Perancangan Sistem Monitoring Suhu, Kelembapan, dan Deteksi Genangan Air pada Optical Distribution Cabinet (ODC) Instalasi Bawah Tanah

Andinia Nur'afni
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
nurafniiandinia@gmail.com

Indha Wahyuni
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
indhawahyuni66@gmail.com

Sekar Langit Az-Zahra Saksono
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
lasekarla@gmail.com

Uke Kurniawan Usman
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
ukeusman@telkomuniversity.ac.id

Akhmad Hambali
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
ahambali@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—**Optical Distribution Cabinet (ODC) merupakan perangkat pada jaringan *Fiber To The Home* (FTTH) yang berfungsi sebagai titik distribusi kabel serat optik. Instalasi ODC bawah tanah rentan mengalami fluktuasi suhu, kelembapan tinggi, dan genangan air yang dapat memengaruhi keandalan perangkat, sedangkan pemantauan manual dinilai kurang efektif karena keterbatasan akses lokasi. Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring suhu, kelembapan, dan deteksi genangan air pada ODC instalasi bawah tanah. Sistem mengintegrasikan sensor SHT20 RS485, sensor *Water Level Analog* K-0135, ESP32, *Firebase Realtime Database*, dan aplikasi Android berbasis Flutter bernama HumTemp. Data sensor dikirim melalui jaringan WiFi dan ditampilkan secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu melakukan monitoring suhu dan kelembapan dengan tingkat akurasi 98,76% untuk suhu dan 99,16% untuk kelembapan, mengklasifikasikan kondisi lingkungan ke dalam kategori *safe*, *warning*, dan *danger*, serta mendeteksi genangan air berdasarkan nilai ADC. Pengujian monitoring jarak jauh berhasil dilakukan hingga ±2.100 km, aplikasi memperoleh nilai rata-rata *User Experience Questionnaire* (UEQ) sebesar 6,69 tanpa mengalami *crash*, dan sistem memiliki konsumsi daya 0,860 W dengan estimasi waktu operasi 10,33 jam. Sistem mampu mendukung pemantauan kondisi lingkungan ODC bawah tanah sebagai media deteksi dini terhadap potensi gangguan.**

Kata kunci—ESP32, Firebase Realtime Database, Internet of Things, Optical Distribution Cabinet, SHT20 RS485

I. PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur telekomunikasi di Indonesia terus meningkat, terutama dalam penyediaan layanan internet berbasis Fiber to the Home (FTTH). Jaringan FTTH memanfaatkan kabel serat optik sebagai media transmisi yang mampu menyediakan kapasitas besar, kecepatan tinggi, dan latensi rendah hingga ke sisi pelanggan. Salah satu komponen penting dalam jaringan FTTH adalah Optical Distribution Cabinet (ODC), yaitu perangkat pasif yang berfungsi sebagai titik terminasi dan distribusi kabel serat optik dari Optical Distribution Frame (ODF) menuju Optical Distribution Point (ODP).

Untuk meningkatkan keamanan perangkat serta mengurangi risiko vandalisme dan gangguan lingkungan, instalasi ODC bawah tanah mulai dipertimbangkan sebagai alternatif pengembangan infrastruktur telekomunikasi. Namun, lingkungan bawah tanah memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan instalasi di permukaan, seperti kelembapan tinggi, sirkulasi udara terbatas, serta potensi masuknya air akibat rembesan tanah maupun limpasan air hujan. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan kondensasi pada komponen optik, korosi konektor, hingga kerusakan perangkat. Laju korosi pada material logam meningkat seiring bertambahnya kelembapan relatif dan mencapai kondisi tertinggi pada kelembapan sekitar 75%RH [1]. Selain itu, keterbatasan akses pada infrastruktur bawah tanah menyulitkan proses inspeksi dan pemeliharaan berkala [2], sementara perubahan temperatur turut memengaruhi karakteristik hamburan balik (Rayleigh backscattering) yang berdampak pada rugi-rugi transmisi serat optik [3]. Pemantauan manual dinilai kurang efektif dalam mendeteksi perubahan kondisi secara cepat. Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) membuka peluang penerapan sistem monitoring jarak jauh secara real-time, di mana parameter suhu, kelembapan, dan keberadaan air dapat dipantau secara kontinu melalui perangkat yang terhubung ke internet [4].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem monitoring dan pengamanan ODC, di antaranya prototipe monitoring suhu dan kelembapan berbasis komunikasi Modbus pada sensor XY-MD02 [5], purwarupa ODC bawah tanah berbasis RFID dengan mekanisme penguncian otomatis [6], serta sistem early warning banjir berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor ketinggian air dan curah hujan [7]. Ketiga solusi tersebut masing-masing masih terbatas pada satu aspek, baik dari sisi tampilan data, keamanan akses, maupun cakupan parameter lingkungan, dan belum mengintegrasikan pemantauan suhu, kelembapan, serta deteksi genangan air secara terpusat dan real-time melalui aplikasi mobile.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring suhu, kelembapan, dan deteksi genangan air pada ODC instalasi bawah tanah berbasis IoT, mengimplementasikan Firebase Realtime Database sebagai media penyimpanan dan sinkronisasi data, serta mengembangkan aplikasi monitoring berbasis Flutter yang terintegrasi dengan Firebase untuk menampilkan data suhu, kelembapan, dan status deteksi air pada ODC secara real-time.

