



Integrasi Metode PPDIOO dan MAFMA untuk Optimalisasi Pulse Width Modulation sebagai Pengganti Darurat *Automatic Voltage Regulator* pada Diesel Generator

Imam Gazali¹, Sukendro Broto Sasongko^{2*}

¹Magister Teknik Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arif Rahman Hakim No. 100 Surabaya, 60117, Indonesia

²Teknik Mesin, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arif Rahman Hakim No. 100 Surabaya, 60117, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Halaman:

112 – 119

Tanggal penyerahan:

8 Juli 2026

Tanggal diterima:

5 Agustus 2026

Tanggal terbit:

30 September 2026

ABSTRACT

Damage to the Automatic Voltage Regulator (AVR) of a diesel generator may cause output Voltage instability and disrupt the continuity of electrical power supply. This study aims to optimize Pulse Width Modulation (PWM) as an emergency AVR substitute through the integration of the Prepare, Plan, Design, Implement, Operate, and Optimize (PPDIOO) framework and Multi-Attribute Failure Mode Analysis (MAFMA). A quantitative experimental approach was applied to a 380 V, 50 Hz, 50 kW, three-phase diesel generator under load variations of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. The results showed that the PWM system maintained generator Voltage between 377 and 380 V, with a maximum Voltage drop of 0.79%. The estimated one-hour reliability reached 96.1%. Risk analysis identified duty-cycle error and sensor noise as dominant failure modes. The integrated approach provides a systematic framework for developing, evaluating, and continuously optimizing an emergency PWM-based excitation control system.

Keywords: automatic voltage regulator, diesel generator, MAFMA, PPDIOO, pulse width modulation.

EMAIL

¹igazliss0101@gmail.com

²sukendro@itats.ac.id*

*) Corresponding Author

ABSTRAK

Kerusakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada diesel generator dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan keluaran dan mengganggu kontinuitas penyediaan energi listrik. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan penggunaan *Pulse Width Modulation* (PWM) sebagai pengganti AVR darurat melalui integrasi metode *Prepare, Plan, Design, Implement, Operate, and Optimize* (PPDIOO) dan *Multi-Attribute Failure Mode Analysis* (MAFMA). Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental pada diesel generator tiga fase berkapasitas 380 V, 50 Hz, dan 50 kW dengan variasi pembebanan 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem PWM mampu mempertahankan tegangan generator pada rentang 377–380 V dengan penurunan maksimum sebesar 0,79%. Reliabilitas untuk periode operasi satu jam diperkirakan sebesar 96,1%. Analisis risiko menunjukkan bahwa kesalahan *duty cycle* dan gangguan sensor merupakan mode kegagalan dominan. Integrasi PPDIOO dan MAFMA memberikan kerangka sistematis untuk pengembangan, evaluasi risiko, dan optimalisasi berkelanjutan sistem PWM sebagai pengganti AVR darurat.

Kata kunci: generator diesel, MAFMA, modulasi lebar pulsa, pengatur tegangan otomatis, PPDIOO,

PENDAHULUAN

Keandalan sistem pembangkit listrik berbasis diesel generator merupakan faktor penting dalam menjamin kontinuitas penyediaan energi, khususnya pada sektor industri, pelayaran, rumah

sakit, dan fasilitas kritis lainnya. Salah satu komponen utama generator sinkron adalah *Automatic Voltage Regulator* (AVR), yang berfungsi mempertahankan kestabilan tegangan keluaran melalui pengendalian arus eksitasi ketika terjadi perubahan beban. Kerusakan AVR dapat menyebabkan tegangan keluaran menjadi tidak stabil, menimbulkan downtime, gangguan operasional, dan risiko kerusakan peralatan listrik [1][2][3]. Dalam kondisi darurat, penggantian AVR sering menghadapi kendala ketersediaan suku cadang, biaya, ketergantungan pada tipe tertentu, serta waktu pengadaan. Oleh karena itu diperlukan alternatif pengendalian yang fleksibel dan cepat diimplementasikan [2][4].

