

INTERNET OF THINGS UNTUK LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

KONSEP, TEKNOLOGI, DAN PROYEK PEMANTAUAN BERBASIS DATA



Harry Setya Hadi, S.Kom, M.Kom

INTERNET OF THINGS UNTUK LINGKUNGAN BERKELANJUTAN KONSEP, TEKNOLOGI, DAN PROYEK PEMANTAUAN BERBASIS DATA

Harry Setya Hadi, S.Kom., M.Kom

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-undang Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2014

Tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/ atau pidana denda paling Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

INTERNET OF THINGS UNTUK LINGKUNGAN BERKELANJUTAN KONSEP, TEKNOLOGI, DAN PROYEK PEMANTAUAN BERBASIS DATA

Harry Setya Hadi, S.Kom., M.Kom



YAYASAN PUTRA ADI DHARMA

INTERNET OF THINGS UNTUK LINGKUNGAN BERKELANJUTAN KONSEP, TEKNOLOGI, DAN PROYEK PEMANTAUAN BERBASIS DATA

Penulis :

Harry Setya Hadi, S.Kom., M.Kom

ISBN : 978-634-295-332-7

IKAPI : No.498/JBA/2024

Editor :

Annida Muthi'ah

Penyunting :

Yayasan Putra Adi Dharma

Desain sampul dan Tata letak

Yayasan Putra Adi Dharma

Penerbit :

Yayasan Putra Adi Dharma

Redaksi :

Wahana Pondok Ungu Blok B9 no 1, Bekasi

Office Marketing Jl. Gedongkuning, Banguntapan Bantul, Yogyakarta

Office Yogyakarta : 087777899993

Marketing : 088221740145

Instagram : @ypad_penerbit

Website : <https://ypad.store>

Email : teampenerbit@ypad.store

Cetakan Pertama Juli 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara
apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit.

Kata Pengantar

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena buku ini dapat disusun sebagai bahan pembelajaran dan panduan praktis mengenai pemanfaatan Internet of Things dalam pemantauan lingkungan berkelanjutan. Perkembangan teknologi digital telah membuka peluang baru dalam cara manusia memahami, memantau, dan merespons perubahan lingkungan. Melalui sensor, konektivitas, platform data, dashboard, dan sistem peringatan, kondisi lingkungan yang sebelumnya sulit diamati secara teratur kini dapat direkam dan dianalisis secara lebih sistematis.

Buku ini disusun untuk membantu pembaca memahami bahwa Internet of Things bukan sekadar perangkat yang tersambung ke internet. IoT merupakan sistem yang menghubungkan lingkungan fisik dengan data digital melalui proses pengukuran, pengiriman, penyimpanan, visualisasi, interpretasi, dan pengambilan keputusan. Oleh karena itu, keberhasilan penerapan IoT tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan perangkat, tetapi juga oleh ketepatan perumusan masalah, pemilihan sensor, kualitas data, kestabilan jaringan, desain dashboard, keamanan sistem, etika penggunaan data, dan kemampuan pengguna dalam menindaklanjuti informasi.

Pendekatan utama buku ini adalah berbasis proyek. Pembaca diajak bergerak dari pemahaman konsep menuju rancangan dan implementasi sistem sederhana, seperti pemantauan kualitas udara, pemantauan kualitas air, smart farming, dashboard lingkungan, dan roadmap pengembangan solusi IoT. Setiap proyek diarahkan agar tidak berhenti pada tampilan angka atau grafik, tetapi dilanjutkan pada pemaknaan data, evaluasi keterbatasan, dan penyusunan tindakan yang realistis.

Buku ini juga menekankan sikap kritis terhadap data. Sensor tidak selalu menghasilkan nilai yang sepenuhnya akurat. Data dapat dipengaruhi oleh kalibrasi, posisi pemasangan, kondisi lapangan, kualitas koneksi, gangguan perangkat, dan cara interpretasi. Karena itu, pembaca didorong untuk membedakan antara data indikatif dan data referensi, antara peringatan dan diagnosis, serta antara hasil pemantauan awal dan kesimpulan ilmiah atau regulatif.

Sasaran buku ini adalah pelajar, mahasiswa, pendidik, komunitas lingkungan, pengelola fasilitas, pemerhati teknologi, dan pembaca umum yang ingin memahami penerapan IoT untuk isu lingkungan secara bertanggung jawab. Buku ini dapat digunakan sebagai bahan ajar, referensi proyek, panduan pelatihan, atau inspirasi awal dalam membangun sistem pemantauan lingkungan yang sederhana, terukur, dan dapat dikembangkan.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih dapat disempurnakan, terutama pada aspek contoh teknis, pembaruan perangkat, regulasi lokal, dan standar pengukuran lingkungan. Oleh karena itu, kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan agar buku ini semakin relevan, akurat, dan bermanfaat bagi pengembangan teknologi lingkungan yang berkelanjutan.

Semoga buku ini dapat menjadi kontribusi kecil dalam memperkuat literasi teknologi, kesadaran lingkungan, dan kemampuan masyarakat dalam memanfaatkan data untuk mengambil keputusan yang lebih baik.

Penulis

Harry Setya Hadi, S.Kom, M.Kom

Prakata

Perkembangan teknologi digital telah membawa perubahan besar dalam cara manusia memahami, memantau, dan mengelola lingkungan. Salah satu teknologi yang memiliki peran penting dalam transformasi tersebut adalah **Internet of Things (IoT)**. Melalui integrasi sensor, perangkat komunikasi, sistem komputasi, dan analisis data, IoT memungkinkan proses pemantauan lingkungan dilakukan secara lebih cepat, terukur, dan berbasis data.

Buku **Internet of Things untuk Lingkungan Berkelanjutan Konsep, Teknologi, dan Proyek Pemantauan Berbasis Data** disusun untuk memberikan pemahaman sistematis mengenai konsep dasar, teknologi pendukung, arsitektur sistem, pengelolaan data, serta berbagai aplikasi IoT dalam bidang lingkungan. Fokus utama buku ini bukan pada implementasi teknis langsung di lapangan, melainkan pada pemahaman konseptual, pengenalan teknologi, kerangka sistem, dan contoh aplikasi yang relevan dengan isu lingkungan berkelanjutan.

Isu-isu lingkungan seperti pencemaran udara, pencemaran air, degradasi tanah, pengelolaan sampah, efisiensi energi, perubahan iklim, dan bencana lingkungan memerlukan dukungan data yang akurat dan berkelanjutan. Dalam konteks tersebut, IoT dapat menjadi salah satu pendekatan teknologi yang membantu menyediakan data real-time, meningkatkan efektivitas pemantauan, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti.

Buku ini disusun dalam beberapa bagian utama. Bagian awal membahas konsep dasar Internet of Things, lingkungan berkelanjutan, sensor, jaringan komunikasi, serta arsitektur sistem IoT. Bagian berikutnya menguraikan data lingkungan dan analisis berbasis IoT, termasuk visualisasi data, dashboard, time-series data, dan predictive analytics. Selanjutnya, buku ini membahas aplikasi

IoT pada pemantauan kualitas udara, kualitas air, tanah, pertanian, ekosistem, pengelolaan sampah, energi, serta mitigasi bencana lingkungan. Bagian akhir membahas aspek keamanan, privasi, etika, tantangan, dan arah pengembangan IoT untuk lingkungan berkelanjutan.

Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi lingkungan, pengembang teknologi, serta pembuat kebijakan yang ingin memahami hubungan antara IoT dan pengelolaan lingkungan. Materi dalam buku ini juga dapat digunakan sebagai bahan ajar pada mata kuliah yang berkaitan dengan Internet of Things, teknologi lingkungan, sistem informasi lingkungan, smart city, green technology, dan keberlanjutan.

Penulis menyadari bahwa perkembangan IoT dan teknologi lingkungan berlangsung sangat cepat. Oleh karena itu, isi buku ini tidak dimaksudkan sebagai pembahasan yang final, melainkan sebagai dasar konseptual dan referensi awal untuk memahami pemanfaatan IoT dalam mendukung lingkungan berkelanjutan. Pembaca diharapkan dapat menggunakan buku ini sebagai landasan untuk mengembangkan kajian, penelitian, inovasi, maupun aplikasi lebih lanjut sesuai kebutuhan masing-masing.

Akhirnya, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan inspirasi dalam penyusunan buku ini. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan edisi berikutnya.

Penulis

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	v
Prakata	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
Glosarium	xviii
Istilah Lingkungan	xxxii
BAB 1 IoT dan Tantangan Lingkungan Berkelanjutan	1
1.1 Mengapa Lingkungan Membutuhkan Data yang Lebih Baik.....	2
1.2 Internet of Things dalam Bahasa Sederhana	4
1.3 Dari Pemantauan Menuju Pengambilan Keputusan	6
1.4 IoT dan Lingkungan Berkelanjutan.....	7
1.5 Pendekatan Berbasis Proyek dalam Buku Ini.....	9
1.6 Batasan dan Risiko Penggunaan IoT	10
1.7 Studi Kasus Pembuka: Sekolah yang Ingin Memantau Kualitas Udara	12
1.8 Refleksi dan Latihan Akhir Bab	13
BAB 2 Fondasi Teknologi IoT untuk Aplikasi Lingkungan.....	16
2.1 Arsitektur Dasar Sistem IoT	16
2.2 Sensor, Aktuator, dan Mikrokontroler	19
2.3 Data sebagai Inti Sistem IoT	22
2.4 Alur Kerja Sistem IoT Lingkungan	23
2.5 Prinsip Desain Sistem yang Andal	25
2.6 Ilustrasi Penerapan: Sistem Suhu dan Kelembapan Ruang Kompos.....	27

2.7 Latihan Akhir Bab	28
BAB 3 Sensor Lingkungan dan Prinsip Pengukuran	31
3.2 Sensor Kualitas Udara	34
3.3 Sensor Kualitas Air	36
3.4 Sensor Tanah, Cuaca Mikro, dan Energi	39
3.5 Kalibrasi, Validasi, dan Penempatan Sensor	41
3.6 Studi Kasus: Mengapa Dua Sensor Udara Memberi Hasil Berbeda di Lokasi yang Sama	43
3.7 Latihan Akhir Bab	45
BAB 4 Konektivitas dan Komunikasi Data IoT	47
4.1 Mengapa Konektivitas Menentukan Keberhasilan Proyek	47
4.2 Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, dan Seluler	49
4.3 Protokol Komunikasi: HTTP, MQTT, dan CoAP	53
4.4 Gateway dan Integrasi Perangkat	56
4.5 Strategi Menghadapi Koneksi Tidak Stabil	58
4.6 Ilustrasi Penerapan: Memilih Konektivitas untuk Tiga Skenario	60
4.7 Latihan Akhir Bab	62
BAB 5 Platform, Cloud, Edge, dan Dashboard Lingkungan	64
5.1 Dari Data Mentah Menjadi Informasi	64
5.2 Platform IoT dan Penyimpanan Data	67
5.3 Edge Computing untuk Respons Cepat	70
5.4 Membuat Dashboard yang Mudah Dipahami	72
5.5 Notifikasi dan Sistem Peringatan Dini	75

5.6 Studi Kasus: Dashboard Kualitas Udara untuk Ruang Publik.....	77
5.7 Latihan Akhir Bab	79
BAB 6 Proyek 1: Sistem Pemantauan Kualitas Udara.....	81
6.1 Menentukan Masalah dan Lokasi Pemantauan	82
6.2 Memilih Sensor dan Perangkat.....	84
6.3 Merancang Alur Data dan Dashboard	86
6.4 Pengujian, Kalibrasi Awal, dan Validasi Sederhana	88
6.5 Membaca Data dan Menyusun Rekomendasi	90
6.6 Skema Rangkaian dan Implementasi Sederhana.....	93
6.7 Latihan Akhir Bab	95
BAB 7 Proyek 2: Pemantauan Kualitas Air dan Risiko Pencemaran	97
7.1 Menentukan Konteks Pemantauan Air	97
7.2 Parameter Kualitas Air yang Relevan.....	100
7.3 Desain Perangkat dan Tantangan Lapangan	103
7.4 Pengiriman Data, Ambang Batas, dan Notifikasi.....	105
7.5 Pelaporan Hasil Pemantauan	107
7.6 Studi Kasus: Pemantauan Kolam Ikan Berbasis Sensor pH dan Suhu	108
7.7 Latihan Akhir Bab	110
BAB 8 Proyek 3: Smart Farming dan Konservasi Sumber Daya	112
8.1 Pertanian Berbasis Data dalam Skala Sederhana	112
8.2 Sensor Tanah dan Cuaca Mikro.....	114
8.3 Irigasi Cerdas dan Aktuator	117

8.4 Optimasi Air dan Energi	120
8.5 Evaluasi Sistem Smart Farming	122
8.6 Studi Kasus: Irigasi Otomatis untuk Tanaman Cabai atau Sayuran Daun	124
8.7 Latihan Akhir Bab	126
BAB 9 Keamanan, Etika, Validitas Data, dan Keberlanjutan Sistem	128
9.1 Keamanan Perangkat dan Jaringan.....	128
9.2 Privasi dan Etika Data Lingkungan.....	131
9.3 Validitas, Bias, dan Kualitas Data	133
9.4 Perawatan Sistem dan Biaya Operasional	135
9.5 Kapan Sistem Perlu Dihentikan atau Didesain Ulang....	137
9.6 Refleksi Akhir Bab: Menilai Risiko Proyek IoT Sendiri.....	140
BAB 10 Merancang Roadmap Solusi IoT Lingkungan Berkelanjutan.....	143
10.2 Menyusun Indikator Keberhasilan	146
10.3 Dokumentasi Teknis dan Dokumentasi Pengguna	148
10.4 Replikasi, Skalabilitas, dan Kolaborasi	150
10.5 Masa Depan IoT untuk Lingkungan Berkelanjutan	152
10.7 Latihan Akhir Bab: Menyusun Roadmap Proyek Lengkap	157
DAFTAR PUSTAKA	161
INDEKS	167
BIODATA PENULIS	174

