

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT

5.1 Prosedur pengukuran dan Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja prototipe sistem monitoring beban transformator distribusi berbasis LoRa dan IoT yang telah dirancang dan dibangun. Pengujian dilakukan pada skala laboratorium dengan menggunakan transformator step-down sebagai objek yang dimonitor dan beban resistif sebagai simulasi pembebanan transformator. Aspek yang dievaluasi meliputi akurasi pembacaan sensor PZEM-004T, keandalan komunikasi LoRa antara unit transmitter dan unit receiver, ketepatan sinkronisasi waktu menggunakan NTP, keberhasilan penyimpanan data pada Google Sheets, fungsionalitas notifikasi dan monitoring melalui Telegram Bot, serta stabilitas sistem dalam operasi berkelanjutan selama 24 jam.

Prosedur pengujian dilakukan secara bertahap agar setiap bagian sistem dapat diperiksa secara terpisah dengan jelas sebelum dilakukan pengujian sistem secara terintegrasi. Pengujian dilakukan dalam kondisi line-of-sight di lingkungan kampus dengan koneksi internet yang aktif pada sisi receiver.

Alat dan bahan yang digunakan selama proses pengujian adalah sebagai berikut:

1. Prototipe unit transmitter (ESP32 + PZEM-004T + PZCT-02 + LoRa Ra-02 SX1278 + LCD I2C + Push Button + PSU 5V 2A)
2. Prototipe unit receiver (ESP32 + LoRa Ra-02 SX1278 + PSU 5V 2A)
3. Box Simulasi Tegangan dengan dua Transformator satu fasa yang dapat mensimulasikan kondisi tegangan normal, undervoltage dan overvoltage sebagai objek monitoring
4. Beban untuk simulasi variasi pembebanan transformator
5. Multimeter sebagai alat ukur referensi untuk tegangan, arus, frekuensi, dan faktor daya
6. Laptop dengan Arduino IDE untuk memantau Serial Monitor dan debugging sistem

7. Smartphone dengan aplikasi Telegram untuk memantau notifikasi dan mengirimkan perintah interaktif
8. Smartphone atau laptop sebagai referensi waktu untuk pengujian akurasi NTP
9. Google earth dan google maps untuk pengukuran jarak pada pengujian komunikasi LoRa
10. Jaringan WiFi aktif untuk koneksi internet pada sisi receiver

Sebelum setiap sesi pengujian dimulai, dilakukan persiapan sistem secara umum dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menyiapkan seluruh perangkat pengujian meliputi unit transmitter, unit receiver, transformator step-down, beban uji, multimeter, laptop, dan smartphone.
2. Menghubungkan unit transmitter ke sumber tegangan AC 220 V melalui PSU 5V 2A dan memastikan seluruh modul pada transmitter (PZEM-004T, LoRa, LCD) telah terhubung dengan benar sesuai konfigurasi pada BAB III.
3. Menghubungkan unit receiver ke sumber tegangan AC 220 V melalui PSU 5V 2A dan memastikan modul LoRa pada receiver telah terhubung dengan benar.
4. Menyalakan unit transmitter dan memastikan inisialisasi PZEM-004T, LCD, dan modul LoRa Ra-02 SX1278 berhasil dilakukan, yang ditandai dengan tampilnya data pengukuran pada LCD transmitter.
5. Menyalakan unit receiver dan memantau Serial Monitor pada laptop untuk memastikan inisialisasi LoRa berhasil, koneksi WiFi terhubung, sinkronisasi NTP berhasil dilakukan, autentikasi Google Sheets selesai, dan Telegram Bot mengirimkan pesan "Receiver Started" sebagai tanda sistem aktif.
6. Memastikan mekanisme polling berjalan dengan baik, yang ditandai dengan munculnya data tegangan, arus, daya, frekuensi, faktor daya, dan persentase beban pada Serial Monitor receiver.
7. Memastikan data pertama berhasil tersimpan pada Google Sheets dengan memeriksa spreadsheet melalui browser atau smartphone.
8. Sistem dinyatakan siap untuk pengujian apabila seluruh langkah di atas telah terpenuhi tanpa adanya pesan error pada Serial Monitor.

Parameter yang diamati pada keseluruhan pengujian ditunjukkan pada Tabel

5 – 1.

Tabel 5 - 1 Parameter pengujian

Parameter	Satuan	Metode Pengukuran	Keterangan
Tegangan	V	Pembacaan PZEM-004T dibandingkan dengan multimeter	Parameter utama sensor
Arus	A	Pembacaan PZEM-004T dibandingkan dengan multimeter	Parameter utama sensor
Frekuensi	Hz	Pembacaan PZEM-004T dibandingkan dengan multimeter	Parameter pendukung sensor
Persentase Beban Trafo	%	Nilai sistem dibandingkan dengan perhitungan manual	Indikator pembebanan trafo
RSSI LoRa	dBm	Fungsi LoRa.packetRssi() pada receiver	Kualitas sinyal LoRa
Success Rate LoRa	%	Jumlah paket diterima dibagi paket dikirim dikali 100%	Keandalan komunikasi LoRa
Penyimpanan data ke Google Spreadsheets	-	Menunjukkan penyimpanan data ke Google Spreadsheets	Hasil penyimpanan data ke Google Spreadsheets
Notifikasi dan Perintah Bot Telegram	-	Menunjukkan Notifikasi dan Perintah Bot pada Telegram	Hasil Notifikasi dan Perintah Bot pada Telegram
Keandalan Sistem 24 Jam	%	Total polling berhasil dibagi total polling dilakukan dikali 100%	Stabilitas operasi berkelanjutan

Pengujian dilakukan pada beberapa variasi pembebanan untuk mengetahui respons pembacaan sensor dan perhitungan sistem pada kondisi yang diterapkan..

