

Monitoring dan Optimasi Daya Mesin Bubut Konvensional Berbasis PZEM-004T dan Arduino

Adham Prida Prayoga^a, Fajar Yumono^b, Salma Ilmawati^c

Teknik Elektro, Universitas Islam Kediri, Indonesia

^a adhamprayoga890@gmail.com

^b fajaryumono@uniska-kediri.ac.id

^c salmaeilmawati@gmail.com

Kata Kunci :

ABSTRAK

efisiensi energi, mesin bubut konvensional, Arduino, PZEM-004T, monitoring tiga fasa

Penelitian ini menganalisis dan mengoptimalkan konsumsi daya listrik pada mesin bubut konvensional di industri manufaktur skala kecil. Mesin bubut sering beroperasi tanpa pemantauan sehingga terjadi pemborosan energi, terutama saat idle. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan sistem monitoring berbasis Arduino Uno dan sensor PZEM-004T yang dipasang pada tiap fasa, dengan hasil ditampilkan secara langsung pada LCD 16x2. Pengujian dilakukan di Bengkel Fortuna Jaya dengan tiga kondisi operasi: tanpa beban (idle), beban velg, dan beban ass hidrolis, dengan variasi kecepatan 20–1250 rpm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan dan semakin berat beban, konsumsi daya semakin meningkat dengan nilai tertinggi mencapai 582 Watt. Tingkat akurasi sistem cukup baik dengan error 20,8% pada kondisi tanpa beban, 3,4% pada beban velg, dan 7,5% pada beban ass hidrolis. Implementasi sistem ini berpotensi menghemat hingga 56 kWh per bulan per mesin jika idle time dapat dikurangi. Dengan demikian, sistem monitoring ini menjadi solusi murah dan efektif untuk meningkatkan efisiensi energi di industri kecil

Energy efficiency, conventional lathe machines, Arduino, PZEM-004T, and three-phase monitoring

This study analyzes and optimizes the electricity consumption of a conventional lathe machine used in small-scale manufacturing. Lathes often run without proper monitoring, which leads to significant energy waste, especially during idle time. To address this issue, a monitoring system was developed using an Arduino Uno and PZEM-004T sensors installed on each phase, with langsung results displayed on a 16x2 LCD. Testing was carried out at Fortuna Jaya Workshop under three operating conditions: idle (no load), wheel rim load, and hydraulic shaft load, with spindle speeds ranging from 20 to 1250 rpm. The findings show that higher speeds and heavier loads increase power consumption, with the maximum recorded at 582 Watts. The system achieved fairly good accuracy, with error rates of 20.8% in idle condition, 3.4% with wheel rim load, and 7.5% with hydraulic shaft load. Implementing this system could potentially save up to 56 kWh per month per machine if idle time is reduced. Overall, this monitoring system offers a low-cost and effective solution for improving energy efficiency in small-scale industries.

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Efisiensi energi merupakan faktor krusial dalam keberlanjutan industri manufaktur, terutama bagi industri kecil dan menengah (IKM) yang sering menghadapi tantangan biaya operasional tinggi. Di Indonesia, industri manufaktur skala kecil memiliki peran penting dalam perekonomian nasional, khususnya pada sektor produksi komponen dan peralatan logam. Mesin bubut konvensional sebagai salah satu alat utama dalam proses produksi memiliki konsumsi daya yang tinggi karena menggunakan motor listrik, sehingga berdampak pada meningkatnya biaya operasional. Kondisi ini semakin memberatkan bagi industri kecil yang memiliki keterbatasan sumber daya dan teknologi.

