

**ANALISA OPERASI PENGUJIAN KARAKTERISTIK PEMBEBANAN
DC SHUNT MOTOR BERBASIS HMI TERHADAP PERUBAHAN
PEMBEBANAN GENERATOR DC**

Andino Wawolangi¹, Syalomita Via Irenly Kapoh², I Wayan Dika Ariana³, Samsu
Tuwongkesong⁴, Tjerie Pangemanan⁵

^{1,2,3,4,5}Politeknik Negeri Manado

[¹Wawolangi04@gmail.com](mailto:Wawolangi04@gmail.com), [²syalomitakapoh6@gmail.com](mailto:syalomitakapoh6@gmail.com),
[³wayanariana055@gmail.com](mailto:wayanariana055@gmail.com), [⁴samsu@elektro.polimdo.ac.id](mailto:samsu@elektro.polimdo.ac.id),
[⁵tjerie.pangemanan@polimdo.ac.id](mailto:tjerie.pangemanan@polimdo.ac.id)

ABSTRACT

This study reports the design and implementation of an HMI-based monitoring system for the characteristic testing of a DC motor-generator set at the Energy Conversion Laboratory of Politeknik Negeri Manado. The system uses a PZEM-017 DC sensor, Omron CP1E-N30DT PLC (programmed in CX-Programmer), and Omron NB7W-TW01B HMI (designed in NB-Designer), with Modbus RTU RS485 (9600 bps) as the communication protocol. The load consists of six incandescent lamps rated 60 W each, switched individually through solid state relays controlled by the PLC. Testing was conducted under seven conditions: no-load and one to six lamps active. Voltage, current, and power were measured simultaneously by the digital sensor and a reference analog multimeter, while motor speed was recorded with a tachometer. As the load increased from zero to six lamps, the digital voltage dropped from 173 V to 137 V, the digital current rose from 0.63 A to 1.23 A, and the motor speed decreased from 1,992 RPM to 1,709 RPM. The measured speed regulation was 16.56%, while the voltage regulation reached 26.28% (digital) and 25.00% (analog). Verification between calculated power ($V \times I$) and the displayed power on the PZEM-017 produced an average error of only 0.91%, with two of the seven test points showing zero error. The HMI-based monitoring system proved capable of acquiring and displaying motor-generator parameters in real time with accuracy comparable to conventional analog instruments.

Keywords: DC Shunt Motor, DC Generator, HMI Omron, PZEM-017, Lamp Load, Modbus RTU

ABSTRAK

Penelitian ini melaporkan perancangan dan implementasi sistem monitoring berbasis HMI untuk pengujian karakteristik set motor-generator DC di Laboratorium Konversi Energi Politeknik Negeri Manado. Sistem menggunakan sensor PZEM-017 DC, PLC Omron CP1E-N30DT (diprogram dengan CX-Programmer), dan HMI Omron NB7W-TW01B (dirancang dengan NB-Designer), dengan protokol komunikasi Modbus RTU RS485 pada kecepatan 9.600 bps. Beban berupa enam lampu pijar 60 W yang diaktifkan satu per satu melalui solid state relay yang dikendalikan oleh PLC. Pengujian dilakukan pada tujuh kondisi: tanpa lampu dan satu hingga enam lampu aktif. Tegangan, arus, dan daya diukur secara bersamaan oleh sensor digital dan multimeter analog referensi, sedangkan kecepatan putar motor dicatat menggunakan tachometer. Seiring bertambahnya beban dari nol hingga enam lampu, tegangan digital turun dari 173 V menjadi 137 V, arus digital

naik dari 0,63 A menjadi 1,23 A, dan kecepatan motor turun dari 1.992 RPM menjadi 1.709 RPM. Regulasi kecepatan terukur sebesar 16,56%, sedangkan regulasi tegangan mencapai 26,28% (digital) dan 25,00% (analog). Verifikasi antara daya hasil perhitungan ($V \times I$) dengan daya terbaca pada PZEM-017 menghasilkan error rata-rata sebesar 0,91%, dengan dua dari tujuh titik pengujian menunjukkan error nol. Sistem monitoring berbasis HMI terbukti mampu mengakuisisi dan menampilkan parameter motor-generator secara real-time dengan akurasi sebanding dengan instrumen analog konvensional.

Kata Kunci: Motor DC Shunt, Generator DC, HMI Omron, PZEM-017, Beban Lampu, Modbus RTU

A. Pendahuluan

Motor DC shunt adalah salah satu jenis mesin listrik arus searah yang banyak digunakan sebagai penggerak pada sistem industri. Karakter utama motor ini adalah kemampuan mempertahankan kecepatan putar yang relatif stabil ketika beban mekanis pada poros berubah. Sifat ini muncul karena kumparan medan tersambung paralel dengan jangkar, sehingga fluks medan tetap hampir konstan pada rentang operasi normal (Chapman, 2012; Fitzgerald et al., 2003).

Di laboratorium konversi energi, motor DC shunt umumnya dipasangkan dengan generator DC untuk membentuk satu unit motor-generator. Konfigurasi ini menjadi sarana standar untuk mempelajari karakteristik elektrik dan mekanis kedua mesin sekaligus, terutama pada pendidikan tinggi vokasi bidang teknik listrik (Sen, 1996; Wildi, 2006).