Data hasil pengujian kemudian digunakan untuk menghitung nilai error, akurasi, success rate, serta mengetahui keberhasilan kerja sistem secara keseluruhan. Rumus yang digunakan untuk menghitung persentase error dan akurasi pada pengujian sensor adalah sebagai berikut:

$$Error(\%) = \frac{|Nilai Sistem - Nilai Referensi|}{Nilai Referensi} \times 100\%$$

$$Akurasi(\%) = 100\% - Error(\%)$$

5.2 Pengujian Akurasi Sensor PZEM-004T

5.2.1 Pengujian Akurasi Tegangan Sensor PZEM-004T

Pengujian dilakukan untuk mengetahui akurasi PZEM-004T dalam mengukur tegangan AC. Pembacaan PZEM-004T dibandingkan dengan multimeter sebagai alat ukur referensi. Kedua alat dihubungkan pada titik pengukuran dan kondisi pembebanan yang sama.

Pengambilan data dilakukan pada tiga variasi arus beban. Variasi tersebut terdiri atas 0,73 A, 1,43 A, dan 2,39 A. Nilai tegangan PZEM-004T diperoleh melalui pembacaan sensor pada unit transmitter. Nilai tegangan multimeter dicatat secara bersamaan sebagai nilai referensi.

Selisih tegangan diperoleh dari nilai absolut perbedaan kedua alat ukur. Error relatif dihitung terhadap hasil pengukuran multimeter. Data hasil pengujian tegangan disajikan pada Tabel 5 -2.

Tabel 5 - 2 Hasil Pengujian Tegangan Sensor PZEM-004T

No	Beban (A)	PZEM-004T (V)	Multimeter (V)	Selisih (V)	Error (%)
1	0.73	220.6	220.1	0.5	0.23
2	1.43	219.1	218.7	0.4	0.18
3	2.39	218.9	218.2	0.7	0.32
Rata-rata	1.52	219.53	219	0.53	0.24

Setelah pengukuran dilakukan, selisih tegangan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta V = |V_{PZEM} - V_{multimeter}|$$

Keterangan:

ΔV merupakan selisih pengukuran tegangan dalam volt.

V_{PZEM} merupakan tegangan hasil pembacaan PZEM-004T.

$V_{multimeter}$ merupakan tegangan hasil pengukuran multimeter.

Perhitungan error relatif pada setiap pengujian dijabarkan sebagai berikut.

$$Error(\%) = \frac{|V_{PZEM} - V_{multimeter}|}{V_{multimeter}} \times 100\%$$

$$Error_1 = \frac{|220,6 - 220,1|}{220,1} \times 100\% = 0,23\%$$

$$Error_2 = \frac{|219,1 - 218,7|}{218,7} \times 100\% = 0,18\%$$

$$Error_3 = \frac{|218,9 - 218,2|}{218,2} \times 100\% = 0,32\%$$

Rata-rata error relatif dihitung dari seluruh hasil pengujian menggunakan persamaan berikut.

$$\overline{Error}(\%) = \frac{Error_1 + Error_2 + Error_3}{3}$$

$$\overline{Error} = \frac{0,23 + 0,18 + 0,32}{3} = 0,24\%$$

Akurasi pengukuran ditentukan berdasarkan error relatif menggunakan persamaan berikut.

$$Akurasi(\%) = 100\% - \overline{Error}(\%)$$

$$Akurasi = 100\% - 0,24\% = 99,76\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, PZEM-004T menghasilkan pembacaan tegangan yang mendekati hasil pengukuran multimeter. Pada pengujian pertama, PZEM-004T membaca tegangan sebesar 220,6 V. Multimeter menunjukkan tegangan sebesar 220,1 V. Pada pengujian kedua, PZEM-004T membaca tegangan sebesar 219,1 V. Multimeter menunjukkan tegangan sebesar 218,7 V. Pada pengujian ketiga, PZEM-004T membaca tegangan sebesar 218,9 V. Multimeter menunjukkan tegangan sebesar 218,2 V.

Ketiga pengujian menghasilkan rata-rata error sebesar 0,24%. Nilai tersebut menghasilkan rata-rata akurasi pengukuran sebesar 99,76%. Perbedaan hasil pengukuran dapat dipengaruhi oleh resolusi alat ukur, kestabilan sumber tegangan,

dan waktu pencatatan data.

Berdasarkan kondisi pengujian tersebut, PZEM-004T menghasilkan pembacaan tegangan yang mendekati hasil pengukuran multimeter. Hasil ini mendukung penggunaan PZEM-004T sebagai sensor tegangan pada prototipe sistem monitoring beban transformator. Kesimpulan tersebut terbatas pada tiga variasi pembebanan dan kondisi pengujian yang diterapkan.

5.2.2 Pengujian Akurasi Arus Sensor PZEM-004T

Pengujian dilakukan untuk mengetahui akurasi PZEM-004T dalam mengukur arus beban. Hasil pembacaan PZEM-004T dibandingkan dengan multimeter sebagai alat ukur referensi. Kedua alat digunakan pada rangkaian dan kondisi pembebanan yang sama.

Pengambilan data dilakukan pada tiga variasi beban. Tegangan sumber juga dicatat untuk menunjukkan kondisi rangkaian selama pengukuran. Nilai arus PZEM-004T diperoleh melalui sensor PZCT-02 yang terhubung ke modul PZEM-004T. Nilai arus multimeter dicatat secara bersamaan sebagai nilai referensi.

Selisih arus diperoleh dari nilai absolut perbedaan pembacaan kedua alat. Error relatif dihitung terhadap hasil pengukuran multimeter. Data hasil pengujian arus disajikan pada Tabel 5 - 3.

Tabel 5 - 3 Hasil Pengujian Arus Sensor PZEM-004T

No	Tegangan (V)	PZEM-004T (A)	Multimeter (A)	Selisih (A)	Error (%)
1	224.9	0.82	0.80	0.02	2.50
2	224.4	1.09	1.10	0.01	0.91
3	220.7	2.27	2.30	0.03	1.30
Rata-rata	223.33	1.39	1.40	0.02	1.57

Setelah pengukuran dilakukan, selisih tegangan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta I = |I_{PZEM} - I_{multimeter}|$$

Keterangan:

ΔI merupakan selisih pengukuran arus dalam ampere.

I_{PZEM} merupakan arus hasil pembacaan PZEM-004T.

$I_{multimeter}$ merupakan arus hasil pengukuran multimeter.

