

## Kajian Tekno Ekonomi pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Melalui Analisa Termodinamika

*Techno-Economic Studies on Diesel Power Plants Through Thermodynamic Analysis*

AHMAD SYIHAN AUZANI, YOGI PRAMUDITO, GERARDO JANITRA PURIADI PUTRA, DEVIN ADIRIWANTO, MUHAMMAD BURHANUDDIN FAUZI

### ABSTRACT

Fossil fuel (BBM) has several problems in Indonesia such as the increase in world crude oil prices with subsidy policies, energy production that is still dependent on fuel, and pollution resulting from burning fuel. As an anticipatory measure and a solution, the Indonesian government will implement a policy of blending 30% biodiesel on diesel fuel in 2020 with crude palm oil (CPO) as a biodiesel mixture. In this research, simulation of diesel engine performance with biodiesel fuel variations was carried out using RK-Diesel software to determine engine performance for each fuel variation. The fuel used in the simulation is Biodiesel (palm oil) with variations of B0, B30 and B40. As a result, B0 fuel produces the highest engine power with 4.4 kW. The lowest specific fuel consumption value is produced by B0 fuel with a value of 245.97 gr/kWh. The decrease in opacity occurred with the addition of biodiesel from 9.8% for B0 fuel and 8.3% for B40 fuel. From the results of the economic analysis, B0 fuel has the lowest cost of supply (BPP) at Rp. 2,638.8/kWh with an SFC of 0.24497 kg/kWh at the power plant (PLTDG).

**Keywords:** biodiesel, crude palm oil, RK-Diesel, diesel power plant, tekno ekonomi

### PENDAHULUAN

Kenaikan harga minyak mentah dunia sangat berdampak bagi Indonesia karena adanya kebijakan subsidi bahan bakar bagi masyarakat Indonesia. Data menunjukkan bahwa 63% produksi energi di Indonesia masih bergantung pada penggunaan bahan bakar minyak (BBM). Indonesia harus mengeluarkan biaya sebesar 89 triliun rupiah untuk subsidi BBM dengan harga minyak mentah 60 dollar AS per barrel (Wirawan & Tambunan, 2006). Keadaan ini diperparah dengan polusi dari pembakaran bahan bakar diesel. Santoso et al., dalam penelitiannya mengenai sumber polusi udara di Serpong, menyatakan bahwa persentase Pb tertinggi dibandingkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di kawasan pemukiman dan industri adalah 3,13% dan 4,25%, sedangkan untuk PM<sub>2.5</sub>-10 adalah 1,89% dan 6,00%. Bahan bakar diesel menyumbang 30% dari keseluruhan sumber polusi (Santoso et al., 2011). Sebagai langkah antisipasi dan solusi, pemerintah membuat program mandatori biodiesel untuk campuran

pada bahan bakar diesel. Pemerintah telah memberlakukan kebijakan pencampuran biodiesel ke dalam minyak solar sebesar 20%, juga dikenal sebagai B20 melalui Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral nomor 12 tahun 2015, dan pada tahun 2020 Indonesia akan mengimplementasikan biodiesel B30, utamanya berbahan dasar minyak sawit (Febriansyah, Utomo, & Suminto, 2020).

Produksi crude palm oil (CPO)/minyak sawit merupakan salah satu komoditas terbesar di Indonesia dengan konsumsi lokal sebesar 25% dari total produksi CPO pada tahun 2016. Pengolahan CPO untuk produksi biodiesel merupakan salah satu yang terbesar selain konsumsi untuk memenuhi target B30 pada tahun 2025 (Harahap, Silveira, & Khatiwada, 2019). Berdasarkan studi komprehensif yang dilakukan Dey et al., mengenai prospek ekonomi, lingkungan dan efisiensi dari palm oil biodiesel menyatakan bahwa ada penurunan polusi karbon monoksida 48% (CO), 47% particulate matter (PM), dan 67% hidrokarbon (HC) seiring dengan kenaikan campuran

