

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT

5.1 Prosedur Pengukuran dan Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja prototipe sistem monitoring level tangki solar berbasis ESP32 menggunakan komunikasi LoRa dan notifikasi Telegram. Pengujian dilakukan pada skala laboratorium dengan cara mengamati pembacaan sensor, persentase level tangki, pengiriman data melalui LoRa, kerja indikator lokal, notifikasi Telegram, serta penyimpanan data pada Google Spreadsheet.

Prosedur pengujian dilakukan secara bertahap agar setiap bagian sistem dapat diperiksa dengan jelas. Berikut langkah-langkah prosedur pengujian prototipe sistem monitoring level tangki solar.

1. Menyiapkan prototipe tangki, node *transmitter*, node *receiver*, *power supply*, dan jaringan *Wi-Fi*
2. Menyalakan node *transmitter* dan node *receiver*.
3. Mengisi tangki dengan volume cairan sesuai titik pengujian.
4. Mengukur jarak atau tinggi cairan sesuai titik pengujian.
5. Membaca hasil pengukuran sensor melalui Serial Monitor
6. Membandingkan hasil pengukuran manual dengan hasil pembacaan sensor.
7. Menghitung nilai *error* dan akurasi pembacaan sensor.
8. Mengamati hasil perhitungan volume, persentase, dan status tangki.
9. Memastikan data terkirim dari node *transmitter* ke node *receiver* melalui LoRa.
10. Mencatat nilai RSSI LoRa yang diterima.
11. Mengamati kerja LED dan *Buzzer* berdasarkan status tangki.
12. Memastikan notifikasi Telegram terkirim.
13. Memastikan data masuk ke Google Spreadsheet.
14. Mencatat hasil pengujian untuk dianalisis.

Parameter yang diamati pada pengujian ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 5-1 Parameter Pengujian

No.	Parameter	Keterangan
1	Jarak Sensor	Hasil pembacaan HC-SR04
2	Tinggi Cairan	Hasil konversi dari jarak sensor
3	Volume	Hasil perhitungan volume cairan
4	Persentase	Persentase level tangki
5	Status	Kondisi kosong, kritis, normal, <i>warning</i> , atau penuh
6	RSSI	Kekuatan sinyal LoRa
7	LED dan <i>Buzzer</i>	Indikator lokal
8	Telegram	Notifikasi jarak jauh
9	Google Spreadsheet	Penyimpanan data otomatis

Pengujian dilakukan pada beberapa kondisi level cairan agar sistem dapat diuji secara menyeluruh. Data hasil pengujian kemudian digunakan untuk menghitung *error*, akurasi, serta mengetahui keberhasilan kerja sistem secara keseluruhan.

5.2 Pengujian Sensor Ultrasonik HC-SR04

Pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam membaca jarak antara sensor dan permukaan cairan. Pada setiap titik pengujian, sensor melakukan lima kali pembacaan dan nilai median digunakan sebagai hasil pengukuran untuk mengurangi pengaruh data menyimpang. Hasil pembacaan sensor kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran manual untuk memperoleh selisih, persentase *error*, dan akurasi.

Pengujian dilakukan dengan mengisi cairan pada beberapa titik ketinggian tertentu. Tinggi cairan diukur secara manual dari dasar tangki menggunakan alat ukur, kemudian hasil tersebut dikonversi menjadi jarak ideal sensor. Konversi ini perlu dilakukan karena pengukuran manual menggunakan acuan dari dasar tangki, sedangkan sensor ultrasonik membaca jarak dari bagian atas tangki menuju permukaan cairan. Berdasarkan hasil pengukuran awal, jarak

sensor saat tangki dalam kondisi kosong adalah sebesar 28 cm. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan jarak kosong. Oleh karena itu, jarak ideal sensor pada setiap titik pengujian dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$d_{ideal} = d_{kosong} - h_{manual}$$

Keterangan:

d_{ideal} = jarak ideal sensor terhadap permukaan cairan (cm)

d_{kosong} = jarak sensor saat tangki kosong (cm)

h_{manual} = hasil pengukuran menggunakan alat ukur manual

Setelah jarak ideal diperoleh, selisih pembacaan sensor dihitung dengan membandingkan jarak ideal sensor terhadap jarak yang terbaca oleh sensor HC-SR04. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$Error = |d_{sensor} - d_{ideal}|$$

Persentase *error* dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\%Error = \frac{|d_{sensor} - d_{ideal}|}{d_{ideal}} \times 100\%$$