II. KAJIAN TEORI

Kajian teori membahas konsep dan pendekatan yang menjadi dasar perancangan sistem monitoring lingkungan ODC berbasis IoT, meliputi komponen perangkat keras, protokol komunikasi, serta media penyimpanan dan penyajian data.

A. Optical Distribution Cabinet (ODC)

ODC menempati posisi strategis dalam arsitektur distribusi FTTH sebagai titik distribusi yang menghubungkan kabel feeder dari Optical Line Terminal (OLT) dengan kabel distribusi yang diteruskan ke Optical Distribution Point (ODP) [8]. Karena umumnya dipasang pada lingkungan luar ruangan termasuk instalasi bawah tanah di dalam handhole atau manhole, ODC rawan terhadap gangguan lingkungan seperti genangan air, fluktuasi suhu, dan kelembapan yang dapat memengaruhi performa sambungan optik dan komponen elektronik pasif di dalamnya [2].

B. Internet of Things (IoT)

IoT merupakan konsep jaringan yang menghubungkan berbagai perangkat fisik dengan internet sehingga perangkat tersebut dapat mengirim dan menerima data tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung [9]. Penerapan IoT pada infrastruktur telekomunikasi memberikan kemampuan pemantauan kondisi lingkungan secara jarak jauh tanpa perlu kunjungan rutin teknisi ke lokasi, sehingga dapat mempercepat deteksi dini terhadap potensi gangguan [10].

C. Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah modul mikrokontroler berbasis System on Chip (SoC) yang dilengkapi modul WiFi dan Bluetooth terintegrasi, prosesor dual-core, serta jumlah pin General Purpose Input/Output (GPIO) yang memadai untuk kebutuhan pembacaan multi-sensor secara bersamaan [11]. Karakteristik tersebut menjadikan ESP32 dipilih sebagai unit pemroses utama pada sistem monitoring ODC dalam penelitian ini.

D. Sensor Suhu, Kelembapan, dan Deteksi Genangan Air

Sensor SHT20 RS485 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan di dalam ODC. Sensor ini mengintegrasikan elemen sensor kapasitif untuk kelembapan dan sensor suhu band-gap dalam satu chip, dengan keluaran RS485 yang tahan terhadap derau (noise) dan mampu mentransmisikan data pada jarak yang lebih jauh dibandingkan komunikasi I²C maupun UART standar [12]. Komunikasi RS485 dipadukan dengan protokol Modbus RTU melalui modul konverter MAX485 yang mengubah sinyal serial UART dari mikrokontroler menjadi sinyal diferensial RS485 [5]. Untuk mendeteksi genangan air, digunakan sensor Water Level Analog K-0135 yang bekerja berdasarkan prinsip konduktivitas, di mana nilai keluaran analog (ADC) dibandingkan terhadap ambang batas tertentu untuk memicu klasifikasi status maupun notifikasi [13].