Pulse Width Modulation (PWM) berpotensi digunakan untuk mengendalikan arus eksitasi melalui pengaturan *duty cycle* sehingga tegangan keluaran generator dapat dipertahankan mendekati nilai nominal [1][5][6]. PWM menawarkan respons cepat, fleksibilitas pengaturan, serta kemudahan integrasi dengan mikrokontroler dan sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT)]. Meskipun demikian, penerapan PWM sebagai pengganti AVR darurat tetap menghadapi potensi kegagalan berupa kesalahan *duty cycle*, gangguan pembacaan sensor, kesalahan ADC, ketidakstabilan frekuensi PWM, dan peningkatan temperatur MOSFET [7][8]. Karena itu diperlukan pendekatan yang menggabungkan pengembangan sistem secara terstruktur dengan evaluasi risiko kegagalan.

Penelitian ini mengintegrasikan metode *Prepare, Plan, Design, Implement, Operate, and Optimize* (PPDIOO) dengan *Multi-Attribute Failure Mode Analysis* (MAFMA). PPDIOO digunakan sebagai kerangka siklus hidup pengembangan sistem, sedangkan MAFMA digunakan untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan mode kegagalan berdasarkan *severity, occurrence, detection, cost, safety, dan efficiency*. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi lifecycle engineering berbasis PPDIOO dan analisis risiko multiatribut untuk optimalisasi PWM sebagai pengganti AVR darurat. Tujuan penelitian adalah mengembangkan dan mengevaluasi sistem PWM sebagai alternatif pengganti AVR pada kondisi darurat serta menentukan strategi optimalisasi melalui integrasi PPDIOO, FTA, dan MAFMA untuk meningkatkan keandalan, keselamatan, dan kesiapan operasional diesel generator

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif dan eksperimental. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fakultas Vokasi Pelayaran Universitas Hang Tuah Surabaya menggunakan generator sinkron tiga fase 380 V, 50 Hz, 50 kW, dan 95 A dengan sistem PWM berbasis mikrokontroler sebagai pengganti AVR darurat. Pengujian dilakukan pada variasi beban 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% menggunakan load bank statis.

Alur penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur, perancangan dan pembuatan alat, pengujian fungsi, pengambilan data, analisis perbandingan performa, analisis Fault Tree Analysis (FTA), penilaian risiko MAFMA, serta penyusunan strategi optimalisasi.

Tahapan PPDIOO

1. *Prepare*: Identifikasi kebutuhan sistem, kondisi eksisting generator, kerusakan AVR, karakteristik generator, tegangan nominal, arus eksitasi, dan pola perubahan beban.
2. *Plan*: Penentuan metode kontrol PWM, pemilihan mikrokontroler, desain sensor tegangan, MOSFET driver, serta strategi pengaturan *duty cycle*.
3. *Design*: Perancangan perangkat keras dan perangkat lunak yang meliputi mikrokontroler, sensor tegangan, MOSFET driver, modul PWM, display monitoring, serta safety device berbasis IoT.
4. *Implement*: Pemasangan sistem PWM pada sistem eksitasi generator, integrasi sensor monitoring, konfigurasi alarm/shutdown, dan pengujian pada variasi pembebanan.
5. *Operate*: Pengujian generator pada beban 0–100% dengan parameter tegangan, arus, temperatur, frekuensi, konsumsi bahan bakar, reliabilitas, dan performa safety device.
6. *Optimize*: Analisis FTA dan MAFMA untuk menentukan prioritas risiko dan strategi mitigasi berupa tuning PWM, filtering sensor, kalibrasi ADC, dan peningkatan pendinginan [9].

Metode MAFMA dan FTA

MAFMA digunakan untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan potensi kegagalan berdasarkan atribut *severity, occurrence, detection, cost, safety, dan efficiency* [10][11]. FTA digunakan untuk menguraikan *top event* berupa kegagalan sistem PWM menjadi *basic event* yang berpotensi menyebabkan gangguan. Mode kegagalan yang dianalisis meliputi sensor *noise*, ADC *error*, *duty cycle error*, ketidakstabilan frekuensi PWM, dan MOSFET *overheating* [11][13][14].