Akurasi sensor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

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

Tabel 5-2 Hasil pengujian Sensor ultrasonik HC-SR04

No.	Tinggi Cairan Manual (cm)	Jarak Ideal (cm)	Jarak Sensor (cm)	Selisih (cm)	Error (%)	Akurasi (%)
1.	0	28	28	0	0	100
2.	1,5	26,5	26,8	0,3	1,13	98,87
3.	5,5	22,5	22,3	0,2	0,89	99,11
4.	15	13	13,5	0,5	3,85	96,15
5.	20	8	8,4	0,4	5	95
6.	24	4	4,2	0,2	5	95
7.	26	2	2,6	0,6	30	70
Rata-rata				0,31	6,55	93,45

Berdasarkan tabel hasil pengujian, sensor ultrasonik HC-SR04 menghasilkan rata-rata selisih sebesar 0,31 cm, rata-rata *error* 6,55%, dan rata-

rata akurasi 93,45%. Pada rentang tinggi cairan 0–24 cm, nilai akurasi berada pada kisaran 95–100%. Selisih terkecil sebesar 0,2 cm terjadi pada tinggi cairan 5,5 cm dan 24 cm, sedangkan selisih terbesar sebesar 0,6 cm terjadi pada tinggi cairan 26 cm.

Pada tinggi cairan 26 cm, jarak ideal sensor hanya 2 cm sehingga berada pada batas *dead zone* HC-SR04. Selisih 0,6 cm terhadap nilai pembanding yang kecil menghasilkan *error* sebesar 30% dan akurasi 70%. Selain *dead zone*, perbedaan pembacaan dapat dipengaruhi oleh riak permukaan cairan, pantulan gelombang pada dinding tangki, serta ketidaktepatan posisi sensor terhadap permukaan cairan.

Dengan demikian, sensor HC-SR04 mampu mengikuti perubahan level cairan dengan baik pada sebagian besar rentang pengujian, tetapi akurasinya menurun ketika permukaan cairan terlalu dekat dengan sensor. Data jarak hasil penyaringan selanjutnya digunakan untuk menghitung tinggi cairan, volume, persentase level, dan status tangki.

5.3 Pengujian Kalibrasi Volume Tangki

Pengujian kalibrasi volume tangki dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian model matematis *frustum* terhadap bentuk fisik prototipe. Tinggi cairan yang digunakan pada pengujian ini diperoleh dari pengukuran manual, kemudian dimasukkan ke persamaan *frustum* dan dibandingkan dengan volume aktual dari gelas ukur. Dengan demikian, nilai akurasi pada subbab ini menunjukkan akurasi model perhitungan volume dan belum mencakup *error* pembacaan sensor ultrasonik.

Tangki yang digunakan memiliki tinggi fisik tangki sebesar $H = 30$ cm, jari-jari atas $R = 11$ cm, dan jari-jari bawah $r = 9,5$ cm. Karena jari-jari tangki berubah terhadap ketinggian, maka jari-jari pada tinggi cairan tertentu dihitung terlebih dahulu menggunakan persamaan interpolasi linear sebagai berikut.

$$r(h) = r_{bawah} + \left(\frac{R - r_{bawah}}{H} \right) \times h$$

$$r(h) = 9,5 + \left(\frac{11 - 9,5}{30} \right) \times h$$

$$r(h) = 9,5 + 0,05h$$

Keterangan:

$r(h)$ = jari-jari tangki pada ketinggian tertentu

h = tinggi cairan

Setelah nilai jari-jari pada ketinggian tertentu diperoleh, volume cairan dihitung menggunakan persamaan volume *frustum* parsial:

$$V(h) = \frac{1}{3} \times \pi \times h \times [r_{bawah}^2 + r_{bawah} \times r(h) + r(h)^2]$$

Sebagai contoh, pada salah satu titik pengujian diperoleh ketinggian cairan secara manual sebesar 15 cm. Jari-jari tangki pada ketinggian tersebut adalah:

$$r(15) = 9,5 + 0,05 \times 15$$

$$r(15) = 10,25 \text{ cm}$$

Maka volume cairan berdasarkan pengukuran manual adalah:

$$V(15) = \frac{1}{3} \times \pi \times 15 \times [9,5^2 + 9,5 \times 10,25 + 10,25^2]$$

$$V(15) = 4.598 \text{ mL}$$

Setelah volume terhitung diperoleh, hasil tersebut dibandingkan dengan volume manual yang diperoleh dari pengisian cairan menggunakan gelas ukur. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui selisih antara volume aktual hasil pengukuran manual dengan volume hasil perhitungan menggunakan rumus *frustum*. Selisih volume dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Selisih} = |V_{\text{manual}} - V_{\text{terhitung}}|$$

Persentase *error* dan akurasi dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Error}(\%) = \frac{|V_{\text{manual}} - V_{\text{terhitung}}|}{V_{\text{terhitung}}} \times 100\%$$

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

Keterangan:

V_{manual} = volume cairan hasil pengukuran manual menggunakan gelas ukur

$V_{\text{terhitung}}$ = volume hasil perhitungan menggunakan rumus *frustum*

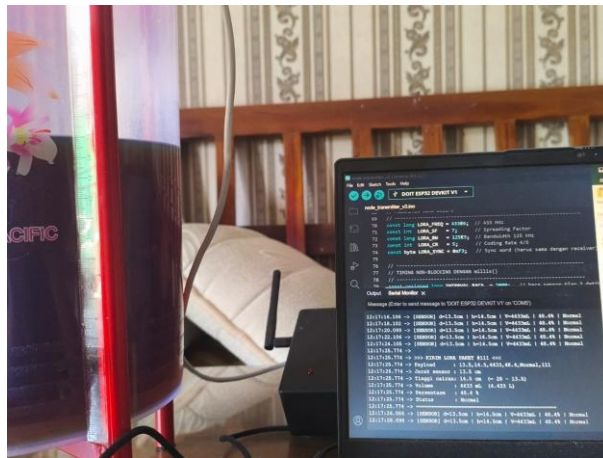
Data hasil pengujian kalibrasi volume tangki dapat ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 5-3 Pengujian Kalibrasi Volume Tangki

No.	Tinggi Cairan Manual (cm)	Volume Manual (mL)	Volume Terhitung (mL)	Selisih Volume (mL)	Error (%)	Akurasi (%)
1.	0	0	0	0	-	-
2.	1,5	500	429	71	14,27	85,73
3.	5,5	1825	1605	220	12,06	87,94
4.	15	5025	4598	427	8,51	91,49
5.	20	6775	6288	487	7,18	92,82
6.	24	8275	7700	575	6,95	93,05
7.	26	8950	8427	523	5,84	94,16
Rata-rata				383,83	9,13	90,87

Berdasarkan Tabel 5.3, rata-rata selisih volume yang diperoleh dari hasil pengujian adalah sebesar 383,83 mL. Rata-rata *error* volume sebesar 9,13%, sehingga rata-rata akurasi volume terhitung terhadap volume manual adalah sebesar 90,87%. Persentase *error* menurun dari 14,27% pada tinggi cairan 1,5 cm menjadi 5,84% pada tinggi cairan 26 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa persamaan *frustum* mampu memperkirakan volume cairan dengan cukup baik pada prototipe.

Perbedaan volume dapat disebabkan oleh bentuk fisik tangki yang tidak sepenuhnya menyerupai *frustum* ideal, adanya lengkungan pada dasar dan dinding wadah, ketelitian pembacaan gelas ukur, serta toleransi pengukuran dimensi tangki. Oleh karena itu, hasil perhitungan volume digunakan sebagai estimasi volume cairan pada prototipe, bukan sebagai alat ukur volume tersertifikasi.



Gambar 5-1 Kalibrasi Volume Tangki

5.4 Pengujian Komunikasi LoRa

Pengujian komunikasi LoRa dilakukan untuk mengetahui kemampuan modul LoRa SX1278 dalam mengirimkan data dari node *transmitter* menuju node *receiver*. Pada sistem ini, node *transmitter* berfungsi membaca data sensor ultrasonik HC-SR04, mengolah data menjadi jarak sensor, tinggi cairan, volume, persentase level, dan status tangki, kemudian mengirimkan data tersebut melalui komunikasi LoRa.

Node *receiver* berfungsi menerima data yang dikirimkan oleh node *transmitter*. Data yang diterima kemudian ditampilkan pada Serial Monitor dan digunakan untuk mengaktifkan indikator lokal, mengirimkan notifikasi Telegram, serta menyimpan data ke Google Spreadsheet. Oleh karena itu, pengujian komunikasi LoRa diperlukan untuk memastikan bahwa data hasil monitoring dapat diterima dengan baik sebelum diteruskan ke *output* sistem.

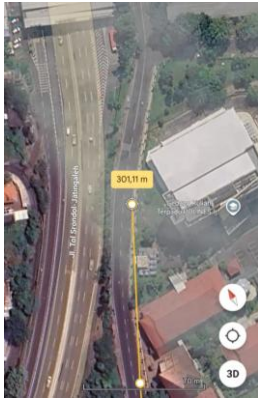
Parameter yang diamati pada pengujian komunikasi LoRa meliputi data yang dikirim, data yang diterima, nilai RSSI, status penerimaan, dan keterangan hasil pengujian. RSSI atau *Received Signal Strength Indicator* digunakan untuk mengetahui kekuatan sinyal yang diterima oleh node *receiver*. Semakin besar nilai RSSI atau semakin mendekati 0 dBm, maka sinyal yang diterima semakin kuat.