Salah satu permasalahan utama adalah banyaknya mesin bubut konvensional yang beroperasi tanpa adanya pemantauan energi secara langsung. Hal ini menyebabkan konsumsi daya tidak efisien, terutama pada kondisi idle yang tidak produktif, serta pengaturan operasi mesin yang tidak optimal, seperti kecepatan putar, jenis material yang diproses, dan beban kerja mesin. Menurut Perez et al. (2021), tanpa adanya sistem monitoring, pelaku IKM kesulitan dalam mengidentifikasi dan meminimalkan pemborosan energi yang signifikan, sehingga efisiensi operasional menjadi rendah. Oleh karena itu, diperlukan solusi pemantauan energi yang terjangkau, mudah diterapkan, dan sesuai dengan kebutuhan industri skala kecil.

Sistem manajemen energi komersial (Energy Management System/EMS) yang tersedia di pasaran umumnya memiliki fitur canggih, namun seringkali mahal dan kompleks sehingga tidak sesuai untuk skala IKM. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi penggunaan sensor berbiaya rendah dan mikrokontroler, tetapi kebanyakan hanya terbatas pada aplikasi satu fasa atau konteks yang berbeda. Seperti yang dikemukakan oleh Sari & Gunawardhana (2021), penelitian berbasis IoT dengan sensor PZEM-004T memang telah dilakukan, namun lebih banyak difokuskan pada sistem motor tiga fasa secara umum, bukan pada aplikasi spesifik mesin perkakas konvensional. Dengan demikian, masih terdapat celah penelitian terkait pengembangan sistem monitoring energi murah yang sesuai untuk mesin bubut konvensional dengan sistem tiga fasa.

Kebaruan penelitian ini adalah adaptasi sensor daya PZEM-004T, yang pada awalnya hanya digunakan untuk aplikasi satu fasa, menjadi sistem monitoring yang mampu menganalisis konsumsi daya total pada mesin bubut tiga fasa. Sari & Gunawardhana (2021) menegaskan bahwa penggunaan PZEM-004T dapat memberikan hasil akurat pada pemantauan energi listrik, sehingga adaptasi ini memiliki potensi signifikan bagi IKM. Untuk menunjang sistem, platform mikrokontroler Arduino dipilih karena sifatnya yang mudah diprogram, fleksibel, dan hemat biaya. Hal ini juga didukung oleh penelitian Furqon et al. (2022) yang membuktikan bahwa kombinasi Arduino dengan PZEM-004T dapat menjadi solusi efektif untuk monitoring energi pada perangkat industri sederhana.

Menurut Aryani et al. (2024) menyatakan pentingnya akuisisi data langsung dalam pemantauan distribusi listrik tiga fasa. Pemantauan berbasis langsung mampu memberikan informasi langsung mengenai ketidakseimbangan beban serta potensi pemborosan energi. Hal ini sejalan dengan penelitian Kim et al. (2023), yang merancang sistem monitoring berbasis IoT dengan

Arduino untuk mesin industri dan berhasil menghadirkan solusi berbiaya rendah namun tetap andal dalam mengidentifikasi pola konsumsi daya. Lebih lanjut, Kumar et al. (2024) menambahkan bahwa monitoring energi tiga fasa menggunakan Arduino dan PZEM-004T terbukti mampu meningkatkan kesadaran pengguna terhadap penggunaan energi yang lebih efisien.

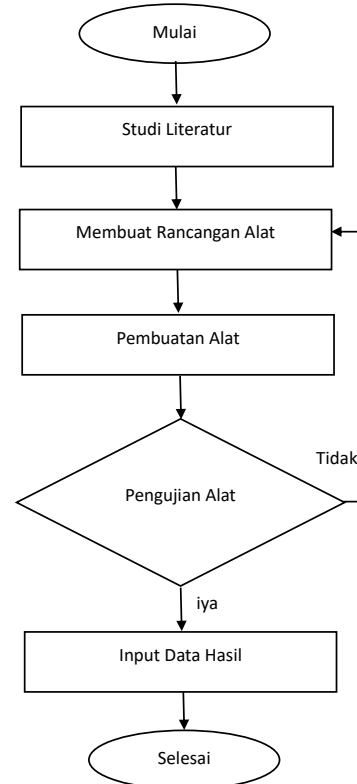
Pendekatan berbasis mikrokontroler dan sensor daya murah juga didukung oleh penelitian Setyawan et al. (2024) yang menegaskan efektivitas IoT dalam monitoring energi listrik secara langsung menggunakan PZEM-004T. Sementara itu, Wijaya & Gunawan (2024) menunjukkan bahwa sistem monitoring tiga fasa berbasis Arduino dapat diaplikasikan secara langsung pada motor induksi di lingkungan industri, dengan biaya implementasi yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem komersial.