Kendala utama yang sering ditemui dalam pengujian laboratorium adalah metode pengukuran yang masih manual. Instrumen analog dibaca satu per satu lalu dicatat ke buku praktikum, sehingga rentan terhadap human error dan kurang efektif merekam perubahan parameter yang berlangsung cepat (Nagrath & Kothari, 2010). Sistem berbasis Human Machine Interface (HMI) menawarkan solusi dengan mengintegrasikan sensor, pengolahan data PLC, dan tampilan visual secara real-time dalam satu platform tunggal (Hughes & Drury, 2013).

Sensor PZEM-017 DC dipilih karena mendukung komunikasi Modbus RTU melalui antarmuka RS485, sehingga kompatibel langsung dengan PLC industri. Spesifikasi akurasi sensor sebesar $\pm 1\%$ menjadikannya pilihan ekonomis untuk pengukuran tegangan dan arus

DC pada skala laboratorium (PZEM-017 Datasheet, 2019). Penelitian ini bertujuan: (1) merancang sistem monitoring berbasis PLC dan HMI yang dapat mengakuisisi dan menampilkan parameter operasional motor-generator DC secara real-time; (2) menganalisis karakteristik tegangan, arus, daya, dan kecepatan motor terhadap variasi pembebanan menggunakan lampu pijar 60 W; serta (3) memverifikasi konsistensi hasil pengukuran sensor PZEM-017 melalui perbandingan dengan multimeter analog dan perhitungan manual daya ($V \times I$).

B. Metode Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental kuantitatif. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi, Distribusi, dan Proteksi Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, selama empat bulan (Maret–Juni 2026).

1. Alat dan Bahan Penelitian

Komponen utama sistem monitoring meliputi: HMI Omron NB7W-TW01B (layar sentuh 7 inci, resolusi 800×480 piksel), PLC Omron CP1E-N30DT (port RS232C dan RS485 terintegrasi), dan sensor PZEM-017 DC (rentang tegangan

6,5–300 V DC; rentang arus 0–300 A via shunt 100 A / 75 mV; akurasi $\pm 1\%$). Komponen daya meliputi motor DC shunt, generator DC shunt, enam unit Solid State Relay (SSR) DC, MCB 2P 6 A, MCB DC 6 A, dan catu daya DC. Beban pengujian berupa enam buah lampu pijar dengan rating 60 W per lampu, dipasang paralel pada sisi keluaran generator. Setiap lampu dapat diaktifkan secara independen melalui SSR yang dikendalikan oleh PLC. Untuk validasi pembacaan digital, digunakan multimeter analog sebagai instrumen referensi dan tachometer optik untuk pengukuran kecepatan motor.

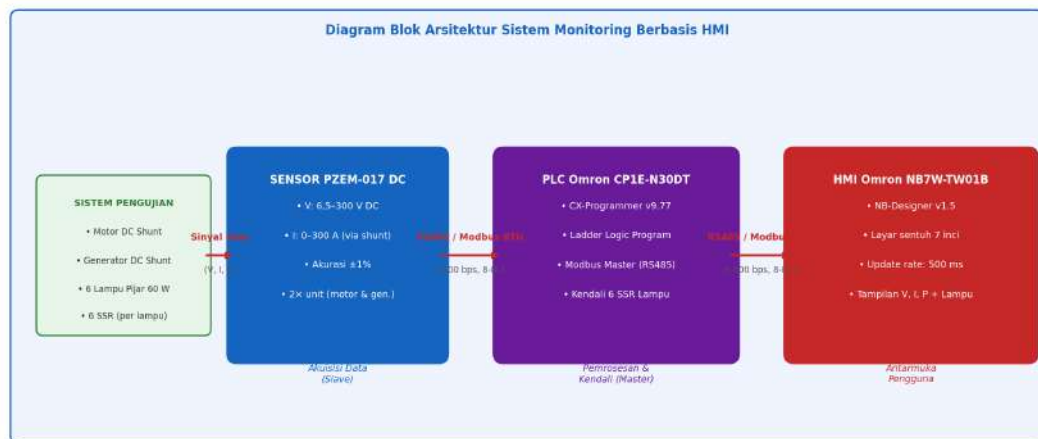
2. Software dan Protokol Komunikasi Sistem

Sistem dibangun dengan dua perangkat lunak utama dari Omron. CX-Programmer versi 9.77 digunakan untuk memprogram PLC CP1E menggunakan diagram ladder. Program PLC mencakup konfigurasi komunikasi serial, pemetaan alamat Modbus dari sensor PZEM-017, penyalinan data ke area memori Data Memory (DM) yang diakses oleh HMI, serta logika pengendalian enam SSR untuk menyalakan dan mematikan setiap lampu (Omron, 2019). NB-Designer

versi 1.5 digunakan untuk merancang antarmuka HMI, mencakup tampilan numerik tegangan, arus, dan daya, indikator status enam lampu, serta tombol kendali on/off untuk masing-masing lampu (Omron, 2020).