Pengujian dilakukan dengan konfigurasi LoRa 433 MHz, *spreading factor* 7, *bandwidth* 125 kHz, *coding rate* 4/5, CRC aktif, dan interval pengiriman 5 detik. Node *transmitter* dan node *receiver* ditempatkan pada jarak 100 meter hingga data tidak lagi diterima. Pada setiap titik, keberhasilan penerimaan payload dan nilai RSSI diamati serta didokumentasikan.

Pengujian dilakukan dengan menempatkan node *transmitter* dan node *receiver* dari jarak 100 meter hingga jarak LoRa tidak terbaca. Pada setiap titik, node *transmitter* mengirimkan data hasil monitoring, kemudian data pada node *receiver*, nilai RSSI, dan keberhasilan penerimaan diamati serta didokumentasikan.

Tabel 5-4 Pengujian Komunikasi LoRa

No.	Jarak Pengujian	Dokumentasi Jarak	Data Diterima Node Receiver	RSSI (dBm)	Hasil
1.	100 meter			-78	Berhasil
2.	200 meter			-88	Berhasil

3.	300 meter			-98	Berhasil
4.	400 meter			-104	Berhasil
5.	500 meter			-106	Berhasil
6.	600 meter			-116	Berhasil

7.	700 meter		Tidak ada update data	-	Gagal
----	-----------	---	-----------------------	---	-------

Berdasarkan hasil pengujian komunikasi LoRa, data dari node *transmitter* berhasil diterima oleh node *receiver* pada jarak 100 meter hingga 600 meter. Nilai RSSI berturut-turut adalah -78 dBm, -88 dBm, -98 dBm, -104 dBm, -106 dBm, dan -116 dBm. Pada jarak 700 meter, node *receiver* tidak memperoleh pembaruan data sehingga pengujian dinyatakan gagal. Dengan demikian, jarak terjauh yang berhasil dicapai pada kondisi pengujian ini adalah 600 meter.

Nilai RSSI yang diperoleh menunjukkan kekuatan sinyal LoRa selama proses pengiriman data. Semakin jauh jarak antara node *transmitter* dan node *receiver*, nilai RSSI cenderung semakin kecil atau semakin menjauhi 0 dBm. Hal ini menunjukkan bahwa terjadinya pelemahan sinyal pada jalur komunikasi. Kegagalan pada jarak 700 meter dapat dipengaruhi oleh jarak, kondisi penghalang, interferensi, ketinggian antena, dan orientasi antena.

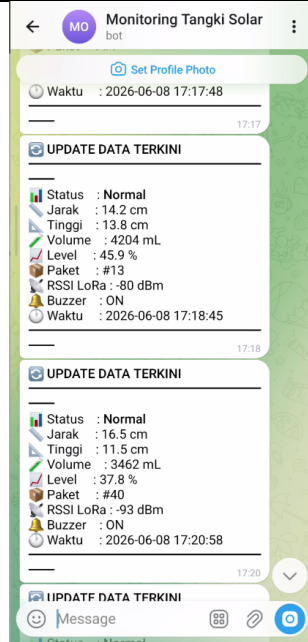
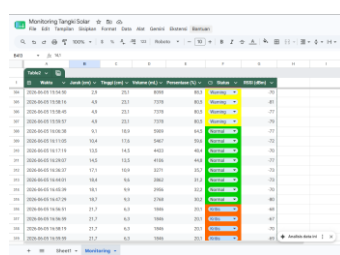
5.5 Pengujian Notifikasi Telegram dan Google Spreadsheet

Pengujian notifikasi Telegram dan Google Spreadsheet dilakukan untuk mengetahui kemampuan node *receiver* dalam mengirimkan informasi hasil monitoring setelah data dari node *transmitter* diterima melalui komunikasi LoRa. Pada sistem ini, node *receiver* tidak hanya berfungsi menerima data, tetapi juga meneruskan data tersebut ke media monitoring jarak jauh berupa Telegram dan media penyimpanan data berupa Google Spreadsheet.

Alert terkirim ketika status berubah, sedangkan pembaruan data terkirim ketika perubahan persentase mencapai ambang program. Google Spreadsheet

berhasil menyimpan setiap paket yang diterima selama node *receiver* terhubung ke *Wi-Fi*. Perintah bot dan tombol menu dapat digunakan sesuai fungsi yang dirancang. Ketika internet tidak tersedia, LoRa, LED, dan *buzzer* tetap bekerja, tetapi Telegram dan Google Spreadsheet tidak diperbarui dan data periode *offline* belum tersimpan dalam antrean permanen.