Perhitungan error relatif pada setiap pengujian dijabarkan sebagai berikut.

$$Error(\%) = \frac{|I_{PZEM} - I_{multimeter}|}{I_{multimeter}} \times 100\%$$

$$Error_1 = \frac{|0,82 - 0,80|}{0,8} \times 100\% = 2,5\%$$

$$Error_2 = \frac{|1,09 - 1,10|}{1,1} \times 100\% = 0,91\%$$

$$Error_3 = \frac{|2,27 - 2,30|}{2,3} \times 100\% = 1,30\%$$

Rata-rata error relatif dihitung dari seluruh hasil pengujian menggunakan persamaan berikut.

$$\overline{Error}(\%) = \frac{Error_1 + Error_2 + Error_3}{3}$$

$$\overline{Error} = \frac{2,5 + 0,91 + 1,3}{3} = 1,57\%$$

Akurasi pengukuran ditentukan berdasarkan error relatif menggunakan persamaan berikut.

$$Akurasi(\%) = 100\% - \overline{Error}(\%)$$

$$Akurasi = 100\% - 1,57\% = 98,43\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, PZEM-004T menghasilkan pembacaan arus yang mendekati hasil pengukuran multimeter. Pada pengujian pertama, PZEM-004T membaca arus sebesar 0,82 A. Multimeter menunjukkan arus sebesar 0,80 A. Pada pengujian kedua, PZEM-004T membaca arus sebesar 1,09 A. Multimeter menunjukkan arus sebesar 1,10 A. Pada pengujian ketiga, PZEM-004T membaca arus sebesar 2,27 A. Multimeter menunjukkan arus sebesar 2,30 A.

Ketiga pengujian menghasilkan rata-rata error sebesar 1,57%. Nilai tersebut menghasilkan rata-rata akurasi sebesar 98,43%. Error terbesar terdapat pada pengujian pertama sebesar 2,50%. Error terkecil terdapat pada pengujian kedua sebesar 0,91%.

Error relatif terbesar diperoleh ketika arus referensi bernilai 0,80 A. Selisih

sebesar 0,02 A menghasilkan persentase error lebih besar karena nilai acuannya lebih rendah. Selisih terbesar sebesar 0,03 A terdapat pada pengujian ketiga. Namun, error relatifnya hanya sebesar 1,30% karena nilai arus referensi lebih tinggi.

5.2.3 Pengujian Frekuensi Tegangan Sensor PZEM-004T

Pengujian dilakukan untuk mengetahui akurasi PZEM-004T dalam mengukur frekuensi sumber listrik. Hasil pembacaan PZEM-004T dibandingkan dengan multimeter sebagai alat ukur referensi. Kedua alat digunakan pada rangkaian dan kondisi pembebanan yang sama.

Pengambilan data dilakukan pada tiga variasi arus beban. Variasi tersebut terdiri atas 0,40 A, 1,55 A, dan 2,63 A. Nilai frekuensi PZEM-004T diperoleh melalui pembacaan sensor pada unit transmitter. Nilai frekuensi multimeter dicatat secara bersamaan sebagai nilai referensi.

Selisih frekuensi diperoleh dari nilai absolut perbedaan pembacaan kedua alat. Persentase error dihitung terhadap frekuensi hasil pengukuran multimeter. Hasil pengujian frekuensi disajikan pada Tabel 5-4.

Tabel 5 - 4 Hasil Pengujian Frekuensi Sensor PZEM-004T

No	Beban (A)	PZEM-004T (Hz)	Multimeter (Hz)	Selisih (Hz)	Error (%)
1	0,4	50	50	0	0,00
2	1,55	49,9	49,94	0,04	0,08
3	2,63	50	50	0	0,00
Rata-rata	1,53	49,97	49,98	0,01	0,03

Setelah pengukuran dilakukan, selisih tegangan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta f = |f_{PZEM} - f_{multimeter}|$$

Keterangan:

Δf merupakan selisih pengukuran frekuensi dalam hertz.

f_{PZEM} merupakan frekuensi hasil pembacaan PZEM-004T.

$f_{multimeter}$ merupakan frekuensi hasil pengukuran multimeter.

Perhitungan error relatif pada setiap pengujian dijabarkan sebagai berikut.

$$Error(\%) = \frac{|f_{PZEM} - f_{multimeter}|}{f_{multimeter}} \times 100\%$$

$$Error_1 = \frac{|50,0 - 50,0|}{50,0} \times 100\% = 0,00\%$$

$$Error_2 = \frac{|49,9 - 49,94|}{49,94} \times 100\% = 0,08\%$$

$$Error_3 = \frac{|50,0 - 50,0|}{50,0} \times 100\% = 0,00\%$$

Rata-rata error relatif dihitung dari seluruh hasil pengujian menggunakan persamaan berikut.

$$\overline{Error}(\%) = \frac{Error_1 + Error_2 + Error_3}{3}$$

$$\overline{Error} = \frac{0,00 + 0,08 + 0,00}{3} = 0,03\%$$

Akurasi pengukuran ditentukan berdasarkan error relatif menggunakan persamaan berikut.

$$Akurasi(\%) = 100\% - \overline{Error}(\%)$$

$$Akurasi = 100\% - 0,03\% = 99,97\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, PZEM-004T menghasilkan pembacaan frekuensi yang mendekati hasil pengukuran multimeter. Pada pengujian pertama, kedua alat menunjukkan frekuensi sebesar 50,00 Hz. Pada pengujian kedua, PZEM-004T membaca frekuensi sebesar 49,9 Hz. Multimeter menunjukkan frekuensi sebesar 49,94 Hz. Pada pengujian ketiga, kedua alat kembali menunjukkan frekuensi sebesar 50,00 Hz.

Ketiga pengujian menghasilkan rata-rata error sebesar 0,03%. Nilai tersebut menghasilkan rata-rata akurasi pengukuran sebesar 99,97%. Selisih hanya ditemukan pada pengujian kedua sebesar 0,04 Hz. Pengujian pertama dan ketiga tidak menghasilkan selisih berdasarkan resolusi pembacaan yang ditampilkan.

Perbedaan pada pengujian kedua dapat dipengaruhi oleh perbedaan resolusi PZEM-004T dan multimeter. PZEM-004T menampilkan frekuensi dengan satu angka desimal pada data pengujian. Multimeter menampilkan frekuensi dengan dua

angka desimal. Perbedaan resolusi tersebut dapat menghasilkan selisih meskipun kedua alat mengukur kondisi sumber yang sama.

