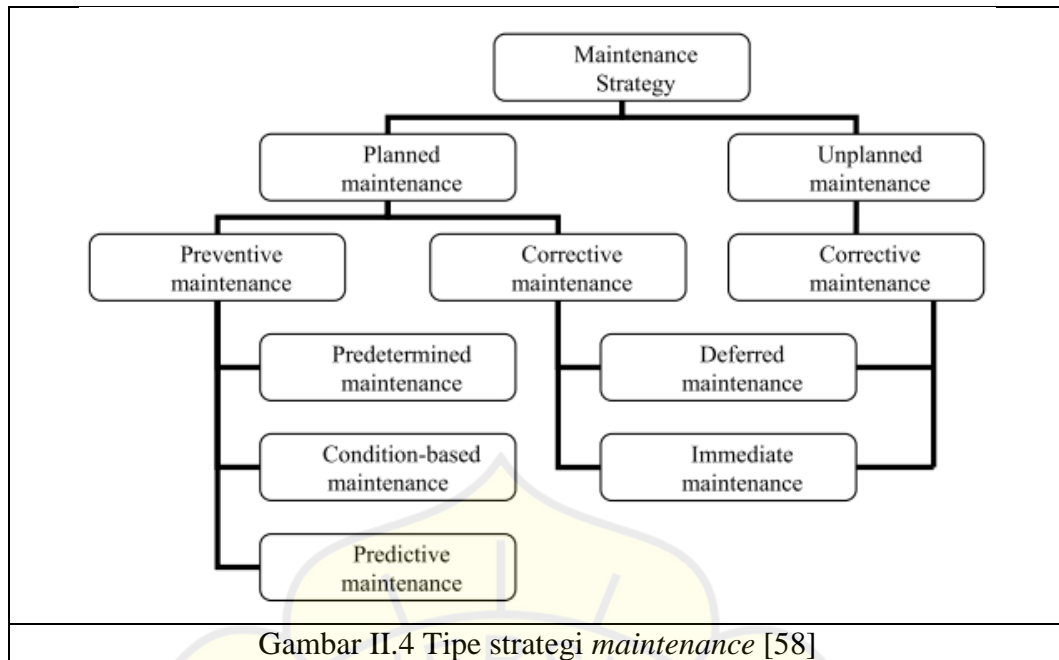
Building maintenance merupakan seperangkat standar, pedoman, atau manual yang digunakan dalam aktivitas pemeliharaan equipment. British Institute of Facilities Management (BIFM), International Facilities Management Association (IFMA), dan ISO telah menstandarkan dan menetapkan pola *maintenance* yang lebih efisien. Salah satu standar internasional yang digunakan adalah ISO 41001, yaitu sistem *facility management*. Standar-standar ini penting untuk menciptakan pemahaman global dan berfungsi sebagai alat pembandingan (*benchmark*) untuk mengukur kualitas kinerja dalam organisasi [58].

Strategi *maintenance* merupakan aspek penting untuk mendukung kebutuhan organisasi. Berdasarkan siklus PDCA ISO 41001 (Gambar II.3), memberikan pola strategi dan kebijakan harus saling melengkapi agar tujuan organisasi dapat tercapai secara optimal. Siklus PDCA (Plan Do Check Act) dalam strategi *building maintenance* dimulai dengan tahap *Plan*, di mana organisasi merumuskan tujuan, strategi, kebijakan, serta menetapkan personel dan rencana pemeliharaan yang disesuaikan dengan risiko dan sumber daya yang ada. Selanjutnya pada tahap *Do*, strategi dijalankan oleh tim operasional dengan dukungan teknologi yang dimiliki, serta dievaluasi melalui survei kepada pengguna layanan. Pada tahap *Check*, organisasi menggunakan metrik dan *key performance indicator* (KPI) untuk menilai kinerja pemeliharaan dan meninjau efektivitas strategi secara berkala [59]. Terakhir, tahap *Act* dilakukan untuk menindaklanjuti ketidaksesuaian, melakukan perbaikan, dan memastikan peningkatan berkelanjutan bagi organisasi.