biodiesel pada bahan bakar (Dey, Reang, Das, & Deb, 2021). Dalam penelitian yang lain oleh Indrawan et al., dinyatakan bahwa penggunaan biodiesel dapat mengurangi emisi kumulatif sebesar 12,1% sulfur dioksida (~3,2 Mton), 2,2% partikel (~186,3 ribu ton), 0,6% karbon (Nagappan et al., 2022) monoksida (~8,6). ribu ton), dan 0,2% senyawa organik yang mudah menguap (~839 ton). Biaya eksternalitas yang terhindarkan berpotensi mencapai 32,5 miliar USD (Indrawan et al., 2017). Biodiesel dapat digunakan sebagai pengganti solar. Tetapi kelemahannya seperti kemampuan penyimpanan jangka panjang yang lebih rendah, jumlah emisi NO<sub>x</sub> yang lebih tinggi, dan viskositas yang lebih tinggi membatasi penggunaan persentase biodiesel yang lebih tinggi (Nagappan et al., 2022). Optimisasi perlu dilakukan untuk tetap mendapatkan keuntungan dari biodiesel, namun mengurangi kelemahan-kelemahan dari biodiesel. Dalam penelitian ini, simulasi performa mesin diesel dengan variasi bahan bakar biodiesel dilakukan menggunakan software RK-Diesel untuk mengetahui performa mesin pada setiap variasi bahan bakar.

## METODOLOGI PENELITIAN

Kajian tekno ekonomi pada pembangkit listrik tenaga diesel melalui analisa termodinamika dilaksanakan dengan tahapan penelitian yang disajikan pada Gambar 1.



GAMBAR 1. Metodologi penelitian Kajian tekno ekonomi pada pembangkit listrik tenaga diesel melalui analisa termodinamika.

Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini yaitu biosolar dengan spesifikasi mesin

diesel uji terlampir pada Tabel 1. Penelitian dilakukan dengan menggunakan simulasi melalui software RK Diesel diawali dengan karakterisasi bahan bakar yang digunakan untuk pengujian. Hasil karakterisasi diuji dan disimulasikan dengan RK Diesel dengan merujuk spesifikasi mesin uji yang telah ditentukan. Hasil data pengujian diolah dan dilakukan evaluasi untuk mendapatkan kesimpulan.

TABEL 1. Spesifikasi mesin diesel

No	Parameter	Nilai
1	Tipe Mesin	<i>Direct injection</i> , 1 silinder/4 langkah
2	<i>Bore × Stroke</i>	80 × 110 mm
3	Rasio kompresi	1:17,5
4	Daya maksimum	3,7 kW
5	Tekanan injeksi	220 bar
6	<i>Injection timing</i>	23,5° b TDC
7	<i>Dynamometer</i>	<i>Eddy current</i>
8	Tipe <i>nozzle</i>	<i>Multi hole</i>
9	Tipe injeksi	3-hole
10	Panjang <i>connecting rod</i>	235 mm
11	Diameter <i>nozzle</i>	0,25 mm

## Pemodelan RK-Diesel

Dalam penelitian ini, bahan bakar minyak solar dan campuran biodiesel dengan bahan bakar solar telah digunakan untuk mengetahui unjuk kerja mesin, karakteristik pembakaran dan emisi dari mesin diesel menggunakan perangkat lunak RK-Diesel. Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan alat model RK-Diesel. Karena model pembakaran multi-zona digunakan untuk menghitung karakteristik pembakaran.

Untuk mensimulasikan secara numerik pengujian yang dilakukan pada mesin diesel injeksi langsung menggunakan kondisi batas input numerik yang ditunjukkan pada gambar 5. Kecepatan mesin, waktu injeksi dan tekanan diatur pada 1500 rpm 23,5° b TDC dan lebih tinggi dari 22 MPa. Selain pengamatan pada nilai daya dan konsumsi mesin, nilai emisi seperti opasitas dan CO serta SO<sub>2</sub> juga diamati pada simulasi ini.

