

Pengembangan modul pemantau penggunaan energi listrik untuk menunjang implementasi industri 4.0

Harry Prayoga Setyawan¹, Sri Raharno¹

¹Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Bandung, Jawa Barat 40132
Email korespondensi: harry.prayoga.setyawan1010@gmail.com

Abstrak

Industri manufaktur telah memasuki era baru, yaitu era Industri 4.0 yang mempunyai tujuan utama antara lain untuk peningkatan efisiensi, pengurangan pemborosan dan penurunan ongkos produksi. Sehubungan dengan tuntutan persaingan dalam industri global yang mengutamakan efisiensi, maka diperlukan peningkatan efisiensi konsumsi energi listrik dengan melakukan strategi pengurangan konsumsi energi. Strategi tersebut memerlukan data historis konsumsi energi listrik sehingga dibutuhkan sistem pemantauan energi untuk memantau dan menyimpan data tersebut. Modul pemantau energi mengukur energi yang digunakan mesin dan data pengukuran disimpan dalam basis data. Pengujian modul pemantau energi dilakukan pada mesin bubut dengan daya motor penggerak 550 Watt berjenis motor penggerak 1 fasa. Modul pemantau mengukur penggunaan energi selama mesin bubut melakukan operasi pembubutan. Data pengukuran divisualisasikan pada antarmuka situs pemantauan energi. Hasil pengujian pembacaan sensor dibandingkan dengan pembacaan alat ukur pembanding, didapatkan hasil ketelitian sensor tegangan 0,96% dan sensor arus 0,92%. Ketelitian pembacaan sensor mempunyai nilai keakuratan sesuai standar IEC No. 13B-23 yang diklasifikasikan ke golongan III dengan nilai ketelitian 1,0%. Modul pemantau energi memiliki kebutuhan daya sebesar 6 Wh dan dilengkapi dengan baterai yang dapat dioperasikan selama 2 jam 25 menit. Modul pemantau energi memiliki indikator TKT 5 pada pengukuran Tingkat Ketersiapan Teknologi (TKT).

Kata kunci: industri 4.0, mesin perkakas, pemantauan.

Abstract

Manufacturing industries have faced a new era, known as the era of Industry 4.0, which has several main objectives that is increasing efficiency, reducing wastes and production costs. In related with the demands of competition in a global industry that prioritizes efficiency, it is necessary to increase the efficiency of electricity consumption by carrying out a strategy to reduce electricity consumption. This strategy required historical data on electricity consumption. Electrical energy monitoring system is needed to monitor and store the data measurement. The energy monitoring module measures the energy consumed by the machine and the measurement data is stored in a database. Testing of the energy monitoring module was carried out on a lathe machine with 550 Watt driving motor with single-phase motor type. The measurement data is visualized on the energy monitoring web interface. The results of testing sensor readings were compared with measuring instrument, the results of the voltage sensor accuracy was 0.96% and the current sensor was 0.92%. The accuracy of the sensor readings according to IEC standards no.13B-23 which is classified into group III with an accuracy 1.0%. The energy monitoring module has 6 Wh power requirement and is equipped with a battery that can be operated for 2 hours 25 minutes. The energy monitoring module is considered as level 5 based on Technology Readiness Level.

Keywords: industry 4.0, machine tools, monitoring.

1. Pendahuluan

Industri manufaktur telah memasuki era baru, yaitu era Industri 4.0 yang mempunyai tujuan utama antara lain untuk peningkatan efisiensi, pengurangan pemborosan dan penurunan ongkos produksi. Penerapan paradigma Industri 4.0 memerlukan persyaratan pokok, yaitu semua elemen produksi seperti peralatan produksi, operator dan benda kerja harus mempunyai kecerdasan [1]. Implementasi konsep Industri 4.0 dilakukan dengan cara mendesain proses dan manajemen informasi untuk mencapai *smart manufacturing* [2]. *Workshop* pemesinan merupakan bagian dari area manufaktur yang