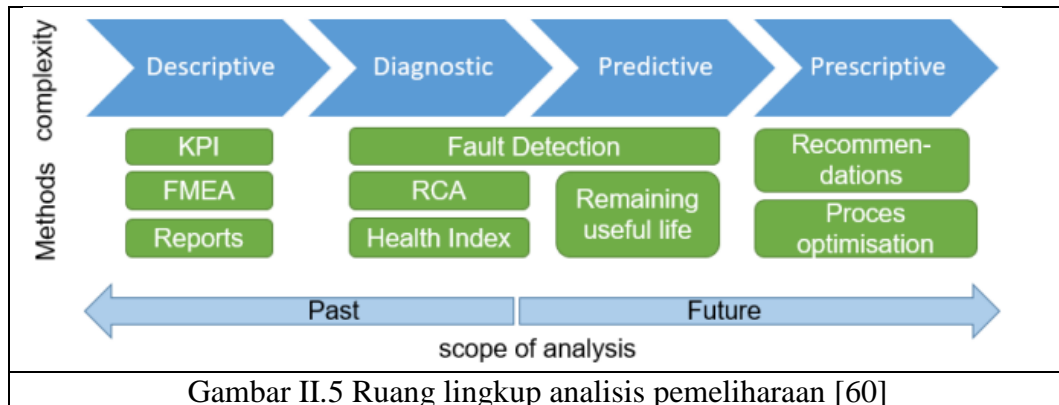
Gambar II.3 PDCA-ISO 41001 proses pendekatan metodologi [58]

Gambar II.3 merupakan kontrol aktifitas *project* termasuk yang dilakukan dalam aktifitas strategi pemeliharaan yang umum digunakan, termasuk alternatif dan kemampuan adaptasinya terhadap lingkungan. Beberapa strategi pemeliharaan telah dibuat dalam berbagai literatur untuk mendukung tujuan tersebut sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II.4. Strategi pemeliharaan terdiri dari dua kategori utama, yaitu *planned maintenance* (pemeliharaan terencana) dan *unplanned maintenance* (pemeliharaan tidak terencana). Pada pemeliharaan terencana, terdapat dua pendekatan: *preventive maintenance* (pemeliharaan pencegahan) yang mencakup *predetermined*, *condition-based*, dan *predictive maintenance*; serta *corrective maintenance* (pemeliharaan korektif) yang dilakukan setelah adanya indikasi kerusakan namun masih dalam rencana. Sementara itu, pemeliharaan tidak terencana terdiri dari *corrective maintenance* yang terbagi menjadi *deferred maintenance* (ditunda) dan *immediate maintenance* (langsung), biasanya dilakukan sebagai respons terhadap kerusakan mendadak tanpa perencanaan sebelumnya. Pendekatan terencana cenderung lebih efisien karena dapat meminimalkan risiko kerusakan berat dan biaya tak terduga.

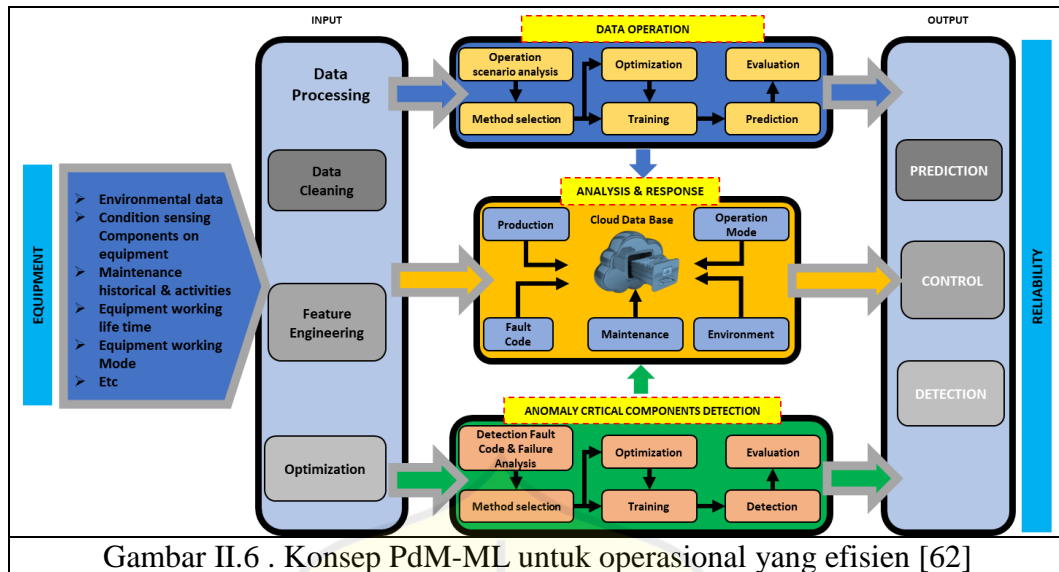
Gambar II.4 Tipe strategi *maintenance* [58]