Sehingga dari berbagai hasil penelitian diatas, maka penelitian ini diarahkan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring konsumsi daya langsung pada mesin bubut konvensional tiga fasa. Analisis data dari sistem ini bertujuan untuk mengukur konsumsi daya pada berbagai kondisi operasional (saat idle dan berbeban) guna mengidentifikasi inefisiensi energi. Hasil akhir penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis untuk optimasi penggunaan energi, membantu IKM dalam menekan biaya operasional, meningkatkan efisiensi produksi, serta mendukung praktik manufaktur yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan

2. METODE

2.1. Alur Penelitian

Metodologi penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif eksperimental yang terstruktur dalam beberapa tahapan seperti yang pada gambar 1.

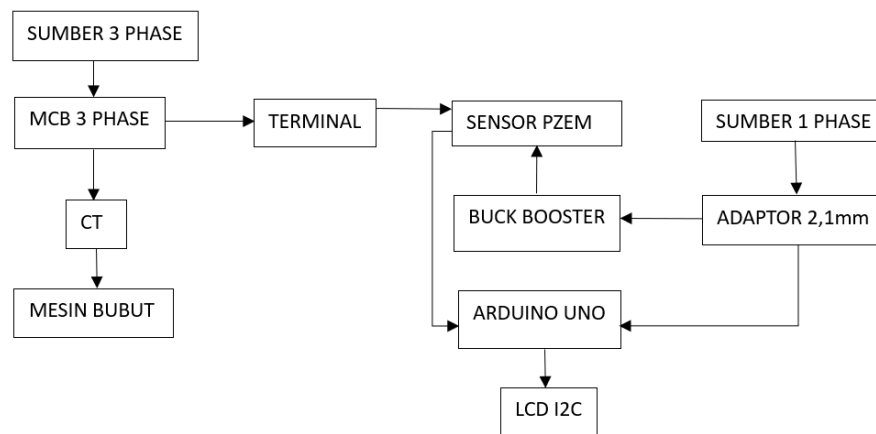


Gambar 1. Gambar Flowchart Penelitian

Flowchart pada gambar 1 menggambarkan alur kerja pembuatan dan pengujian alat secara berurutan. Proses dimulai dari studi literatur sebagai dasar penyusunan rancangan sistem monitoring daya menggunakan sensor PZEM-004T yang terhubung ke Arduino UNO (Nurdiyanti & Candra, 2023). Setelah rancangan ditetapkan, alat dibuat dan kemudian diuji untuk memastikan fungsinya sesuai kebutuhan. Jika alat belum bekerja dengan baik, proses kembali ke tahap perancangan untuk dilakukan perbaikan. Jika alat sudah berfungsi dengan benar, dilakukan pengukuran pada bahan ass hidrolis dan velg dalam rentang kecepatan 20 – 1250 rpm. Hasil pengujian dicatat sebagai data akhir, dan setelah seluruh data terkumpul, proses dinyatakan selesai.

2.2 Desain Sistem

Sistem monitoring dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen yang disusun dalam blok diagram. Sumber listrik tiga fase dihubungkan dengan mesin bubut pada MCB, kemudian dipasang current transformer (CT) sebagai sensor arus pada kabel sumber. Dan data dari CT diproses oleh sensor PZEM-004T yang terhubung dengan Arduino UNO sebagai pengendali utama. Hasil pengukuran langsung ditampilkan pada LCD 16x2 I2C secara langsung. Desain ini mengadopsi konsep dari penelitian (Syhari & Bintoro, 2023) tentang system monitoring daya berbasis Arduino menggunakan sensor PZEM-004T.