Berdasarkan kondisi pengujian, PZEM-004T menghasilkan pembacaan frekuensi yang mendekati hasil pengukuran multimeter. Hasil ini mendukung penggunaan PZEM-004T untuk memantau frekuensi pada prototipe sistem monitoring beban transformator. Kesimpulan tersebut terbatas pada tiga variasi beban dan kondisi pengujian yang diterapkan.

5.3 Pengujian Persentase Pembebanan Transformator

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kesesuaian persentase pembebanan yang dihitung oleh sistem. Nilai pembebanan sistem dibandingkan dengan hasil perhitungan manual menggunakan arus multimeter.

Program menetapkan kapasitas transformator sebesar 1.100 VA dan tegangan nominal sebesar 220 V. Kedua nilai tersebut digunakan untuk menentukan arus nominal transformator.

Arus nominal transformator dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$I_{nominal} = \frac{S_{nominal}}{V_{nominal}}$$

Keterangan:

$I_{nominal}$ merupakan arus nominal transformator dalam ampere.

$S_{nominal}$ merupakan kapasitas nominal transformator dalam volt-ampere.

$V_{nominal}$ merupakan tegangan nominal transformator dalam volt.

Berdasarkan kapasitas dan tegangan nominal, arus nominal dihitung sebagai berikut.

$$I_{nominal} = \frac{1100}{220} = 5A$$

Persentase pembebanan pada sistem dihitung menggunakan arus PZEM-004T. Metode tersebut sesuai dengan perhitungan pembebanan pada program transmitter menggunakan persamaan berikut.

$$B_{sistem} = \frac{I_{PZEM}}{I_{nominal}} \times 100\%$$

Persentase pembebanan referensi dihitung menggunakan arus hasil

pengukuran multimeter menggunakan persamaan berikut.

$$B_{referansi} = \frac{I_{referensi}}{I_{nominal}} \times 100\%$$

Pengambilan data dilakukan pada tiga variasi pembebanan. Nilai arus diambil dari hasil pengujian akurasi arus PZEM-004T. Hasil perhitungan persentase pembebanan disajikan pada Tabel 5 - 5.

Tabel 5 - 5 Hasil Pengujian Persentase Pembebanan Transformator

No	PZEM-004T (A)	Multimeter (A)	Beban sistem (%)	Beban referensi (%)	Selisih (%)	Error (%)
1	0.82	0.80	16,40	16,00	0.40	2.50
2	1.09	1.10	21,80	22,00	0.20	0.91
3	2.27	2.30	45,40	46,00	0.60	1.30
Rata-rata	1.39	1.40	27,87	28,00	0.40	1.57

Persentase pembebanan pada pengujian pertama dihitung sebagai berikut.

$$B_{sistem_1} = \frac{0,82}{5} \times 100\% = 16,40\%$$

$$B_{referensi_1} = \frac{0,80}{5} \times 100\% = 16,00\%$$

Persentase pembebanan pada pengujian kedua dihitung sebagai berikut.

$$B_{sistem_2} = \frac{1,09}{5} \times 100\% = 21,80\%$$

$$B_{referensi_2} = \frac{1,10}{5} \times 100\% = 22,00\%$$

Persentase pembebanan pada pengujian ketiga dihitung sebagai berikut.

$$B_{sistem_3} = \frac{2,27}{5} \times 100\% = 45,40\%$$

$$B_{referensi_3} = \frac{2,30}{5} \times 100\% = 46,00\%$$

Selisih persentase pembebanan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta B = |B_{sistem} - B_{referensi}|$$

Nilai selisih dinyatakan dalam poin persentase. Error dihitung terhadap persentase pembebanan referensi menggunakan persamaan berikut.

$$Error(\%) = \frac{|B_{sistem} - B_{referensi}|}{B_{referensi}} \times 100\%$$

$$Error_1 = \frac{|16,40 - 16,00|}{16,00} \times 100 = 2,50\%$$

$$Error_2 = \frac{|21,80 - 22,0|}{22,00} \times 100 = 0,91\%$$

$$Error_3 = \frac{|45,40 - 46,0|}{46,0} \times 100 = 1,30\%$$

Rata-rata error dihitung dari seluruh hasil pengujian menggunakan persamaan berikut.

$$\overline{Error}(\%) = \frac{Error_1 + Error_2 + Error_3}{3}$$

$$\overline{Error} = \frac{2,50 + 0,91 + 1,30}{3} = 1,57\%$$

Akurasi perhitungan persentase pembebanan ditentukan berdasarkan rata-rata error.

$$Akurasi(\%) = 100\% - \overline{Error}(\%)$$

$$Akurasi = 100\% - 1,57\% = 98,43\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, persentase pembebanan sistem mendekati hasil perhitungan menggunakan arus multimeter. Pada pengujian pertama, sistem menghasilkan pembebanan sebesar 16,40%. Perhitungan referensi menghasilkan pembebanan sebesar 16,00%.

Pada pengujian kedua, sistem menghasilkan pembebanan sebesar 21,80%. Perhitungan referensi menghasilkan pembebanan sebesar 22,00%. Pada pengujian ketiga, sistem menghasilkan pembebanan sebesar 45,40%. Perhitungan referensi menghasilkan pembebanan sebesar 46,00%.

Ketiga pengujian menghasilkan rata-rata pembebanan sistem sebesar 27,87%. Perhitungan referensi menghasilkan rata-rata pembebanan sebesar 28,00%. Rata-rata selisih antara kedua hasil diperoleh sebesar 0,40 poin persentase.

Rata-rata error diperoleh sebesar 1,57%. Nilai tersebut menghasilkan

akurasi sebesar 98,43%. Error persentase pembebanan mengikuti error pembacaan arus PZEM-004T. Kondisi tersebut terjadi karena kedua perhitungan menggunakan arus nominal yang sama.

Perbedaan hasil perhitungan dipengaruhi oleh selisih pembacaan arus PZEM-004T dan multimeter. Persentase pembebanan pada program telah dihitung sesuai kapasitas dan tegangan nominal transformator. Hasil ini menunjukkan kesesuaian penerapan rumus pembebanan pada unit transmitter.

