Studi Kinerja Sistem Monitoring Dan Proteksi Otomatis Mesin Pencacah Rumput Bertenaga Surya Berbasis *Internet Of Things (IOT)*

Mohamad Garda Winabror[*1], Miftakhul Huda[2], Septriandi Wirayoga[3]

[1,2,3]Prodi Teknik Elektronika, Jurusan Teknik Elektro,Politeknik Negeri Malang, Indonesia
Email: [1]2241190001@student.polinema.ac.id, [2]miftakhul.huda@polinema.ac.id,
[3]yoga.septriandi@polinema.ac.id

Nomor Handphone : 083831734298

Abstrak

Pencacahan pakan ternak di Kelompok Ternak Desa Batokan yang masih manual atau berbahan bakar minyak mendorong pengembangan mesin pencacah bertenaga surya. Namun, sistem ini rentan rusak akibat beban kelistrikan berlebih dan panas motor. Penelitian ini bertujuan merancang sistem pemantauan dan proteksi otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mengamankan komponen dan mempermudah evaluasi jarak jauh. Sistem dikendalikan mikrokontroler ESP32 yang membaca arus dan tegangan (PZEM-017) serta suhu motor (*Thermocouple Type-K*). Data telemetri dikirim via Wi-Fi ke *Firebase Realtime Database* untuk ditampilkan pada *Web Dashboard*. Sistem otomatis memutus daya melalui *relay* jika terdeteksi anomali parameter. Hasil pengujian menunjukkan proteksi kelistrikan akurat memutus arus saat beban melampaui 20,0 A (dengan algoritma *soft-start*) dan tegangan di bawah 22,6 V (mencegah *deep discharge*). Proteksi suhu memutus motor saat permukaan *casing* mencapai 60,0 °C, menjaga suhu inti di bawah batas isolasi Kelas E (120 °C). Pengujian kualitas layanan telemetri berjalan *near real-time* dengan rata-rata *delay* 500 ms. Kesimpulannya, sistem ini terbukti efektif meningkatkan keandalan dan kelayakan operasional mesin jangka panjang.

Kata kunci: Mesin Pencacah Rumput, Panel Surya, *Internet of Things* (IoT), Sistem Proteksi, ESP32, *Firebase*.

Abstract

Livestock feed chopping in the Batokan Village Livestock Group, which is still performed manually or using fossil-fueled engines, encourages the development of a solar-powered chopping machine. However, this system is prone to damage caused by electrical overloads and motor heating. This study aims to design an automatic monitoring and protection system based on the Internet of Things (IoT) to secure components and facilitate remote evaluation. The system is controlled by an ESP32 microcontroller, which reads the current and voltage (PZEM-017) along with the motor temperature (Type-K Thermocouple). Telemetry data is transmitted via Wi-Fi to the Firebase Realtime Database to be displayed on a Web Dashboard. The system automatically cuts off power via a relay if parameter anomalies are detected. The test results show that the electrical protection accurately disconnects the current when the load exceeds 20.0 A (equipped with a soft-start algorithm) and when the voltage drops below 22.6 V (preventing deep discharge). The temperature protection shuts off the motor when the casing surface reaches 60.0 °C, maintaining the core temperature below the Class E insulation limit (120 °C). The telemetry quality of service testing operates near real-time with an average delay of 500 ms. In conclusion, this system is proven effective in enhancing the reliability and long-term operational feasibility of the machine.

Keywords: *esp32, firebase, grass chopper machine, internet of things (IoT), protection system, solar panel.*

This work is an open access article and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. PENDAHULUAN

Pakan ternak menempati porsi krusial dalam manajemen pemeliharaan kambing Jawa Randu, di mana penyediaan hijauan yang berkualitas berdampak langsung pada laju pertumbuhan harian, kesehatan sistem imun, dan keberhasilan program pembibitan [1]. Saat ini, Kelompok Ternak Desa Batokan mengelola populasi sebanyak 86 ekor kambing yang membutuhkan pasokan rumput segar mencapai 258 kg setiap harinya. Proses pemenuhan pakan dalam skala besar tersebut mayoritas masih dilakukan melalui pencacahan manual menggunakan sabit yang dinilai sangat tidak efisien karena menguras terlalu banyak waktu dan tenaga fisik [2]. Oleh karena itu, peternak sangat membutuhkan inovasi mesin pencacah mekanis guna mempercepat waktu produksi pakan secara signifikan [3].

Guna meningkatkan efisiensi kerja dan menekan biaya operasional listrik, penerapan mesin pencacah bertenaga surya menjadi solusi solutif untuk mewujudkan kemandirian energi. Akan tetapi, keandalan sistem bertenaga surya berisiko mengalami kerusakan komponen secara permanen akibat gangguan elektrikal dan suhu motor penggerak yang tidak terpantau [4]. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), ketiadaan pengamanan berisiko memicu kerusakan baterai akibat tegangan turun ekstrem (*under-voltage/deep discharge*). Sementara pada sisi penggerak motor DC, kendala yang paling sering muncul adalah lonjakan arus *start* yang tinggi, beban berlebih (*overload*), serta panas berlebih pada belitan motor (*overheating*) [5].

Menjawab identifikasi masalah tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem proteksi otomatis yang diintegrasikan dengan teknologi *Internet of Things* (IoT). Pemantauan dan proteksi dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 sebagai *Master Control* untuk membaca parameter tegangan dan arus, serta memantau suhu motor secara terus-menerus. Jika terdeteksi anomali atau kondisi di luar batas titik maksimum, mikrokontroler akan menginstruksikan pemutusan daya secara mekanis. Seluruh data telemetri operasional dikirimkan secara *real-time* ke basis data untuk ditampilkan pada *Web Dashboard*.