Tabel 5-5 Hasil Pengujian Telegram dan Google Spreadsheet

No.	Media Pengujian	Data yang Diuji	Hasil Pengujian	Keterangan
1.	Telegram	Jarak sensor, tinggi cairan, volume, persentase, status tangki, RSSI, dan waktu pembacaan		Data monitoring berhasil tampil pada pesan Telegram
2.	Google Spreadsheet	Waktu, jarak sensor, tinggi cairan, volume, persentase, status tangki, dan RSSI		Data monitoring berhasil tersimpan otomatis pada Google Spreadsheet

3.	Telegram Bot	Perintah /start, /status, /Wi-Fi, /mute, /unmute, /riwayat, /buzzer_on, /buzzer_off, dan tombol menu		Bot dapat merespons perintah pengguna sesuai fungsi yang dirancang
----	--------------	---	--	--

Berdasarkan hasil pengujian, Telegram berhasil menampilkan jarak sensor, tinggi cairan, volume, persentase level, status tangki, RSSI, dan waktu pembacaan. Notifikasi otomatis terkirim ketika terjadi perubahan status atau perubahan nilai yang melewati ambang pembaruan pada program. Google Spreadsheet berhasil menyimpan data setiap paket yang diterima selama node *receiver* terhubung ke *Wi-Fi*. Perintah bot dan tombol menu juga dapat digunakan untuk menampilkan status, memeriksa *Wi-Fi*, mengatur *buzzer*, dan melihat riwayat data. Ketika koneksi internet tidak tersedia, penerimaan LoRa, LED, dan *buzzer* tetap dapat bekerja, sedangkan Telegram dan Google Spreadsheet tidak dapat diperbarui.

5.6 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem monitoring level tangki solar secara terintegrasi, mulai dari pembacaan sensor, pengolahan data, pengiriman data melalui LoRa, hingga *output* berupa indikator lokal, notifikasi Telegram, dan penyimpanan data di Google Spreadsheet.

Pengujian dilakukan pada beberapa titik level cairan yang mewakili lima status sesuai program, yaitu kosong, kritis, normal, *warning*, dan penuh. Pada setiap kondisi diamati pembacaan sensor, hasil perhitungan, komunikasi LoRa,

pola LED, kerja *buzzer*, notifikasi Telegram, serta pencatatan data ke Google Spreadsheet. Pada Tabel 5.6, keterangan “OK” menunjukkan bahwa fungsi LoRa, Telegram, dan Spreadsheet bekerja sesuai pengujian, sedangkan *buzzer* “Aktif” menunjukkan bunyi putus-putus.

Tabel 5-6 Pengujian Keseluruhan Sistem

No.	Status	Level (%)	LED	<i>Buzzer</i>	LoRa	Telegram	Spreadsheet
1	Kosong	0-10	Kedip	Bunyi	OK	OK	OK
2	Kritis	>10-25	Kedip	Bunyi	OK	OK	OK
3	Normal	>25-75	Tetap	Mati	OK	OK	OK
4	<i>Warning</i>	>75-90	Kedip	1 Kali	OK	OK	OK
5	Penuh	>90-100	Tetap	Bunyi	OK	OK	OK

5.7 Asumsi Operasional Sistem Berdasarkan Konsumsi Daya Node Transmitter

Subbab ini bertujuan untuk menganalisis kemampuan operasional node *transmitter* berdasarkan konsumsi daya selama sistem bekerja. Analisis dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu berdasarkan spesifikasi komponen (*datasheet*) dan berdasarkan pola operasi node *transmitter* sesuai program yang diimplementasikan. Dengan demikian, estimasi waktu operasi baterai dapat menggambarkan kondisi kerja sistem yang lebih mendekati implementasi sebenarnya.

5.7.1 Perhitungan Konsumsi Daya Berdasarkan *Datasheet*

Node *transmitter* menggunakan dua baterai Li-ion 18650 dengan tegangan nominal masing-masing sebesar 3,7 V dan kapasitas 2500 mAh. Kedua baterai dirangkai secara seri dengan konfigurasi 2S. Pada rangkaian seri, tegangan kedua baterai dijumlahkan, sedangkan kapasitasnya tetap. Oleh karena

itu, tegangan nominal baterai menjadi 7,4 V dengan kapasitas tetap sebesar 2500 mAh atau 2,5 Ah.

Energi nominal baterai dihitung menggunakan persamaan:

$$E_{baterai} = V_{baterai} \times C_{baterai}$$

Dimana:

$$E_{baterai} = \text{energi nominal baterai (Wh)}$$

$$V_{baterai} = \text{tegangan nominal baterai (V)}$$

$$C_{baterai} = \text{kapasitas baterai (Ah)}$$

Dengan tegangan nominal sebesar 7,4 V dan kapasitas sebesar 2,5 Ah, energi nominal baterai diperoleh sebagai berikut:

$$E_{baterai} = 7,4 \times 2,5$$

$$E_{baterai} = 18,5 \text{ Wh}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, dua baterai yang disusun secara seri mempunyai energi nominal sebesar 18,5 Wh. Tegangan baterai kemudian diturunkan menjadi 5 V menggunakan buck converter MP1584EN. Proses konversi tegangan menimbulkan rugi-rugi daya pada komponen *switching*, induktor, dioda, dan rangkaian lainnya. Pada perhitungan ini digunakan asumsi efisiensi buck converter sebesar 85% sebagai pendekatan konservatif.