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Konsep dasar sistem IoT lingkungan	5
Gambar 1. 2 Alur berpikir proyek IoT lingkungan	10
Gambar 2. 1 Arsitektur dasar sistem IoT untuk aplikasi lingkungan	18
Gambar 2. 2 Alur kerja data pada sistem IoT lingkungan	24
Gambar 4. 1 Perbandingan pola komunikasi HTTP, MQTT, dan CoAP	54
Gambar 4. 2 Peran gateway dalam integrasi perangkat IoT lingkungan.....	57
Gambar 5. 1 Alur transformasi data mentah menjadi informasi lingkungan.....	65
Gambar 5. 2 Perbedaan alur cloud-only dan edge-assisted	71
Gambar 5. 3 Contoh struktur dashboard satu halaman	74
Gambar 6. 1 Alur data proyek pemantauan kualitas udara	87
Gambar 6. 2 Skema konseptual rangkaian sistem pemantauan kualitas udara	93
Gambar 8. 1 Logika dasar irigasi berbasis kelembapan tanah.....	118
Gambar 9. 1 Siklus hidup sistem IoT lingkungan.....	139
Gambar 10. 1 Peta jalan implementasi IoT lingkungan berkelanjutan	155

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Masalah lingkungan, parameter yang dapat dipantau, dan contoh penggunaan IoT.....	3
Tabel 1. 2 Perbedaan data, informasi, keputusan, dan tindakan dalam proyek IoT.....	7
Tabel 1. 3 Rancangan awal proyek pemantauan kualitas udara di sekolah	13
Tabel 1. 4 Template latihan identifikasi proyek IoT lingkungan	14
Tabel 2. 1 Komponen arsitektur IoT dan fungsinya dalam sistem lingkungan.....	18
Tabel 2. 2 Perbandingan umum perangkat pemroses untuk proyek IoT lingkungan.....	20
Tabel 2. 3 Unsur data yang perlu dicatat dalam sistem IoT lingkungan.....	22
Tabel 2. 4 Prinsip desain sistem IoT lingkungan yang andal.....	26
Tabel 2. 5 Contoh rancangan awal proyek pemantauan ruang kompos.....	28
Tabel 2. 6 Template rancangan arsitektur IoT lingkungan.....	29
Tabel 3. 1 Faktor yang memengaruhi hasil pembacaan sensor lingkungan.....	33
Tabel 3. 2 Parameter kualitas udara dan catatan penggunaannya dalam proyek IoT	35
Tabel 3. 3 Parameter kualitas air, fungsi, dan catatan kehati-hatian	37
Tabel 3. 4 Sensor tanah, cuaca mikro, dan energi dalam aplikasi lingkungan.....	40
Tabel 3. 5 Checklist kalibrasi, validasi, dan penempatan sensor	42
Tabel 3. 6 Analisis penyebab perbedaan dua sensor udara	44
Tabel 3. 7 Template kriteria pemilihan sensor untuk proyek IoT lingkungan.....	45

Tabel 4. 1 Hubungan kebutuhan proyek dengan pilihan konektivitas	49
Tabel 4. 2 Perbandingan umum Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, dan seluler untuk proyek IoT lingkungan	51
Tabel 4. 3 Perbandingan HTTP, MQTT, dan CoAP dalam proyek IoT	55
Tabel 4. 4 Contoh struktur data sederhana untuk pengiriman data sensor	57
Tabel 4. 5 Strategi menghadapi koneksi tidak stabil.....	59
Tabel 4. 6 Latihan pemilihan konektivitas untuk tiga skenario	61
Tabel 4. 7 Template pemilihan konektivitas proyek IoT lingkungan	62
Tabel 5. 1 Unsur konteks yang perlu ditambahkan pada data sensor	66
Tabel 5. 2 Perbandingan kategori platform IoT	68
Tabel 5. 3 Perbandingan cloud, server lokal, dan edge computing.....	71
Tabel 5. 4 Elemen dashboard lingkungan dan fungsinya.....	73
Tabel 5. 5 Contoh logika notifikasi dalam proyek IoT lingkungan	76
Tabel 5. 6 Rancangan dashboard kualitas udara ruang publik.....	78
Tabel 5. 7 Template rancangan dashboard satu halaman	79
Tabel 6. 1 Contoh perumusan masalah proyek pemantauan kualitas udara.....	83
Tabel 6. 2 Contoh daftar komponen proyek pemantauan kualitas udara mini	85
Tabel 6. 3 Contoh struktur data untuk proyek kualitas udara	88
Tabel 6. 4 Checklist pengujian awal sistem pemantauan kualitas udara.....	90
Tabel 6. 5 Contoh pembacaan data dan rekomendasi praktis	91
Tabel 6. 6 Struktur laporan sederhana proyek kualitas udara	92

Tabel 6. 7 Estimasi komponen dan catatan teknis proyek kualitas udara mini	94
Tabel 6. 8 Template rancangan proyek pemantauan kualitas udara mini	95
Tabel 7. 1 Konteks pemantauan air dan tujuan penggunaan data	99
Tabel 7. 2 Parameter kualitas air, satuan, fungsi pengamatan, sensor potensial, dan catatan validasi.....	101
Tabel 7. 3 Tantangan lapangan dalam proyek IoT kualitas air dan strategi mitigasi	104
Tabel 7. 4 Contoh logika notifikasi kualitas air	106
Tabel 7. 5 Struktur laporan sederhana pemantauan kualitas air.....	107
Tabel 7. 6 Rancangan proyek pemantauan kolam ikan berbasis pH dan suhu	109
Tabel 7. 7 Template rancangan laporan pemantauan kualitas air..	110
Tabel 8. 1 Contoh pertanyaan pertanian yang dapat dibantu dengan data IoT	114
Tabel 8. 2 Sensor tanah dan cuaca mikro untuk smart farming	116
Tabel 8. 3 Kebutuhan data, perangkat, keputusan otomatis, dan risiko kegagalan	119
Tabel 8. 4 Indikator optimasi air dan energi dalam sistem smart farming.....	121
Tabel 8. 5 Indikator evaluasi sistem smart farming	123
Tabel 8. 6 Rancangan studi kasus irigasi otomatis tanaman cabai atau sayuran daun.....	125
Tabel 8. 7 Template rancangan logika kontrol irigasi	126
Tabel 9. 1 Risiko keamanan dasar dan tindakan mitigasi	130
Tabel 9. 2 Pertimbangan etis dalam publikasi data lingkungan	132
Tabel 9. 3 Sumber kesalahan data dan cara mengendalikannya	134
Tabel 9. 4 Komponen biaya operasional sistem IoT lingkungan	136

Tabel 9. 5 Indikator sistem perlu dihentikan atau didesain ulang.....	139
Tabel 9. 6 Matriks risiko teknis, sosial, operasional, dan etis.....	140
Tabel 10. 1 Struktur proposal singkat proyek IoT lingkungan	144
Tabel 10. 2 Contoh indikator keberhasilan proyek IoT lingkungan	147
Tabel 10. 3 Perbedaan dokumentasi teknis dan dokumentasi pengguna	149
Tabel 10. 4 Tantangan replikasi dan skalabilitas proyek IoT lingkungan.....	151
Tabel 10. 5 Arah perkembangan IoT lingkungan dan catatan kehati-hatian.....	153
Tabel 10. 6 Template roadmap proyek IoT lingkungan	155
Tabel 10. 7 Template rancangan akhir proyek IoT lingkungan.....	158

Glosarium

Aktuator

Perangkat yang berfungsi mengubah sinyal digital atau listrik menjadi aksi fisik. Dalam sistem IoT lingkungan, aktuator dapat digunakan untuk membuka katup air, menyalakan pompa, mengaktifkan kipas, atau mengatur sistem irigasi berdasarkan data sensor.