5.4 Pengujian RSSI LoRa Berdasarkan Jarak

Pengujian dilakukan untuk mengetahui perubahan RSSI dan jarak komunikasi maksimum LoRa. Nilai RSSI digunakan untuk menunjukkan kekuatan sinyal yang diterima oleh receiver. Pengujian juga digunakan untuk mengetahui batas penerimaan data pada lokasi pengujian.

Pengujian dilakukan di sepanjang Jalan Banyu Putih Raya, Tembalang. Titik awal pengujian berada di tepi jalan depan Kopi Kemenangan. Receiver kemudian dipindahkan menuju arah utara melalui jalan yang relatif lurus.

Jarak transmitter dan receiver ditambah sebesar 100 m pada setiap pengujian. Pengujian dilanjutkan sampai komunikasi LoRa tidak dapat menghasilkan data. Penentuan jarak dilakukan menggunakan Google Maps. Jalur pengujian dan jarak maksimum ditunjukkan pada Gambar 5. 1.

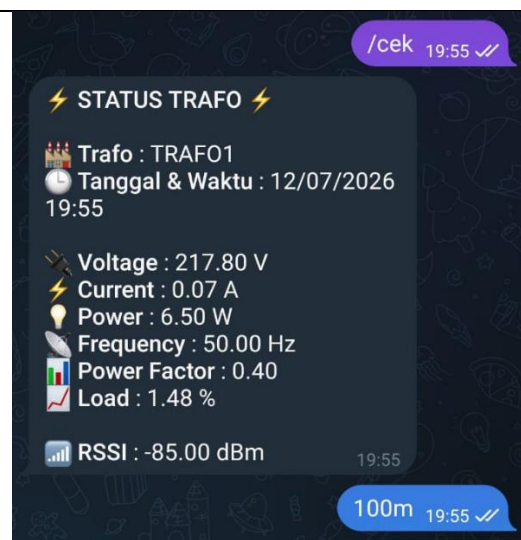


Gambar 5. 1 Tempat dan jarak Pengujian RSSI LoRa

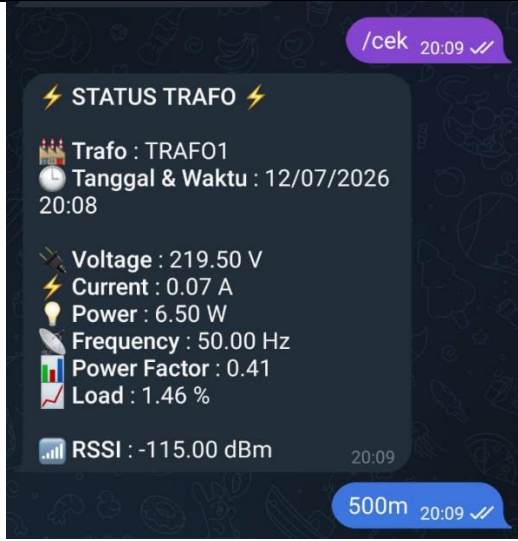
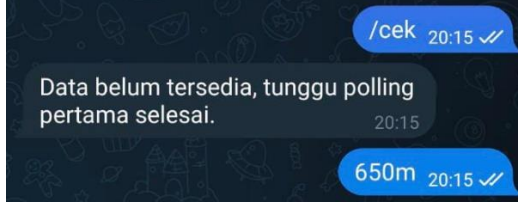
Transmitter ditempatkan pada titik awal pengujian. Receiver dipindahkan pada jarak 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, dan 600 m. Pengujian terakhir dilakukan pada jarak 650 m.

Nilai RSSI dan status penerimaan data pada setiap jarak disajikan pada Tabel 5 - 6.

Tabel 5 - 6 Hasil Pengujian RSSI LoRa Berdasarkan Jarak

No.	Jarak (m)	RSSI (dBm)	Status Penerimaan	Tampilan Bot Telegram
1	100	-85	Berhasil	
2	200	-93	Berhasil	

No.	Jarak (m)	RSSI (dBm)	Status Penerimaan	Tampilan Bot Telegram
3	300	-112	Berhasil	The screenshot shows a Telegram chat with a bot named 'STATUS TRAF0'. The bot's message includes the following data: Trafo : TRAF01, Tanggal & Waktu : 12/07/2026 20:03, Voltage : 219.20 V, Current : 0.07 A, Power : 6.60 W, Frequency : 50.00 Hz, Power Factor : 0.41, Load : 1.48 %, and RSSI : -112.00 dBm. The user has responded with a purple message '/cek' at 20:03, and the bot has replied with a blue message '300m' at 20:04.
4	400	-110	Berhasil	The screenshot shows a Telegram chat with the same bot 'STATUS TRAF0'. The bot's message includes the following data: Trafo : TRAF01, Tanggal & Waktu : 12/07/2026 20:06, Voltage : 219.70 V, Current : 0.07 A, Power : 6.50 W, Frequency : 50.00 Hz, Power Factor : 0.40, Load : 1.48 %, and RSSI : -110.00 dBm. The user has responded with a purple message '/cek' at 20:06, and the bot has replied with a blue message '400m' at 20:06.

No.	Jarak (m)	RSSI (dBm)	Status Penerimaan	Tampilan Bot Telegram
5	500	-115	Berhasil	
6	600	-116	Berhasil	
7	650	-	Gagal	

Nilai RSSI pada jarak 100 m tercatat sebesar -85 dBm. Nilai tersebut berubah menjadi -93 dBm pada jarak 200 m. Pada jarak 300 m, nilai RSSI tercatat sebesar -112 dBm.

Nilai RSSI pada jarak 400 m tercatat sebesar -110 dBm. Pada jarak 500 m

dan 600 m, nilai RSSI tercatat sebesar -115 dBm dan -116 dBm. Receiver gagal memperoleh data dari transmitter pada jarak 650 m.

Berdasarkan data pada Tabel 5-x, nilai RSSI cenderung melemah ketika jarak komunikasi bertambah. Nilai RSSI berubah dari -85 dBm pada jarak 100 m menjadi -116 dBm pada jarak 600 m. Selisih antara kedua nilai tersebut sebesar 31 dB.