E. Firebase Realtime Database

Firebase Realtime Database merupakan layanan basis data berbasis cloud yang dikembangkan oleh Google, dengan data yang disimpan dalam struktur JSON berbentuk pohon dan disinkronkan secara real-time ke seluruh klien yang terhubung. Data sensor dapat dikirimkan langsung dari ESP32 ke node basis data melalui protokol HTTPS tanpa memerlukan server perantara, sehingga cocok digunakan pada sistem monitoring yang membutuhkan pembaruan data secara instan [14].

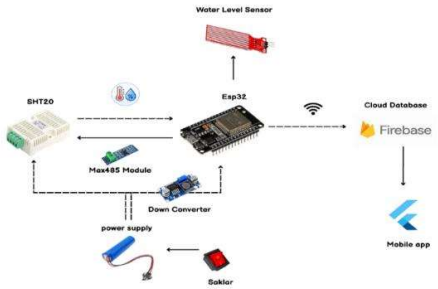
F. Framework Flutter

Flutter adalah framework pengembangan aplikasi antarmuka pengguna bersifat open-source yang dikembangkan Google menggunakan bahasa pemrograman Dart, dan memungkinkan pengembang membangun aplikasi lintas platform dari satu basis kode. Penerapan Flutter pada sistem berbasis IoT memberikan tampilan antarmuka yang interaktif dan mudah diakses bagi pengguna [15], sehingga dipilih sebagai kerangka kerja pengembangan aplikasi dashboard mobile HumTemp pada penelitian ini.

III. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental melalui tahap analisis kebutuhan, perancangan arsitektur sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian dan evaluasi kinerja. Sistem dirancang sebagai satu kesatuan yang mengintegrasikan sensor SHT20 RS485 dan sensor Water Level Analog K-0135 pada sisi ODC, mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses, Firebase Realtime Database sebagai media penyimpanan, dan aplikasi HumTemp berbasis Flutter sebagai antarmuka pengguna.



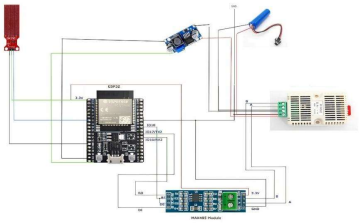
GAMBAR 1
Arsitektur Sistem Monitoring ODC

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1, sensor SHT20 dipasang di dalam ODC untuk mengukur suhu dan kelembapan, sedangkan sensor water level dipasang di luar ODC untuk mendeteksi genangan air pada area instalasi.

Data sensor dikirim ke ESP32 melalui komunikasi RS485 menggunakan modul MAX485 dan pin analog, kemudian diteruskan ke Firebase Realtime Database melalui koneksi WiFi sebelum ditampilkan pada aplikasi HumTemp secara real-time. Catu daya sistem menggunakan baterai lithium-ion 18650 yang diregulasi melalui modul step-down LM2596.

B. Desain Perangkat Keras

Rangkaian sistem monitoring terdiri atas ESP32, sensor SHT20 RS485, sensor Water Level Analog K-0135, modul MAX485, baterai Li-ion 18650, dan modul *down converter*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3. Sensor SHT20 RS485 terhubung ke ESP32 melalui modul MAX485 menggunakan komunikasi RS485, sedangkan sensor Water Level terhubung langsung ke pin analog ESP32. Seluruh komponen dipasang di dalam kabinet ODC dengan penataan yang disesuaikan agar sistem dapat beroperasi secara optimal serta memudahkan proses instalasi dan pemeliharaan.



GAMBAR 2
Skematik Rangkaian Sistem Monitoring



GAMBAR 3
Penempatan Sensor dan Modul Monitoring di Dalam Kabinet ODC

C. Prosedur dan Skema Pengujian

Purwarupa ODC ditempatkan di dalam manhole berukuran 80 cm × 80 cm dengan kedalaman 1,5 m untuk merepresentasikan kondisi pemasangan ODC bawah tanah pada lingkungan operasional sesungguhnya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.3 Pengujian meliputi validasi akurasi sensor SHT20 RS485 terhadap termometer digital HTC-1, validasi logika klasifikasi status sistem, monitoring suhu dan kelembapan secara kontinu selama periode pengamatan, pengujian logika sensor water level dengan variasi tinggi air, pengujian monitoring jarak jauh dari beberapa lokasi berbeda, pengujian performa dan User Experience aplikasi HumTemp, serta pengujian konsumsi daya sistem.