Analisis Data Lingkungan

Proses mengolah, menafsirkan, dan mengevaluasi data yang berasal dari parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, kualitas udara, kualitas air, curah hujan, dan intensitas cahaya. Analisis ini digunakan untuk memahami kondisi lingkungan, mendeteksi perubahan, serta mendukung pengambilan keputusan.

Application Programming Interface (API)

Antarmuka yang memungkinkan dua sistem perangkat lunak saling berkomunikasi. Dalam IoT, API digunakan untuk menghubungkan perangkat, server, dashboard, aplikasi seluler, dan layanan analitik data.

Artificial Intelligence (AI)

Teknologi kecerdasan buatan yang memungkinkan sistem melakukan analisis, klasifikasi, prediksi, atau pengambilan keputusan secara otomatis. Dalam konteks lingkungan, AI dapat digunakan untuk memprediksi pencemaran udara, mendeteksi anomali kualitas air, atau mengoptimalkan penggunaan energi.

Bandwidth

Kapasitas maksimum suatu jaringan dalam mengirimkan data dalam periode tertentu. Sistem IoT lingkungan umumnya membutuhkan bandwidth yang relatif kecil karena data sensor biasanya berukuran kecil, tetapi pengiriman data secara terus-menerus tetap memerlukan pengelolaan jaringan yang efisien.

Big Data

Kumpulan data dalam jumlah besar, beragam, dan terus bertambah cepat. Dalam IoT lingkungan, big data dapat berasal dari ribuan sensor yang memantau kualitas udara, kualitas air, cuaca, lalu lintas, energi, atau kondisi ekosistem secara real-time.

Biosensor

Sensor yang menggunakan komponen biologis untuk mendeteksi zat tertentu. Dalam pemantauan lingkungan, biosensor dapat digunakan untuk mendeteksi kontaminan, toksin, mikroorganisme, atau perubahan kualitas air dan tanah.

Bluetooth Low Energy (BLE)

Teknologi komunikasi nirkabel jarak pendek dengan konsumsi daya rendah. BLE dapat digunakan pada perangkat IoT kecil yang membutuhkan efisiensi energi, seperti sensor portabel atau perangkat pemantauan iklim.

Cloud Computing

Layanan komputasi berbasis internet yang menyediakan penyimpanan, pemrosesan, dan analisis data. Dalam IoT lingkungan, cloud digunakan untuk menyimpan data sensor, menjalankan algoritma analitik, dan menyediakan akses dashboard secara daring.

Cloud Storage

Media penyimpanan data berbasis cloud yang memungkinkan data sensor disimpan dan diakses melalui internet. Cloud storage mendukung pengarsipan data lingkungan dalam jangka panjang untuk analisis tren dan evaluasi kebijakan.

CO₂ Sensor

Sensor yang digunakan untuk mengukur konsentrasi karbon dioksida di udara. Sensor ini penting dalam pemantauan kualitas udara dalam ruangan, emisi, rumah kaca, dan sistem pertanian cerdas.

Cyber-Physical System (CPS)

Sistem yang mengintegrasikan komponen fisik, sensor, jaringan, dan sistem komputasi. IoT lingkungan merupakan bagian dari CPS karena menghubungkan fenomena fisik lingkungan dengan sistem digital untuk pemantauan dan pengendalian.

Dashboard IoT

Antarmuka visual yang menampilkan data dari perangkat IoT. Dashboard biasanya menyajikan grafik, peta, indikator, status perangkat, peringatan, dan laporan kondisi lingkungan secara real-time atau periodik.

Data Logger

Perangkat atau sistem yang digunakan untuk merekam data dari sensor dalam interval waktu tertentu. Data logger banyak digunakan dalam pemantauan suhu, kelembapan, kualitas air, kualitas tanah, atau kondisi cuaca.

Data Real-Time

Data yang dikumpulkan dan ditampilkan hampir secara langsung setelah peristiwa terjadi. Dalam pemantauan lingkungan, data real-time penting untuk mendeteksi kondisi kritis seperti banjir, pencemaran udara, kebocoran gas, atau perubahan kualitas air secara cepat.

Data Sensor

Informasi yang dihasilkan oleh sensor setelah mendeteksi atau mengukur parameter tertentu. Contohnya adalah nilai suhu, kelembapan, pH air, kadar oksigen terlarut, intensitas cahaya, konsentrasi gas, atau tingkat kebisingan.

Data Stream

Aliran data yang dikirim secara terus-menerus dari sensor ke sistem penyimpanan atau analisis. Data stream digunakan dalam sistem IoT yang membutuhkan pemantauan kontinu terhadap kondisi lingkungan.

Data Visualization

Proses menyajikan data dalam bentuk visual seperti grafik, peta, diagram, indikator warna, atau tabel interaktif. Visualisasi data membantu pengguna memahami pola, tren, dan perubahan kondisi lingkungan.

Deep Learning

Cabang machine learning yang menggunakan jaringan saraf tiruan berlapis untuk mengenali pola kompleks. Dalam lingkungan, deep learning dapat digunakan untuk menganalisis citra satelit, mendeteksi deforestasi, mengidentifikasi polusi, atau memprediksi bencana.

Device Management

Proses mengelola perangkat IoT, termasuk registrasi, konfigurasi, pembaruan perangkat lunak, pemantauan status, dan pemeliharaan. Device management penting agar perangkat sensor dapat bekerja stabil dalam jangka panjang.

Dissolved Oxygen (DO)

Jumlah oksigen terlarut dalam air. Parameter ini penting untuk menilai kualitas air dan kesehatan ekosistem perairan. Kadar DO yang rendah dapat menunjukkan pencemaran atau kondisi yang tidak mendukung kehidupan organisme air.

Edge Computing

Proses pemrosesan data yang dilakukan dekat dengan sumber data, misalnya pada perangkat sensor, gateway, atau komputer lokal. Edge computing mengurangi ketergantungan pada cloud, mempercepat respons, dan menghemat bandwidth.

Efisiensi Energi

Upaya mengurangi konsumsi energi tanpa menurunkan fungsi utama sistem. Dalam IoT lingkungan, efisiensi energi penting karena banyak perangkat sensor bekerja menggunakan baterai atau energi terbarukan.

Embedded System

Sistem komputer kecil yang tertanam dalam perangkat tertentu untuk menjalankan fungsi khusus. Contohnya adalah mikrokontroler pada node sensor lingkungan yang mengumpulkan dan mengirimkan data.

Environmental Monitoring

Kegiatan pemantauan kondisi lingkungan secara sistematis menggunakan sensor, perangkat ukur, atau teknologi digital. Parameter yang dipantau dapat mencakup udara, air, tanah, cuaca, kebisingan, energi, dan keanekaragaman hayati.

Firmware

Perangkat lunak tingkat rendah yang tertanam pada perangkat keras IoT. Firmware mengatur cara sensor, mikrokontroler, modul komunikasi, dan perangkat lain bekerja.