Name of equation	Equation	Comments
Conservation of mass	$\frac{dM}{dt} = \sum \dot{m}_i$	$\dot{m}_i$ = mass flow rate of the $i^{th}$ species in kg/sec
Conservation of species	$\frac{dN_i}{dt} = \sum \dot{m}_i Y_i - \sum \dot{m}_j Y_j$	$N_i$ = total mass within the cylinder in kg, $m_i$ = mass of $i^{th}$ species in kg/second $\dot{m}_i$ = net generation of the $i^{th}$ species in kg/second $\rho$ = rate of mass in mol/m <sup>3</sup> , $\rho$ = density in kg/m <sup>3</sup>
Conservation of energy	$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_j h_j + \dot{Q} - \dot{W}$	Left hand side first term is change of energy, right hand side first term is rate of displacement work done, second term is rate of heat transfer and third term is work done $\dot{Q} = \dot{m}_i h_i$ = heat conducted in, $\dot{W} = p \times \text{cylinder pressure in bar and } V_{dot} = \text{cylinder volume in m}^3$ $\dot{m}_i$ = mass flow rate (kg per sec)
Frictional torque	$T_{fric} = \tau \times r \times A_{fric}$	$\tau$ and $T$ = pressure and torque, $E_a$ = Activation energy of fuel, $r$ = radius in second
Effective pressure	$P_{eff} = P - P_{fric}$	$P_{fric}$ = friction torque, $P$ = cylinder pressure
Brake specific fuel consumption	$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_{brake}}$	$\dot{m}_f$ = fuel mass flow rate, $P_{brake}$ = brake power
Heat Release Model	$\dot{Q}_{HR} = \dot{m}_f \times H_{HR}$	$H_{HR}$ = heat release rate, $\dot{m}_f$ = fuel mass flow rate
NO <sub>x</sub> formation	$\frac{dNO_x}{dt} = k_1 [O] [N] - k_2 [NO] [O]$	Formation of $d(NO_x)/dt$ is strongly depends on temperature as shown in equation 15, $\omega$ = angular velocity in revolution per minute
Hartridge smoke level	$S = \frac{1}{\omega} \times \frac{dM_{PM}}{dt}$	$S$ = smoke level, $\omega$ = angular velocity in revolution per minute
Soot formation	$\frac{dS}{dt} = k_3 [C] - k_4 [S]$	$k_3$ = soot formation rate, $k_4$ = soot oxidation rate
Brake number	$BN = \frac{P_{brake}}{P_{ref}}$	$P_{brake}$ = brake power, $P_{ref}$ = reference power

GAMBAR 2. Persamaan model perhitungan (Rajak, Nashine, & Verma, 2020).

### Karakteristik Bahan Bakar

Hasil pengujian karakteristik bahan bakar sesuai dengan tabel 3 menunjukkan ada peningkatan nilai angka setana setelah penambahan biodiesel. Bahan bakar B0 menunjukkan nilai angka setana sebesar 49,8, sedangkan B30 memiliki nilai angka setana sebesar 53,1, dan B40 memiliki nilai angka setana sebesar 54,4.

TABEL 2. Karakteristik bahan bakar B0, B30 dan B40

No	Parameter Uji	Metode Uji	Unit	Hasil Uji		
				B0	B30	B40
1	Angka Setana	ASTM D 613	-	49,8	53,1	54,4
2	Berat Jenis suhu 15°C	ASTM D 4052	kg/m <sup>3</sup>	860,1	864,6	865,9
3	Viskositas suhu 40°C	ASTM D 445	cSt	3,51	3,64	3,82
4	Kandungan Sulfur	ASTM D 4294	ppm	1450	1100	950
5	Kandungan FAME	ASTM D 7806	% v/v	0	30,4	40,1
6	Nilai Kator (Net)	ASTM D 240	MJ/kg	42,556	40,714	40,506

Kandungan energi bahan bakar atau nilai kalor adalah salah satu yang parameter utama dalam masalah teknis yang mengindikasikan penggunaan campuran biodiesel dan minyak solar untuk rasio pencampuran yang lebih tinggi, karena berhubungan langsung dengan keluaran daya mesin dan dipengaruhi langsung dari kandungan energi bahan bakar tersebut (Ali, Mamat, Abdullah, & Abdullah, 2016). Gambar 3 menunjukkan nilai kalor (Net) B0 sebesar 42,556 MJ/kg, sementara itu untuk B30 sebesar 40,714 MJ/kg dan B40 40,506 MJ/kg.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Simulasi RK-Diesel