HASIL DAN PEMBAHASAN**Stabilitas Tegangan Generator**

Berdasarkan Tabel 1, peningkatan beban generator dari 0% hingga 100% diikuti oleh kenaikan arus dari 0 A menjadi 95 A. Pada beban 25%, 50%, 75%, dan 100%, arus yang terukur masing-masing sebesar 23,75 A, 47,75 A, 71,25 A, dan 95 A, sehingga menunjukkan kecenderungan peningkatan arus yang relatif proporsional terhadap kenaikan beban. Sebaliknya, tegangan keluaran generator hanya mengalami penurunan bertahap dari 380 V pada kondisi tanpa beban menjadi 377 V pada beban penuh. Penurunan maksimum sebesar 3 V atau sekitar 0,79% terhadap tegangan nominal 380 V menunjukkan bahwa sistem PWM masih mampu mempertahankan tegangan keluaran pada rentang yang relatif stabil selama perubahan pembebanan. Pada beban 50–75%, tegangan bahkan tetap berada pada 378 V, yang mengindikasikan bahwa perubahan beban pada rentang tersebut tidak menghasilkan fluktuasi tegangan yang signifikan.

Apabila batas toleransi tegangan yang digunakan dalam penelitian adalah, misalnya, $\pm 5\%$ dari tegangan nominal, maka rentang tegangan yang masih dapat diterima berada pada sekitar 361–399 V. Dengan demikian, seluruh hasil pengujian sebesar 377–380 V masih berada jauh di dalam batas tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan PWM sebagai pengganti darurat *Automatic Voltage Regulator* mampu memberikan fungsi regulasi tegangan yang memadai pada kondisi pembebanan yang diuji. Namun, untuk menyatakan bahwa performanya setara dengan AVR konvensional, diperlukan pengujian pembandingan langsung menggunakan AVR pada kondisi beban dan durasi operasi yang sama.

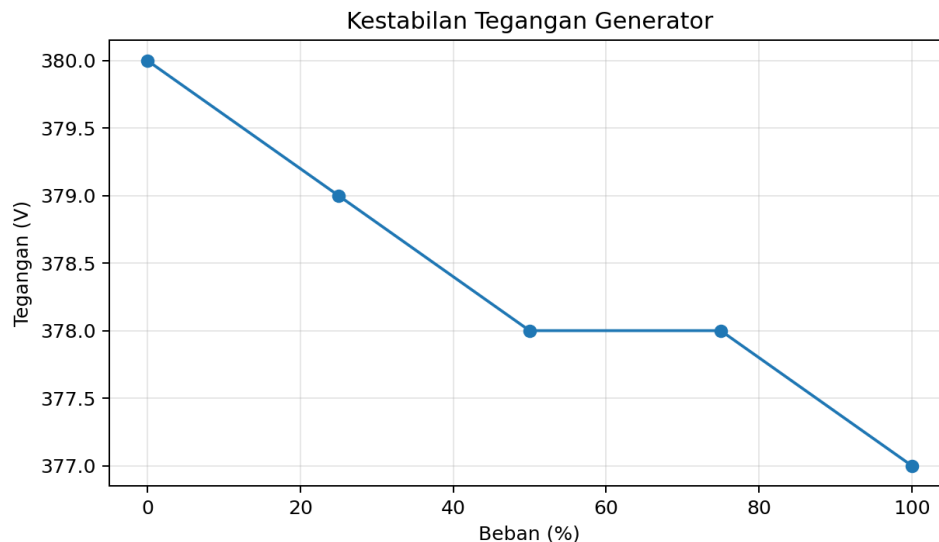
Tabel 1. Tabel Hasil Pengujian PWM

No.	Waktu operasi	Beban (%)	Arus (A)	Tegangan (V)
1	1jam	0	0	380
2	1jam	25	23,75	379
3	1jam	50	47,75	378
4	1jam	75	71,25	378
5	1jam	100	95	377

Pada Gambar 1 menunjukkan hubungan antara peningkatan beban generator dan tegangan keluaran ketika sistem PWM digunakan sebagai pengatur tegangan. Secara umum, tegangan menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan peningkatan beban. Pada kondisi tanpa beban, tegangan tercatat sebesar 380 V, kemudian turun menjadi 379 V pada beban 25% dan 378 V pada beban 50%. Tegangan selanjutnya relatif konstan sebesar 378 V pada beban 75%, sebelum kembali turun menjadi 377 V pada kondisi beban penuh. Dengan demikian, peningkatan beban dari 0% hingga 100% hanya menghasilkan penurunan tegangan sebesar 3 V atau sekitar 0,79% terhadap tegangan nominal 380 V.