Fog Computing

Model komputasi yang berada di antara edge computing dan cloud computing. Fog computing memungkinkan sebagian pemrosesan data dilakukan pada gateway atau server lokal sebelum data dikirim ke cloud.

Gateway IoT

Perangkat penghubung antara sensor atau node IoT dengan jaringan internet atau cloud. Gateway dapat melakukan pengumpulan data, konversi protokol, pemrosesan awal, dan pengiriman data ke server.

Geographic Information System (GIS)

Sistem informasi geografis yang digunakan untuk mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data berbasis lokasi. Dalam IoT lingkungan, GIS digunakan untuk memetakan kualitas udara, sebaran polusi, titik banjir, tutupan lahan, atau kondisi ekosistem.

Global Positioning System (GPS)

Sistem navigasi berbasis satelit yang digunakan untuk menentukan posisi geografis. GPS berguna dalam perangkat IoT lingkungan

bergerak, seperti sensor kualitas udara portabel, pelacak satwa, atau pemantauan kendaraan pengangkut limbah.

Green IoT

Konsep pengembangan dan penggunaan IoT yang memperhatikan efisiensi energi, pengurangan emisi, penghematan sumber daya, dan dampak lingkungan. Green IoT bertujuan menjadikan teknologi IoT tidak hanya bermanfaat bagi lingkungan, tetapi juga ramah lingkungan dalam operasionalnya.

Internet of Things (IoT)

Konsep jaringan perangkat fisik yang dilengkapi sensor, perangkat lunak, dan konektivitas internet sehingga mampu mengumpulkan, mengirimkan, dan bertukar data. Dalam konteks lingkungan, IoT digunakan untuk memantau, menganalisis, dan mendukung pengelolaan sumber daya alam serta kualitas lingkungan.

Interoperabilitas

Kemampuan berbagai perangkat, platform, protokol, dan sistem untuk saling terhubung dan bekerja bersama. Interoperabilitas penting karena sistem IoT lingkungan sering menggunakan berbagai jenis sensor, jaringan, dan aplikasi.

Kalibrasi Sensor

Proses menyesuaikan hasil pengukuran sensor agar sesuai dengan standar atau alat ukur acuan. Kalibrasi diperlukan untuk menjaga akurasi data lingkungan, terutama pada sensor kualitas air, kualitas udara, suhu, kelembapan, dan gas.

Kelembapan

Jumlah kandungan uap air di udara atau tanah. Dalam sistem IoT lingkungan, kelembapan udara dan kelembapan tanah sering dipantau untuk pertanian cerdas, iklim mikro, konservasi tanaman, serta analisis cuaca.

Kendali Otomatis

Proses pengendalian sistem secara otomatis berdasarkan data atau aturan tertentu. Contohnya adalah sistem irigasi yang menyala ketika kelembapan tanah berada di bawah ambang batas tertentu.

Kualitas Air

Kondisi air berdasarkan parameter fisik, kimia, dan biologis. Parameter umum kualitas air meliputi pH, suhu, kekeruhan, oksigen terlarut, konduktivitas, salinitas, dan keberadaan zat pencemar.

Kualitas Udara

Tingkat kebersihan atau pencemaran udara berdasarkan konsentrasi polutan. Parameter yang umum diukur antara lain PM2.5, PM10, CO₂, CO, NO₂, SO₂, O₃, suhu, dan kelembapan.

Latency

Waktu tunda antara pengiriman data dari perangkat IoT hingga data diterima atau diproses oleh sistem tujuan. Latency rendah diperlukan untuk sistem peringatan dini seperti deteksi banjir, kebakaran hutan, atau pencemaran berbahaya.

LoRa

Teknologi komunikasi nirkabel jarak jauh dengan konsumsi daya rendah. LoRa banyak digunakan dalam IoT lingkungan karena cocok untuk pengiriman data sensor dalam area luas seperti pertanian, hutan, sungai, dan kawasan pesisir.

LoRaWAN

Protokol jaringan berbasis LoRa yang memungkinkan perangkat IoT berkomunikasi dengan gateway dan server jaringan. LoRaWAN cocok untuk aplikasi pemantauan lingkungan berskala luas dengan kebutuhan daya rendah.

Machine Learning

Metode kecerdasan buatan yang memungkinkan sistem belajar dari data untuk melakukan prediksi, klasifikasi, atau deteksi pola. Dalam IoT lingkungan, machine learning dapat digunakan untuk

memprediksi kualitas udara, mendeteksi anomali kualitas air, atau menganalisis risiko banjir.

Mikrokontroler

Komponen komputasi kecil yang digunakan untuk mengendalikan sensor, aktuator, dan komunikasi data. Contoh mikrokontroler yang sering digunakan dalam IoT adalah Arduino, ESP8266, ESP32, dan STM32.

Monitoring Berkelanjutan

Pemantauan yang dilakukan secara terus-menerus atau periodik dalam jangka panjang. Monitoring berkelanjutan penting untuk memahami perubahan lingkungan, mengidentifikasi tren, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data.

MQTT

Protokol komunikasi ringan yang banyak digunakan dalam sistem IoT. MQTT bekerja dengan model publish-subscribe, sehingga cocok untuk pengiriman data sensor secara efisien melalui jaringan dengan bandwidth terbatas.

Node Sensor

Unit perangkat IoT yang terdiri atas sensor, mikrokontroler, sumber daya, dan modul komunikasi. Node sensor bertugas mengukur parameter lingkungan dan mengirimkan data ke gateway atau server.

Open Data

Data yang tersedia untuk digunakan, dibagikan, dan dianalisis oleh publik. Dalam konteks lingkungan, open data dapat mendukung transparansi, penelitian, partisipasi masyarakat, dan kebijakan berbasis bukti.

Otomatisasi

Penggunaan sistem teknologi untuk menjalankan proses tanpa intervensi manusia secara langsung. Dalam IoT lingkungan, otomatisasi dapat diterapkan pada irigasi, ventilasi, pemantauan kualitas air, pengelolaan energi, atau peringatan dini.

pH Sensor

Sensor yang digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan suatu larutan. Dalam pemantauan lingkungan, pH sensor digunakan untuk menilai kualitas air sungai, danau, limbah cair, akuakultur, atau media tanam hidroponik.

Platform IoT

Sistem perangkat lunak yang menyediakan layanan untuk menghubungkan perangkat, mengelola data, menampilkan dashboard, menjalankan analitik, dan mengintegrasikan aplikasi. Platform IoT dapat berbasis cloud, lokal, atau hibrida.

PM2.5

Partikel udara berukuran sangat kecil dengan diameter 2,5 mikrometer atau lebih kecil. PM2.5 berbahaya bagi kesehatan karena dapat masuk ke saluran pernapasan bagian dalam. Sensor PM2.5 digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara.

PM10

Partikel udara dengan diameter 10 mikrometer atau lebih kecil. PM10 dapat berasal dari debu jalan, aktivitas industri, konstruksi, pembakaran, atau sumber alam. Parameter ini umum digunakan dalam penilaian kualitas udara.

Predictive Analytics

Analisis data yang bertujuan memprediksi kejadian atau kondisi di masa depan berdasarkan data historis dan model statistik atau machine learning. Dalam IoT lingkungan, predictive analytics dapat digunakan untuk memprediksi banjir, polusi udara, kebutuhan irigasi, atau konsumsi energi.