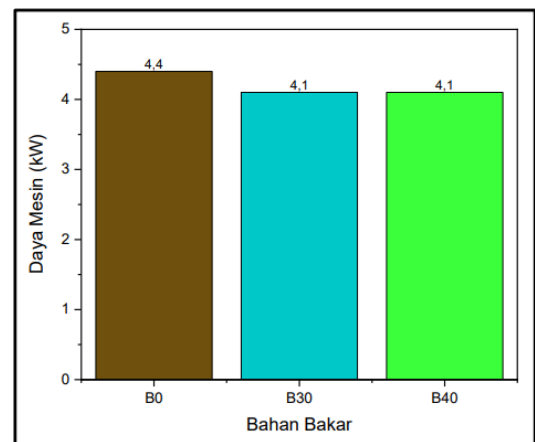
Pengukuran dan analisis sifat bahan bakar campuran biodiesel pada minyak solar dilakukan dalam kajian ini setelah campuran

bahan bakar biodiesel minyak sawit memenuhi spesifikasi yang ditetapkan pemerintah untuk bahan bakar campuran hingga rasio biodiesel 30% dan akan ada peningkatan menjadi 40%. Analisis kinerja mesin secara simulasi menggunakan Diesel RK dilakukan dengan menggunakan bahan bakar campuran B30 dan B40, selain bahan bakar B0 sebagai dasar untuk perbandingan. Simulasi dilakukan pada 1500 RPM dengan hasil simulasi pada Tabel 3.

TABEL 3. Hasil pengujian kinerja mesin menggunakan RK Diesel untuk bahan bakar B0, B30 dan B40

No.	Parameter Uji	Metode Uji	Unit	Hasil Uji		
				B0	B30	B40
1	Putaran mesin		RPM	1500		
2	Daya Mesin		Kw	4.3705	4.0102	3.9405
3	Torsi		Nm	27.825	25.531	25.215
4	SFC		Kg/kwh	0.24497	0.26682	0.27005
5	Mass of Fuel Supplied per cycle, g		mf	0.02379	0.02378	0.02377
6	Maximum Cylinder Pressure, bar		Bar	96.655	100.42	100.56
7	Temperature, K		K	290.51	290.54	290.61
8	Average Exhaust Manifold Gas	RK Diesel	K	605.44	588.88	588.06
9	Air Fuel Equival. Ratio (Lambda) in the Cylinder			1,75	1,75	1,75
10	Opasitas		-	9.8447	8.4249	8.3745
11	PM		g/kwh	0.2279	0.20493	0.20557
12	NOx		Ppm	1905	1852.5	1831.4
13	CO2		g/kwh	789.24	859.75	870.15
14	SO2		g/kwh	0.71040	0.58700	0.51309

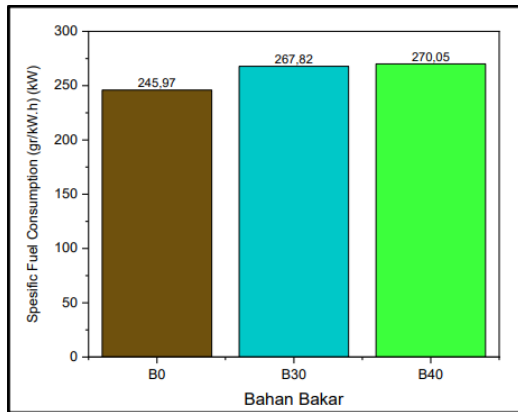
Hasil pengujian daya mesin pada Gambar 2 menunjukkan hasil keluaran daya untuk bahan bakar yang diuji. Daya mesin menurun dengan meningkatnya variasi campuran biodiesel. Sebagai perbandingan, daya keluaran maksimum B0 sekitar 6,8% lebih tinggi dibandingkan bahan bakar campuran B30 dan B40 untuk kondisi operasi mesin yang sama (Ali et al., 2016).