Gambar 2. Gambar Blok Diagram

Blok diagram pada Gambar 2 memperlihatkan alur kerja sistem dari sumber daya hingga proses penampilan data. Sumber listrik tiga fase yang digunakan mesin bubut terlebih dahulu melewati MCB sebelum sinyal arusnya dideteksi oleh CT. Sinyal arus dan tegangan yang sudah terbaca kemudian diarahkan ke modul PZEM-004T untuk dilakukan pengukuran parameter listrik. Selanjutnya, data hasil pengukuran dikirimkan ke Arduino UNO yang bertugas mengolah dan meneruskannya ke LCD I2C sebagai tampilan keluaran. Pada bagian suplai daya, adaptor dan buck booster digunakan untuk memastikan setiap komponen menerima tegangan kerja yang stabil. Rangkaian keseluruhan memungkinkan proses monitoring dilakukan secara terstruktur dan real time.

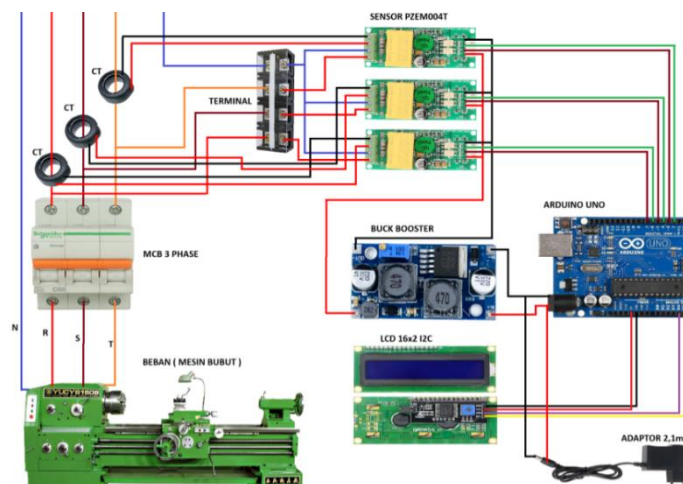
Tabel 1. Spesifikasi Komponen

NO	KOMPONEN	FUNGSI	SPESIFIASI
1	Adaptor Jack 2,1 mm	Menyuplai tegangan ke Arduino Uno	Input: 220V AC, Output: 12V DC, konektor DC 2,1 mm
2	Arduino Uno	Mikrokontroler utama untuk memproses data sensor	Chip: ATmega328P, Tegangan kerja: 5V, Pin digital: 14, Pin analog: 6, Clock: 16 MHz
3	Buck Booster (DC-DC Converter)	Menyetabilkan tegangan untuk PZEM dan komponen lain	Input: 7–35V DC, Output: 5V DC stabil, Daya maksimum $\pm$ 15W
4	Sensor PZEM-004T (3 unit)	Mengukur tegangan, arus, daya, dan energi listrik	Tegangan: 80 – 260V AC, Arus: hingga 100A (via CT), Komunikasi: TTL
5	LCD 16x2 I2C	Menampilkan hasil pengukuran (tegangan, arus, daya)	Tampilan: 16 karakter $\times$ 2 baris, Tegangan kerja: 5V, Antarmuka: I2C (SDA, SCL)
6	Current Transformer (CT)	Mengukur arus tanpa memutus kabel utama	Kapasitas arus: hingga 100A, Output terhubung ke PZEM

Tabel 1 berisi daftar komponen utama yang digunakan dalam sistem monitoring daya, lengkap dengan fungsi dan spesifikasinya. Adaptor 2,1 mm digunakan sebagai sumber tegangan untuk Arduino Uno, yang berperan memproses seluruh data sensor. Buck booster digunakan untuk menstabilkan tegangan agar sesuai dengan kebutuhan rangkaian. Sensor PZEM-004T mengukur tegangan, arus, daya, dan energi listrik, sementara hasilnya ditampilkan pada LCD 16x2 I2C. Selain itu, CT berfungsi membaca arus pada tiap fasa tanpa memutus kabel utama dan bekerja sesuai dengan input yang dibutuhkan sensor PZEM.