Perubahan RSSI tidak berlangsung secara linier pada seluruh titik pengujian. Nilai RSSI pada jarak 400 m sebesar -110 dBm. Nilai tersebut lebih kuat daripada RSSI pada jarak 300 m sebesar -112 dBm.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa RSSI tidak hanya dipengaruhi oleh jarak. Kondisi sekitar jalur, posisi antena, penghalang, kendaraan, dan gangguan radio dapat memengaruhi penerimaan sinyal. Faktor tersebut masih berupa kemungkinan karena tidak diukur secara terpisah selama pengujian.

Penerimaan data masih berhasil pada jarak 600 m dengan RSSI sebesar -116 dBm. Receiver tidak memperoleh data pada jarak 650 m. Dengan demikian, jarak komunikasi maksimum yang berhasil dibuktikan pada lokasi pengujian adalah 600 m. Batas kegagalan mulai ditemukan pada pengujian sejauh 650 m.

Hasil tersebut tidak menunjukkan bahwa batas teknis LoRa selalu sebesar 600 m. Jarak tersebut hanya berlaku pada konfigurasi perangkat, arah pengujian, dan kondisi lingkungan yang diterapkan. Pengujian pada lokasi lain dapat menghasilkan jarak dan RSSI berbeda.

5.5 Pengujian Success Rate LoRa

Pengujian dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan komunikasi LoRa antara transmitter dan receiver. Keberhasilan ditentukan berdasarkan penerimaan data pada setiap permintaan polling receiver.

Interval polling pada program receiver ditetapkan selama lima menit. Namun, proses komunikasi dan penyimpanan menghasilkan keterlambatan beberapa detik. Oleh karena itu, selisih waktu sekitar lima sampai enam menit masih dikategorikan berhasil.

Selisih waktu sekitar sepuluh menit menunjukkan satu polling tidak menghasilkan data. Receiver kemudian melakukan polling kembali pada interval

berikutnya. Kriteria tersebut digunakan untuk memeriksa keberhasilan komunikasi berdasarkan timestamp.

Jumlah polling selama lima jam dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$N_{polling} = \frac{t_{pengujian}}{t_{interval}}$$

Keterangan:

$N_{polling}$ merupakan jumlah polling teoritis.

$t_{pengujian}$ merupakan durasi pengujian dalam menit.

$t_{interval}$ merupakan interval polling dalam menit.

Jumlah polling teoritis dihitung sebagai berikut.

$$N_{polling} = \frac{5 \times 60}{5} = 60 \text{ polling}$$

Data kemudian dikelompokkan menjadi lima periode pengamatan. Setiap periode berlangsung selama satu jam dan terdiri atas 12 polling. Hasil pemeriksaan timestamp disajikan pada Tabel 5 – 7.

Tabel 5 - 7 Hasil Pengujian Success Rate Komunikasi LoRa

Jam ke-	Rentang Waktu	Jumlah Polling	Data Diterima	Data Gagal	Success (%)	Error (%)
1	12.02.33–13.03.10	12	12	0	100	0,00
2	13.03.10–14.04.06	12	12	0	100	0,00
3	14.04.06–15.05.36	12	11	1	91,67	8,33
4	15.05.36–16.06.26	12	12	0	100	0,00
5	16.06.26–17.06.57	12	12	0	100	0,00
Total	5 Jam	60	59	1	-	-
Rata-rata	1 Jam	12	11,8	0.2	98,33	1,67

Jumlah data gagal dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$N_{gagal} = N_{polling} - N_{diterima}$$

$$N_{gagal} = 60 - 59 = 1 \text{ polling}$$

Success rate komunikasi LoRa dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$Success(\%) = \frac{N_{diterima}}{N_{polling}} \times 100\%$$

$$Success = \frac{59}{60} \times 100\% = 98,33\%$$

Error rate dihitung berdasarkan jumlah polling yang tidak menghasilkan data menggunakan persamaan berikut.

$$Error(\%) = \frac{N_{gagal}}{N_{polling}} \times 100\%$$

$$Error = \frac{1}{60} \times 100\% = 1,67\%$$

Berdasarkan data pada Tabel 5 - 7, receiver menerima 59 data dari 60 polling teoritis. Empat periode menghasilkan success rate sebesar 100%. Satu kegagalan ditemukan pada periode ketiga.

Data terakhir sebelum kegagalan tercatat pada pukul 14.24.18. Data berikutnya tercatat pada pukul 14.35.22. Selisih waktu antara kedua data tersebut mencapai 11 menit 4 detik. Kondisi tersebut menunjukkan satu polling tidak menghasilkan data.

Pengujian menghasilkan success rate sebesar 98,33% dan error rate sebesar 1,67%. Hasil tersebut menunjukkan sebagian besar permintaan polling memperoleh respons dari transmitter. Namun, satu kegagalan komunikasi masih ditemukan selama periode pengujian.

Kegagalan tersebut dapat berkaitan dengan gangguan komunikasi LoRa atau kondisi perangkat selama polling. Penyebab pasti belum dapat ditentukan hanya berdasarkan timestamp. Pemeriksaan Serial Monitor diperlukan untuk membedakan kegagalan LoRa dan kegagalan proses penyimpanan.

Hasil pengujian mendukung penerapan mekanisme polling antara receiver dan transmitter. Komunikasi dapat mempertahankan penerimaan data pada 59 dari 60 percobaan. Kesimpulan ini terbatas pada periode sampel dan kondisi komunikasi selama pengujian.

5.6 Penyimpanan data ke Google Spreadsheet

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan receiver dalam

frekuensi serta faktor daya. Kolom Load (%) memuat hasil perhitungan persentase pembebanan transformator.

Kolom RSSI (dBm) memuat kekuatan sinyal paket LoRa yang diterima oleh receiver. Nilai RSSI tersebut juga digunakan dalam pengujian komunikasi LoRa berdasarkan jarak. Hasil pemeriksaan fungsi penyimpanan data disajikan pada Tabel 5 - 8.