Protokol komunikasi data antarperangkat menggunakan Modbus RTU melalui antarmuka fisik RS485 half-duplex. Parameter komunikasi antara sensor PZEM-017 dan PLC ditetapkan pada 9.600 baud,

8 bit data, 1 bit stop, tanpa paritas (9600-8-N-1) sesuai spesifikasi default sensor (PZEM-017 Datasheet, 2019). PLC bertindak sebagai Modbus Master yang mengirimkan kode fungsi 0x04 (Read Input Registers) ke sensor setiap 500 ms, kemudian meneruskan data ke HMI melalui port RS485 kedua dengan parameter yang sama (Modbus Organization, 2012). Arsitektur komunikasi sistem secara keseluruhan diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Arsitektur Komunikasi Sistem Monitoring HMI
Sumber: Penulis, 2026

3. Rancangan Sistem Monitoring dan Persamaan Pengukuran

Arsitektur sistem terdiri dari tiga lapisan: (a) lapisan akuisisi data oleh sensor PZEM-017 yang membaca tegangan dan arus pada sisi generator; (b) lapisan pengolahan

oleh PLC Omron CP1E yang juga menjalankan logika pengendalian beban; dan (c) lapisan visualisasi real-time pada HMI Omron NB7W.

Sensor PZEM-017 mengukur arus berdasarkan tegangan jatuh pada shunt eksternal yang terhubung

4. Prosedur Pengujian dan Analisis Data

Pengujian dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah no-load test, yaitu mengoperasikan motor-generator tanpa lampu aktif untuk memperoleh kondisi awal sistem. Tahap kedua adalah load test, di mana lampu diaktifkan satu per satu melalui HMI sehingga terbentuk tujuh kondisi pengujian: tanpa lampu, lampu 1, lampu 2, sampai lampu 6. Untuk setiap kondisi, sistem dibiarkan selama beberapa menit agar mencapai keadaan tunak (steady-state) sebelum data dicatat. Parameter yang dicatat pada setiap kondisi meliputi tegangan digital (V Digital, dari PZEM-017), tegangan analog (V Analog, dari multimeter), arus digital (I Digital), arus analog (I Analog), daya (P, dari PZEM-017), dan kecepatan motor (n, dari tachometer optik).

Validasi pembacaan sensor PZEM-017 dilakukan melalui dua pendekatan. Pertama, membandingkan pembacaan tegangan dan arus digital terhadap multimeter analog pada titik pengukuran yang sama. Kedua, memverifikasi konsistensi internal sensor dengan membandingkan hasil

perhitungan daya ($V \times I$) terhadap daya yang tampil pada HMI. Persentase error pengukuran daya dihitung dengan Persamaan (3):

$$\% Error = \frac{P_{calc} - P_{test}}{P_{test}} \times 100\% \quad (3)$$

Regulasi kecepatan motor (Speed Regulation) dan regulasi tegangan generator (Voltage Regulation) dihitung secara berturut-turut dengan Persamaan (4) dan (5):

$$SR = \frac{n_{NL} - n_{FL}}{n_{FL}} \times 100\% \quad (4)$$

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (5)$$

Resistansi ekuivalen total beban dihitung melalui Persamaan (6):

$$R_L = \frac{V}{I} \quad (6)$$

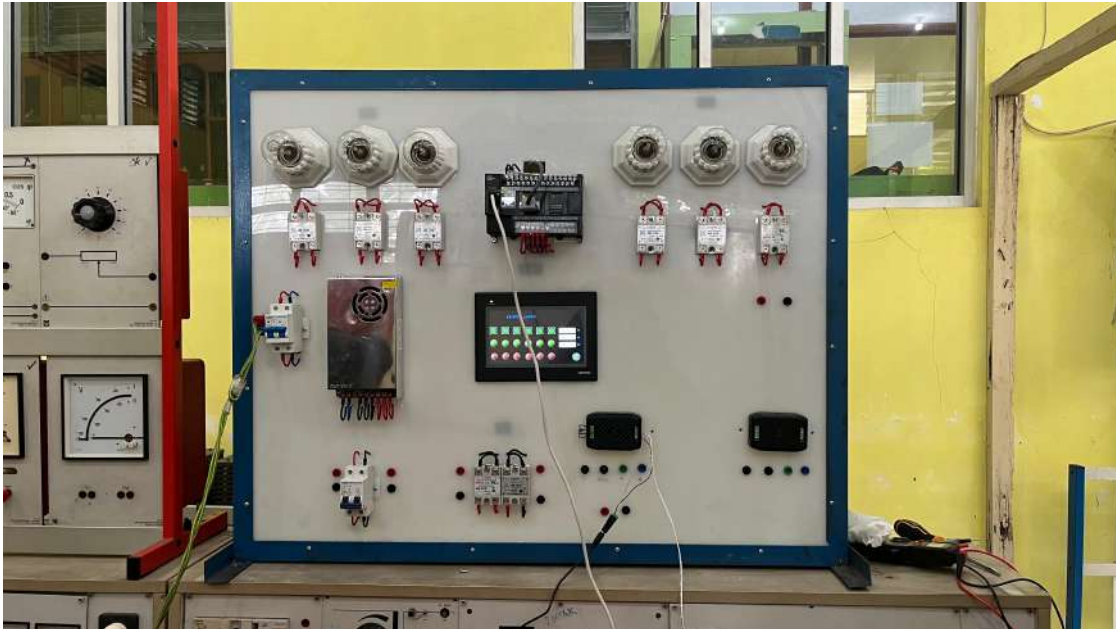
Error pengukuran daya rata-rata dari N titik pengujian dihitung sebagai rata-rata aritmetik dari error individual, sesuai Persamaan (7):

$$E_b = V_s - I_a \cdot R_a \quad (7)$$

Selain itu, hubungan back-EMF motor DC shunt yang digunakan sebagai dasar analisis penurunan kecepatan dinyatakan dalam Persamaan (8):

$$\%Error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \%Error_i \quad (8)$$