GAMBAR 2. Daya mesin hasil simulasi RK Diesel

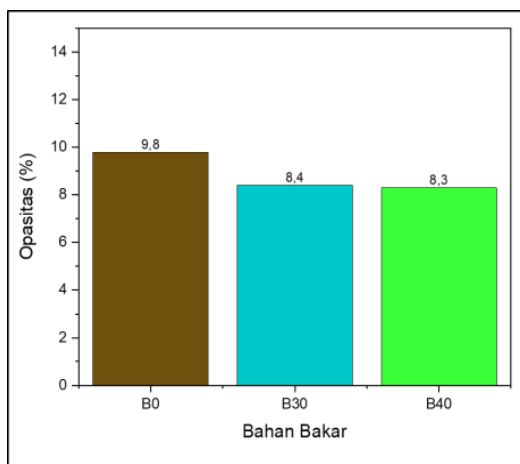
Gambar 3 menunjukkan hasil konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC). Laju aliran bahan bakar diukur berdasarkan volume (l/jam) selama pengujian mesin menggunakan flow meter bahan bakar. Laju aliran massa bahan bakar dihitung menggunakan nilai densitas terukur untuk setiap bahan bakar. Perbedaan BSFC ini dengan minyak solar B0 dan bahan bakar campuran karena nilai kalor yang tinggi dari

B0 dibandingkan dengan bahan bakar campuran, B30 dan B40 (Ali et al., 2016). Oleh karena itu, untuk mempertahankan keluaran daya yang sama, BSFC dari B30 dan B40 akan ditingkatkan.



GAMBAR 3. Hasil simulasi konsumsi bahan bakar spesifik

Hasil uji emisi opasitas seperti yang terlihat pada Gambar 4, menunjukkan adanya penurunan nilai opasitas pada tingkat pencampuran yang lebih tinggi (B30 dan B40). Merujuk pada peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2006 terlihat bahwa batas maksimum opasitas yang diijinkan untuk motor diesel tahun pembuatan dibawah tahun 2010 yaitu 70% HSU. Dengan hasil yang terlihat pada hasil simulasi Diesel RK, opasitas gas buang yang dihasilkan oleh bahan bakar biodiesel B0, B30 dan B40 masih memenuhi syarat maksimum ambang batas.



GAMBAR 4. Hasil emisi opasitas simulasi

### Analisis Keekonomian

Faktor yang mempengaruhi BPP pembangkit yaitu jumlah bahan bakar yang digunakan mesin untuk menghasilkan daya efektif, harga

bahan bakar yang digunakan, berat jenis bahan bakar, dan nilai konsumsi bahan bakar spesifik (SFC). Specific Fuel Consumption (SFC) adalah rasio perbandingan total konsumsi bahan bakar terhadap daya listrik yang dibangkitkan dalam sebuah industri pembangkit listrik, biasanya digunakan sebagai salah satu cara untuk mengetahui seberapa efisien sebuah pembangkit listrik dan untuk memprediksi nilai kalor bahan bakar yang digunakan untuk pembakaran (Partogi, Kusuma, & Astawa, 2018).

TABEL 4. Hasil perhitungan biaya pokok penerimaan (BPP) PLTDG

No	Bahan Bakar	BPP (Rp/kWh)
1	B0	2.638,8
2	B30	2.859,2
3	B40	2.889,5

Jumlah bahan bakar yang dikonsumsi B0 lebih rendah dari pada jumlah bahan bakar yang dikonsumsi B30 dan B40. Penggunaan B0 mempunyai hasil BPP yang paling kecil dibandingkan B30 dan B40 yang disebabkan nilai SFC yang kecil. Berturut turut nilai SFC B0, B30, dan B40 yaitu 0,24497 kg/kWh; 0,26682 kg/kWh; dan 0,27005 kg/kWh.

### KESIMPULAN

1. Penggunaan campuran biodiesel untuk pembangkit listrik tenaga diesel dianalisa dengan menggunakan pemodelan termodinamika melalui simulasi. Dengan melihat nilai karakteristik bahan bakar yang memiliki angka cetana lebih tinggi dan mengandung oksigen yang tinggi dan merupakan salah satu properti penting untuk pembakaran, campuran biodiesel pada pembangkit listrik dapat berfungsi sebagai pengganti pembangkit berbahan bakar tanpa campuran biodiesel pada kondisi operasi rendah.
2. Pembangkit listrik berbahan bakar campuran biodiesel memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan tanpa campuran biodiesel sebagai akibat dari nilai kalor yang lebih rendah, tetapi ada perbaikan khusus dalam hal emisi yang terjadi penurunan pada nilai opasitas dan  $SO_2$ .
3. Analisis ekonomi pada pembangkit yang menggunakan kedua bahan bakar tersebut, memberikan nilai penggunaan B0 yang mempunyai hasil BPP yang paling rendah dibandingkan B30 dan B40 yang