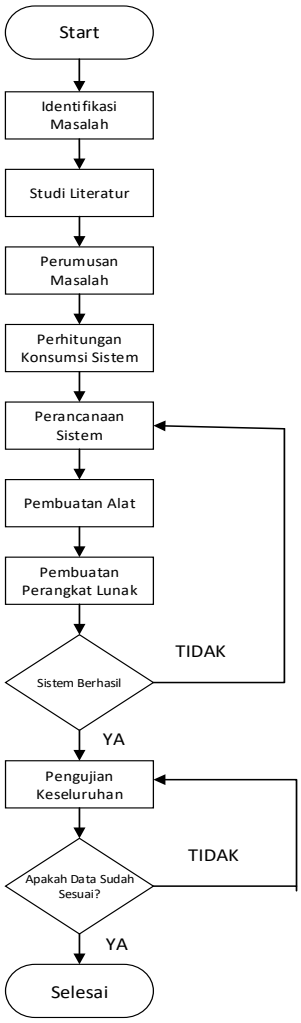
Tujuan utama penelitian ini adalah merancang bangun sistem proteksi yang andal terhadap anomali kelistrikan mesin pencacah bertenaga surya, sekaligus mengevaluasi kinerjanya secara *real-time* jarak jauh. Melalui pemantauan parameter kritis seperti suhu motor, kecepatan putar (RPM), tegangan, dan arus, penelitian ini diharapkan tidak hanya mengamankan siklus hidup perangkat keras, tetapi juga memfasilitasi evaluasi kinerja untuk mendukung penerapan pendekatan perawatan prediktif berdasarkan data lapangan yang terukur.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode riset dan pengembangan (*Research and Development*) Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan serta menyempurnakan keandalan alat melalui sistem monitoring dan proteksi multi-layer agar operasional mesin lebih efektif dan aman bagi pengguna. Pengembangan dilakukan dengan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali yang memproses data sensor PZEM-017, *thermocouple type k*, dan proximity secara *real-time*. Inovasi utama yang dihadirkan adalah otomatisasi pemutusan arus melalui relay saat kondisi kritis serta visualisasi data berbasis IoT melalui *Firebase* dan *web hosting GitHub Pages*. Hal ini bertujuan untuk mentransformasi sistem kontrol konvensional menjadi sistem cerdas yang mampu melakukan perawatan prediktif guna mencegah kerusakan komponen permanen pada mesin pencacah.

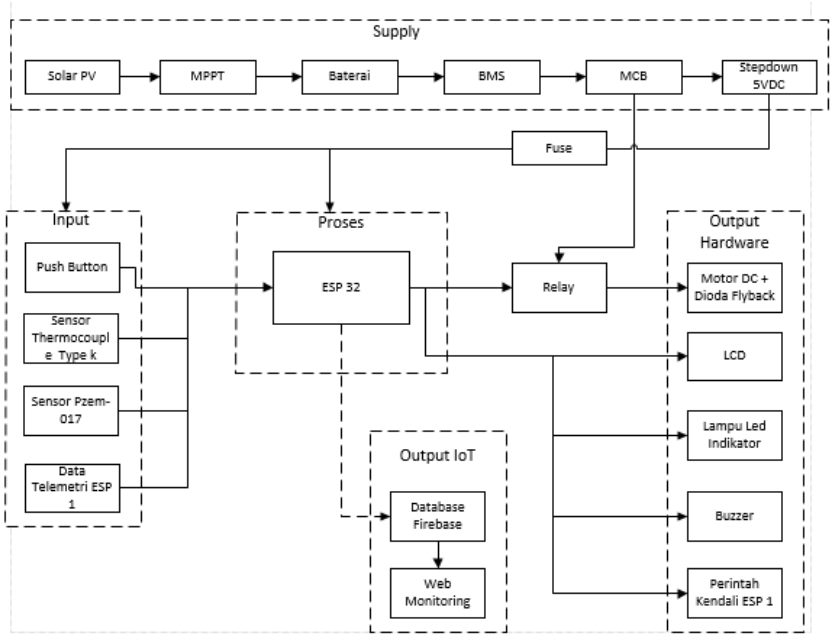
2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang diterapkan dalam proyek ini memiliki alur yang terstruktur, dimulai dari identifikasi masalah hingga analisa dan kesimpulan dalam laporan. Pada gambar 1 ditunjukkan tahapan yang akan dilakukan dalam pembuatan sistem sebagai berikut :