Realisasi perangkat keras sistem monitoring di papan trainer diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Realisasi Papan Trainer Sistem Monitoring HMI dengan Beban Enam Lampu 60 W
Sumber: Penulis, 2026

C. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengujian Karakteristik Motor-Generator DC

Pengujian dilaksanakan pada tujuh kondisi pembebanan, dimulai

dari tanpa lampu hingga enam lampu aktif. Data hasil pengujian disajikan secara lengkap pada Tabel 1, mencakup pembacaan digital, pembacaan analog, daya, serta kecepatan putar motor.

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Sistem Motor-Generator DC pada Variasi Beban Lampu 60 W

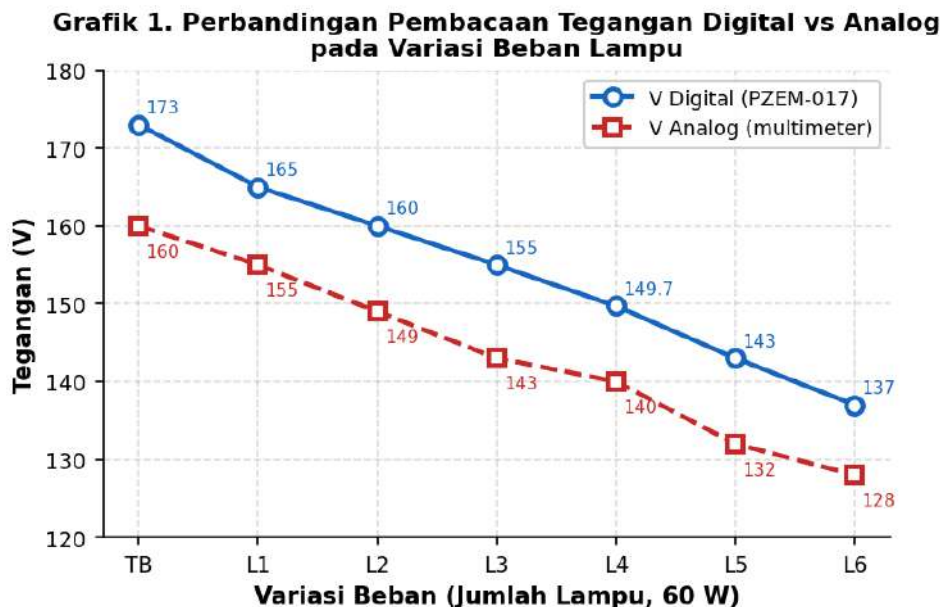
Kondisi Beban	V Digital (V)	V Analog (V)	I Digital (A)	I Analog (A)	Daya P (W)	Kecepatan n (RPM)
Tanpa Lampu	173	160	0,63	0,60	107,0	1.992
Lampu 1	165	155	0,80	0,70	129,5	1.808
Lampu 2	160	149	0,87	0,80	138,3	1.795
Lampu 3	155	143	0,96	0,90	146,6	1.772
Lampu 4	149,7	140	1,04	1,00	154,6	1.752
Lampu 5	143	132	1,13	1,00	161,5	1.729
Lampu 6	137	128	1,23	1,05	168,5	1.709
Selisih TB–L6	36	32	0,60	0,45	61,5	283

**V Digital dan I Digital diperoleh dari sensor PZEM-017 yang ditampilkan pada HMI. V Analog dan I Analog dibaca dari multimeter sebagai referensi. P adalah daya terukur PZEM-017. n diukur dengan tachometer optik.*

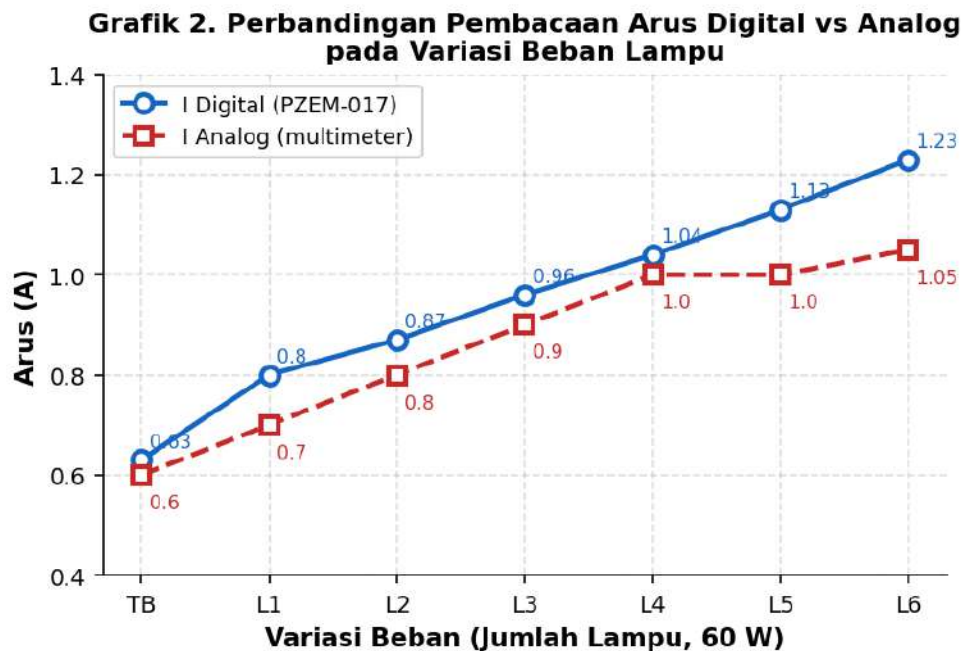
Berdasarkan Tabel 1, terlihat tren yang konsisten pada seluruh parameter. Pertambahan jumlah lampu aktif menyebabkan tegangan turun, arus naik, daya naik, dan kecepatan motor menurun. Tren ini sesuai dengan karakteristik dasar sistem motor-generator DC dengan beban resistif (Chapman, 2012).