Protokol Komunikasi

Aturan atau standar yang mengatur pertukaran data antarperangkat. Dalam IoT, protokol komunikasi mencakup MQTT, HTTP, CoAP, Zigbee, Bluetooth, LoRaWAN, dan NB-IoT.

Real-Time Monitoring

Pemantauan kondisi secara langsung atau hampir langsung berdasarkan data sensor. Real-time monitoring penting dalam sistem peringatan dini dan pengawasan kondisi lingkungan yang cepat berubah.

Remote Sensing

Teknologi penginderaan jauh yang memperoleh informasi tentang objek atau wilayah tanpa kontak langsung, biasanya melalui satelit, pesawat, atau drone. Remote sensing dapat dikombinasikan dengan IoT untuk analisis lingkungan berskala luas.

Renewable Energy

Energi terbarukan yang berasal dari sumber alami yang dapat diperbarui, seperti matahari, angin, air, biomassa, dan panas bumi. Dalam IoT lingkungan, energi terbarukan dapat digunakan sebagai sumber daya untuk perangkat sensor di lokasi terpencil.

Resiliensi Lingkungan

Kemampuan sistem lingkungan untuk bertahan, beradaptasi, dan pulih dari gangguan seperti polusi, perubahan iklim, bencana alam, atau aktivitas manusia. IoT dapat mendukung resiliensi lingkungan melalui pemantauan dan sistem peringatan dini.

Sensor

Perangkat yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur parameter fisik, kimia, atau biologis. Dalam IoT lingkungan, sensor dapat mengukur suhu, kelembapan, gas, cahaya, tekanan, kualitas air, kualitas tanah, kebisingan, dan polutan.

Sensor Cahaya

Sensor yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya. Sensor ini dapat digunakan dalam pemantauan iklim mikro, pertanian cerdas, konservasi energi, dan sistem pencahayaan otomatis.

Sensor Gas

Sensor yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas tertentu di udara. Contohnya adalah sensor CO₂, CO, CH₄, NO₂, SO₂, dan O₃. Sensor gas penting dalam pemantauan kualitas udara dan deteksi pencemaran.

Sensor Kekerusuhan

Sensor yang digunakan untuk mengukur tingkat kejernihan air berdasarkan jumlah partikel tersuspensi. Sensor ini digunakan dalam pemantauan kualitas air sungai, danau, waduk, limbah cair, dan akuakultur.

Sensor Kelembapan Tanah

Sensor yang digunakan untuk mengukur kadar air dalam tanah. Sensor ini penting dalam pertanian cerdas, konservasi air, irigasi otomatis, dan pemantauan kondisi lahan.

Sensor Suhu

Sensor yang digunakan untuk mengukur temperatur udara, air, tanah, atau permukaan. Sensor suhu digunakan dalam pemantauan cuaca, pertanian, kualitas air, ekosistem, dan sistem energi.

Smart Agriculture

Penerapan teknologi digital, sensor, IoT, dan analitik data dalam bidang pertanian. Tujuannya adalah meningkatkan produktivitas, efisiensi penggunaan air dan pupuk, serta mengurangi dampak lingkungan.

Smart City

Konsep kota yang menggunakan teknologi digital dan data untuk meningkatkan kualitas layanan, efisiensi sumber daya, keberlanjutan, dan kualitas hidup masyarakat. IoT lingkungan dalam smart city digunakan untuk memantau udara, kebisingan, energi, air, sampah, dan lalu lintas.

Smart Environment

Konsep lingkungan cerdas yang memanfaatkan sensor, IoT, data, dan sistem analitik untuk memantau serta mengelola kondisi lingkungan secara lebih efektif. Smart environment mencakup kualitas udara, air, tanah, energi, limbah, cuaca, dan ekosistem.

Smart Grid

Sistem jaringan listrik cerdas yang menggunakan teknologi digital untuk memantau, mengatur, dan mengoptimalkan distribusi energi. Dalam perspektif lingkungan, smart grid mendukung efisiensi energi dan integrasi energi terbarukan.

Smart Irrigation

Sistem irigasi cerdas yang menggunakan data sensor, seperti kelembapan tanah, suhu, cuaca, dan kebutuhan tanaman, untuk mengatur penyiraman secara otomatis atau berbasis rekomendasi.

Smart Waste Management

Sistem pengelolaan sampah berbasis teknologi IoT. Contohnya adalah tempat sampah pintar yang dapat memantau volume sampah dan mengirimkan data untuk mengoptimalkan rute pengangkutan.

Sumber Daya Alam

Segala unsur alam yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan manusia, seperti air, tanah, udara, mineral, hutan, dan energi. IoT dapat membantu pemantauan dan pengelolaan sumber daya alam secara lebih efisien.

Sustainability

Prinsip keberlanjutan yang menekankan pemenuhan kebutuhan saat ini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya. Dalam IoT lingkungan, sustainability berkaitan dengan efisiensi sumber daya, pengurangan emisi, konservasi, dan pengelolaan lingkungan berbasis data.

Teknologi Nirkabel

Teknologi komunikasi tanpa kabel yang digunakan untuk mengirimkan data antarperangkat. Dalam IoT, teknologi nirkabel mencakup Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRa, NB-IoT, dan jaringan seluler.

Telemetry

Proses pengukuran dan pengiriman data dari lokasi jauh ke sistem pusat. Dalam IoT lingkungan, telemetry digunakan untuk mengirimkan data dari sensor di sungai, hutan, pertanian, tambang, atau wilayah terpencil.

ThingsBoard

Salah satu platform IoT open-source yang digunakan untuk manajemen perangkat, pengumpulan data, visualisasi, dan dashboard. Platform ini dapat digunakan untuk proyek pemantauan lingkungan berbasis IoT.

Threshold

Nilai ambang batas yang digunakan untuk menentukan apakah suatu kondisi masih normal atau sudah memerlukan perhatian. Contohnya adalah ambang batas PM2.5, pH air, suhu, atau kelembapan tanah.

Time-Series Data

Data yang dikumpulkan berdasarkan urutan waktu. Data lingkungan dari sensor umumnya berbentuk time-series karena dicatat secara periodik, misalnya setiap detik, menit, jam, atau hari.

Turbidity

Tingkat kekeruhan air yang disebabkan oleh partikel tersuspensi. Turbidity menjadi indikator penting dalam penilaian kualitas air, terutama untuk sungai, danau, waduk, air limbah, dan sistem akuakultur.

Urban Heat Island

Fenomena peningkatan suhu di wilayah perkotaan dibandingkan daerah sekitarnya akibat kepadatan bangunan, permukaan beton,

aktivitas manusia, dan rendahnya vegetasi. IoT dapat digunakan untuk memantau suhu mikro di berbagai titik kota.

Water Quality Monitoring

Pemantauan kualitas air menggunakan sensor dan sistem pengukuran tertentu. Parameter yang umum dipantau meliputi suhu, pH, oksigen terlarut, kekeruhan, konduktivitas, salinitas, dan bahan pencemar.