Energi efektif yang dapat dimanfaatkan oleh rangkaian dihitung menggunakan persamaan:

$$E_{efektif} = E_{baterai} \times \eta$$

Dimana:

$$E_{efektif} = \text{energi efektif baterai (Wh)}$$

$$\eta = \text{efisiensi buck converter}$$

Dengan asumsi efisiensi sebesar 85%, diperoleh:

$$E_{efektif} = 18,5 \text{ Wh} \times 0,85$$

$$E_{efektif} = 15,725 \text{ Wh}$$

Dengan demikian, energi efektif yang diperkirakan dapat digunakan oleh node *transmitter* adalah sekitar 15,73 Wh. Node *transmitter* terdiri atas ESP32, sensor

ultrasonik HC-SR04, modul LoRa SX1278, dan LED indikator. Estimasi konsumsi arus node *transmitter* dihitung berdasarkan arus aktif masing-masing komponen yang diperoleh dari *datasheet* dan spesifikasi teknis komponen. Nilai tersebut digunakan sebagai pendekatan untuk memperkirakan kebutuhan daya sistem. Estimasi konsumsi arus masing-masing komponen ditunjukkan pada Tabel 5.7.

Tabel 5-7 Estimasi Konsumsi Arus Node *Transmitter*

No	Komponen	Arus Aktif
1	ESP32	80 mA
2	HC-SR04	15 mA
3	LoRa SX1278	120 mA
4	LED Indikator	5 mA
Total estimasi arus		220 mA

Berdasarkan Tabel 5.7, apabila seluruh komponen diasumsikan bekerja secara bersamaan pada kondisi aktif maksimum (*worst-case condition*), maka total arus node *transmitter* diperoleh 220 mA atau 0,22 A. Kemudian daya total node *transmitter* dihitung menggunakan persamaan:

$$P = V \times I$$

Dimana:

$$P = \text{daya (W)}$$

$$V = \text{tegangan keluaran buck converter (V)}$$

$$I = \text{arus total (A)}$$

Maka,

$$P = 5 \times 0,22 = 1,10 \text{ W}$$

Estimasi waktu operasi baterai dihitung menggunakan persamaan:

$$t = \frac{E_{\text{efektif}}}{P}$$

Dimana:

$$t = \text{lama operasi baterai (jam)}$$

$$E_{ef} = \text{energi efektif baterai (Wh)}$$

$$P = \text{daya total node transmitter (W)}$$

Sehingga diperoleh:

$$t = \frac{15,73}{1,10} = 14,30 \text{ jam}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa node *transmitter* diperkirakan mampu beroperasi selama 14,30 jam apabila seluruh komponen bekerja secara bersamaan pada kondisi aktif maksimum. Kondisi ini merupakan kondisi konservatif (*worst-case condition*), sehingga digunakan sebagai batas bawah estimasi waktu operasi baterai. Pada implementasi sebenarnya, tidak semua komponen bekerja pada kondisi aktif maksimum secara bersamaan sehingga waktu operasi aktual diperkirakan lebih lama.

5.7.2 Asumsi Operasional Sistem berdasarkan Daya

Berdasarkan hasil perhitungan konsumsi daya, node *transmitter* memiliki estimasi waktu operasi minimum selama 14,30 jam apabila seluruh komponen bekerja secara aktif secara terus-menerus. Namun demikian, kondisi tersebut tidak sepenuhnya menggambarkan pola operasi sistem yang sebenarnya. Berdasarkan program yang diimplementasikan pada node *transmitter*, setiap komponen memiliki waktu aktif yang berbeda sehingga konsumsi daya aktual lebih rendah dibandingkan kondisi maksimum.

Untuk memperoleh estimasi operasional sistem yang lebih mendekati kondisi sebenarnya, dilakukan analisis menggunakan **duty cycle**, yaitu perbandingan antara waktu aktif suatu komponen terhadap periode kerjanya. *Duty cycle* dihitung menggunakan persamaan:

$$DC = \frac{t_{aktif}}{t_{periode}} \times 100\%$$

Dimana:

$$DC = \text{duty cycle (\%)}$$

$$t_{aktif} = \text{waktu komponen aktif (detik)}$$

$$t_b = \text{periode kerja komponen (detik)}$$

a. *Duty cycle* Sensor HC-SR04

Sensor HC-SR04 melakukan pembacaan sebanyak lima sampel setiap 2 detik, sesuai dengan program yang digunakan pada node *transmitter*. Setiap proses pembacaan memiliki waktu tunda (*delay*) sebesar 60 ms sehingga total waktu tunda diperoleh sebagai berikut.