Tabel 5 - 8 Hasil Pengujian Penyimpanan Data ke Google Spreadsheet

No.	Data yang Diperiksa	Hasil Pengujian	Status
1	Timestamp	Tanggal dan waktu tersimpan pada setiap baris data	Berhasil
2	Identitas transformator	Identitas TRAFO1 tersimpan pada kolom Node ID	Berhasil
3	Tegangan	Nilai tegangan tersimpan pada kolom Voltage (V)	Berhasil
4	Arus	Nilai arus tersimpan pada kolom Current (A)	Berhasil
5	Daya	Nilai daya tersimpan pada kolom Power (W)	Berhasil
6	Frekuensi	Nilai frekuensi tersimpan pada kolom Frequency (Hz)	Berhasil
7	Faktor daya	Nilai faktor daya tersimpan pada kolom Power Factor	Berhasil
8	Persentase pembebanan	Nilai pembebanan tersimpan pada kolom Load (%)	Berhasil
9	RSSI LoRa	Nilai RSSI tersimpan pada kolom RSSI (dBm)	Berhasil
10	Penambahan baris data	Data baru ditambahkan pada baris berikutnya	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian, receiver dapat menyimpan data monitoring ke Google Spreadsheet. Seluruh jenis data yang ditentukan dalam program telah

ditempatkan pada kolom masing-masing. Identitas transformator juga tercatat sebagai TRAFO1 pada setiap baris.

Data yang tersimpan memiliki timestamp berbeda sesuai waktu penerimaan pada receiver. Hasil tersebut menunjukkan bahwa NTP telah menyediakan informasi waktu bagi proses pencatatan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi receiver, WiFi, dan Google Spreadsheet telah menjalankan fungsi penyimpanan data. Kesimpulan tersebut hanya berlaku ketika receiver terhubung ke jaringan WiFi dan layanan Google Spreadsheet dapat diakses.

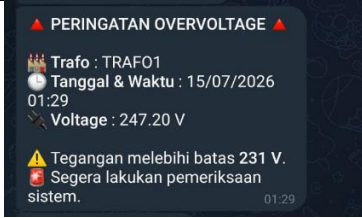
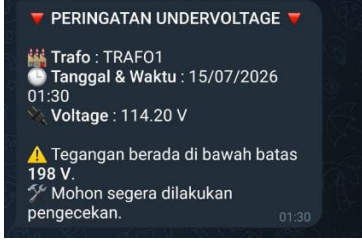
5.7 Notifikasi dan Perintah Bot Telegram

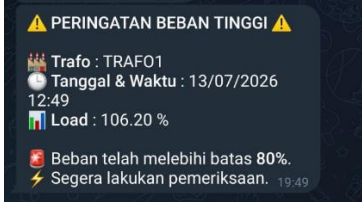
Pengujian dilakukan untuk mengetahui fungsi monitoring dan peringatan melalui Telegram Bot. Fungsi monitoring digunakan untuk menampilkan data terakhir yang diterima receiver. Fungsi peringatan digunakan untuk menyampaikan kondisi tegangan dan pembebanan yang melampaui ambang program.

Pengujian perintah dilakukan dengan mengirimkan perintah /cek melalui aplikasi Telegram. Receiver kemudian menampilkan data terakhir yang diterima dari transmitter. Data tersebut meliputi identitas transformator, timestamp, tegangan, arus, daya, frekuensi, faktor daya, persentase pembebanan, dan RSSI.

Pengujian notifikasi dilakukan dengan memberikan kondisi yang memenuhi setiap kriteria peringatan. Ambang overvoltage ditetapkan sebesar 231 V. Ambang undervoltage ditetapkan sebesar 198 V. Ambang beban tinggi ditetapkan sebesar 80% dari total kapasitas. Hasil pengujian perintah dan notifikasi disajikan pada Tabel 5 – 9.

Tabel 5 - 9 Hasil Pengujian Notifikasi dan Perintah pada Telegram Bot

No.	Fungsi yang Diuji	Kondisi pengujian	Tampilan Telegram Bot	Hasil Pengujian
1	Perintah monitoring	Perintah /cek dikirim melalui Telegram		Bot menampilkan identitas TRAF01, timestamp, parameter kelistrikan, persentase pembebanan, dan RSSI. Status: Berhasil
2	Notifikasi over voltage	Tegangan sebesar 247,20 V melebihi ambang 231 V		Bot mengirimkan peringatan overvoltage dan menampilkan nilai tegangan. Status: Berhasil
3	Notifikasi under voltage	Tegangan sebesar 114,20 V berada di bawah ambang 198 V		Bot mengirimkan peringatan undervoltage dan menampilkan nilai tegangan. Status: Berhasil

No.	Fungsi yang Diuji	Kondisi pengujian	Tampilan Telegram Bot	Hasil Pengujian
4	Notifikasi beban tinggi	Beban sebesar 106,20% melebihi ambang 80%		Bot mengirimkan peringatan beban tinggi dan menampilkan persentase pembebanan. Status: Berhasil

Berdasarkan data pada Tabel 5 - 9, Telegram Bot dapat merespons perintah /cek. Respons tersebut menampilkan data monitoring terakhir yang diterima oleh receiver. Parameter yang ditampilkan telah mencakup data kelistrikan, persentase pembebanan, dan RSSI.

Notifikasi overvoltage diterima ketika tegangan mencapai 247,20 V. Nilai tersebut telah melampaui ambang overvoltage sebesar 231 V. Pesan yang diterima mencantumkan jenis peringatan, identitas transformator, timestamp, dan nilai tegangan.

Notifikasi undervoltage diterima ketika tegangan mencapai 114,20 V. Nilai tersebut berada di bawah ambang undervoltage sebesar 198 V. Pesan yang diterima telah mencantumkan jenis peringatan dan nilai tegangan yang terdeteksi.

Notifikasi beban tinggi diterima ketika pembebanan mencapai 106,20%. Nilai tersebut telah melampaui ambang beban tinggi sebesar 80%. Pembebanan tersebut diperoleh setelah beban pada rangkaian pengujian ditingkatkan.

Arus nominal yang digunakan dalam perhitungan program sebesar 5 A. Persentase pembebanan sebesar 106,20% menunjukkan bahwa arus terukur telah melampaui arus nominal tersebut. Nilai tersebut tidak menunjukkan kesalahan perhitungan program.

Keempat pengujian menghasilkan status berhasil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa receiver dapat menjalankan fungsi monitoring interaktif dan peringatan otomatis. Jenis notifikasi yang dikirim telah sesuai dengan kondisi

tegangan dan pembebanan yang diberikan.