2.3.2 Perkembangan Maintenance

Perkembangan *maintenance* telah mengalami transformasi signifikan dari pendekatan reaktif menjadi strategi yang lebih proaktif dan berbasis data. Ada empat tingkatan analisis dalam perkembangan pemeliharaan berbasis data, yaitu: deskriptif, diagnostik, prediktif, dan preskriptif. Analisis deskriptif berfokus pada kondisi masa lalu melalui KPI, analisis mode *failure modes and effects analysis* (FMEA), dan laporan operator, untuk analisis apa yang telah terjadi. Tahapan berikutnya adalah analisis diagnostik yang bertujuan mengidentifikasi penyebab kegagalan melalui deteksi kesalahan, *root cause analysis* (RCA), dan indeks kesehatan komponen. Analisis prediktif memperkirakan sisa umur pakai atau *remaining useful life* (RUL) dari peralatan, berdasarkan data historis dan kondisi terkini. Terakhir, analisis preskriptif memberikan rekomendasi tindakan dan optimasi proses berdasarkan prediksi, untuk mencegah kerusakan dan meningkatkan efisiensi operasional. Keempat tahapan ini menunjukkan peningkatan kompleksitas metode serta pergeseran fokus analisis dari masa lalu ke masa depan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II.5.



Pemeliharaan PdM saat ini menjadi metode yang sering digunakan dalam menjaga keandalan dan keselamatan peralatan industri, terutama dalam mendeteksi kerusakan dan memperkirakan RUL. PdM memanfaatkan kemajuan teknologi *artificial intelligence* (AI) dan *information technology* (IT) untuk mengolah data *real-time* dari berbagai parameter fisik seperti tekanan, getaran, suhu, viskositas, hingga laju aliran. teknologi ini memungkinkan deteksi dini kerusakan, penjadwalan perawatan secara tepat waktu, serta menghindari kegagalan fatal [61]. PdM tidak hanya mengurangi biaya perawatan tetapi juga memperpanjang umur pakai peralatan. Dengan dukungan teknologi seperti *smart* sensor, jaringan, AI, *big data*, dan sistem *cloud*, dengan PdM kesehatan mesin dapat dipantau kapan saja dan *schedule maintenance* dilakukan sebelum kerusakan terjadi, sehingga kinerja *downtime* mendekati nol. ML, sebagai bagian dari AI, berperan penting dalam mengekstraksi data untuk mendukung proses pengambilan keputusan yang lebih cerdas dan otomatis dalam PdM. *Framework Predictive maintence* dalam aplikasinya untuk pemeliharaan *equipment* secara umum ditunjukkan oleh Gambar II.6.