2.3 Perancangan Alat

Sistem monitoring daya ini menggunakan sensor PZEM-004T yang terhubung dengan Arduino UNO untuk mengukur tegangan, arus, dan daya secara langsung. Desain ini mengacu pada penelitian (Syhari & Bintoro, 2023) yang menggunakan sensor PZEM 004T untuk pengukuran dan juga di kontrol oleh Arduino Uno untuk pengolahan data. Sensor current transformer (CT) dipasang pada setiap fasa tanpa perlu melepas sumber 3 phase, dan data yang langsung ditampilkan melalui LCD 16x2 I2C.

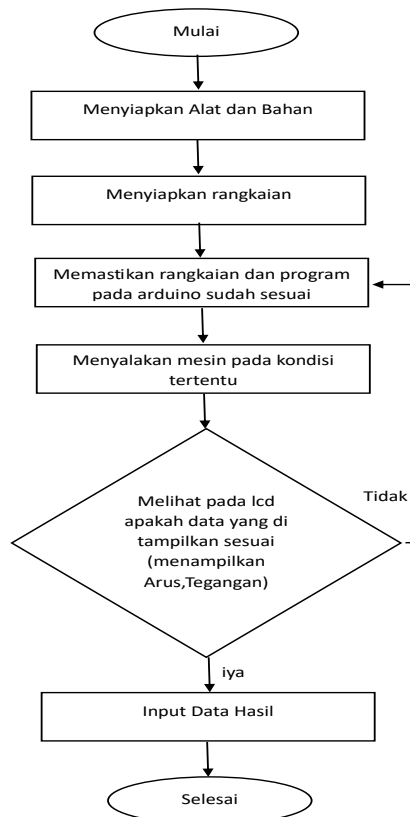


Gambar 3. Rangkaian Alat

Pada gambar 3 tersebut terlihat bagaimana setiap fasa listrik masuk ke terminal dan kemudian menuju sensor PZEM-004T, sementara CT dipasang di tiap fasa untuk membaca arus tanpa harus memutus kabel. Data tegangan, arus, dan daya dari sensor dikirim ke Arduino UNO untuk diproses, lalu hasilnya ditampilkan di LCD 16x2 I2C. Buck booster memastikan semua komponen mendapat tegangan yang stabil, dan adaptor 2,1 mm menjadi sumber dayanya. Dengan susunan ini, sistem dapat bekerja dengan baik dan menampilkan data pengukuran secara langsung.

2.4 Alur dan Cara Kerja Alat

Cara kerja sistem monitoring diawali dengan penyaluran daya listrik ke mesin bubut melewati rangkaian sensor. Saat mesin dioperasikan, sensor PZEM-004T akan membaca parameter listrik secara langsung dan data yang diperoleh dikirim ke Arduino untuk diolah dan ditampilkan pada LCD. Sistem ini bekerja secara mandiri tanpa koneksi IoT, pengukuran langsung di lokasi mesin bubut. Pengambilan data dilakukan dalam waktu dan kondisi tertentu selama proses pembubutan



Gambar 4. Flowchart Cara Kerja Alat

Flowchart pada Gambar 4 menggambarkan langkah-langkah penggunaan sistem monitoring daya. Proses dimulai dengan menyiapkan alat, bahan, dan rangkaian yang diperlukan. Setelah itu, pengguna memastikan bahwa rangkaian dan program pada Arduino sudah benar. Mesin bubut kemudian dijalankan pada kondisi tertentu (pada bahan ass hidrolis dan velg) pada rentang 20 – 1250 RPM sesuai kebutuhan pengukuran. Selanjutnya, pengguna memeriksa tampilan pada LCD untuk memastikan data arus dan tegangan muncul dengan benar. Jika data tidak sesuai, rangkaian diperiksa kembali. Jika sudah benar, hasil pengukuran dicatat sebagai data akhir. Proses berakhir setelah seluruh data berhasil diinput.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengukuran

Sistem monitoring tenaga listrik tiga fasa yang telah dirancang berhasil mengukur parameter elektrik (Tegangan/V, Arus/A, dan Daya/Watt) pada berbagai kondisi operasi mesin bubut. Data yang diperoleh memberikan gambaran tentang karakteristik konsumsi daya mesin. Hasil pengukuran merupakan sampel ter tinggi dan terendah pada setiap bahan kerja (idle (tanpa beban), velg, dan ass hidrolis) dapat dilihat pada tabel 2 sampai 7, yang menunjukkan nilai dari setiap fasa (R, S, T) dan nilai rata-ratanya.

Tabel 2. Hasil Pengukuran
Kondisi Tanpa Beban pada Kecepatan pada rentan 20 – 32 rpm

PZEM	V	A	Watt
1 (R)	236.5	1.65	380.2
2 (S)	235.8	1.82	419.0
3 (T)	230.5	1.78	404.6
Rata – rata Daya			401.2

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran mesin tanpa beban pada kecepatan rendah 20–32 rpm. Tegangan pada ketiga fase hampir sama, namun arusnya sedikit berbeda sehingga daya yang dihasilkan tiap fase juga bervariasi. Dari semua data, diperoleh daya rata-rata sekitar 401,2 Watt.

Tabel 3. Hasil Pengukuran
Kondisi Tanpa Beban pada Kecepatan pada rentan 800 – 1250 rpm

PZEM	V	A	Watt
1 (R)	236.3	1.95	456.5
2 (S)	235.4	2.21	491.2
3 (T)	231.8	2.08	471.2
Rata – rata Daya			472.9

Tabel 3 memperlihatkan pengukuran mesin tanpa beban pada kecepatan lebih tinggi 800–1250 rpm. Arus pada tiap fase meningkat dibandingkan Tabel 2, sehingga daya yang terukur juga lebih besar. Rata-rata daya pada kecepatan ini adalah 472,9 Watt.

Tabel 4. Hasil Pengukuran
Kondisi Beban Velg pada Kecepatan pada rentan 20 – 32 rpm

PZEM	V	A	Watt
1 (R)	236.1	1.92	435.3
2 (S)	233.7	1.92	435.5
3 (T)	226.7	1.78	397.6
Rata – rata Daya			422.8

Tabel 4 menunjukkan hasil pengukuran saat mesin menggunakan beban velg pada kecepatan

rendah 20–32 rpm. Tegangan pada tiap fase masih berada di kisaran yang hampir sama, dan arus cenderung stabil. Perbedaan kecil pada arus dan tegangan membuat daya pada tiap fase sedikit berbeda. Dari pengukuran ini diperoleh daya rata-rata sekitar 422,8 Watt.

Tabel 5. Hasil Pengukuran
Kondisi Beban Velg pada Kecepatan pada rentan 630 – 1000 rpm

PZEM	V	A	Watt
1 (R)	235.2	2.05	460.8
2 (S)	233.8	2.27	511.4
3 (T)	225.7	2.27	483.0
Rata – rata Daya			485.0

Tabel 5 menampilkan pengukuran mesin dengan beban velg pada kecepatan yang lebih tinggi, yaitu 630–1000 rpm. Pada putaran ini, arus di tiap fase meningkat, sehingga daya listrik yang digunakan juga lebih besar dibandingkan Tabel 4. Daya rata-rata yang tercatat adalah 485,0 Watt.