Pola pada Gambar 1 menunjukkan bahwa sistem PWM mampu memberikan kompensasi terhadap perubahan beban sehingga penurunan tegangan dapat dipertahankan relatif kecil. Kondisi tegangan yang tetap sebesar 378 V pada rentang beban 50–75% juga mengindikasikan bahwa sistem dapat mempertahankan keluaran tegangan meskipun terjadi peningkatan pembebanan pada rentang tersebut. Penurunan menjadi 377 V pada beban 100% menunjukkan adanya pengaruh peningkatan kebutuhan arus terhadap tegangan terminal generator, tetapi besar penurunannya masih terbatas dibandingkan tegangan nominal.

Hasil tersebut memberikan indikasi bahwa sistem PWM berpotensi digunakan sebagai alternatif pengaturan tegangan dalam kondisi darurat ketika AVR tidak dapat beroperasi. Namun, hasil pada Gambar 1 terutama menggambarkan karakteristik regulasi pada kondisi beban tunak (*steady-state*). Oleh karena itu, kemampuan sistem belum dapat dinilai hanya berdasarkan kestabilan tegangan ini. Evaluasi lebih lanjut terhadap durasi operasi, temperatur komponen, kestabilan sinyal PWM, serta respons terhadap perubahan beban diperlukan untuk menentukan reliabilitas sistem ketika digunakan dalam periode operasi yang lebih panjang.



Gambar 1. Grafik Kestabilan Tegangan Generator

Reliabilitas Sistem PWM

Reliabilitas dianalisis menggunakan fungsi eksponensial [4][5] :

$$R(t) = e^{(-\lambda t)} \dots\dots(1)$$

dengan keterangan sebagai berikut:

$R(t)$ sebagai probabilitas sistem tetap bekerja, λ sebagai laju kegagalan, dan t sebagai waktu operasi. Berdasarkan satu kejadian kegagalan selama total waktu operasi 25 jam diperoleh $\lambda = 1/25 = 0,04$ kegagalan/jam. Dengan demikian, reliabilitas untuk periode operasi satu jam adalah $R(1) = e^{(-0,04 \times 1)} = 0,961$ atau 96,1%. Nilai ini harus ditafsirkan sebagai estimasi reliabilitas untuk interval satu jam dengan asumsi laju kegagalan konstan.

Mean Time Between Failure (MTBF)

MTBF digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu operasi system sebelum mengalami kegagalan. Persamaan MTBF sebagai berikut:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots(2)$$

$$MTBF = \frac{1}{0,04} = 25 \text{ jam}$$

Nilai MTBF sebesar 25 jam menunjukkan bahwa *system* PWM mampu bekerja dalam rentang operasi yang cukup baik sebelum muncul kemungkinan kegagalan. Hal ini menunjukkan bahwa *system* PWM layak dijadikan pengganti AVR darurat khususnya pada kondisi emergency operation.

Analisis Statistik Keandalan PWM Berdasarkan Data Pengujian

1. Analisis statistik berdasarkan deviasi tegangan PWM:

$$\text{Deviasi} = \frac{380 - 377}{380} \times 100\% = 0,79\%$$

Karena hasil deviasi menunjukkan bahwa penyimpangan tegangan maksimum hanya sebesar 0,79% jauh dibawah batas toleransi generator sebesar $< 5\%$. Dengan demikian dapat dinyatakan bahawa PWM mampu mempertahankan kestabilan tegangan keluaran generator secara efektif.