2. Analisis Perbandingan Pengukuran Digital dan Analog

Grafik 1 dan Grafik 2 memperlihatkan perbandingan langsung antara pembacaan digital dari sensor PZEM-017 dengan pembacaan analog dari multimeter pada parameter tegangan dan arus.



Grafik 1. Perbandingan Pembacaan Tegangan Digital vs Analog pada Variasi Beban Lampu
Sumber: Penulis, 2026



Grafik 2. Perbandingan Pembacaan Arus Digital vs Analog pada Variasi Beban Lampu
Sumber: Penulis, 2026

Pembacaan digital konsisten lebih tinggi dibanding pembacaan analog pada seluruh kondisi pengujian, baik pada parameter tegangan maupun arus. Selisih tegangan rata-rata antara digital dan analog sebesar 10,8 V, sementara selisih arus rata-rata sebesar 0,09 A. Perbedaan tersebut dapat dijelaskan oleh dua faktor utama: (a) perbedaan titik tap pengukuran—sensor PZEM-017 mengukur pada terminal yang lebih dekat ke sumber daya, sehingga belum memperhitungkan rugi tegangan pada kabel penghubung menuju titik multimeter; dan (b) keterbatasan resolusi pembacaan analog yang tergantung pada

ketepatan posisi mata pengamat (paralaks), berbeda dengan pembacaan digital yang bersifat absolut (Hughes & Drury, 2013).

Meskipun terdapat selisih absolut, kedua sistem menunjukkan tren penurunan tegangan dan kenaikan arus yang sebanding dan linier terhadap penambahan beban. Hal ini mengonfirmasi bahwa sensor PZEM-017 mampu merekam karakteristik dinamis sistem dengan pola yang konsisten dengan instrumen analog konvensional.

3. Analisis Karakteristik Kecepatan Motor DC

Kecepatan putar motor menurun dari 1.992 RPM (tanpa

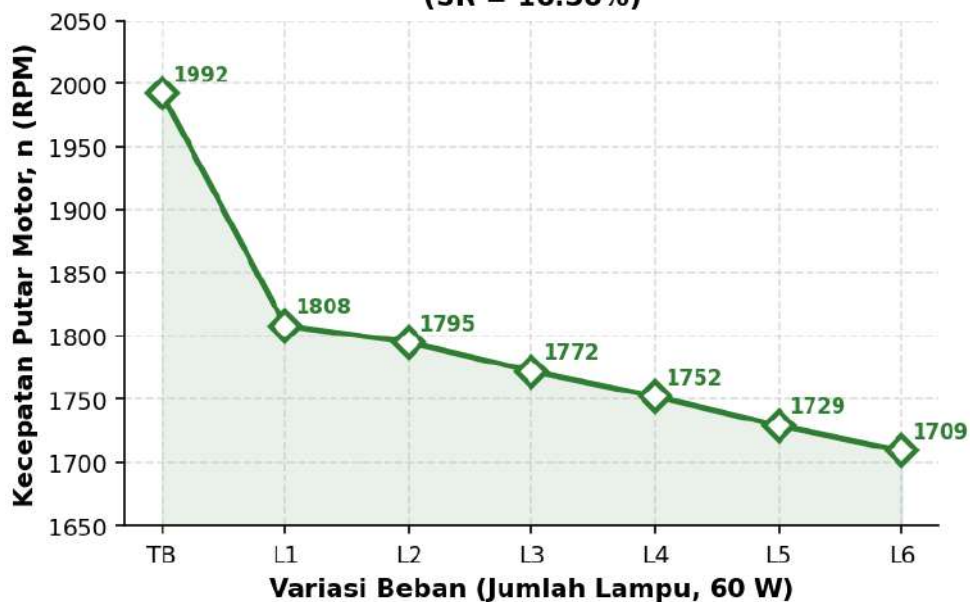
lampu) menjadi 1.709 RPM (enam lampu aktif), dengan selisih total 283 RPM. Penurunan kecepatan tersebut disebabkan oleh berkurangnya gaya gerak balik (back-EMF) seiring meningkatnya arus jangkar sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (8). Saat beban listrik pada generator meningkat, motor harus menghasilkan torsi lebih besar untuk memutar generator, sehingga arus jangkar naik dan tegangan jatuh $I_a \times R_a$ bertambah besar. Akibatnya, E_b menurun dan kecepatan ikut turun (Fitzgerald et al., 2003; Sen, 1996).