$$t_{delay} = 5 \times 60$$

$$t_{delay} = 300ms$$

Selain waktu tunda, sensor memerlukan waktu untuk proses pengiriman dan penerimaan gelombang ultrasonik. Berdasarkan persamaan waktu rambat gelombang,

$$t = \frac{2d}{v}$$

Dimana:

$$d = 0,28 \text{ m (jarak maksimum pengukuran)}$$

$$v = 343 \text{ m/s (kecepatan bunyi di udara)}$$

maka diperoleh

$$t = \frac{2 \times 0,28}{342}$$

$$t = 1,63 \text{ ms}$$

Karena pembacaan dilakukan sebanyak lima kali, maka total waktu proses echo adalah

$$t_{echo} = 5 \times 1,63 = 8,15 \text{ ms}$$

Sehingga total waktu aktif sensor menjadi

$$t_{aktif} = 300 + 8,15$$

$$t_{aktif} = 308,15 \text{ ms}$$

atau sekitar

$$0,31 \text{ detik}$$

Duty cycle sensor dihitung sebagai berikut.

$$DC = \frac{0,31}{2} \times 100\%$$

$$DC = 15,5\%$$

b. *Duty cycle* Modul LoRa SX1278

Modul LoRa melakukan pengiriman data setiap 5 detik. Berdasarkan konfigurasi komunikasi yang digunakan, yaitu SF7, *Bandwidth* 125 kHz, *Coding rate* 4/5, CRC aktif, serta ukuran payload sekitar 30 byte, diperoleh Time on Air (ToA) sebesar 67 ms berdasarkan persamaan pada *datasheet* Semtech SX1278.

Dengan demikian,

$$DC = \frac{0,067}{5} \times 100\%$$

$$DC = 1,34\%$$

c. *Duty cycle* LED Indikator

LED indikator hanya menyala ketika proses pengiriman data berlangsung. Berdasarkan program, LED berada pada kondisi menyala selama dua kali masing-masing 150 ms, sehingga total waktu aktif LED adalah

$$t_{aktif} = 150 + 150$$

$$t_{aktif} = 300 \text{ ms} \approx 30s$$

Duty cycle LED adalah

$$DC = \frac{0,30}{5} \times 100\%$$

$$DC = 6\%$$

d. *Duty cycle* ESP32

ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama sistem sehingga tetap aktif selama node *transmitter* beroperasi. Oleh karena itu *duty cycle* ESP32 dianggap sebesar 100%

Tabel 5-8 Karakteristik Operasional Node *Transmitter*

No	Komponen	Arus Aktif (mA)	Waktu Aktif	Periode	<i>Duty cycle</i>
1	ESP32	80	Kontinu	-	100%
2	HC-SR04	15	0,31s	2s	15,5%
3	LoRa SX1278	120	0,067s	5s	1,34%
4	LED Indikator	5	0,30s	5s	6%

Arus rata-rata masing-masing komponen dihitung menggunakan persamaan:

$$I_{avg} = I_{aktif} \times \frac{DC}{100}$$

Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 5-9 Arus Rata-rata Node *Transmitter*

No	Komponen	Arus Aktif (mA)	Duty cycle	Arus Rata-rata (mA)
1	ESP32	80	100%	80
2	HC-SR04	15	15,5%	2,33
3	LoRa SX1278	120	1,34%	1,61
4	LED Indikator	5	6%	0,30
Total				84,24 mA

Daya rata-rata node *transmitter* dihitung menggunakan persamaan:

$$P = V \times I$$

$$P = 5 \times 0,084 = 0,42 \text{ W}$$

Selanjutnya, estimasi waktu operasi sistem dihitung menggunakan persamaan:

$$t = \frac{E_{efektif}}{P}$$

$$t = \frac{15,73}{0,42}$$

$$t = 37,45 \text{ jam} \approx 1,56 \text{ hari}$$

Berdasarkan hasil analisis tersebut, pola kerja sistem menunjukkan bahwa node *transmitter* tidak mengoperasikan seluruh komponen secara bersamaan selama proses monitoring. ESP32 tetap aktif sebagai pengendali utama, sedangkan sensor HC-SR04, modul LoRa, dan LED hanya aktif pada interval tertentu sesuai program yang diimplementasikan. Oleh karena itu, estimasi waktu operasi berdasarkan *duty cycle* lebih mendekati kondisi penggunaan sebenarnya dibandingkan perhitungan konsumsi daya maksimum pada Subbab 5.7.1. Meskipun secara teoritis sistem mampu beroperasi hingga sekitar 37,36 jam, untuk menjaga keandalan sistem dan menghindari penurunan tegangan baterai yang dapat memengaruhi performa perangkat, pengisian ulang baterai direkomendasikan dilakukan setiap satu hari sekali.