Gambar 1 Tahapan Penelitian

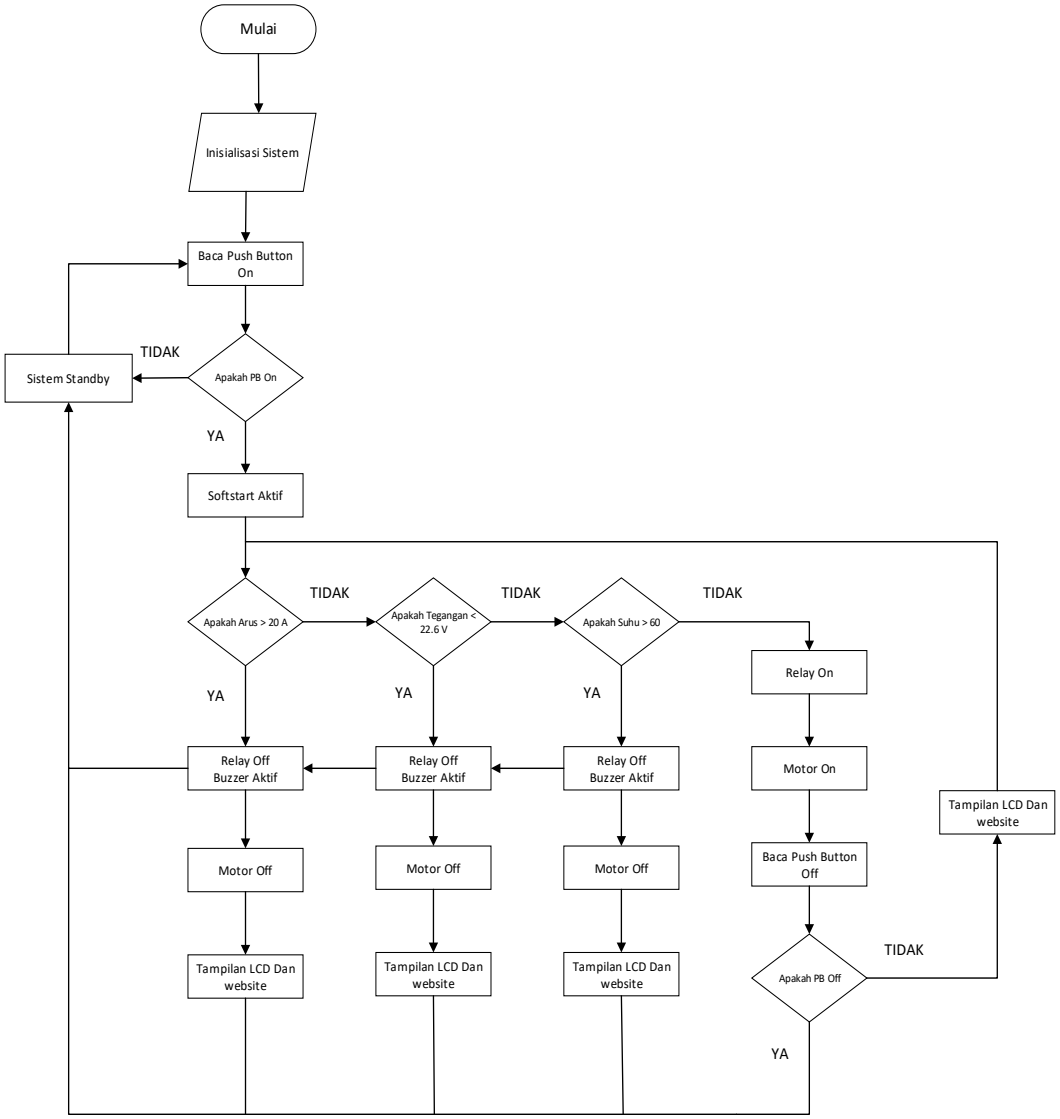
2.2 Diagram Blok Sistem



Gambar 2 Diagram Blok

Berdasarkan diagram blok pada penelitian ini beroperasi melalui lima alur kerja utama yang saling terintegrasi. Blok *Supply* bersumber dari energi panel surya dan baterai (dilengkapi BMS) yang didistribusikan menjadi dua jalur utama: suplai mikrokontroler ESP32 melalui modul *stepdown* 5VDC dan suplai daya motor DC melalui komponen relai. Pada Blok *Input*, sistem mengakuisisi data operasional menggunakan saklar *push button*, sensor *Thermocouple Type-K* untuk suhu motor, sensor PZEM-017 untuk arus dan tegangan, serta data telemetri RPM dari mikrokontroler sekunder (ESP 1). Seluruh data masukan tersebut kemudian diolah pada Blok *Proses* oleh ESP32 sebagai pusat kendali (*Master Node*) untuk dievaluasi berdasarkan algoritma batas aman kelistrikan dan suhu secara *real-time*. Hasil komputasi ini menghasilkan instruksi eksekusi menuju Blok *Output Hardware*, yang bertugas memutus atau menghubungkan relai motor (dilengkapi dioda *flyback*), menampilkan pembacaan sensor pada layar LCD lokal, menyalakan indikator bahaya (LED dan *buzzer*), serta mengirimkan instruksi darurat ke ESP 1. Secara bersamaan, Blok *Output IoT* mentransmisikan seluruh data pemantauan tersebut memanfaatkan koneksi Wi-Fi ESP32 menuju *Firebase Realtime Database*, sehingga kinerja alat dan status proteksi dapat dipantau oleh operator dari jarak jauh melalui antarmuka *Web Dashboard*.

2.3 Perancangan Logika Sistem



Gambar 3 Flowchart Sistem

Berdasarkan *flowchart* pada Gambar 3, alur kerja sistem diawali dengan tahap inisialisasi mikrokontroler yang akan tetap berada pada mode siaga (*standby*) hingga saklar *push button* ON ditekan. Saat sistem diaktifkan, mikrokontroler mengeksekusi algoritma *soft-start* dan langsung

mengevaluasi tiga parameter proteksi kelistrikan secara berurutan dan *real-time*: batas arus maksimal 20 A, batas tegangan minimal baterai 22,6 V, dan batas suhu motor 60 °C. Apabila salah satu dari ketiga parameter tersebut terdeteksi melewati batas aman, sistem secara otomatis memutus relai utama, menyalakan *buzzer*, menghentikan perputaran motor, serta memperbarui peringatan bahaya pada LCD dan *website* sebelum kembali ke mode siaga. Sebaliknya, jika seluruh parameter pembacaan sensor berada dalam rentang aman, mesin akan beroperasi penuh secara normal dengan pembaruan data telemetri yang berjalan terus-menerus. Siklus pemantauan operasional ini akan terus berulang hingga operator menekan tombol OFF, yang secara langsung akan menginstruksikan sistem untuk memutus daya secara aman dan kembali ke kondisi siaga.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kalibrasi Pzem-017

Proses kalibrasi sensor Pzem-017 dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaannya terhadap multimeter sebagai alat ukur referensi. Tujuannya adalah memastikan akurasi sensor dalam mengukur tegangan, arus, dan daya. Perbedaan nilai dianalisis dalam bentuk error (%). Nilai error dihasilkan dengan perhitungan berikut:

$$Nilai\ error = \frac{Nilai\ Sensor - Nilai\ Multimeter}{Nilai\ Multimeter}\ x\ 100\% \quad (1)$$