Regulasi kecepatan dihitung menggunakan Persamaan (4):

$$SR = (1.992 - 1.709) \div 1.709 \times 100\% = 16,56\%$$

Nilai regulasi kecepatan 16,56% berada sedikit di atas rentang tipikal motor DC shunt (5–15%) yang disebutkan Chapman (2012) dan Nagrath & Kothari (2010). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik motor laboratorium yang telah lama beroperasi serta cakupan beban pengujian yang cukup lebar (hingga enam lampu). Pola penurunan kecepatan terhadap variasi beban diperlihatkan pada Grafik 3.

Grafik 3. Karakteristik Kecepatan Motor DC vs Variasi Beban Lampu (SR = 16.56%)



Grafik 3. Karakteristik Kecepatan Motor DC vs Variasi Beban Lampu
Sumber: Penulis, 2026

4. Analisis Karakteristik Tegangan Generator dan Regulasi Tegangan

Tegangan terminal generator (pembacaan digital) menurun dari 173 V (tanpa beban) menjadi 137 V (enam

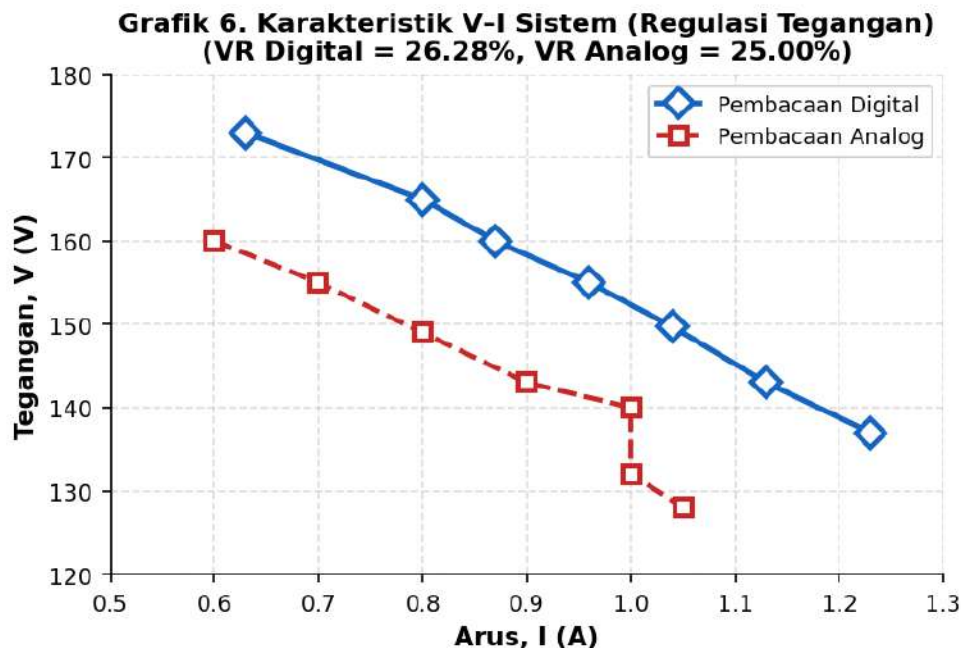
lampu aktif). Penurunan ini disebabkan oleh dua mekanisme utama: (a) tegangan jatuh resistif pada tahanan jangkar generator seiring meningkatnya arus beban, dan (b) efek reaksi jangkar yang mengurangi fluks efektif kumparan medan saat arus jangkar meningkat (Wildi, 2006).

Regulasi tegangan generator dihitung menggunakan Persamaan (5), baik berdasarkan pembacaan digital maupun analog:

$$VR_digital = (173 - 137) \div 137 \times 100\% = 26,28\%$$

$$VR_analog = (160 - 128) \div 128 \times 100\% = 25,00\%$$

Kedua hasil regulasi tegangan menunjukkan nilai yang relatif besar dibandingkan rentang tipikal generator DC shunt (3–10%) yang dikemukakan Wildi (2006). Nilai yang tinggi ini wajar untuk generator skala laboratorium yang dibebani hingga cakupan arus relatif besar dibanding rating nominalnya, di mana efek reaksi jangkar dan rugi ohmic menjadi lebih signifikan. Kurva karakteristik V–I yang merangkum perilaku regulasi tegangan diperlihatkan pada Grafik 4.