Tabel 6. Hasil Pengukuran
Kondisi Beban Ass Hidrolis pada Kecepatan pada rentan 20 – 32 rpm

PZEM	V	A	Watt
1 (R)	234.3	1.86	426.9
2 (S)	233.6	2.06	473.8
3 (T)	229.0	2.02	451.1
Rata – rata Daya			450.6

Tabel 6 menunjukkan hasil pengukuran mesin dengan beban ass hidrolis pada kecepatan rendah 20–32 rpm. Tegangan pada tiap fase berada di kisaran yang hampir sama, namun arus sedikit berbeda sehingga daya yang dihasilkan tiap fase juga bervariasi. Dari hasil pengukuran, daya rata-rata yang tercatat adalah 450,6 Watt.

Tabel 7. Hasil Pengukuran
Kondisi Beban Ass Hidrolis pada Kecepatan pada rentan 630 – 1000 rpm

PZEM	V	A	Watt
1 (R)	234.0	2.68	574.8
2 (S)	233.0	2.74	598.3
3 (T)	229.2	2.76	573.0
Rata – rata Daya			582.0

Tabel 7 menampilkan pengukuran saat mesin menggunakan beban ass hidrolis pada kecepatan lebih tinggi 630–1000 rpm. Pada kondisi ini arus meningkat cukup signifikan, sehingga daya pada tiap fase juga lebih besar dibandingkan Tabel 6. Daya rata-rata yang diperoleh pada rentang putaran ini adalah 582,0 Watt.

3.2 Analisa Data Velg

Tabel 8. Deviasi Absolut Beban Velg

Rata-rata pengukuran	Rata-rata total pengukuran	Deviasi absolut
450.6	534.1	83.5
548.7	534.1	14.6
566.2	534.1	32.1
496.9	534.1	37.2
559.9	534.1	25.8
582.0	534.1	47.9
Nilai rata-rata deviasi absolut		40.2

Analisis statistik terhadap data pembubutan pada Velg menunjukkan deviasi absolut sebesar 3,4% dengan nilai error maksimum 38,5 Watt. Nilai deviasi yang masih di bawah 10% membuktikan keakuratan sistem monitoring yang digunakan, meskipun terdapat variasi akibat faktor eksternal seperti fluktuasi tegangan listrik.

Tabel 9. Deviasi Absolut Beban Ass Hidrolis

Rata-rata pengukuran	Rata-rata total pengukuran	Deviasi absolut
422.8	461.3	38.5
463.4	461.3	2.1
483.5	461.3	22.2
451.9	461.3	9.4
461.2	461.3	0.1
485.0	461.3	23.7
Nilai rata-rata deviasi absolut		16

Sedangkan untuk mengetahui nilai presentase erornya pada pembubutan Velg adalah

$$\begin{aligned}
 & \frac{\text{Nilai deviasi}}{\text{nilai rata – rata total pengukuran}} \times 100\% \\
 &= \frac{16}{461.3} \times 100\% = \\
 &= 3.4\%
 \end{aligned}$$

3.4 Analisa Data Ass Hidrolis

Analisis statistik terhadap data pembubutan pada Ass Hidrolis menunjukkan deviasi absolut sebesar 7,5% dengan nilai error maksimum 38,5 Watt. Nilai deviasi yang masih di bawah 10% membuktikan keakuratan sistem monitoring yang digunakan, meskipun terdapat variasi akibat faktor eksternal seperti fluktuasi tegangan listrik.

Sedangkan untuk mengetahui nilai presentase erornya pada pembubutan Ass Hidrolis adalah

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Nilai deviasi}}{\text{nilai rata – rata total pengukuran}} \times 100\% \\
 &= \frac{40.2}{534.1} \times 100\% \\
 &= 7.5\%
 \end{aligned}$$