2. Standar deviasi tegangan Perhitungan kestabilan tegangan :

Data PWM : 379 V, 379 V, 378 V, 378 V, 377 V

Mean : $\bar{x} = 378,2$ V dengan nilai deviasi sangat kecil menunjukkan bahwa system PWM stabil.

Nilai standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa system PWM memiliki konsistensi pengaturan tegangan yang baik pada perubahan beban 0 – 100%.

Temperatur Sistem PWM

Berdasarkan Tabel 2, peningkatan beban generator diikuti oleh kenaikan temperatur pada generator maupun sistem PWM. Temperatur generator meningkat dari 40 °C pada kondisi tanpa beban menjadi 48 °C pada beban 100%, atau mengalami kenaikan sebesar 8 °C. Peningkatan temperatur generator relatif moderat; temperatur tetap sebesar 40 °C hingga beban 25%, kemudian meningkat menjadi 45 °C pada beban 50–75%, dan mencapai 48 °C pada beban penuh. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan memberikan pengaruh terhadap kondisi termal generator, meskipun perubahan temperaturnya relatif lebih kecil dibandingkan dengan sistem PWM.

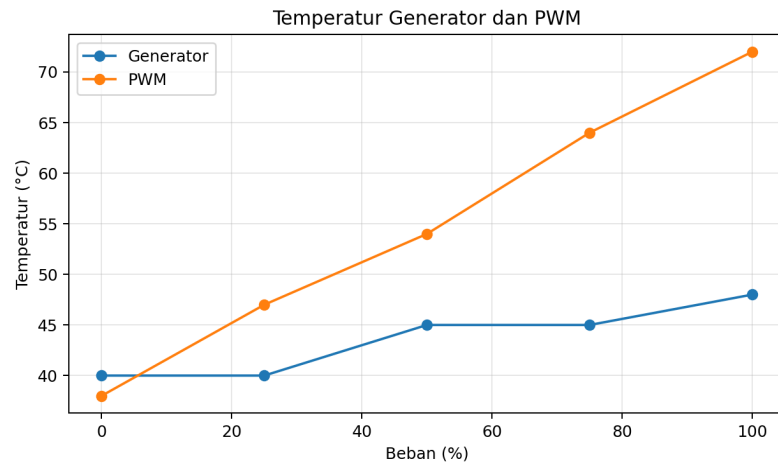
Tabel 2 Tabel Temperatur Hasil Pengujian PWM dan Generator

No.	Beban (%)	Generator (°C)	PWM (°C)
1	0	40	38
2	25	40	47
3	50	45	54
4	75	45	64
5	100	48	72

Sebaliknya, temperatur sistem PWM menunjukkan peningkatan yang lebih signifikan. Temperatur PWM meningkat dari 38 °C pada kondisi tanpa beban menjadi 47 °C, 54 °C, 64 °C, dan 72 °C masing-masing pada beban 25%, 50%, 75%, dan 100%. Secara keseluruhan terjadi kenaikan sebesar 34 °C dari kondisi tanpa beban hingga beban penuh. Pada beban 100%, temperatur PWM mencapai 72 °C atau 24 °C lebih tinggi dibandingkan temperatur generator. Kenaikan temperatur tersebut menunjukkan bahwa peningkatan arus akibat bertambahnya beban memberikan beban termal yang lebih besar pada rangkaian PWM, terutama pada komponen switching daya. Secara umum, peningkatan rugi konduksi dan rugi switching pada komponen semikonduktor seiring peningkatan arus dapat berkontribusi terhadap kenaikan temperatur sistem.

Gambar 2 memperjelas perbedaan karakteristik termal antara generator dan PWM. Kurva temperatur generator memiliki kemiringan yang relatif landai, sedangkan temperatur PWM meningkat secara lebih konsisten dan tajam seiring bertambahnya beban. Pada kondisi tanpa beban, temperatur PWM bahkan sedikit lebih rendah daripada generator, yaitu 38 °C dibandingkan 40 °C. Namun, mulai beban 25%, temperatur PWM melampaui temperatur generator dan selisih keduanya semakin besar seiring peningkatan beban. Selisih temperatur meningkat dari 7 °C pada beban 25% menjadi 9 °C pada beban 50%, 19 °C pada beban 75%, dan 24 °C pada beban 100%. Pola tersebut menunjukkan bahwa aspek termal pada rangkaian PWM menjadi faktor yang semakin dominan ketika sistem dioperasikan pada beban tinggi.