Grafik 4. Karakteristik Tegangan terhadap Arus (Regulasi Tegangan Generator)

Sumber: Penulis, 2026

5. Verifikasi Konsistensi Pengukuran Daya

Validasi internal sensor PZEM-017 dilakukan dengan membandingkan dua besaran daya:

(a) daya hasil perhitungan dari pembacaan tegangan dan arus ($P_{\text{calc}} = V \times I$), dan (b) daya yang langsung tampil pada HMI sebagai

hasil bacaan sensor (P). Persentase error dihitung dengan Persamaan (3). Hasil perhitungan lengkap disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Verifikasi Konsistensi Pengukuran Daya PZEM-017 melalui Perhitungan $V \times I$

Kondisi Beban	V Digital (V)	I Digital (A)	$P_{\text{calc}} = V \times I$ (W)	P Terbaca (W)	% Error
Tanpa Lampu	173	0,63	109,0	107,0	1,8
Lampu 1	165	0,80	132,0	129,5	1,9
Lampu 2	160	0,87	139,2	138,3	0,6
Lampu 3	155	0,96	148,8	146,6	1,5
Lampu 4	149,7	1,04	155,6	154,6	0,6
Lampu 5	143	1,13	161,5	161,5	0,0
Lampu 6	137	1,23	168,5	168,5	0,0
Rata-rata Error					0,91

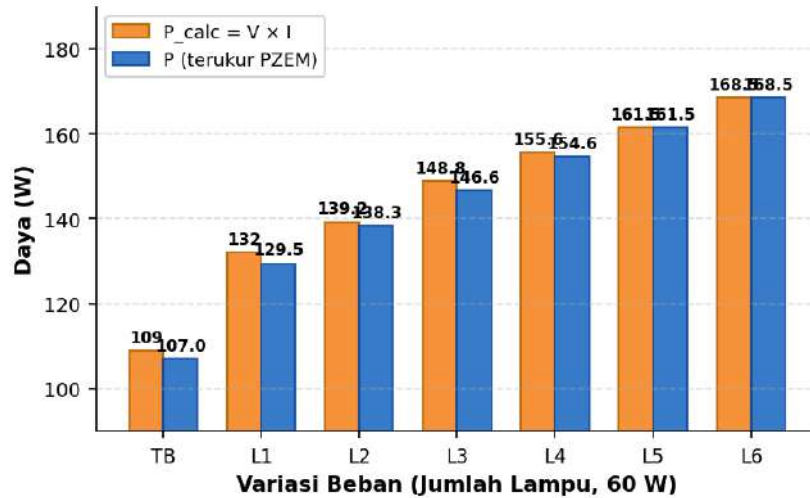
**Error rata-rata 0,91% berada di bawah spesifikasi akurasi sensor PZEM-017 ($\pm 1\%$). Pada Lampu 5 dan Lampu 6, hasil perhitungan persis sama dengan daya terbaca (error = 0%), menunjukkan konsistensi internal sensor yang baik pada arus yang lebih besar.*

Hasil verifikasi menunjukkan bahwa error pengukuran daya bervariasi dari 0% hingga 1,9%, dengan rata-rata 0,91%. Nilai rata-rata ini berada di bawah batas spesifikasi akurasi sensor PZEM-017 sebesar $\pm 1\%$, sehingga sensor dapat dinyatakan layak digunakan untuk pengujian skala laboratorium. Menariknya, pada kondisi Lampu 5 dan Lampu 6, daya hasil perhitungan persis sama dengan daya yang ditampilkan sensor (error = 0%). Hal ini menunjukkan bahwa pada nilai arus dan tegangan yang lebih besar, ketelitian numerik internal sensor

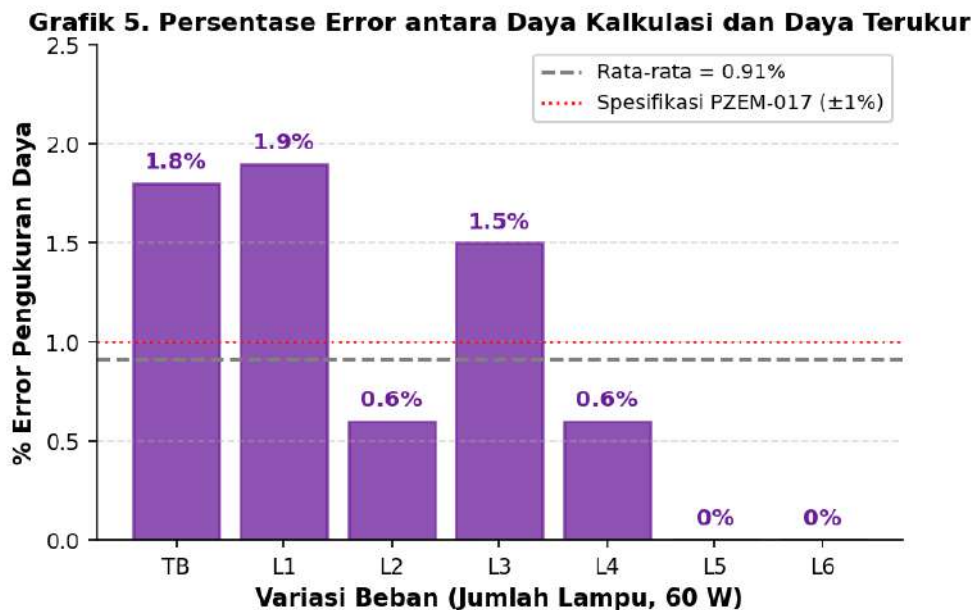
menjadi lebih baik karena efek pembulatan menjadi lebih kecil relatif terhadap nilai pengukuran (PZEM-017 Datasheet, 2019).

Error tertinggi (1,9%) terjadi pada kondisi Lampu 1, di mana selisih antara daya hasil perhitungan (132 W) dan daya terbaca (129,5 W) sebesar 2,5 W. Walaupun masih dapat diterima, error pada beban rendah sedikit lebih tinggi karena nilai numerik yang kecil memperbesar dampak pembulatan terhadap persentase error. Pola error pada seluruh kondisi pengujian diperlihatkan pada Grafik 5.