terdistribusi secara luas. Hal ini menyebabkan kebutuhan/konsumsi energi yang digunakan tidak terukur secara jelas. Peningkatan yang signifikan dari biaya energi dan kelangkaan sumber daya energi menyebabkan perencanaan dan penjadwalan efisiensi penggunaan energi harus diterapkan [3], sehingga produsen dari pembuat mesin perkakas melakukan pengembangan sistem pemantauan dan evaluasi konsumsi energi pada mesin perkakas [4]. Efisiensi penggunaan energi listrik menjadi faktor penting dalam industri untuk mengurangi biaya produksi dan dapat kompetitif di pasar [5]. Namun, karena sistem konsumsi energi dan perubahan energi yang dinamis dalam sebuah bengkel pemesinan, produsen mesin

masih belum mendapatkan metode yang efektif untuk memantau dan mengelola efisiensi energi, sehingga dibutuhkan suatu model metode pemantauan dan pengelolaan efisiensi energi [6].

Sehubungan dengan tuntutan persaingan dalam industri global yang mengutamakan efisiensi, maka diperlukan peningkatan efisiensi konsumsi energi listrik dengan melakukan strategi pengurangan konsumsi energi listrik. Strategi tersebut memerlukan data historis konsumsi energi listrik, sehingga dibutuhkan sistem pemantauan energi listrik untuk memantau dan menyimpan data historis tersebut [7].

Mesin perkakas secara umum tidak dilengkapi dengan sistem pemantauan konsumsi energi listrik, sehingga mesin perkakas membutuhkan perangkat pengendali tambahan agar dapat memantau dan menyimpan data historis penggunaan energi. Modul pemantau energi listrik memiliki sensor arus dan sensor tegangan. Sensor tersebut berfungsi untuk mengukur arus, tegangan, daya dan energi listrik yang digunakan pada mesin perkakas [8]. Data pengukuran dikirimkan ke *single board computer* melalui komunikasi serial [9]. Data pengukuran selanjutnya dilakukan pengolahan dan disimpan dalam basis data [10]. Data yang telah diperoleh akan diolah menjadi informasi dalam bentuk visualisasi data pada antarmuka situs.

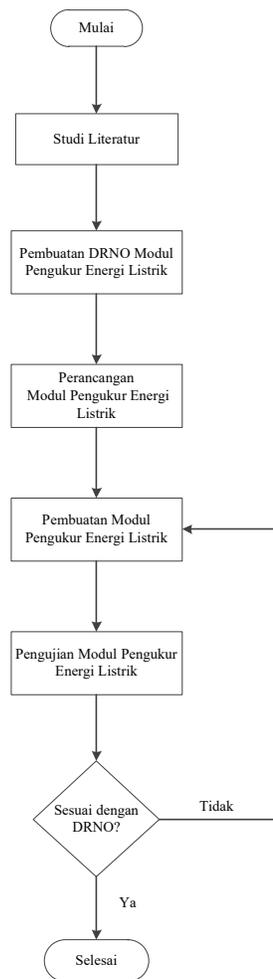
Pada kajian ini dilakukan perancangan dan pembuatan modul pemantau penggunaan energi listrik pada mesin perkakas konvensional. Modul pemantau energi listrik bekerja dengan mengukur energi listrik yang digunakan pada mesin perkakas konvensional berpenggerak motor listrik 1 fasa. Data energi listrik yang telah terukur disimpan dalam basis data dan ditampilkan pada antarmuka situs.

2. Metode

Kajian ini diawali dengan studi literatur pencarian informasi mengenai objek penelitian dan objek studi kasus melalui literatur-literatur dari internet dan cetak. Informasi yang dicari merupakan konsep pengembangan modul pengukur energi listrik pada mesin perkakas. Pengembangan modul pemantau penggunaan energi mesin melalui beberapa tahapan yaitu studi literatur, pembuatan DRNO (*Design Requirement and Objectives*), perancangan modul pengukur energi dan pengujian modul pengukur energi.