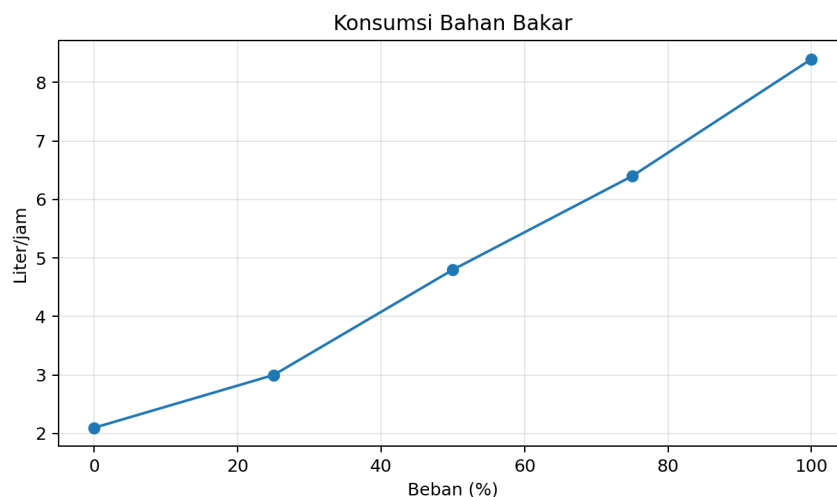
Meskipun sistem PWM pada pengujian sebelumnya mampu mempertahankan tegangan generator pada rentang 377–380 V, hasil pengujian temperatur menunjukkan adanya konsekuensi termal ketika beban meningkat. Oleh karena itu, penerapan PWM sebagai pengganti darurat *Automatic Voltage Regulator* perlu mempertimbangkan kapasitas *heat sink*, sistem pendinginan, rating temperatur MOSFET, serta durasi operasi. Nilai maksimum 72 °C belum dapat langsung dikategorikan aman atau tidak aman tanpa dibandingkan dengan batas temperatur kerja komponen yang digunakan. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi hingga beban penuh pada kondisi pengujian, tetapi manajemen termal menjadi parameter penting dalam menentukan reliabilitas penggunaan PWM untuk operasi yang lebih lama.



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Temperatur Generator dan PWM

Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar meningkat seiring bertambahnya beban generator seperti pada Gambar 3. Pada kondisi tanpa beban konsumsi tercatat 2,1 liter/jam dan pada beban 100% mencapai 8,4 liter/jam. Karena naskah belum menyajikan kelompok pembanding AVR konvensional pada kondisi identik, hasil ini tidak digunakan untuk menyimpulkan bahwa PWM secara signifikan lebih hemat atau setara terhadap AVR; kesimpulan dibatasi pada pola konsumsi selama pengoperasian dengan PWM.



Gambar 3. Gambar Grafik Konsumsi

Analisis Fault Tree Analysis

Tabel 2. Tabel Probabilitas (Kegagalan)

No.	Basic Event	Probabilitas
1	Sensor noise	0,03
2	ADC error	0,02
3	Duty cycle error	0,04
4	Ketidakstabilan frekuensi PWM	0,03
5	MOSFET overheating	0,02

Pada Tabel 2 *Duty cycle error* mempunyai probabilitas individual tertinggi (0,04) dan menjadi penyebab dominan yang memerlukan prioritas mitigasi. *Sensor noise* juga penting karena

dapat menyebabkan pembacaan tegangan tidak akurat dan memengaruhi respons kontrol PWM. Mitigasi diarahkan pada tuning parameter PWM, filtering sensor, dan kalibrasi ADC.