Tabel 1 Hasil Kalibrasi Tegangan Sensor Pzem-017

No.	Tegangan Pzem-017 (V)	Tegangan Multimeter (V)	Error Tegangan (%)	Tingkat Akurasi (%)
1	6.53	6.52	0.153	99.847
2	18.02	18.01	0.055	99.944
3	19.30	19.29	0.051	99.948
4	20.89	20.87	0.095	99.904
5	21.32	21.30	0.093	99.906
6	21.74	21.72	0.092	99.908
7	22.23	22.21	0.090	99.910
8	22.62	22.59	0.132	99.867
9	23.34	23.31	0.128	99.871
10	23.93	23.90	0.126	99.874
Rata - Rata			0.117	99.883

Tabel 2 Hasil Kalibrasi Arus Sensor Pzem-017

No.	Arus Pzem-017 (A)	Arus Multimeter (A)	Error (%)	Tingkat Akurasi (%)
1	1.70	1.68	1.190	98.810
2	3.81	3.81	0	100.00
3	3.17	3.17	0	100.00
4	2.55	2.61	2.299	97.701
5	4.06	4.06	0	100.00
6	4.48	4.46	0.448	99.552
7	4.60	4.64	0.862	99.138
8	4.68	4.69	0.213	99.787
9	3.49	3.47	0.576	99.424
10	6.61	6.53	1.225	98.775
Rata - Rata			0.652	99.348

Hasil kalibrasi sensor PZEM-017 menunjukkan bahwa pembacaan data sangat linier dan berhimpit dengan alat ukur referensi. Kalkulasi persentase *error* pembacaan tegangan tercatat sangat kecil, yakni

0,117% (akurasi 99,883%), sementara persentase *error* pada parameter arus berada pada angka 0,652% (akurasi 99,348%). Karena rata-rata nilai *error* dari kedua parameter tersebut berada jauh di bawah ambang batas toleransi standar maksimal 1%, maka dapat disimpulkan bahwa sensor PZEM-017 sangat valid, andal, dan layak diimplementasikan sebagai komponen pengukur utama pada sistem proteksi dan *monitoring*.

3.2. Kalibrasi Sensor Thermocouple Type-K

Untuk memastikan keandalan data yang dihasilkan, dilakukan pengujian akurasi dengan cara membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap termometer digital standar sebagai alat ukur referensi. Dari proses pengukuran nilai akurasi dihasilkan dengan perhitugan sebagai berikut.

$$Akurasi = 100\% - error\ (\%) \qquad (2)$$

Tabel 3 Hasil Kalibrasi Thermocouple Type-K

No.	Sensor Suhu *Thermocouple Type K* (°C)	Thermometer Digital (°C)	Error (%)	Tingkat Akurasi (%)
1.	32.3	32.6	0.920	99.08
2.	32.1	32.5	1.230	98.75
3.	30.9	30.7	0.651	99.349
4.	30.7	30.8	0.324	99.676
5.	23.4	23.1	1.298	98.702
6.	23.6	23.4	0.854	99.146
7.	14.4	14.3	0.699	99.301
8.	17.1	17.1	0	100.00
9.	19.2	19.1	0.523	99.477
10.	21.2	21.2	0	100.00
	Rata - rata		0.618	99.381

Hasil kalibrasi sensor *Thermocouple Type-K* pada 10 siklus pengujian menunjukkan kepresisian tinggi dan berhimpit dengan termometer digital referensi. Sensor ini mencatat rata-rata *error* yang sangat kecil, yakni 0,618% (akurasi 99,381%) dengan selisih maksimum hanya 0,6 °C. Oleh karena itu, sensor ini terbukti sangat andal dan layak diimplementasikan sebagai sistem proteksi *overheat* otomatis pada mesin pencacah.

3.3 Pengujian Kinerja Panel Surya Dalam Sistem Pengisian Baterai

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan produksi daya panel surya dan efisiensi pengisian baterai LiFePO4 24V 40Ah oleh *controller* MPPT pada pukul 07.00–17.00 WIB. Fokus pengujian mencakup pemantauan total energi yang dihasilkan oleh panel surya serta perhitungan rasio efisiensi yang berhasil terserap ke dalam baterai. Hasil pengujian tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4 Pengujian Kinerja PV

Waktu (WIB)	Panel Surya			MPPT			Kondisi Cuaca	Efisiensi MPPT
	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)		
07.00	37.18	0.76	28.4	26.0	1.0	26.0	Berawan	91.54 %
07.30	38.77	1.10	42.7	26.5	1.4	37.1	Berawan	95.69 %
08.00	38.23	2.22	85.0	27.1	3.1	84.01	Cerah	98.83 %
08.30	29.17	7.33	213.8	28.1	7.4	207.9	Cerah	97.25 %
09.00	38.81	2.84	110.3	29.0	3.7	107.3	Berawan	97.54%

09.30	42.68	0.00	0.00	29.2	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
10.00	43.82	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
10.30	44.22	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
11.00	43.75	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
11.30	43.66	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
12.00	44.21	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
12.30	43.87	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
13.00	43.62	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
13.30	44.48	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
14.00	42.75	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
14.30	41.86	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Cerah	0.00 %
15.00	38.53	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Berawan	0.00 %
15.30	38.12	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Berawan	0.00 %
16.00	37.11	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Berawan	0.00 %
16.30	36.19	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Berawan	0.00 %
17.00	32.80	0.00	0.00	27.4	0.00	0.00	Berawan	0.00 %

Berdasarkan hasil pengujian, pengisian daya baterai dari 20% hingga penuh membutuhkan waktu 2,5 jam (07.00–09.30 WIB). Data ini sekaligus memvalidasi keberhasilan proteksi *overcharge* MPPT, di mana arus pengisian otomatis terputus (0 A) saat tegangan mencapai batas maksimal 29,2 V. Setelah *cut-off*, MPPT secara konsisten menahan tegangan pada level aman (*float voltage*) sebesar 27,4 V hingga pukul 17.00 WIB, sehingga baterai efektif terlindungi dari risiko kelebihan muatan listrik.