5.8 Pengujian Keandalan Sistem 24 Jam

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kontinuitas operasi sistem monitoring selama 24 jam. Pengujian mencakup pembacaan sensor, polling LoRa, penerimaan data, dan penyimpanan pada Google Spreadsheet.

Sistem dioperasikan pada kondisi pembebanan normal. Jarak transmitter dan receiver dipertahankan kurang dari 100 m. Kondisi undervoltage, overvoltage, dan pembebanan melebihi 80% tidak diberikan selama pengujian.

Pengujian dimulai pada 9 Juli 2026 pukul 12.02.33. Periode pengujian berakhir pada 10 Juli 2026 pukul 12.20.31.

Receiver melakukan polling terhadap transmitter dengan interval program selama lima menit. Proses komunikasi dan penyimpanan menghasilkan tambahan waktu beberapa detik. Selisih sekitar lima sampai enam menit tetap dikategorikan sebagai penerimaan berhasil. Pengujian tidak dilakukan selama pas 24 jam persis dikarenakan adanya jeda beberapa detik antar data yang dikirim.

Selisih sekitar sepuluh menit menunjukkan satu siklus polling tidak menghasilkan data. Selisih sekitar lima belas menit menunjukkan dua siklus polling tidak menghasilkan data. Penentuan tersebut digunakan untuk memeriksa kontinuitas data berdasarkan timestamp.

Jumlah polling selama lima jam dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$N_{polling} = \frac{t_{pengujian}}{t_{interval}}$$

Keterangan:

$N_{polling}$ merupakan jumlah polling teoritis.

$t_{pengujian}$ merupakan durasi pengujian dalam menit.

$t_{interval}$ merupakan interval polling dalam menit.

Jumlah polling teoritis dihitung sebagai berikut.

$$N_{polling} = \frac{24 \times 60}{5} = 288 \text{ polling}$$

Data pengujian dikelompokkan menjadi 24 periode. Setiap periode berlangsung selama kurang lebih satu jam dan memuat 12 polling. Hasil pengujian

operasi sistem disajikan pada Tabel 5 - 10.

Tabel 5 - 10 Hasil Pengujian Operasi Sistem Selama 24 Jam

Jam ke-	Rentang Waktu	Jumlah Polling	Data Diterima	Data Gagal	Success (%)	Error (%)
1	12.02.33–13.03.10	12	12	0	100	0,00
2	13.03.10–14.04.06	12	12	0	100	0,00
3	14.04.06–15.05.36	12	11	1	91,67	8,33
4	15.05.36–16.06.26	12	12	0	100	0,00
5	16.06.26–17.06.57	12	12	0	100	0,00
6	17.06.57–18.07.47	12	12	0	100	0,00
7	18.07.47–19.08.25	12	12	0	100	0,00
8	19.08.25–20.08.55	12	12	0	100	0,00
9	20.08.55–21.09.36	12	12	0	100	0,00
10	21.09.36–22.10.11	12	12	0	100	0,00
11	22.10.11–23.10.58	12	10	2	83,33	16,67
12	23.10.58–00.11.33	12	12	0	100	0,00
13	00.11.33–01.12.08	12	12	0	100	0,00
14	01.12.08–02.12.39	12	12	0	100	0,00
15	02.12.39–03.14.11	12	11	1	91,67	8,33
16	03.14.11–04.14.48	12	12	0	100	0,00
17	04.14.48–05.15.22	12	12	0	100	0,00
18	05.15.22–06.15.56	12	11	1	91,67	8,33
19	06.15.56–07.17.38	12	12	0	100	0,00
20	07.17.38–08.18.13	12	12	0	100	0,00
21	08.18.13–09.18.48	12	12	0	100	0,00
22	09.18.48–10.19.21	12	12	0	100	0,00
23	10.19.21–11.19.56	12	12	0	100	0,00
24	11.19.56–12.20.31	12	12	0	100	0,00
Total	24 Jam	288	283	5	-	-
Rata-rata	1 Jam	12	11,79	0,21	98,26	1,74

Jumlah data yang tidak tersimpan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$N_{tidak\ tersimpan} = N_{polling} - N_{tersimpan}$$

$$N_{tidak\ tersimpan} = 288 - 283 = 5\ polling$$

Success rate data tersimpan LoRa dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$Data\ Tersimpan(\%) = \frac{N_{tersimpan}}{N_{polling}} \times 100\%$$

$$Data\ Tersimpan = \frac{283}{288} \times 100\% = 98,26\%$$

Error rate dihitung berdasarkan jumlah polling yang tidak menghasilkan data menggunakan persamaan berikut.

$$Data\ Tidak\ Tersimpan(\%) = \frac{N_{tidak\ tersimpan}}{N_{polling}} \times 100\%$$

$$Data\ Tidak\ Tersimpan = \frac{5}{288} \times 100\% = 1,74\%$$

Berdasarkan data pada Tabel 5 - 10, sistem menyimpan 283 data selama pengujian 24 jam. Jumlah tersebut dibandingkan dengan 288 polling teoritis. Persentase data tersimpan diperoleh sebesar 98,26%.

Sebanyak 5 siklus polling tidak menghasilkan data pada Google Spreadsheet. Persentase data tidak tersimpan diperoleh sebesar 1,74%. Kondisi tersebut teridentifikasi melalui gap timestamp sekitar sepuluh dan lima belas menit. Persentase data tersimpan mencapai 100% pada 20 dari 24 periode pengamatan. Periode lainnya menghasilkan persentase antara 83,33% sampai 91,67%.

Nilai RSSI selama pengujian berada pada rentang -44 dBm sampai -38 dBm. Rentang tersebut menunjukkan kondisi penerimaan sinyal pada jarak kurang dari 100 m. Namun, RSSI yang kuat tidak selalu menjamin setiap siklus menghasilkan data tersimpan.

Ketiadaan data dapat terjadi pada komunikasi LoRa atau proses penyimpanan melalui internet. Penyebab pasti tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan timestamp Google Spreadsheet. Pemeriksaan Serial Monitor

diperlukan untuk memisahkan kedua kemungkinan tersebut.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat mempertahankan fungsi monitoring selama 24 jam pada kondisi normal. Sistem menghasilkan data pada seluruh rentang waktu pengujian.