Analisis Risiko MAFMA

Hasil MAFMA pada Tabel 3 menunjukkan bahwa PWM *error* atau *duty cycle error* memiliki tingkat risiko sangat tinggi, sensor *noise* berkategori tinggi, dan MOSFET *overheating* berkategori sedang. Strategi optimasi meliputi tuning parameter PWM, kontrol adaptif, peningkatan akurasi sensor, *filtering*, kalibrasi ADC, dan peningkatan sistem pendinginan.

Tabel 3. Tabel *Analysis* Risiko

<i>Failure mode</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>Safety</i>	<i>Efficiency</i>	Tingkat Risiko
Sensor <i>Noise</i>	8	7	5	6	5	Tinggi
Mosfet Panas	7	5	4	7	6	Sedang
PWM <i>Error</i>	9	6	6	8	7	Sangat Tinggi

Integrasi PPDIOO dan MAFMA dalam Optimalisasi PWM

Integrasi PPDIOO dan MAFMA memberikan pendekatan sistematis dari identifikasi kebutuhan hingga perbaikan berkelanjutan. *Prepare* dan *Plan* mengidentifikasi kebutuhan dan parameter kontrol; *Design* dan *Implement* berfokus pada perangkat PWM, sensor, serta keselamatan berbasis IoT; *Operate* mengevaluasi performa berdasarkan pengujian pembebanan; sedangkan *Optimize* menggunakan hasil FTA dan MAFMA untuk menentukan prioritas perbaikan. Dengan demikian, optimasi tidak hanya bergantung pada desain awal, tetapi juga pada evaluasi risiko dan peningkatan berkelanjutan.

Pengujian Berulang

Tabel 4. Tabel Pengujian Berulang – Ulang

No.	Beban (%)	Uji 1		Uji 2		Uji 3		Uji 4		Uji 5	
		Volt	Amp	Volt	Amp	Volt	Amp	Volt	Amp	Volt	Amp
1	0	380	0	380	0	380	0	380	0	380	0
2	25	379	23,75	379	23,75	379	23,75	379	23,75	379	23,75
3	50	378	47,75	378	47,75	378	47,75	378	47,75	378	47,75
4	75	378	71,25	378	71,25	378	71,25	378	71,25	378	71,25
5	100	377	95	377	95	377	95	377	95	377	95

Pengujian berulang pada Tabel 4 menunjukkan hasil yang relatif konsisten. Pada beban 0% - 100%, dua pengujian menghasilkan 378 V, satu pengujian 379 V dan 377 V. Konsistensi ini mendukung kemampuan sistem PWM dalam mempertahankan eksitasi pada variasi pembebanan.

KESIMPULAN

Integrasi metode PPDIOO dan MAFMA memberikan pendekatan sistematis dalam pengembangan dan optimalisasi sistem PWM sebagai pengganti AVR darurat pada diesel generator. Sistem PWM mampu mempertahankan tegangan keluaran pada rentang 377–380 V untuk variasi beban 0–100%, dengan penurunan maksimum 0,79% terhadap tegangan nominal 380 V. Berdasarkan model eksponensial dengan satu kejadian kegagalan selama 25 jam operasi, reliabilitas sistem untuk periode satu jam diperkirakan sebesar 96,1%. Analisis FTA dan MAFMA menunjukkan bahwa kesalahan *duty cycle* dan sensor *noise* merupakan mode kegagalan dominan sehingga optimalisasi perlu difokuskan pada tuning parameter PWM, filtering sensor, kalibrasi ADC, peningkatan pendinginan MOSFET, serta pengembangan monitoring berbasis IoT. Sistem PWM menunjukkan potensi sebagai alternatif pengendali eksitasi pada kondisi darurat ketika AVR utama mengalami gangguan, namun pengujian lanjutan dengan durasi lebih panjang, beban dinamis, kelompok pembanding AVR konvensional, dan validasi sistem proteksi diperlukan sebelum penerapan operasional yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. K. M. D. Panggabean, H. Gunawan, and M. E. Dalimunthe, "PID controller system analysis on Automatic Voltage Regulator (AVR) for regulating excitation voltage of a 3-