3.4 Hasil Monitoring Konsumsi Sistem

Pengujian ini berfokus pada hasil pemantauan konsumsi energi kelistrikan sistem secara keseluruhan selama siklus operasional. Pengambilan data dilakukan secara *real-time* menggunakan sensor PZEM-017 yang merekam parameter tegangan, arus, dan akumulasi penggunaan daya dalam satuan *Watt*-hour (Wh).

Tabel 5 Hasil Monitoring Konsumsi Sistem Selama 8 Hari

Pengujian	Waktu	Kondisi Operasional	Total Konsumsi Energi (Wh)
Hari Ke- 1	00:00 – 23:59	Standby + Mesin Aktif	324,44 Wh
Hari Ke- 2	00:00 – 23:59	Standby + Mesin Aktif	385.39 Wh
Hari Ke- 3	00:00 – 23:59	Standby + Mesin Aktif	386.74 Wh
Hari Ke- 4	00:00 – 23:59	Standby + Mesin Aktif	439.66 Wh
Hari Ke- 5	00:00 – 23:59	Standby + Mesin Aktif	445.64 Wh
Hari Ke- 6	00:00 – 23:59	Standby + Mesin Aktif	284.10 Wh

Hari Ke- 7	00:00 – 23:59	Standby + Mesin Aktif	549.47 Wh
Hari Ke- 8	00:00 – 23:59	Standby + Mesin Aktif	345.65 Wh

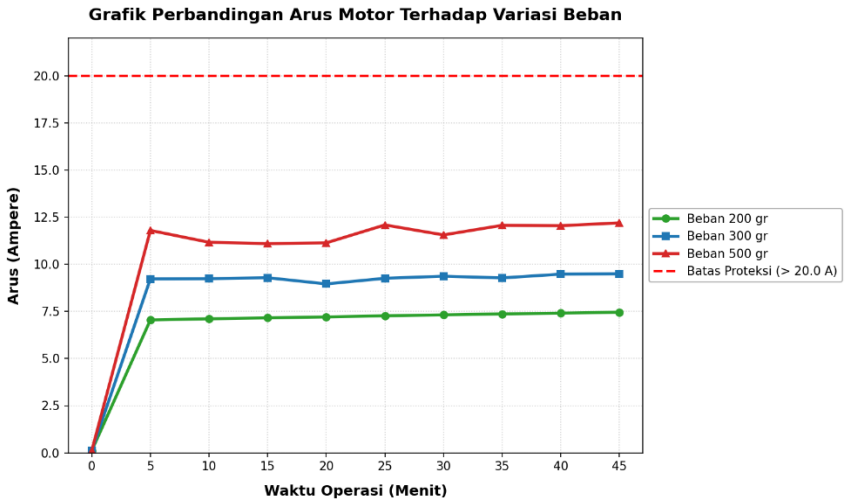
Berdasarkan Tabel 5 konsumsi energi harian mesin berfluktuasi dengan rata-rata 395,14 Wh dan puncaknya mencapai 549,47 Wh pada Hari ke-7. Kebutuhan daya ini mampu ditopang penuh oleh suplai panel surya 450 Wp yang berkapasitas produksi hingga 2.340 Wh per hari. Oleh karena itu, penerapan skema operasional intermiten dengan total durasi 4 jam per hari masih terakomodasi dengan sangat aman, mengingat total kebutuhan energinya berada jauh di bawah kapasitas maksimal produksi harian PLTS.

3.5 Hasil Monitoring Arus Baterai

Pada sub-bab ini menguraikan hasil konsumsi arus baterai LiFePO4 saat mesin beroperasi menggunakan sensor PZEM-017 dan mikrokontroler ESP32

Tabel 6 Data Monitoring Arus Dengan Beban 500 gr Durasi 45 Menit

Waktu Operasi	Arus (A)	Batas Set Point (A)	*Relay*	Status Motor
0 Menit	0.11 A	> 20	ON	Aman
5 Menit	11.80 A	> 20	ON	Aman
10 Menit	11.17 A	> 20	ON	Aman
15 Menit	11.10 A	> 20	ON	Aman
20 Menit	11.14 A	> 20	ON	Aman
25 Menit	12.09 A	> 20	ON	Aman
30 Menit	11.56 A	> 20	ON	Aman
35 Menit	12.07 A	> 20	ON	Aman
40 Menit	12.05 A	> 20	ON	Aman
45 Menit	12.20 A	> 20	ON	Aman



Gambar 4 Grafik Monitoring Arus Baterai

Berdasarkan Gambar 4, tarikan arus motor meningkat proporsional terhadap berat beban mekanis, mulai dari 0,11 A saat *standby* hingga mencapai puncaknya di 11,10–12,20 A pada beban maksimal 500 gram. Kenaikan arus secara perlahan di penghujung pengujian mengindikasikan terjadinya efek pemanasan Joule (*Joule heating*) pada kumparan. Meskipun demikian, sistem terbukti aman dari risiko pemutusan daya palsu (*false cut-off*) karena lonjakan arus tertinggi (12,20 A) masih terpaut jauh di bawah ambang batas proteksi *overcurrent* sebesar 20 A.

3.6 Hasil Pengujian Keandalan Sistem Proteksi Sensor Arus (*Cutt off via Relay*)

Pengujian ini bertujuan mengevaluasi akurasi sensor PZEM-017 dan kecepatan respons ESP32 dalam memutus sakelar daya utama (*Relay*). Batas kritis pemutusan (setpoint) ditetapkan pada angka > 20 *Ampere* guna melindungi *Relay* 30 A dan kumparan motor dari kerusakan akibat beban berlebih maupun kondisi poros macet (stall). Hasil pemantauan arus dan respons sistem disajikan pada tabel berikut.