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring konsumsi daya listrik pada mesin bubut konvensional berbasis Arduino Uno dan sensor PZEM-004T, dengan tampilan data langsung pada LCD 16×2 I2C. Hasil pengujian menunjukkan perbedaan konsumsi daya yang jelas antara kondisi idle dan berbeban. Daya idle terbukti cukup besar dan berpotensi menimbulkan pemborosan energi apabila mesin dibiarkan menyala tanpa aktivitas produksi. Sistem yang dikembangkan mampu memberikan informasi langsung secara sederhana, murah, dan mudah diaplikasikan di lingkungan bengkel skala kecil. Dengan adanya monitoring langsung, operator dapat lebih cepat mengidentifikasi inefisiensi energi dan mengambil tindakan praktis, seperti mematikan mesin saat tidak digunakan. Meskipun masih terdapat keterbatasan, seperti pencatatan data yang masih manual dan belum adanya sistem penyimpanan otomatis, penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut ke depan, sistem dapat ditingkatkan dengan penambahan modul penyimpanan data atau fitur komunikasi nirkabel, sehingga analisis konsumsi daya dapat dilakukan secara lebih komprehensif dan mendukung strategi efisiensi energi berkelanjutan pada industri kecil dan menengah (IKM).

Daftar Pustaka

- Aryani, D., Yusril, M., Idris, A. R., Aminah, N., Raharjo, M. F., & Lumembang, C. (2024). Langsung Data Acquisition and Monitoring of Three Phase Load Balance in Electricity Distribution. *EPI International Journal of Engineering*, 6(2), 56–61. <https://doi.org/10.25042/epi-ije.082023.01>
- Diaz. P. F. J., & Gámez-García, J. (2023). A Review On Energy Efficiency Strategies In The Machine Tool Industry. *Energy Reports*, 9, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.002>

Furqon, A., Pradana, F., & Shobirin, M. (2022). Langsung Monitoring System for Power Consumption Using PZEM-004T Sensor and Arduino. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJESTY)*, 4(2), 68–74. <https://ijesty.org/index.php/ijesty/article/download/335/226>

Kim, S. H., Kim, J. Y., & Lee, K. S. (2023). Design And Implementation Of A Low-Cost Energy Monitoring System For Industrial Machines Using Arduino and Iot Platform. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18(5), 2101–2110. <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01362-y>

Kumar, R., Rathod, S. R., & Sharma, A. (2024). Monitoring Of Energy Consumption In Three-Phase Machines Using Arduino And PZEM-004T. *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science (IRJMETS)*, 6(4), 527–533. https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper//issue_4_april_2024/52775/final/fin_irjmets1713439734.pdf

Nurdiyanti, S., & Candra, O. (2023). Sistem Monitoring Daya Listrik 3 Fasa Berbasis IoT (Internet of Things). *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 4(2), 924–933. <https://doi.org/10.24036/jtein.v4i2.532>

Sari, G. F., & Gunawardhana, R. H. (2021). Iot Based Three Phase Motor Energy Monitoring System Using PZEM-004T. *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, 297–302. <https://doi.org/10.1109/ICIIS53822.2021.9669528>

Setyawan, R. B. A., Santoso, S. B., & Hartono, R. D. (2024). Iot-Based Langsung Electrical Energy Monitoring System Using PZEM-004T Sensor And ESP32. *Proceedings of the 2024 International Conference on Automation, Control, and Mechatronics (ICACM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICACM61899.2024.10427807>

Syhari, A., & Bintoro, A. (2023). Monitoring dan Controlling Daya Berbasis Arduino Uno Menggunakan Sensor PZEM-004T. *Jurnal Energi Elektrik*, 12(1), 43. <https://doi.org/10.29103/jee.v12i1.9836>

Wang, Y., He, C., & Zhang, J. (2020). A Low-Cost Iot-Based System For Langsung Electricity Consumption Monitoring And Analysis In Industrial Enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122421>

Wijaya, A. R., & Gunawan, I. G. A. A. (2024). A Low-Cost Power Monitoring System For Three-Phase Induction Motor Using Arduino And PZEM-004T. *Telkomnika*, 22(1), 248–258. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v22i1.26759>