Pada tahap penentuan DRNO, dipilih kebutuhan fitur pada modul pemantau penggunaan energi. Tahapan selanjutnya menentukan komponen-komponen penyusun modul pemantau energi yang dapat memenuhi kebutuhan yang telah ditetapkan. Komponen penyusun modul pemantau energi dipasang pada selubung (*casing*) sebagai wadah pelindung komponen modul pemantau energi. Modul pemantau penggunaan energi diuji pada mesin bubut dengan motor berpenggerak 1 fasa dan kapasitas daya motor 550 Watt. Pengujian modul pemantau energi dilakukan dengan mengukur penggunaan energi pada

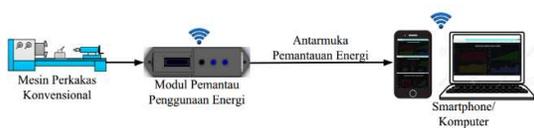
mesin perkakas bubut yang melakukan operasi pembubutan. Tahapan kajian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir kajian.

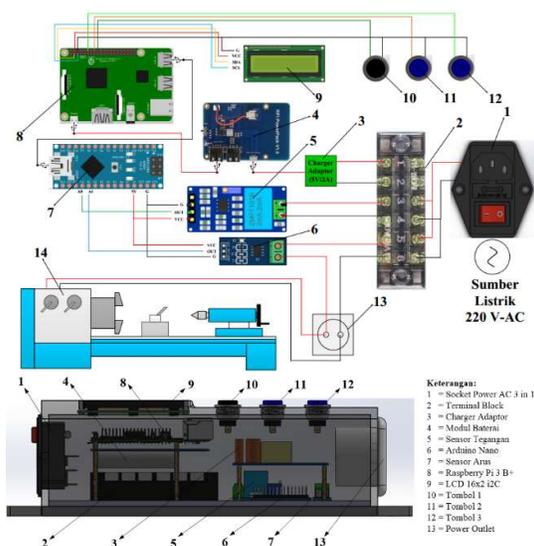
Konsep Kerja Alat

Modul pemantau penggunaan energi mesin berfungsi untuk mengukur penggunaan energi yang digunakan mesin selama beroperasi. Setiap mesin perkakas dipasang modul pemantau penggunaan energi. Konsep pemasangan modul pemantau energi pada setiap mesin bertujuan memberi identitas mesin yang sedang dilakukan pemantauan energi. Modul pemantau energi mengukur tegangan, arus, daya dan energi pada mesin perkakas, kemudian data pengukuran tersebut disimpan dalam basis data. Data pengukuran selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk grafik pada antarmuka situs pemantauan energi mesin. Antarmuka situs pemantauan energi dapat diakses melalui perangkat pengguna seperti *smartphone* atau komputer melalui jaringan lokal. Konsep kerja modul pemantau penggunaan energi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Konsep kerja modul pemantau penggunaan energi mesin.

Alat yang dikembangkan merupakan modul pemantau energi yang memiliki fitur pengukuran penggunaan energi pada mesin perkakas. *Casing* pelindung terdiri dari *casing* atas dan *casing* bawah. Komponen-komponen elektronik pengendali modul seperti *single board computer* (SBC), mikrokontroler, sensor-sensor, baterai, dan terminal blok dipasang di *casing* bawah. Komponen pendukung modul pemantau seperti *power outlet*, *socket power AC 3 in 1*, LCD, *charger adaptor*, dan tombol-tombol dipasang di *casing* atas. Skema komponen modul pemantau energi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema komponen modul pemantau energi.

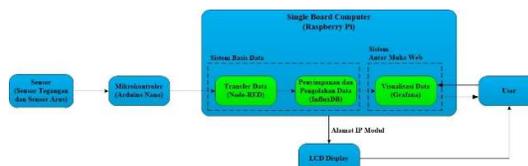
Pembuatan modul pemantau energi mesin dilakukan melalui tahapan perancangan desain *casing* dan tata letak komponen modul, desain *mockup* dan proses produksi *casing*. Model *casing* yang telah dibuat dilakukan proses produksi pembuatan prototipe *casing* modul pemantau. Material yang digunakan berjenis *High Density Polyethylene* (HDPE) yang berbentuk batang (*rod*). Material HDPE dipilih karena memiliki sifat mampu mesin yang baik dan hasil penyelesaian akhir (*finishing*) pada permukaan yang baik. Jenis proses pemesinan yang dilakukan untuk membuat prototipe *casing* modul pemantau yaitu proses bubut, proses frais dan proses gurdi. Prototipe modul pemantau energi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Prototipe modul pemantau energi.