Tabel 7 Sistem Proteksi Arus

Pengujian Ke	Waktu Operasi	Arus (A)	Batas Set Point (A)	*Relay*	Status Motor
	15:02:47	0.12 A	> 20	ON	*Soft-start*
1	15:02:56	5.72 A	> 20	ON	Aman
	15:03:09	20.13 A	> 20	OFF	*Overcurrent*
	15:04:05	0.12 A	> 20	ON	*Soft-start*
2	15:04:15	5.96 A	> 20	ON	Aman
	15:04:24	20.22 A	> 20	OFF	*Overcurrent*
	15:05:18	0.12 A	> 20	ON	*Soft-start*
3	15:05:28	5.83 A	> 20	ON	Aman
	15:05:39	20.17 A	> 20	OFF	*Overcurrent*
	15:06:28	0.12 A	> 20	ON	*Soft-start*
4	15:06:38	5.56 A	> 20	ON	Aman
	15:06:48	20.83 A	> 20	OFF	*Overcurrent*
	15:07:27	0.12 A	> 20	ON	*Soft-start*
5	15:07:37	5.78 A	> 20	ON	Aman
	15:07:47	20.37 A	> 20	OFF	*Overcurrent*

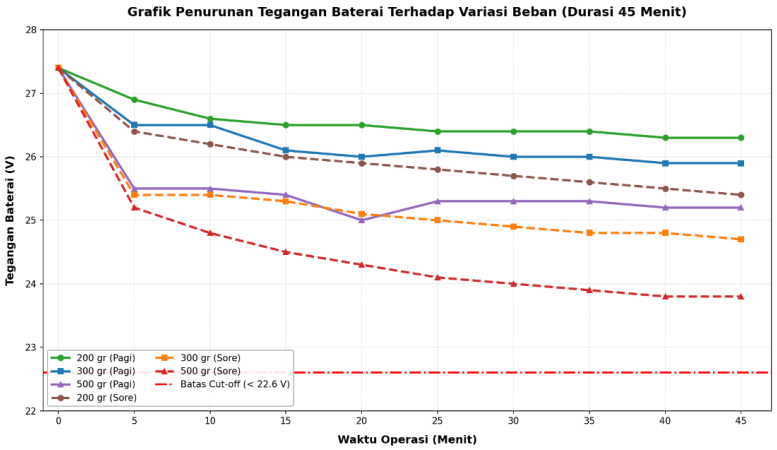
Berdasarkan Tabel 7, sistem proteksi *overcurrent* menunjukkan tingkat keberhasilan 100% pada lima siklus pengujian. Setelah melewati fase *soft-start* (0,12 A) menuju operasi aman (5,56–5,96 A), mikrokontroler terbukti merespons seketika dengan memutus relai (OFF) saat mendeteksi lonjakan arus ekstrem melebihi ambang batas 20 A (tercatat 20,13–20,83 A). Konsistensi pemutusan daya ini membuktikan bahwa rancang bangun sistem proteksi bekerja sangat presisi dan andal dalam mencegah kerusakan akibat beban berlebih.

3.7 Hasil Monitoring Tegangan Baterai

. Pembacaan tegangan dilakukan secara *real-time* oleh sensor PZEM-017 dan diproses menggunakan ESP32

Tabel 8 Hasil Monitoring Tegangan Baterai

Waktu Operasi	Tegangan (V)	Batas Set Point (V)	*Relay*	Status Motor
0 Menit	27.4 V	< 22.6	ON	Aman
5 Menit	25.5 V	< 22.6	ON	Aman
10 Menit	25.5 V	< 22.6	ON	Aman
15 Menit	25.4 V	< 22.6	ON	Aman
20 Menit	25.0 V	< 22.6	ON	Aman
25 Menit	25.3 V	< 22.6	ON	Aman
30 Menit	25.3 V	< 22.6	ON	Aman
35 Menit	25.3 V	< 22.6	ON	Aman
40 Menit	25.2 V	< 22.6	ON	Aman
45 Menit	25.2 V	< 22.6	ON	Aman



Gambar 5 Grafik Monitoring Tegangan Baterai

Berdasarkan Gambar 5, tingkat penurunan tegangan baterai berbanding lurus dengan berat beban, di mana beban maksimal (500 gram) menghasilkan kurva penurunan tercuram. Penurunan ini berlangsung lebih cepat pada sesi sore akibat minimnya suplai energi dari panel surya. Meskipun demikian, kapasitas baterai terbukti sangat memadai karena tegangan terendah yang tercatat hanya menyentuh angka 23,8 V. Nilai tersebut masih berada jauh di atas batas proteksi *under-voltage* (22,6 V), sehingga mikrokontroler secara konsisten mempertahankan relai dalam kondisi aktif (Aman) hingga akhir pengujian.

3.8 Hasil Pengujian Keandalan Sistem Proteksi Sensor Tegangan (*Cutt off via Relay*)

Pengujian bertujuan memvalidasi keakuratan sistem dalam memutus kelistrikan saat tegangan baterai menyentuh ambang batas *cut-off* 22,6 *Volt* .