GAMBAR 4
Lokasi Pengujian Sistem Monitoring pada ODC di Dalam Manhole

Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sensor terhadap Mean Absolute Error (MAE) dan tingkat keakuratan terhadap alat referensi, kesesuaian klasifikasi status Safe, Warning, dan Danger, kestabilan aplikasi menggunakan aplikasi AppTim, serta estimasi waktu operasi sistem berdasarkan hasil pengukuran daya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem monitoring ODC secara objektif melalui kombinasi narasi, tabulasi, dan grafik untuk mempermudah interpretasi hasil yang diperoleh.

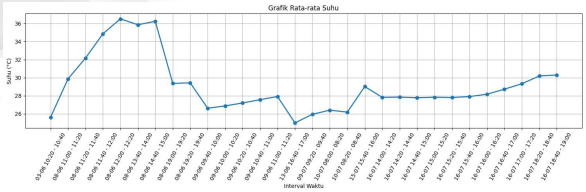
A. Hasil Pengujian Monitoring Suhu dan Kelembapan

Validasi sensor SHT20 RS485 dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap termometer digital HTC-1 sebanyak 30 kali pengukuran. Hasil perhitungan Mean Absolute Error (MAE) dan tingkat keakuratan sensor disajikan pada Tabel 4.1.

TABEL 1

Parameter	Nilai
Rata-rata selisih suhu (MAE)	0,357 °C
Rata-rata selisih kelembapan (MAE)	0,443 %RH
Tingkat keakuratan suhu	98,76%
Tingkat keakuratan kelembapan	99,16%

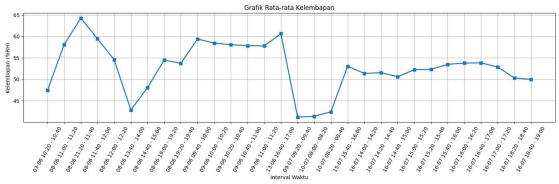
Selisih pengukuran yang relatif kecil menunjukkan bahwa sensor SHT20 RS485 memiliki tingkat akurasi yang baik. Selain itu, validasi logika sistem menunjukkan bahwa seluruh skenario pengujian menghasilkan status Safe dan Warning yang sesuai dengan klasifikasi berdasarkan nilai suhu dan kelembapan yang ditetapkan.



GAMBAR 4
Grafik Rata-rata Suhu Selama Pengujian

Berdasarkan Gambar 4.1, grafik menunjukkan perubahan rata-rata suhu selama pengujian. Nilai rata-rata suhu berada pada rentang 25,00°C hingga 36,51°C dengan rata-rata keseluruhan sebesar 29,08°C. Suhu mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai nilai

maksimum pada periode siang hari, kemudian menurun dan cenderung stabil pada kisaran 27–30°C hingga akhir pengujian.



GAMBAR 5
Grafik Rata-rata Kelembapan Selama Pengujian

Berdasarkan Gambar 4.2, grafik menunjukkan perubahan rata-rata kelembapan selama pengujian. Nilai rata-rata kelembapan berada pada rentang 41,18%RH hingga 64,30%RH dengan rata-rata keseluruhan sebesar 52,86%RH. Pola perubahan kelembapan cenderung berbanding terbalik dengan suhu, di mana kelembapan menurun ketika suhu meningkat dan kembali meningkat saat suhu menurun. Dari 30 interval pengamatan yang dianalisis, 28 interval berada pada kategori Safe dan 2 interval berada pada kategori Warning, sehingga menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan kondisi lingkungan sesuai batas ambang yang ditetapkan.

B. Hasil Pengujian Deteksi Genangan Air

Pengujian sensor Water Level Analog K-0135 dilakukan menggunakan variasi tinggi air 0–3,5 cm. Klasifikasi status berdasarkan nilai ADC ditunjukkan pada Tabel 4.2.