Alur Proses Transfer Data

Proses transfer data merupakan proses menerima data pengukuran dari sensor yang dikirimkan ke *single board computer* melalui komunikasi serial. Perangkat lunak Node-RED digunakan untuk menerima data pengukuran dan menyimpan data tersebut ke basis data. Perangkat lunak diakses menggunakan *web browser* Raspberry Pi pada *port* 1880. Basis data InfluxDB digunakan untuk mengolah dan menyimpan data pengukuran yang telah dikirimkan dari mikrokontroler. Alur proses transfer data dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Alur proses transfer data.

Sistem basis data berfungsi untuk menerima dan menyimpan data pengukuran dari sensor. Modul pemantau menggunakan jenis basis data tipe deret waktu (*time-series database*). Jenis basis data tipe deret waktu memiliki fitur kompresi data yang dapat menghapus data pengukuran dan diatur secara berkala. Data yang telah diterima oleh *Single Board Computer* (SBC) dikelompokkan berdasarkan data pengukuran yaitu data tegangan, data arus dan data energi. Pengiriman data dapat dilakukan apabila data pengukuran telah dikelompokkan. Proses transfer data pengukuran dilakukan dengan memberikan perintah berupa *node* pada perangkat lunak Node-RED.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian Pembacaan Sensor

Pengujian pembacaan hasil pengukuran sensor pada modul pemantau energi dilakukan untuk mengetahui keakuratan pembacaan sensor. Hasil pengukuran data sensor pada modul dibandingkan dengan alat ukur listrik yang memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi. Tabel 1 merupakan klasifikasi tingkat pengukuran alat ukur listrik berdasarkan standar IEC (*International Electrotechnical Commission*) 13B-23 tentang *electrical measuring instruments*.

Tabel 1. Klasifikasi ketelitian alat ukur listrik (IEC 13B-23).

Golongan	Ketelitian Alat Ukur	Keterangan
I	±0,05 %; ±0,1 %; ±0,2 %	<ul style="list-style-type: none"> Alat ukur dengan tingkat kepresisian tinggi. Digunakan pada skala laboratorium.
II	±0,5 %	<ul style="list-style-type: none"> Alat ukur untuk pengukuran-pengukuran yang presisi. Alat ukur bersifat portabel.
III	±1,0 %	<ul style="list-style-type: none"> Alat ukur dengan tingkat presisi lebih rendah dibandingkan golongan II. Alat ukur bersifat portabel kecil atau pada panel.
IV	±1,5 %; ± 2,5 %; ±5 %	<ul style="list-style-type: none"> Alat ukur yang digunakan pada panel-panel. Alat ukur tidak begitu memperhatikan tingkat kepresisian.

Pengujian sensor modul dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dan hasil pembacaan alat ukur pembanding (multimeter dan *clampmeter*). Keakuratan pembacaan sensor dilakukan dengan menghitung persentase kesalahan sensor dengan hasil pembacaan alat ukur pembanding yang memiliki ketelitian yang lebih tinggi. Persentase *error* pembacaan sensor dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\% \text{ error} = \left| \frac{\text{meter} - \text{prototi}}{\text{meter}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Hasil pembacaan tegangan listrik pada sensor tegangan modul pemantau dan alat ukur pembanding dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil pembacaan arus listrik pada sensor arus modul pemantau dan alat ukur pembanding dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil pembacaan sensor tegangan dan multimeter digital.

Percobaan ke-	Sensor Tegangan (V)	Multimeter (V)	Error (%)
1	225	221	1,81
2	226	221	2,26
3	217	220	1,36
4	220	220	0
5	220	218	0,92
6	218	216	0,93
7	220	220	0
8	217	219	0,91
9	220	220	0
10	215	218	1,38
Rata-Rata Error			0,96

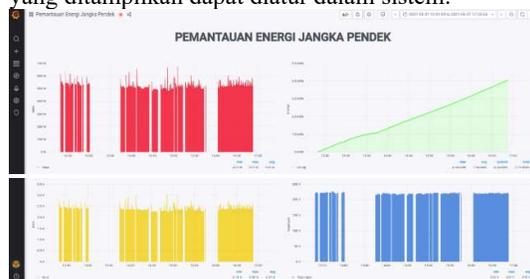
Tabel 3. Hasil pembacaan sensor arus dan *clampmeter*.