Gambar II.6 . Konsep PdM-ML untuk operasional yang efisien [62]

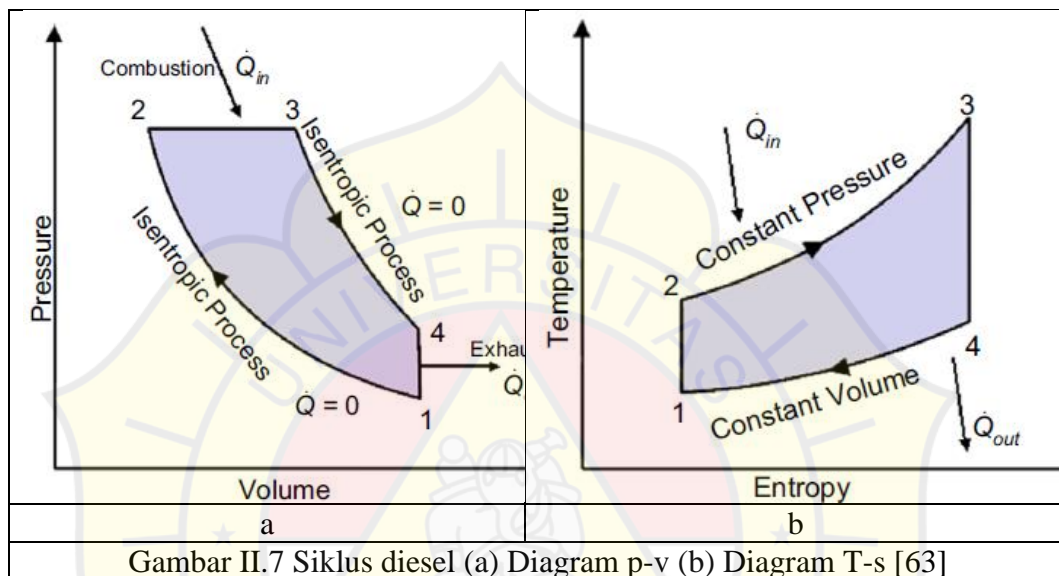
Sistem *Automated Predictive Maintenance* pada equipment seperti mesin diesel dengan mengintegrasikan sensor dan teknologi yang tertanam pada mesin untuk mengumpulkan berbagai data operasional seperti suhu, getaran, tekanan, dan suara. Data ini kemudian dikirim dan dipantau secara jarak jauh melalui perangkat digital menggunakan teknologi visual dan komunikasi, yang dapat dipantau secara *real-time*. Selanjutnya, data yang terkumpul dianalisis secara prediktif menggunakan sistem berbasis jaringan untuk mengidentifikasi potensi kerusakan dan memperkirakan umur pakai komponen. Analisis ini diperkuat oleh kecerdasan buatan AI yang mampu mengenali pola kerusakan berdasarkan data historis dan memberikan rekomendasi tindakan pemeliharaan. Hasil dari analisis ini digunakan untuk mengotomatisasi proses perawatan, sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan sebelum kerusakan terjadi. Pendekatan ini tidak hanya mencegah *downtime* tetapi juga memperpanjang umur mesin secara efisien dan hemat biaya.

2.3.3 Analisis Mekanis pada Proses Pembakaran Mesin Diesel

2.3.3.1 Parameter Termodinamika dalam Siklus Diesel

Parameter termodinamika dalam siklus diesel mencakup tekanan, suhu, volume, dan entalpi pada tiap tahap proses pembakaran. Kinerja mesin Diesel *reciprocating* ditentukan oleh keseimbangan energi sistem tertutup dan hukum kedua termodinamika, mencakup efisiensi termal, kerja bersih spesifik, tekanan efektif rata-rata, serta pengaruh rasio kompresi. Siklus diesel, terdiri dari empat proses reversibel: kompresi isentropik, penambahan panas pada volume konstan, ekspansi

isentropik, dan pembuangan panas pada volume konstan. Siklus ini direpresentasikan dalam diagram p-v dan T-s secara berurutan Gambar II.7 a adalah 1 → 2: Proses kompresi *adiabatic*, dimana s merupakan suhu entropi, 2 → 3: Proses pemanasan konstan (penambahan panas \dot{Q}_{in}), 3 → 4: Proses ekspansi *adiabatic*, dimana s merupakan suhu entropi, 4 → 1: Proses pendinginan konstan (pelepasan panas \dot{Q}_{out}) [63]. Gambar II.7 b menunjukkan hubungan suhu dan entropi dalam siklus diesel, dengan suhu maksimum T3 dan minimum T1.