- disebabkan nilai SFC yang rendah berdasarkan hasil simulasi pengujian kinerja. Berturut turut nilai SFC B0, B30, dan B40 yaitu 0,24497 kg/kWh; 0,26682 kg/kWh; dan 0,27005 kg/kWh
4. Berdasarkan permen ESDM No 12 tahun 2015 mengenai pemanfaatan EBT, pembangkit listrik berbahan bakar campuran biodiesel adalah pilihan yang lebih layak untuk pembangkit listrik komersial terutama dari sudut pandang ekonomi, sedangkan kedua bahan bakar menunjukkan tren yang tidak signifikan dari hasil analisis termodinamika. Campuran biodiesel menawarkan lebih banyak manfaat dibandingkan dengan Minyak solar dalam hal dampak terhadap lingkungan, seperti dilihat dari semakin rendahnya nilai emisi yang dihasilkan.
- DAFTAR PUSTAKA
- Ali, O. M., Mamat, R., Abdullah, N. R., & Abdullah, A. A. (2016). Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel–diesel blended fuel. *Renewable Energy*, 86, 59-67.
- Dey, S., Reang, N. M., Das, P. K., & Deb, M. (2021). A comprehensive study on prospects of economy, environment, and efficiency of palm oil biodiesel as a renewable fuel. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124981. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124981>
- Febriansyah, H., Utomo, F. B., & Suminto, S. (2020). *The Readiness of Indonesia to Implement Blended Biodiesel B30*. Paper presented at the E3S Web of Conferences.
- Harahap, F., Silveira, S., & Khatiwada, D. (2019). Cost competitiveness of palm oil biodiesel production in Indonesia. *Energy*, 170, 62-72. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.115>
- Indrawan, N., Thapa, S., Rahman, S. F., Park, J.-H., Park, S.-H., Wijaya, M. E., . . . Park, D.-H. (2017). Palm biodiesel prospect in the Indonesian power sector. *Environmental Technology & Innovation*, 7, 110-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.01.001>
- Nagappan, M., Devaraj, A., M.Babu, J., Vibhav Saxena, N., Prakash, O., Kumar, P., & Sharma, A. (2022). Impact of additives on Combustion, performance and exhaust emission of biodiesel fueled direct injection diesel engine. *Materials Today: Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.114>
- Partogi, M. A., Kusuma, I. G. B. W., & Astawa, K. (2018). Analisa Unjuk Kerja Sistem PLTG di PT Indonesia Power Unit Pembangkitan Bali. *Jurnal METTEK Volume*, 4(1), 16-22.
- Rajak, U., Nashine, P., & Verma, T. N. (2020). Effect of spirulina microalgae biodiesel enriched with diesel fuel on performance and emission characteristics of CI engine. *Fuel*, 268, 117305.
- Santoso, M., Lestiani, D. D., Mukhtar, R., Hamonangan, E., Syafrul, H., Markwitz, A., & Hopke, P. K. (2011). Preliminary study of the sources of ambient air pollution in Serpong, Indonesia. *Atmospheric Pollution Research*, 2(2), 190-196. doi:<https://doi.org/10.5094/APR.2011.024>
- Wirawan, S. S., & Tambunan, A. H. (2006). *The current status and prospects of biodiesel development in Indonesia: A review*. Paper presented at the Presented on the Third Asia Biomass Workshop.
- 
- PENULIS:
- Ahmad Syihan Auzani  
Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik,  
Universitas Indonesia, Depok 16424,  
Indonesia.  
Email: [auzani@ui.ac.id](mailto:auzani@ui.ac.id)
- Yogi Pramudito  
Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik,  
Universitas Indonesia, Depok 16424,  
Indonesia.

**Gerardo Janitra Puriadi Putra**

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik,  
Universitas Indonesia, Depok 16424,  
Indonesia.

**Devin Adiriwanto**

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik,  
Universitas Indonesia, Depok 16424,  
Indonesia.

**Muhammad Burhanuddin Fauzi**

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik,  
Universitas Indonesia, Depok 16424,  
Indonesia.