Percobaan ke-	Sensor Arus (A)	Clampmeter (A)	Error (%)
1	2,35	2,32	1,19
2	2,32	2,31	0,40
3	2,34	2,5	1,60
4	2,48	2,5	0,80
5	2,31	2,5	0,40
6	2,33	2,31	0,80
7	2,35	2,5	2
8	2,31	2,49	0,80
9	2,32	2,5	0,80
10	2,48	2,49	0,40
Rata-Rata Error			0,92

Hasil pengujian pembacaan sensor pada Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan sensor tegangan memiliki ketelitian sebesar 0,96% dan sensor arus memiliki ketelitian sebesar 0,92%. Ketelitian pembacaan sensor modul mempunyai nilai keakuratan sesuai standar IEC No. 13B-23 yang klasifikasikan ke golongan III dengan nilai ketelitian 1,0%.

Pengujian Visualisasi Data pada Situs Modul Pemantau

Hasil dari pengukuran energi listrik pada mesin perkakas perlu ditampilkan sebagai informasi yang berguna dan mempermudah pengguna dalam mengambil kesimpulan berdasarkan data historis pengukuran. Gambar 6 memperlihatkan grafik *time series* dari daya listrik (grafik merah), energi listrik (grafik hijau), arus listrik (grafik kuning), dan tegangan listrik (grafik biru) pada antarmuka Pemantauan Energi Jangka Pendek. Rentang waktu yang ditampilkan dapat diatur dalam sistem.



Gambar 6. Antarmuka pemantauan energi jangka pendek.

Gambar 7 menunjukkan grafik pemantauan data pengukuran daya listrik dan energi listrik dengan rentang waktu 1 hari, 1 minggu, 1 bulan, dan 1 tahun pada antarmuka Pemantauan Energi Jangka Panjang.



Gambar 7. Antarmuka pemantauan energi jangka panjang.

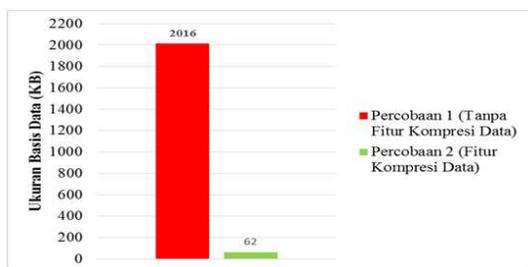
Pengujian Ukuran Basis Data

Pengujian ukuran basis data modul pemantau menggunakan skema percobaan, yaitu percobaan pertama pengujian modul pemantau energi tanpa menggunakan fitur kompresi data dan percobaan

kedua pengujian modul pemantau energi menggunakan fitur kompresi data. Percobaan ini dilakukan untuk membandingkan pengaruh penggunaan fitur kompresi data terhadap jumlah data pengukuran (*datapoint*) dan ukuran basis data modul pemantau energi. Pengujian dilakukan dengan melakukan pengukuran selama 40 jam (8 jam/hari) dalam kurun waktu 1 minggu.

Pengujian ukuran basis data modul pemantau energi juga dilakukan pengujian modul pemantau dengan menggunakan fitur kompresi data dan pengujian modul menggunakan fitur kompresi data. Gambar 8 merupakan grafik percobaan pengujian ukuran basis data. Pada percobaan pertama (modul pemantau tanpa menggunakan fitur kompresi data) memiliki ukuran kapasitas data sebesar 2016 KB (*kilobyte*). Pada percobaan kedua (modul pemantau menggunakan fitur kompresi data) memiliki ukuran kapasitas data sebesar 62 KB (*kilobyte*). Ukuran kapasitas data percobaan kedua hanya sebesar 3% dari ukuran kapasitas data percobaan pertama. Perbedaan ukuran basis data yang signifikan pada diakibatkan oleh perbandingan jumlah *data point* yang sangat besar pada kedua percobaan tersebut.