- phase synchronous generator,” *Jurnal Multidisiplin Sahombu*, vol. 5, no. 4, pp. 1041–1050, 2025.
- [2] Q. Long, H. Yu, F. Xie, N. Lu, and D. Lubkeman, “Diesel generator model parameterization for microgrid simulation using hybrid box-constrained Levenberg–Marquardt algorithm,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 943–952, 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3026617.
 - [3] N. D. Chetty, G. Sharma, R. Gandhi, A. V. Sant, P. N. Bokoro, and R. Kumar, “A review of automatic voltage regulation methods for synchronous generator control,” *Electricity*, vol. 7, no. 1, Art. no. 18, 2026, doi: 10.3390/electricity7010018.
 - [4] J. Marqusee and D. Jenket, “Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions,” *Appl. Energy*, vol. 268, Art. no. 114918, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114918.
 - [5] A. Ruiz-González, J.-R. Heredia-Larrubia, F. M. Pérez-Hidalgo, and M. J. Meco-Gutiérrez, “Discontinuous PWM strategy with frequency modulation for vibration reduction in asynchronous machines,” *Machines*, vol. 11, no. 7, Art. no. 705, 2023, doi: 10.3390/machines11070705.
 - [6] A. Ruiz-González, J.-R. Heredia-Larrubia, M. J. Meco-Gutiérrez, and F.-M. Pérez-Hidalgo, “Pulse-width modulation technique with harmonic injection in the modulating wave and discontinuous frequency modulation for the carrier wave for multilevel inverters: An application to the reduction of acoustic noise in induction motors,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 40579–40590, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3269593.
 - [7] W. J. de Paula, G. H. M. Tavares, G. M. Soares, P. S. Almeida, and H. A. C. Braga, “Switching losses prediction methods oriented to power MOSFETs—A review,” *IET Power Electron.*, vol. 13, no. 14, pp. 2960–2970, 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2019.1003.
 - [8] C. Morel and J.-Y. Morel, “Power semiconductor junction temperature and lifetime estimations: A review,” *Energies*, vol. 17, no. 18, Art. no. 4589, 2024, doi: 10.3390/en17184589.
 - [9] A. Purwanto and B. Soewito, “Optimization problem of computer network using PPDIOO,” *ICIC Express Letters*, vol. 15, no. 7, pp. 769–777, 2021, doi: 10.24507/icicel.15.07.769.
 - [10] M. Braglia, “MAFMA: Multi-attribute failure mode analysis,” *Int. J. Qual. Reliab. Manage.*, vol. 17, no. 9, pp. 1017–1033, 2000, doi: 10.1108/02656710010353885.
 - [11] J. F. W. Peeters, R. J. I. Basten, and T. Tinga, “Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 172, pp. 36–44, 2018, doi: 10.1016/j.res.2017.11.024.
 - [12] A. Aleksić, D. Tadić, N. Komatina, and S. Nestić, “Failure mode and effects analysis integrated with multi-attribute decision-making methods under uncertainty: A systematic literature review,” *Mathematics*, vol. 13, no. 13, Art. no. 2216, 2025, doi: 10.3390/math13132216.
 - [13] R. I. Yaqin, Z. Z. Zamri, J. P. Siahaan, Y. E. Priharanto, M. S. Alirejo, and M. L. Umar, “FMEA approach in risk analysis of main engine fuel system maintenance: Case study on KM Sidomulyo,” *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, vol. 9, no. 3, pp. 189–200, 2020, doi: 10.26593/jrsi.v9i3.4075.189-200.
 - [14] E. Sulistyowati and Lukmandono, “Usulan perbaikan efektivitas mesin GDX2-NV dan C-600 melalui Fault Tree Analysis,” *Jurnal SENOPATI: Sustainability, Ergonomics, Optimization, and Application of Industrial Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 58–65, 2021, doi: 10.31284/j.senopati.2021.v2i2.1204.
 - [15] A. Żyłuk, M. Zieja, N. Grzesik, J. Tomaszewska, G. Kozłowski, and M. Jasztal, “Implementation of the mean time to failure indicator in the control of the logistical support of the operation process,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 7, Art. no. 4608, 2023, doi: 10.3390/app13074608