TABEL 2

Rentang ADC	Status	Keterangan
ADC < 200	Safe	Kondisi kering
200 ≤ ADC < 1500	Warning	Air mulai terdeteksi
ADC ≥ 1500	Danger	Genangan air terdeteksi

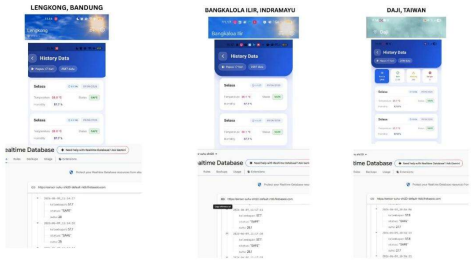
Hasil pengujian menunjukkan nilai ADC meningkat seiring bertambahnya tinggi permukaan air: kondisi 0 cm menghasilkan status Safe (0 ADC), tinggi air 1–1,5 cm menghasilkan status Warning (kisaran 1187–1414 ADC), dan tinggi air 2–3,5 cm menghasilkan status Danger (kisaran 1530–2107 ADC). Seluruh hasil pembacaan tetap berada pada rentang klasifikasi yang sesuai, menunjukkan proses pembacaan sensor, pengiriman data ke Firebase, dan penampilan status pada aplikasi HumTemp berjalan sesuai dengan logika sistem yang dirancang.

C. Hasil Pengujian Monitoring Jarak Jauh

Pengujian monitoring jarak jauh dilakukan dengan mengakses aplikasi HumTemp dari tiga lokasi berbeda, yaitu Lengkong (Bandung), Bangkaloa Ilir (Indramayu), dan Daji (Taiwan), sebagaimana disajikan pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.3.

TABEL 3

Lokasi Pengakses	Jarak dari ODC	Status Sistem	Kesesuaian
Lengkong, Bandung	± 5 km	Safe	Sesuai
Bangkaloa Ilir, Indramayu	± 170 km	Safe	Sesuai
Daji, Taiwan	± 2.100 km	Safe	Sesuai



GAMBAR 6
Hasil Pengujian Monitoring Jarak Jauh pada Tiga Lokasi Berbeda

Aplikasi HumTemp berhasil menampilkan data monitoring pada seluruh lokasi pengujian tanpa dipengaruhi oleh perbedaan geografis, dan data yang ditampilkan pada aplikasi sesuai dengan data yang tersimpan pada Firebase, menunjukkan proses sinkronisasi data berlangsung dengan baik.

D. Hasil Pengujian Performa Aplikasi dan User Experience

Pengujian performa aplikasi menggunakan AppTim pada smartphone OPPO Reno4 (RAM 8 GB, Android 12) menunjukkan aplikasi dapat beroperasi stabil tanpa crash, dengan hasil disajikan pada Tabel 4.4.

TABEL 4

Parameter	Hasil
Rata-rata penggunaan CPU	17,17%
Rata-rata penggunaan RAM aplikasi	354,3 MB
Frame Rate (FPS)	12 FPS
Jumlah crash	0

Pengujian User Experience menggunakan User Experience Questionnaire (UEQ) yang melibatkan 15 responden memperoleh nilai rata-rata 6,69 dari skala 7, dengan aspek Clarity, Quality of Content, dan Value memperoleh nilai tertinggi sebesar 6,73, menunjukkan aplikasi HumTemp mudah digunakan, efisien, dan mampu memenuhi kebutuhan pengguna dalam melakukan monitoring secara real-time.

E. Hasil Pengujian Konsumsi Daya Sistem

Pengujian konsumsi daya dilakukan menggunakan dua baterai Lithium-ion 18650 (7,4 V, 1200 mAh) yang disusun seri. Hasil pengukuran tegangan, arus, dan daya setiap komponen disajikan pada Tabel 4.5.

TABEL 5

Komponen	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
Sensor SHT20 RS485	7,37	0,018	0,133
ESP32	4,82	0,145	0,699
Sensor Water Level K-0135	3,06	0,009	0,028
Total	-	0,172	0,860

Berdasarkan total konsumsi daya sistem sebesar 0,860 W dan kapasitas energi baterai sebesar 8,88 Wh, sistem diperkirakan mampu beroperasi secara kontinu selama sekitar 10,33 jam pada kondisi beban normal, menunjukkan

konsumsi daya sistem tergolong efisien untuk mendukung proses monitoring dalam jangka waktu yang cukup lama.

F. Evaluasi dan Pembahasan

Perbandingan antara target spesifikasi dan hasil realisasi sistem disajikan pada Tabel 4.6.