2.3.3.2 Efisiensi Volumetrik & Rasio Bahan Bakar-Udara pada Mesin Diesel

Pembakaran mesin diesel bergantung pada suplai bahan bakar dan udara ke ruang bakar (*volumetric efficiency and fuel-air ratio*), selain itu jenis bahan bakar (*caloric value*) mempengaruhi energi atau *power* yang dihasilkan. Efisiensi proses ini ditentukan oleh massa bahan bakar per unit waktu (Rumus 3) dan massa total campuran udara-bahan bakar \dot{m}_{mix} (Rumus 4), yang dipengaruhi oleh efisiensi volumetrik (η_v), densitas udara (ρ_{air}), volume displasi (V_d), kecepatan mesin (N), rasio kesetaraan (ϕ), dan rasio udara-bahan bakar stoikiometri (AF_S) [64]. Efisiensi volumetrik dan densitas udara menentukan suplai oksigen untuk pembakaran, sementara volume displasi dan kecepatan mesin mempengaruhi frekuensi siklus pembakaran. Rasio kesetaraan dan rasio udara-bahan bakar stoikiometri mengontrol jumlah bahan bakar yang disuplai relatif terhadap kebutuhan udara ideal.

$\dot{m}_f = \frac{\eta_v \rho_{air} V_d N \varphi}{2 A F_S}$	(3)
---------------------------------------------------------------	-----

$\dot{m}_{mix} = \frac{\eta_v \rho_{air} V_d N}{2} \left(1 + \frac{\varphi}{A F_S} \right)$	(4)
----------------------------------------------------------------------------------------------	-----

2.3.3.3 Kehilangan Panas dan Konversi Energi Bahan Bakar pada Mesin

Efisiensi termal mengukur seberapa efektif sistem mengubah energi yang ditambahkan menjadi kerja bersih, dengan mempertimbangkan energi yang hilang dalam proses. Untuk menghitung efisiensi termal engine diesel digunakan Formula 3, dimana \dot{W}_{net} adalah selisih antara energi masuk (\dot{Q}_{in}) dan energi keluar (\dot{Q}_{out}) dalam satu siklus engine. \dot{Q}_{in} adalah energi yang ditambahkan ke sistem selama proses pembakaran dan \dot{Q}_{out} adalah energi yang dikeluarkan dari sistem selama proses pembuangan (Rumus 5). Dimana \dot{m} adalah laju aliran masa (*mass flow rate*), C_v merupakan kapasitas panas spesifik pada volume konstan (*specific heat capacity at constant volume*), dan C_p adalah kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan (*specific heat capacity at constant pressure*) [63].

$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}$	(5)
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m} C_v (T_4 - T_1) \text{ and } \dot{Q}_{in} = \dot{m} C_p (T_3 - T_2) \quad (6)$$

Sehingga nilai efisiensi juga dapat dihitung dengan Rumus 6, dengan γ rasio kapasitas panas $\left(\frac{C_p}{C_v}\right)$.

$\eta_{th} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\gamma (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \left(\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \right)$	(6)
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Efisiensi termal η_{th} , suplai bahan bakar-udara, dan pembakaran dalam mesin diesel berkontribusi terhadap keluaran daya atau kerja \dot{W}_{net} secara umum diukur dalam *horsepower (Power)*. Dimana efisiensi volumetrik tinggi → Suplai udara optimal → Pembakaran lebih baik → Torsi meningkat. Efisiensi termal tinggi → Konversi energi lebih efektif → Lebih sedikit energi terbuang → Daya mesin meningkat. Daya adalah kerja per satuan waktu ($Power = \frac{Work}{Time}$). Sehingga, daya juga dapat

ditulis sebagai $Power = Force \left(\frac{Displacement}{Time} \right)$, secara umum diformulasikan sebagaimana ditunjukkan Rumus 7 [65].

$W = \frac{TN_p}{5252}$	(7)
-------------------------	-----

Di mana W adalah kerja poros mesin yang dinyatakan dalam HP (*horsepower*), N_p adalah kecepatan berputar poros (RPM), dan 5252 adalah faktor konversi antara Lb-ft dan HP.