Grafik 4. Perbandingan Daya Kalkulasi ($V \times I$) dan Daya Terukur (P) pada Variasi Beban Lampu



Grafik 5. Perbandingan Daya Perhitungan ($V \times I$) dan Daya Terukur PZEM-017
 Sumber: Penulis, 2026



Grafik 6. Persentase Error Pengukuran Daya pada Variasi Beban Lampu
 Sumber: Penulis, 2026

6. Performa Sistem Monitoring Berbasis HMI

Sistem monitoring berhasil menampilkan data tegangan, arus, daya, dan status keenam lampu secara bersamaan pada layar sentuh

HMI berukuran 7 inci dengan laju pembaruan data 500 ms. Komunikasi antara sensor, PLC, dan HMI melalui protokol Modbus RTU RS485 berlangsung stabil tanpa kegagalan

komunikasi selama keseluruhan sesi pengujian. Tombol kendali on/off pada HMI memungkinkan operator menyalakan atau mematikan setiap lampu secara individual, sekaligus menampilkan parameter listrik yang berubah secara real-time.

Keunggulan utama sistem ini dibanding metode konvensional adalah kemampuan integrasi fungsi pemantauan dan pengendalian dalam satu platform tunggal, sehingga praktikan dapat mengamati respons sistem secara langsung saat beban berubah. Integrasi sensor PZEM-017, PLC Omron CP1E, dan HMI Omron NB7W menggunakan CX-Programmer dan NB-Designer menunjukkan bahwa sistem ini layak dijadikan modul praktikum modern untuk pengujian karakteristik mesin listrik di Politeknik Negeri Manado.

D. KESIMPULAN

Sistem monitoring berbasis PLC dan HMI berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan sensor PZEM-017 DC, PLC Omron CP1E-N30DT yang diprogram dengan CX-Programmer, dan HMI Omron NB7W-TW01B yang dirancang dengan NB-Designer, dengan

protokol komunikasi Modbus RTU RS485 pada 9.600 bps.

2. Pengujian pada tujuh kondisi pembebanan dengan beban enam lampu pijar 60 W menghasilkan: tegangan digital turun dari 173 V menjadi 137 V; arus digital naik dari 0,63 A menjadi 1,23 A; daya naik dari 107 W menjadi 168,5 W; dan kecepatan motor menurun dari 1.992 RPM menjadi 1.709 RPM. Hasil ini sesuai dengan karakteristik dasar set motor-generator DC dengan beban resistif.
3. Regulasi kecepatan motor terukur sebesar 16,56%, sedangkan regulasi tegangan generator mencapai 26,28% berdasarkan pembacaan digital dan 25,00% berdasarkan pembacaan analog. Kedua nilai berada di atas rentang tipikal literatur, yang merefleksikan kondisi motor -generator skala laboratorium dengan rentang pembebanan yang relatif lebar.
4. Verifikasi konsistensi internal sensor PZEM-017 melalui perbandingan daya hasil perhitungan ($V \times I$) terhadap daya terbaca menghasilkan error rata-rata 0,91%, di bawah spesifikasi akurasi sensor $\pm 1\%$. Dua dari

tujuh titik pengujian (Lampu 5 dan Lampu 6) menunjukkan error nol persen, mengonfirmasi konsistensi internal sensor terutama pada beban menengah dan tinggi.

5. Pembacaan digital PZEM-017 konsisten lebih tinggi dibanding pembacaan analog dengan selisih rata-rata 10,8 V (tegangan) dan 0,09 A (arus). Selisih ini bersumber dari perbedaan titik tap pengukuran dan keterbatasan resolusi pembacaan analog, namun kedua sistem menunjukkan tren yang konsisten dan linier sehingga PZEM-017 dapat dikategorikan layak untuk pengukuran skala laboratorium.

Sistem monitoring HMI mampu menampilkan parameter listrik dan status keenam lampu secara real-time dengan laju pembaruan 500 ms tanpa kegagalan komunikasi. Sistem ini layak diimplementasikan sebagai modul praktikum mesin listrik di Laboratorium Konversi Energi Politeknik Negeri Manado.

DAFTAR PUSTAKA

- Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Hughes, A., & Drury, B. (2013). *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications* (4th ed.). Newnes/Elsevier.
- Modbus Organization. (2012). *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*. Modbus Organization, Inc.
- Nagrath, I. J., & Kothari, D. P. (2010). *Electric Machines* (5th ed.). Tata McGraw-Hill Education.
- Omron. (2019). *CP1E CPU Unit Hardware User's Manual* (Cat. No. W480-E1). Omron Corporation.
- Omron. (2020). *NB Series Programmable Terminal Setup Manual* (Cat. No. V107-E1). Omron Corporation.
- PZEM-017 Datasheet. (2019). *PZEM-017 DC Energy Meter Module User Manual* (Rev. 1.2). Peacefair Electronics.
- Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Sen, P. C. (1996). *Principles of Electric Machines and Power Electronics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Wildi, T. (2006). *Electrical Machines, Drives, and Power Systems* (6th ed.). Pearson Education.
- Zuhal. (1991). *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. PT Gramedia Pustaka Utama.