TABEL 6

Spesifikasi	Target	Realisasi	Status
Monitoring suhu & kelembapan	Keakuratan suhu ≥ 95%, keakuratan kelembapan ≥ 95%, klasifikasi kondisi, dan data monitoring ditampilkan pada aplikasi	Keakuratan suhu 98,76%, kelembapan 99,16%, klasifikasi sesuai batas ambang, dan data berhasil ditampilkan pada aplikasi	Tercapai
Monitoring genangan air	Klasifikasi 3 status	Safe/Warning/Danger sesuai ADC	Tercapai
Monitoring jarak jauh	Minimal 3 lokasi	Berhasil pada 3 lokasi	Tercapai
Performa aplikasi	Crash = 0	0 crash	Tercapai
User Experience	UEQ ≥ 6,0	UEQ 6,69	Tercapai
Konsumsi daya sistem	Operasi ≥ 10 jam	10,33 jam	Tercapai

Secara keseluruhan, seluruh target spesifikasi sistem berhasil tercapai. Sistem mampu melakukan monitoring suhu dan kelembapan dengan tingkat keakuratan masing-masing sebesar 98,76% dan 99,16%, menampilkan data monitoring pada aplikasi, serta mengklasifikasikan kondisi sesuai dengan batas ambang yang telah ditentukan. Sistem juga berhasil mendeteksi kondisi genangan air ke dalam kategori Safe, Warning, dan Danger berdasarkan nilai ADC sensor Water Level. Keberhasilan monitoring jarak jauh pada tiga lokasi menunjukkan bahwa arsitektur berbasis cloud menggunakan Firebase Realtime Database mampu mendukung pemantauan tanpa dibatasi oleh jarak geografis selama tersedia koneksi internet. Selain itu, aplikasi tidak mengalami *crash* selama pengujian, memperoleh nilai *User Experience Questionnaire* (UEQ) sebesar 6,69, serta memiliki estimasi waktu operasi selama 10,33 jam sehingga memenuhi target konsumsi daya sistem. Meskipun demikian, penelitian ini masih berupa purwarupa yang diuji pada skala terbatas dan durasi pengujian yang belum mencakup variasi musim maupun kondisi lingkungan ekstrem. Oleh karena itu, pengujian jangka panjang pada instalasi ODC yang sesungguhnya masih diperlukan untuk memvalidasi keandalan sistem secara lebih komprehensif.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring suhu, kelembapan, dan deteksi genangan air pada *Optical Distribution Cabinet* (ODC) instalasi bawah tanah dengan mengintegrasikan sensor SHT20 RS485, sensor Water Level Analog K-0135, ESP32, Firebase Realtime Database, dan aplikasi mobile. Sistem mampu melakukan monitoring suhu dan kelembapan secara *real-time* dengan tingkat keakuratan masing-masing sebesar 98,76% dan 99,16%, menampilkan data monitoring pada aplikasi, serta mengklasifikasikan kondisi berdasarkan batas ambang yang telah ditentukan. Sistem juga berhasil mendeteksi kondisi genangan air ke dalam kategori *safe, warning,* dan *danger* sesuai dengan nilai ADC sensor Water Level. Pengujian monitoring jarak jauh menunjukkan bahwa sistem dapat diakses secara konsisten pada tiga lokasi pengujian hingga jarak ±2.100 km selama tersedia koneksi internet. Selain itu, aplikasi menunjukkan performa yang stabil tanpa mengalami *crash*, memperoleh nilai rata-rata *User Experience Questionnaire* (UEQ) sebesar 6,69, serta sistem memiliki estimasi waktu operasi selama 10,33 jam dengan konsumsi daya sebesar 0,860 W menggunakan baterai Li-ion 18650. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis Internet of Things (IoT) efektif diterapkan sebagai media monitoring dan deteksi dini terhadap perubahan kondisi lingkungan pada ODC instalasi bawah tanah. Pengembangan selanjutnya disarankan mencakup implementasi pada ODC bawah tanah yang sesungguhnya, pengujian dalam jangka waktu yang lebih panjang dan pada berbagai kondisi lingkungan, penambahan parameter lingkungan lainnya, penggunaan catu daya cadangan, serta perluasan skala pemantauan pada beberapa ODC secara terpusat.

REFERENSI

[1] C. Chen, L. Xiang, J. Wang, S. Wang, C. Zhu, and G. Jie, “Research on simulation testing of humidity-controlled salt spray corrosion environment for electrical products under working conditions,” *Corros. Rev.*, vol. 44, no. 1, pp. 1–10, 2025, doi: 10.1515/corrrev-2025-0005.