Wi-Fi

Teknologi komunikasi nirkabel yang memungkinkan perangkat terhubung ke jaringan lokal dan internet. Dalam IoT lingkungan, Wi-Fi cocok untuk area dengan infrastruktur jaringan stabil, tetapi konsumsi dayanya relatif lebih tinggi dibandingkan LoRa atau BLE.

Wireless Sensor Network (WSN)

Jaringan sensor nirkabel yang terdiri atas sejumlah node sensor untuk mengumpulkan dan mengirimkan data. WSN merupakan fondasi penting bagi sistem IoT lingkungan, terutama dalam pemantauan area luas.

Zigbee

Teknologi komunikasi nirkabel jarak pendek dengan konsumsi daya rendah yang digunakan untuk jaringan sensor. Zigbee cocok untuk aplikasi IoT yang membutuhkan komunikasi antarperangkat dalam area terbatas.

Istilah Lingkungan

Adaptasi Perubahan Iklim

Upaya menyesuaikan sistem sosial, ekonomi, dan lingkungan terhadap dampak perubahan iklim. IoT dapat mendukung adaptasi melalui pemantauan cuaca, banjir, kekeringan, suhu, dan perubahan ekosistem.

Banjir

Peristiwa meluapnya air ke wilayah yang biasanya kering. Sistem IoT dapat digunakan untuk memantau tinggi muka air, curah hujan, kelembapan tanah, dan memberikan peringatan dini banjir.

Bencana Lingkungan

Peristiwa yang menyebabkan kerusakan lingkungan, seperti banjir, tanah longsor, kebakaran hutan, pencemaran air, pencemaran udara, dan tumpahan limbah. IoT dapat mendukung mitigasi melalui pemantauan real-time.

Emisi Karbon

Pelepasan karbon dioksida dan gas rumah kaca lain ke atmosfer. IoT dapat digunakan untuk memantau konsumsi energi, aktivitas industri, transportasi, dan sistem energi guna membantu pengurangan emisi.

Kebakaran Hutan

Peristiwa terbakar atau meluasnya api di kawasan hutan atau lahan. Sensor suhu, kelembapan, gas, asap, dan citra udara dapat digunakan dalam sistem deteksi dini kebakaran hutan.

Konservasi Lingkungan

Upaya melindungi, memelihara, dan memulihkan lingkungan serta sumber daya alam. IoT dapat membantu konservasi melalui pemantauan habitat, kualitas air, kualitas tanah, satwa liar, dan perubahan tutupan lahan.

Limbah

Sisa hasil aktivitas manusia, industri, pertanian, atau rumah tangga yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. IoT dapat digunakan untuk memantau volume, lokasi, komposisi, dan pengangkutan limbah.

Mitigasi Perubahan Iklim

Upaya mengurangi penyebab perubahan iklim, terutama emisi gas rumah kaca. IoT dapat mendukung mitigasi melalui efisiensi energi, smart grid, pengurangan emisi, dan pengelolaan sumber daya.

Pencemaran Air

Masuknya zat, energi, atau komponen lain ke dalam air sehingga kualitasnya menurun. IoT dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan pH, kekeruhan, suhu, oksigen terlarut, dan parameter pencemar lain.

Pencemaran Tanah

Penurunan kualitas tanah akibat masuknya bahan pencemar seperti logam berat, pestisida, limbah industri, atau sampah. Sensor dan analisis data dapat membantu mendeteksi perubahan kondisi tanah.

Pencemaran Udara

Masuknya zat pencemar ke atmosfer yang dapat membahayakan kesehatan manusia, ekosistem, dan iklim. Sistem IoT dapat memantau polutan seperti PM2.5, PM10, CO, CO₂, NO₂, SO₂, dan O₃.

Pengelolaan Sampah

Proses pengumpulan, pemilahan, pengangkutan, pengolahan, dan pembuangan sampah. IoT dapat digunakan untuk memantau kapasitas tempat sampah, mengoptimalkan rute pengangkutan, dan meningkatkan efisiensi layanan.

Perubahan Iklim

Perubahan jangka panjang pada pola suhu, curah hujan, dan kondisi iklim global atau regional. IoT dapat membantu menyediakan data lingkungan yang mendukung analisis risiko, adaptasi, dan mitigasi.

Polutan

Zat atau energi yang menyebabkan pencemaran lingkungan. Polutan dapat berupa partikel, gas, bahan kimia, logam berat, limbah biologis, suara, panas, atau radiasi.

Sistem Peringatan Dini

Sistem yang dirancang untuk mendeteksi potensi bahaya dan memberikan informasi peringatan sebelum dampak besar terjadi. Dalam IoT lingkungan, sistem ini dapat digunakan untuk banjir, kebakaran hutan, pencemaran udara, pencemaran air, atau tanah longsor.

BAB 1

IoT dan Tantangan Lingkungan Berkelanjutan

Lingkungan yang sehat tidak dapat dikelola hanya dengan niat baik. Ia membutuhkan data yang cukup, pengamatan yang konsisten, serta kemampuan untuk membaca perubahan sebelum masalah berkembang menjadi krisis. Dalam kehidupan sehari-hari, banyak persoalan lingkungan muncul secara perlahan. Udara menjadi semakin tidak nyaman, air berubah warna atau bau, tanah kehilangan kelembapan, penggunaan energi meningkat tanpa disadari, atau tumpukan sampah bertambah sebelum ada tindakan yang memadai. Masalahnya, perubahan semacam ini sering tidak terlihat secara langsung sampai dampaknya dirasakan oleh manusia, tanaman, hewan, atau infrastruktur.

Internet of Things, atau IoT, hadir sebagai salah satu pendekatan teknologi yang dapat membantu menjembatani kesenjangan antara kondisi lingkungan nyata dan informasi yang dibutuhkan untuk mengambil keputusan. Secara sederhana, IoT memungkinkan benda-benda fisik seperti sensor, perangkat kendali, dan sistem pemantauan saling terhubung untuk mengukur, mengirim, menyimpan, dan menampilkan data. Dalam konteks lingkungan berkelanjutan, IoT dapat digunakan untuk memantau kualitas udara, kualitas air, kelembapan tanah, suhu, kebisingan, curah hujan, konsumsi energi, hingga kondisi tempat pembuangan sampah.

Namun, buku ini tidak memposisikan IoT sebagai solusi tunggal untuk seluruh persoalan lingkungan. IoT adalah alat bantu. Nilainya bergantung pada bagaimana sistem dirancang, bagaimana data dikumpulkan, bagaimana sensor dikalibrasi, bagaimana pengguna membaca dashboard, dan bagaimana hasil pemantauan diterjemahkan menjadi tindakan. Tanpa desain yang baik, IoT hanya akan menghasilkan angka-angka yang terlihat modern tetapi tidak benar-benar membantu.

Bab ini menjadi pintu masuk untuk memahami hubungan antara IoT, data lingkungan, dan keberlanjutan. Pembahasan dimulai dari alasan mengapa data lingkungan penting, dilanjutkan dengan pengenalan IoT dalam bahasa sederhana, lalu diarahkan pada cara berpikir berbasis proyek yang akan digunakan sepanjang buku.