Penggunaan fitur kompresi data dengan ukuran 14 *byte/data point* memungkinkan ukuran kapasitas penyimpanan data pengukuran sekitar 13,6 MB (*Megabyte*) untuk menyimpan data selama satu tahun. Modul pemantau tanpa menggunakan fitur kompresi data membutuhkan kapasitas penyimpanan sebesar 441,5 MB (*Megabyte*) untuk menyimpan data selama satu tahun. Data perbandingan ukuran basis data pada percobaan pertama dan percobaan kedua dapat dilihat pada Gambar 8.



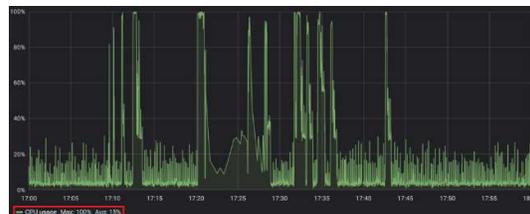
Gambar 8. Hubungan penggunaan fitur kompresi data terhadap ukuran basis data.

Pengujian Kinerja CPU dan RAM

Pengujian kinerja CPU dan RAM pada modul pemantau menggunakan skema percobaan yaitu percobaan pertama pengujian modul pemantau energi tanpa menggunakan fitur kompresi data dan percobaan kedua pengujian modul pemantau energi menggunakan fitur kompresi data. Percobaan ini dilakukan untuk membandingkan pengaruh penggunaan fitur kompresi data terhadap kinerja CPU dan RAM pada modul pemantau energi.

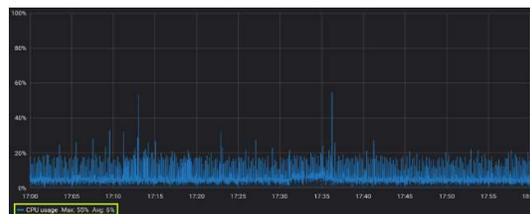
Gambar 9 menunjukkan kinerja CPU pada percobaan modul pemantau tanpa menggunakan fitur kompresi

data. Pada percobaan pertama modul pemantau energi kinerja CPU memiliki rata-rata sebesar 15% dan maksimum sebesar 100%. Persentase kinerja CPU pada percobaan pertama cukup fluktuatif karena beban data untuk memvisualisasikan data yang relatif berat.



Gambar 9. Kinerja CPU tanpa fitur kompresi.

Gambar 10 menunjukkan kinerja CPU pada percobaan modul pemantau menggunakan fitur kompresi data. Pada percobaan kedua modul pemantau energi kinerja CPU memiliki rata-rata sebesar 6% dan maksimum sebesar 55%. Persentase kinerja CPU pada percobaan kedua cukup stabil selama modul pemantau melakukan proses visualisasi data. Pada percobaan kedua CPU hanya menggunakan kapasitas sebesar 55% tersebut dalam waktu yang sangat singkat dan dapat menangani proses visualisasi dengan cukup ringan.



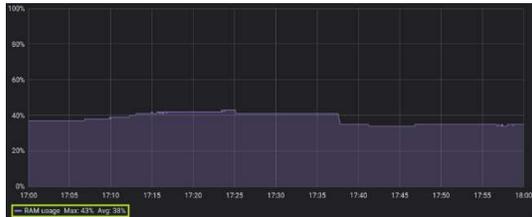
Gambar 10. Kinerja CPU menggunakan fitur kompresi.

Gambar 11 menunjukkan kinerja RAM pada percobaan modul pemantau tanpa menggunakan fitur kompresi data. Pada percobaan pertama modul pemantau energi kinerja RAM memiliki rata-rata sebesar 32% dan maksimum sebesar 100%. Pada saat beban data ditingkatkan sampai titik tertentu, kinerja RAM meningkat hingga 100% yang menunjukkan bahwa modul pemantau kedua membutuhkan banyak memori saat melakukan visualisasi data jangka panjang. Grafik ini juga menunjukkan bahwa RAM yang digunakan masih kurang memadai ketika tidak digunakan fitur kompresi data yang ditandai dengan tidak adanya RAM yang tersisa selama selang waktu beberapa menit.



Gambar 11. Kinerja RAM tanpa fitur kompresi.