[2] M. Wang and X. Yin, “Construction and maintenance of urban underground infrastructure with digital technologies,” *Autom. Constr.*, vol. 141, no. June, p. 104464, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104464.

[3] S. Junon and A. Roeksabutr, “ิ ่ านเส ้ นใยน าแสงด ้ วยโอท ี ด ี อาร ์ Study of the Temperature Optical Fiber Sensor using OTDR,” 2023, doi: 10.14456/rmutlengj.2023.9.

[4] H. Zhang, B. Li, M. Karimi, S. Saydam, and M. Hassan, “Recent Advancements in IoT Implementation for Environmental, Safety, and Production Monitoring in Underground Mines,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 16, pp. 14507–14526, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3267828.

[5] S. Romadhona, Z. Hanni Pradana, S. Larasati, and S. L. Br Perangin-angin, “Prtotipe Monitoring Suhu Dan Kelembapan Pada Budidaya Kelinci Dengan Komunikasi Modbus Pada Sensor Xy-Md02,” *J. SINTA Sist. Inf. dan Teknol. Komputasi*, vol. 1, no. 3, pp. 118–128, 2024, doi: 10.61124/sinta.v1i3.21.

[6] Megan Ananta Putriasih, “Rancang Bangun Purwarupa Optical Distribution Cabinet dengan Modifikasi Mekanisme Penguncian Berbasis RFID,” Universitas Telkom, 2025.

[7] I. A. Wandi and A. Ashari, "Monitoring Ketinggian Air dan Curah Hujan Dalam Early Warning System Bencana Banjir Berbasis IoT," *IJEIS (Indonesian J. Electron. Instrum. Syst.*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.22146/ijeis.83569.

[8] B. Noraga and I. Suharjo, "Perancangan Jaringan Rt/Rw Net Berbasis Teknologi Fiber To the Home (Ftth) Di Dusun Kedon Rt.005 Bantul," *JATISI (Jurnal Tek. Inform. dan Sist. Informasi)*, vol. 12, no. 1, pp. 76–89, 2025, doi: 10.35957/jatisi.v12i1.10245.

[9] R. A. Radouan Ait Mouha, "Internet of Things (IoT)," *J. Data Anal. Inf. Process.*, vol. 09, no. 02, pp. 77–101, 2021, doi: 10.4236/jdaip.2021.92006.

[10] R. Kusumah, H. I. Islam, and S. Sobur, "Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Ruang Data Center," *J. Appl. Informatics Comput.*, vol. 7, no. 1, pp. 82–88, 2023, doi: 10.30871/jaic.v7i1.5199.

[11] P. MacHeso, S. Chisale, C. Daka, N. Dzupire, J. Mlatho, and D. Mukanyirigira, "Design of Standalone Asynchronous ESP32 Web-Server for Temperature and Humidity Monitoring," *2021 7th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst. ICACCS 2021*, pp. 635–638, 2021, doi: 10.1109/ICACCS51430.2021.9441845.

[12] A. H. La Jumani, M. I. Sarita, L. F. Aksara, I. Isnawaty, and L. B. Aksara, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu Dan Kelembaban Pada Pabrik Pembuatan Es Balok Menggunakan Sensor Sht20 Berbasis Android," *semanTIK*, vol. 8, no. 2, p. 201, 2022, doi: 10.55679/semantik.v8i2.27888.

[13] A. Mulyani, D. Kurniadi, and R. E. Saputra, "IoT-Based Real-Time River Monitoring and Early Flood Warning Using ESP32 and HC-SR04," no. July 2025, 2026, doi: 10.56741/jnest.v5i01.1252.

[14] I. N. W. R. S. Rizqi Samkayana, "Implementasi Firebase Realtime Database Pada Smart Cat Feeder Berbasis Mikrokontroler Esp32," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.7198.

[15] M. F. Latief, I. Irmansyah, and L. Rosyidi, "Sistem Pemantauan Ruang Kelas berbasis Internet of Things (IoT) untuk Proses Pendidikan yang Efektif," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 1278–1284, 2025, doi: 10.47709/digitech.v4i2.5485.