Tabel 9 Data Pengujian Proteksi Tegangan Baterai pada Sistem Pembebanan Tanpa Suplai PV

Waktu Operasi	Tegangan (V)	Batas Set Point (V)	*Relay*	Status Motor
0 Menit	27.4 V	< 22.6	ON	Aman
5 Menit	24.2 V	< 22.6	ON	Aman
10 Menit	24.1 V	< 22.6	ON	Aman
15 Menit	24.1 V	< 22.6	ON	Aman
20 Menit	24.0 V	< 22.6	ON	Aman
25 Menit	23.9 V	< 22.6	ON	Aman

Tabel 10 Data Pengujian Proteksi Tegangan Baterai pada Sistem Pembebanan Tanpa Suplai PV

Waktu Operasi	Tegangan (V)	Batas Set Point (V)	*Relay*	Status Motor
0 Menit	26.3 V	< 22.6	ON	Aman
5 Menit	23.8 V	< 22.6	ON	Aman
10 Menit	23.8 V	< 22.6	ON	Aman
15 Menit	23.8 V	< 22.6	ON	Aman
20 Menit	23.7 V	< 22.6	ON	Aman
25 Menit	23.6 V	< 22.6	ON	Aman

30 Menit	23.6 V	< 22.6	ON	Aman
35 Menit	23.6 V	< 22.6	ON	Aman
40 Menit	23.2 V	< 22.6	ON	Aman
45 Menit	23.2 V	< 22.6	ON	Aman
50 Menit	22.9 V	< 22.6	ON	Aman
51 Menit	22.6 V	< 22.6	ON	LOW*VOLT* AGE

Pengujian pembebanan tanpa suplai panel surya membuktikan responsivitas sistem proteksi baterai secara *real-time*. Pada Pengujian 1, tegangan terpantau turun dari 27,4 V menjadi 23,9 V dalam status "Aman". Penurunan ini terus berlanjut pada Pengujian 2 hingga menyentuh ambang batas bawah 22,6 V tepat pada menit ke-51. Pada titik kritis tersebut, mikrokontroler seketika memutus aliran daya (*cut-off*) dengan status peringatan "LOWVOLTAGE", sehingga sel baterai efektif terlindungi dari risiko kerusakan fatal akibat pengurasan berlebih (*over-discharge*).

3.9 Hasil Monitoring Suhu Motor Dan Pengujian Keandalan Sistem Proteksi Sensor Suhu (*Cutt off via Relay*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem keamanan mesin terhadap bahaya suhu berlebih. Melalui pengawasan suhu secara berkesinambungan oleh sensor thermocouple, sistem dirancang untuk dapat mengidentifikasi kondisi kritis pada motor. Ketika ambang batas toleransi panas terlampaui, algoritma kontrol akan langsung mengambil alih dengan memicu *Relay* untuk memutus arus utama.

Tabel 11 Pengujian sensor suhu dengan beban berat (500 gr) Sesi Pagi

Waktu Operasi	Suhu (°C)	Batas Set Point (°C)	*Relay*	Status Motor
0 Menit	28.4 °C	> 60	ON	Aman
6 Menit	34.7 °C	> 60	ON	Aman
12 Menit	42.3 °C	> 60	ON	Aman
18 Menit	46.8 °C	> 60	ON	Aman
24 Menit	49.7 °C	> 60	ON	Aman
30 Menit	51.9 °C	> 60	ON	Aman
36 Menit	53.4 °C	> 60	ON	Aman
42 Menit	55.4 °C	> 60	ON	Aman
48 Menit	56.7 °C	> 60	ON	Aman
54 Menit	57.9 °C	> 60	ON	Aman
60 Menit	58.7 °C	> 60	ON	Aman
66 Menit	59.9 °C	> 60	ON	Aman
69 Menit	60.0 °C	> 60	OFF	*OVERHEAT*

Tabel 12 Pengujian sensor suhu dengan beban berat (500 gr) Sesi Sore

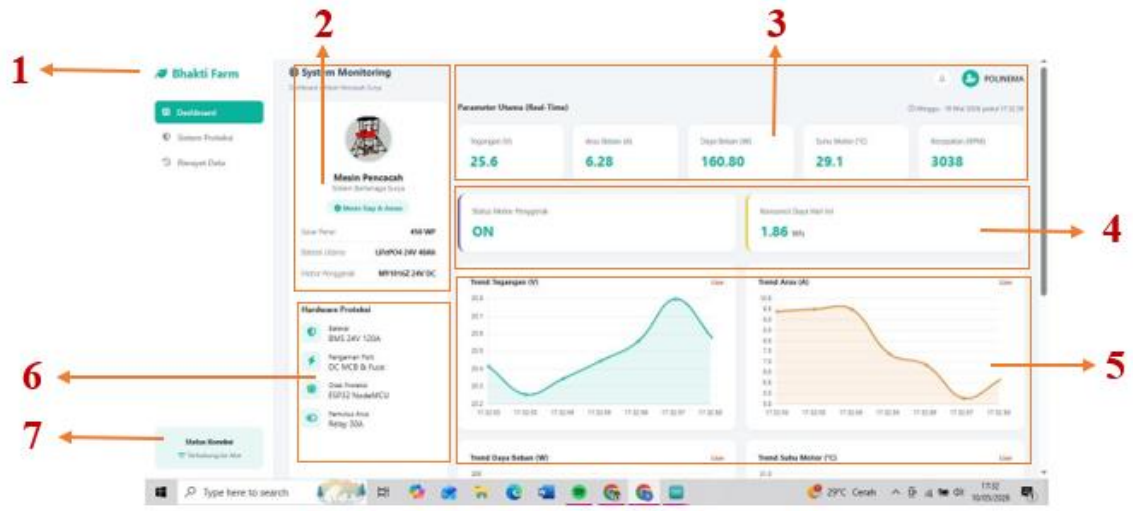
Waktu Operasi	Suhu (°C)	Batas Set Point (°C)	*Relay*	Status Motor
0 Menit	40.9 °C	> 60	ON	Aman
6 Menit	43.7 °C	> 60	ON	Aman

12 Menit	48.0 °C	> 60	ON	Aman
18 Menit	52.1 °C	> 60	ON	Aman
24 Menit	54.4 °C	> 60	ON	Aman
30 Menit	56.2 °C	> 60	ON	Aman
36 Menit	57.0 °C	> 60	ON	Aman
42 Menit	58.0 °C	> 60	ON	Aman
48 Menit	58.4 °C	> 60	ON	Aman
54 Menit	59.0 °C	> 60	ON	Aman
60 Menit	59.6 °C	> 60	ON	Aman
66 Menit	60.0 °C	> 60	OFF	*OVERHEAT*