Gambar 12 menunjukkan kinerja RAM pada percobaan modul pemantau menggunakan fitur kompresi data. Pada percobaan kedua modul pemantau energi kinerja RAM memiliki rata-rata sebesar 38% dan penggunaan maksimum sebesar 43%. Persentase kinerja RAM pada percobaan kedua cukup stabil selama modul pemantau melakukan proses visualisasi data. Kapasitas RAM pada percobaan kedua masih tercukupi yang ditandai dengan masih banyaknya kapasitas memori yang tersisa pada modul pemantau.



Gambar 12. Kinerja RAM menggunakan fitur kompresi.

Pengujian Kerja LCD dan Tombol

LCD menampilkan informasi pada modul pemantau yaitu alamat IP antarmuka situs, nama modul pemantau, dan perintah *restart/shutdown*. Perintah pada modul pemantau dapat dijalankan dengan menekan tombol yang memiliki fungsi tertentu. Tombol 1 berfungsi untuk menampilkan alamat IP modul pemantau pada layar LCD. Tombol 2 berfungsi untuk menampilkan nama modul pemantau yang sedang diakses. Informasi nama modul ditampilkan pada layar LCD. Tombol 3 berfungsi untuk menampilkan menu *restart* dan *shutdown* modul pemantau. Tampilan layar LCD pada modul pemantau ketika sedang diakses dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Tampilan layar LCD (a) tampilan default, (b) tampilan alamat IP, (c) tampilan nama modul dan (d) tampilan menu restart/off.

Pengujian Daya Tahan Penggunaan Baterai

Pengujian daya tahan penggunaan baterai pada modul pemantau dilakukan untuk mengetahui durasi penggunaan baterai dalam memenuhi suplai daya listrik modul pemantau energi. Kebutuhan daya komponen-komponen elektrik yang disuplai modul baterai dihitung untuk menentukan kapasitas modul baterai. Total kebutuhan daya komponen pada modul pemantau dihitung berdasarkan *datasheets* dari produsen komponen sebesar 6,12 Watt. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya dilakukan pengujian konsumsi daya listrik modul pemantau menggunakan Energimeter.

Kebutuhan arus komponen elektrik modul pemantau energi yaitu sebesar 1225,5 mA. Penentuan kapasitas baterai menjadi faktor utama agar komponen modul pemantau dapat diaktifkan. Apabila kapasitas baterai kurang dari atau sama dengan besarnya kebutuhan daya modul pemantau, maka modul pemantau dapat mengalami *tripped* daya pada saat suplai daya beralih ke mode baterai. Modul baterai dengan kapasitas baterai 3000 mAh dipilih karena dapat menyuplai kebutuhan daya modul pemantau sebesar 1225,5 mA. Durasi penggunaan baterai dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$\text{Durasi Penggunaan Baterai} = \frac{\text{Kapasitas Baterai}}{\text{Kebutuhan daya}} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Durasi Penggunaan Baterai} = \frac{3000 \text{ mAh}}{1225,5 \text{ mA}}$$

$$\text{Durasi Penggunaan Baterai} = 2,5 \text{ Jam}$$

Hasil perhitungan durasi penggunaan baterai menggunakan Persamaan 2 menjadi data perbandingan dengan hasil perhitungan durasi penggunaan baterai secara aktual. Pengujian durasi waktu penggunaan baterai dihitung menggunakan *stopwatch* saat modul pemantau energi diaktifkan sampai modul pemantau energi non-aktif karena daya baterai yang telah habis. Hasil pengukuran durasi waktu penggunaan baterai secara aktual yaitu selama 2 jam 25 menit.

Pengukuran Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT)

Pengukuran Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) dilakukan untuk mengetahui level kesiapterapan teknologi dari modul pemantau penggunaan energi pada mesin perkakas konvensional. Pengukuran dilakukan dengan mengisi formulir TKT-Meter yang disediakan oleh Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi (Ristekdikti).