5.8 Analisis Hasil Pengujian

Hasil pengujian sensor ultrasonik menunjukkan rata-rata akurasi 93,45% dengan rata-rata *error* 6,55%. Sensor bekerja dengan baik pada rentang tinggi cairan 0–24 cm dengan akurasi 95–100%. Penurunan akurasi terbesar terjadi pada tinggi cairan 26 cm karena jarak permukaan terhadap sensor hanya sekitar 2 cm dan berada pada daerah *dead zone* HC-SR04.

Pengujian model perhitungan volume *frustum* menghasilkan rata-rata akurasi 90,87% dan rata-rata *error* 9,13% terhadap volume manual. Hasil ini mengevaluasi kesesuaian model geometri menggunakan tinggi manual, sehingga belum mencakup *error* sensor ultrasonik. Perbedaan terhadap volume manual terutama disebabkan oleh bentuk tangki yang tidak sepenuhnya mengikuti model *frustum* ideal, lengkungan dasar wadah, ketelitian gelas ukur, dan toleransi pengukuran dimensi. Meskipun demikian, perhitungan tersebut sudah dapat digunakan untuk memberikan estimasi volume pada prototipe skala laboratorium.

Pengujian komunikasi LoRa menunjukkan bahwa data berhasil diterima pada jarak 100 meter hingga 600 meter dengan RSSI menurun dari -78 dBm menjadi -116 dBm. Pada jarak 700 meter tidak terdapat pembaruan data pada node *receiver*. Oleh karena itu, jarak maksimum yang berhasil dicapai pada kondisi pengujian adalah 600 meter. Hasil ini juga menunjukkan bahwa peningkatan jarak menyebabkan pelemahan sinyal, sedangkan keberhasilan aktual tetap dipengaruhi oleh penghalang, posisi, ketinggian, dan orientasi antena.

Pengujian Telegram dan Google Spreadsheet menunjukkan bahwa node *receiver* mampu meneruskan data monitoring ke kedua layanan selama koneksi *Wi-Fi* tersedia. Telegram berhasil memberikan notifikasi perubahan status dan pembaruan level, sedangkan Google Spreadsheet berhasil menyimpan data monitoring secara otomatis. Saat koneksi internet terputus, komunikasi LoRa dan indikator lokal tetap bekerja, tetapi layanan berbasis internet tidak dapat diperbarui.

Selain pengujian terhadap fungsi sistem, dilakukan pula analisis konsumsi daya pada node *transmitter* yang menggunakan dua baterai lithium-ion 18650 berkapasitas 2500 mAh yang dirangkai seri. Berdasarkan perhitungan konsumsi daya maksimum, node *transmitter* memiliki estimasi waktu operasi minimum sekitar 14,30 jam apabila seluruh komponen bekerja secara aktif secara terus-menerus. Namun, kondisi tersebut merupakan skenario *worst-case* dan tidak mencerminkan pola operasi sistem yang sebenarnya.

Berdasarkan analisis *duty cycle*, konsumsi daya rata-rata sistem menjadi lebih rendah dibandingkan konsumsi daya maksimum. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa node *transmitter* memiliki estimasi waktu operasi sekitar 37,36 jam atau setara dengan 1,56 hari sebelum baterai memerlukan pengisian ulang. Dengan asumsi sistem dioperasikan secara kontinu selama 24 jam setiap hari, baterai diperkirakan cukup diisi ulang sekitar setiap 1,5 hari sekali. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan komunikasi LoRa dengan interval pengiriman data setiap lima detik serta penerapan *duty cycle* pada komponen berhasil mendukung efisiensi konsumsi daya, sehingga sistem sesuai untuk aplikasi monitoring yang memerlukan operasi dalam waktu relatif lama menggunakan sumber daya baterai.

Secara keseluruhan, sistem telah mampu membaca level tangki, menghitung tinggi, volume, dan persentase, mengirimkan data melalui LoRa, menjalankan LED dan *buzzer* sesuai status, memberikan notifikasi Telegram, serta menyimpan data pada Google Spreadsheet. Keterbatasan sistem terdapat pada *dead zone* sensor saat tangki mendekati penuh, akurasi volume yang dipengaruhi bentuk wadah, penurunan kualitas sinyal pada jarak jauh, dan ketergantungan layanan internet terhadap *Wi-Fi*. Berdasarkan hasil tersebut, prototipe telah memenuhi fungsi utama yang dirancang dan dapat digunakan sebagai dasar pengembangan sistem monitoring level tangki yang lebih lanjut.