Berdasarkan pengujian suhu di atas, kurva kenaikan suhu motor bersifat eksponensial dan dipengaruhi oleh suhu lingkungan (*ambien*). Meskipun sesi sore diawali pada suhu yang lebih tinggi (40,9 °C) dibandingkan sesi pagi (28,4 °C), waktu untuk mencapai batas *overheat* 60,0 °C hanya berselisih 3 menit, yakni 66 menit pada sore hari dan 69 menit pada pagi hari. Perlambatan kenaikan suhu ini terjadi karena adanya kesetimbangan kalor saat motor melewati suhu 55 °C. Tepat ketika sensor membaca 60,0 °C, mikrokontroler terbukti secara presisi memutus relai daya (*cut-off*) dengan status peringatan "OVERHEAT". Respons seketika ini efektif melindungi motor dari kerusakan isolasi kelistrikan dan keausan sikat arang (*carbon brush*).

3.10 Implementasi Web Monitoring

Desain *Web* sistem monitoring PLTS dibuat dengan tampilan yang mudah dipahami oleh pengguna. Data-data sensor ditampilkan pada *Web* untuk memantau komponen-komponen secara terus menerus.



Gambar 6 Dashboard Web Monitoring

Keterangan:

1. Menu tampilan navbar
2. Spesifikasi sistem
3. Parameter utama
4. Tampilan status motor dan konsumsi daya harian
5. Tampilan grafik
6. Daftar proteksi yang digunakan
7. Status koneksi Esp

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, mesin pencacah rumput bertenaga surya ini terbukti mampu beroperasi secara optimal dengan suplai daya mandiri 24V untuk menggerakkan motor DC MY1016Z dan seluruh instrumentasi mikrokontroler. Sistem proteksi kelistrikan bekerja secara andal dan presisi dalam memutus modul relay saat terjadi kondisi abnormal, yakni ketika beban melampaui batas 20 A (didukung fitur soft-start) serta saat tegangan baterai turun di bawah 22,6 V guna mencegah deep discharge. Selanjutnya, proteksi suhu terbukti efektif mengamankan motor dengan memutus daya saat permukaan casing mencapai 60,0 °C, sehingga suhu inti kumparan tetap berada dalam safety margin di bawah batas maksimal ketahanan isolasi Kelas E (120 °C). Seluruh parameter operasional dan peringatan bahaya ini dapat dipantau dengan sangat baik secara lokal melalui layar LCD dan buzzer, maupun secara jarak jauh (near real-time) melalui Web Dashboard IoT dengan rata-rata delay transmisi data sebesar 500 ms.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Kaharudin., Hariprihadi, B. D. (2021). RANCANG BANGUN MESIN PENCACAH PAKAN TERNAK KAPASITAS 50 KG/JAM. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 01(02), 1-8.

[2] Harmayani, R., Fitriyah, A., Alimuddin., Mariani, Y., Andry, N, M., Kartika., Fajri, N, A., Permadi, H., Gunadi, S., Zaetun., Damar, G., Alyaminy, I, H, A, Z., Fajri, L, M, N. (2024). EDUKASI PAKAN TERNAK BERNUTRISI TINGGI KEPADA PETERNAK KAMBING BERANAK KEMBAR DI DESA OMBE KECAMATAN KEDIRI KABUPATEN LOMBOK BARAT. *Jurnal Pengabdian Mandiri*, 03(7), 579-586.

[3] Ismail, R., Thohirin, M., Yunus, M., Dalimunthe, R. (2021). Rancang Bangun Mesin Pencacah Rumput Untuk Pakan Ternak. *Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat*, 45-50.

[4] Lubis, R, S., Harahap, N, A, K., Putri, M. (2024). PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI BEBAN LEBIH MENGGUNAKAN TOR PADA MOTOR INDUKSI 1 FASA UNTUK MESIN PENGEPRES LIMBAH KALENG. *Konferensi Nasional Social dan Engineering Politeknik Negeri Medan*, 630-639.

[5] Aafi, A. M., Jamaaluddin, J., & Anshory, I. (2022). Implementasi Sensor PZEM-017 Untuk Monitoring Arus, Tegangan dan Daya Pada Instalasi Panel Surya dengan Sistem Data Logger Menggunakan Google Spreadsheet dan Smartphone. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika (SNESTIK)*, 191-196.

[6] Shafrialni, R. P., & Ismail, K. M. (2025). Rancang Bangun Monitoring *Overheat*ing Motor Eskalator di Bandar Udara Sultan Mahmud Badaruddin II. *Jurnal Mesil (Mesin Elektro Sipil)*, *6*(1), 35-42. https://doi.org/10.53695/jm.v6i1.1128

[7] Suryanto, S., Khoerudin, M., & Watmah, S. (2025). Pemantauan Catu Daya untuk Proteksi Listrik Menggunakan ESP32 Berbasis *Internet of Things* (IOT). *IMTechno: Journal of Industrial Management and Technology*, *6*(2), 94-99.

[8] Lestyanto, D. S. N., Sutedjo, S., Windarko, N. A., & Adila, A. F. (2023). Sistem Proteksi Arus Lebih pada Proses Pengisian Baterai Menggunakan Buck Converter Metode Constant *Volt* age. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, *5*(2), 181-190. https://doi.org/10.32528/elkom.v5i2.10143.

[9] Khaeri, S., Pratama, B. G., & Handayani, T. (2025). Rancang Bangun Sistem Monitoring Energi Listrik Berbasis IoT Untuk Pemantauan dan Analisis Konsumsi Daya. *JMTE (Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro)*, *6*(2).

[10] Kurniawan, I. K. P., dkk. (2024). Analisis Efisiensi Pengisian Baterai pada PLTS Off Grid dengan Sistem SCC PWM dan MPPT Menggunakan Simulink. *Jurnal Magnetika: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, *8*(1). Institut Teknologi Nasional Malang.