Saat ini modul pemantau energi telah memenuhi syarat kriteria indikator TKT 5. Modul pemantau energi selanjutnya diperlukan implementasi prototipe laboratorium untuk menguji kelayakan rekayasa dari teknologi perangkat lunak. Level ini menunjukkan bahwa diperlukan penelitian dan uji coba lebih lanjut sebelum sistem ini dapat dikomersialkan. Hasil pengukuran Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) modul pemantau energi dengan level indikator TKT 5 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengukuran Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) pada modul pemantau energi.

5 atau % terpenuhinya						Indikator TKT 5 [beri tanda cross (X) pada kolom yang sesuai]					
[beri tanda cross (X) pada kolom yang sesuai]											
No	0	1	2	3	4	5	(0=tidak terpenuhi; 1=20%; 2=40%; 3=60%; 4=80%; 5=100% atau terpenuhi)				
1						X	1. Mengajukan tingkatan dimana teknologi perangkat lunak yang dikembangkan siap untuk diintegrasikan dengan sistem eksisting				
2						X	2. Implementasi prototipe yang sesuai jumlah, dengan lingkup/intermedua dari target				
3						X	3. Dilakukan eksperimen terhadap permasalahan yang sesungguhnya (real)				
4						X	4. Melakukan simulasi terhadap antarmuka dari sistem eksisting				
5						X	5. Arsitektur perangkat lunak sistem selesai				
6						X	6. Algoritma berjalan pada (multi) prosesor di lingkungan operasional dengan karakteristik yang sesuai ekspektasi				
S	0	0	0	0	0	4	86 %				
S							Indikator TKT 5 = TERPENUHI				

4. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan yang dilakukan sebelumnya, kesimpulan dalam kajian ini yakni hasil pengujian pembacaan sensor dibandingkan dengan pembacaan alat ukur pembanding didapatkan hasil ketelitian sensor tegangan 0,96% dan sensor arus 0,92%. Ketelitian pembacaan sensor modul mempunyai nilai keakuratan sesuai standar IEC No. 13B-23 yang klasifikasikan ke golongan III dengan nilai keakuratan 1,0%. Modul pemantau penggunaan energi telah berhasil melakukan pengukuran energi listrik dari mesin perkakas, menyimpan data dan memvisualisasikan data dalam bentuk antarmuka web.

Daftar Pustaka

- [1] Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP* [Internet]. 2016;52:173–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- [2] Raharno S., Cooper G. Jumping to Industry 4.0 through process design and managing information for smart manufacturing: Configurable virtual workstation. *Ind 40 – Shap Futur Digit World*. 2020; 47–51.
- [3] X. Lu, S. Wang, W. Li, P. Jiang, dan C. Zhang. Development of a WSN based Real Time Energy Monitoring Platform for Industrial Applications. *IEEE 19th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*. 2015; 337-342.
- [4] Harja HB, Prakosa T, Raharno S, Martawirya YY, Nurhadi I, Nograho AS. Preliminary Development of Real Time Usage-Phase Monitoring System for CNC Machine Tools with a Case Study on CNC Machine VMC 250. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2018;319(1):0–6.
- [5] T. Javied, J. Bakakeu, D. Gessinger, dan J. Franke Strategic Energy Management in Industry 4.0 Environment. *Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2018; 1-4.
- [6] Chen X, Li C, Tang Y, Xiao Q. An Internet of Things based energy efficiency monitoring and management system for machining workshop. *J Clean Prod*. 2018;199:957–68. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.211>
- [7] T. Javied, S. Huprich, dan J. Franke . Cloud based Energy Management System Compatible with the Industry 4.0 Requirements. *IFAC-PapersOnline*. 2019; Vol.52 ISSN 2405-8963 171-175. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.018>.
- [8] Abubakar K., Mustafa S. N., Shareef M. W., dan Mustapha M. Calibration of ZMPT101B Voltage Sensor Module Using Polynomial Regression for Accurate Load Monitoring. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;vol.12 No.4.
- [9] Blackstock M., dan Lea R. Toward a Distributed Data Flow Platform for the Web of Things (Distributed Node-RED). *5th International Workshop on Web of Things*. 2014; 34-39 from: <https://doi.org/10.1145/2684432.2684439>
- [10] R. Elamsri, dan S. Navanthe. *Fundamentals of Database Systems*. Sixth Edition Pearson Education Inc. 2011.