1.1 Mengapa Lingkungan Membutuhkan Data yang Lebih Baik

Lingkungan adalah sistem yang dinamis. Kondisi udara, air, tanah, suhu, kelembapan, cahaya, dan energi tidak selalu tetap. Ia berubah karena cuaca, aktivitas manusia, pertumbuhan penduduk, kegiatan industri, transportasi, pertanian, penggunaan lahan, serta perubahan iklim. Karena itu, pengelolaan lingkungan membutuhkan informasi yang tidak hanya bersifat umum, tetapi juga kontekstual, terukur, dan diperbarui secara berkala.

Dalam kerangka pembangunan berkelanjutan, data memiliki peran penting untuk memantau kemajuan, menyusun kebijakan, dan memastikan akuntabilitas. Situs resmi indikator Sustainable Development Goals atau SDGs menegaskan bahwa mekanisme tindak lanjut dan peninjauan Agenda 2030 membutuhkan kerangka indikator dan data statistik yang kuat untuk memantau kemajuan, menginformasikan kebijakan, dan memastikan akuntabilitas berbagai pihak [1]. UNEP juga menempatkan pemantauan indikator lingkungan sebagai bagian dari pelacakan capaian SDGs, termasuk indikator-indikator yang berada di bawah kustodi metodologinya [2]. Artinya, keberlanjutan tidak cukup dibicarakan dalam bentuk slogan. Ia perlu diukur.

Pada tingkat lokal, kebutuhan data sering lebih praktis. Sebuah sekolah mungkin ingin mengetahui apakah ruang kelas memiliki kualitas udara yang baik. Kelompok tani mungkin ingin memahami kapan tanaman benar-benar membutuhkan air. Pengelola kolam ikan mungkin perlu memantau perubahan pH dan suhu air. Pemerintah desa mungkin ingin mengetahui titik mana yang sering mengalami genangan atau penumpukan sampah. Semua contoh tersebut membutuhkan data yang dekat dengan lokasi masalah.

Pendekatan manual tetap penting, tetapi sering memiliki keterbatasan. Pengamatan manual membutuhkan waktu, tenaga, dan

kedisiplinan pencatatan. Dalam banyak kasus, perubahan lingkungan terjadi di luar jam pengamatan. Misalnya, kualitas udara dapat memburuk pada jam tertentu karena lalu lintas, pembakaran terbuka, atau aktivitas industri. Kelembapan tanah dapat turun cepat pada hari panas. Kualitas air dapat berubah setelah hujan deras membawa limpasan dari permukaan tanah. Jika pengukuran hanya dilakukan sesekali, pola semacam itu mudah terlewat.

Di sinilah IoT menjadi relevan. Sistem IoT dapat membaca data secara berkala, memberi tanda waktu pada setiap data, mengirim data ke platform, lalu menampilkan pola dalam bentuk grafik atau indikator. Data yang sebelumnya sulit diamati dapat menjadi lebih terlihat. Meski demikian, data IoT tetap perlu diperlakukan secara kritis. Sensor murah tidak selalu akurat. Sensor yang mahal pun dapat salah jika pemasangan dan kalibrasinya buruk. Karena itu, tujuan utama IoT bukan sekadar memperbanyak data, melainkan menghasilkan data yang cukup andal untuk membantu pengambilan keputusan.

Tabel 1. 1 Masalah lingkungan, parameter yang dapat dipantau, dan contoh penggunaan IoT

Masalah lingkungan	Parameter yang dapat dipantau	Contoh perangkat atau sistem	Manfaat praktis
Kualitas udara ruang atau kawasan	Partikulat, gas tertentu, suhu, kelembapan	Node sensor udara dan dashboard pemantauan	Membantu mengenali pola kualitas udara dan waktu risiko meningkat
Kualitas air kolam atau sungai kecil	pH, suhu, kekeruhan, TDS, konduktivitas	Sensor air berbasis mikrokontroler	Membantu mendeteksi perubahan awal kondisi air
Kekeringan tanah pertanian	Kelembapan tanah, suhu tanah, cuaca	Sensor tanah dan sistem irigasi otomatis	Membantu pengambilan keputusan

	mikro		penyiraman
Konsumsi energi bangunan	Arus, tegangan, daya, durasi penggunaan	Smart meter dan dashboard energi	Membantu memahami pola konsumsi dan peluang efisiensi
Pengelolaan sampah	Volume tempat sampah, lokasi, frekuensi pengangkutan	Sensor ultrasonik dan sistem pelaporan	Membantu perencanaan pengangkutan sampah

1.2 Internet of Things dalam Bahasa Sederhana

Internet of Things dapat dipahami sebagai jaringan benda fisik yang dilengkapi sensor, perangkat pemroses, perangkat komunikasi, dan perangkat lunak sehingga mampu mengumpulkan dan bertukar data. Dalam literatur awal, IoT dijelaskan sebagai hasil integrasi berbagai teknologi identifikasi, sensor, komunikasi, dan komputasi yang memungkinkan objek fisik menjadi bagian dari ekosistem informasi [3]. Kajian lain menekankan bahwa IoT menggabungkan sensor, aktuator, jaringan, dan platform komputasi untuk membentuk sistem yang dapat mengamati dan memahami lingkungan fisik [4].

Agar lebih mudah dipahami, bayangkan tubuh manusia. Mata, hidung, kulit, dan telinga berfungsi sebagai sensor. Otak memproses informasi. Saraf menjadi jalur komunikasi. Tangan dan kaki dapat bertindak sebagai aktuator yang melakukan tindakan. Dalam sistem IoT, sensor membaca kondisi lingkungan, mikrokontroler memproses data awal, jaringan mengirimkan data, platform menyimpan dan menampilkan data, sedangkan aktuator dapat melakukan tindakan tertentu jika sistem dirancang untuk otomatisasi.

Pada sistem pemantauan lingkungan, sensor dapat membaca suhu udara setiap lima menit. Mikrokontroler seperti ESP32 atau perangkat sejenis menerima data tersebut, lalu mengirimkannya melalui Wi-Fi, LoRa, atau jaringan seluler. Data masuk ke server atau platform cloud, kemudian ditampilkan dalam dashboard. Pengguna dapat melihat grafik suhu harian, nilai maksimum dan

minimum, serta peringatan jika suhu melewati ambang tertentu. Apabila sistem dilengkapi aktuator, perangkat dapat menyalakan kipas, pompa, atau alarm berdasarkan logika yang telah diprogram. Pengertian ini penting karena IoT sering disalahpahami sebagai sekadar alat yang tersambung ke internet. Padahal, koneksi internet hanyalah salah satu bagian dari sistem. IoT yang berguna harus memiliki tujuan pengukuran yang jelas, perangkat yang sesuai, alur data yang rapi, tampilan informasi yang dapat dipahami, dan mekanisme respons yang realistis. Sebuah sensor yang mengirim angka ke internet belum tentu menjadi solusi. Ia baru bernilai ketika angka tersebut membantu manusia memahami situasi dan mengambil keputusan.



Gambar 1. 1 Konsep dasar sistem IoT lingkungan

Gambar 1.1 menunjukkan alur dasar IoT lingkungan. Lingkungan fisik menghasilkan kondisi yang diukur oleh sensor. Sensor mengubah kondisi tersebut menjadi data. Mikrokontroler membaca dan memproses data. Jaringan mengirimkan data ke platform. Platform menyimpan dan mengelola data. Dashboard membantu pengguna membaca informasi. Keputusan pengguna kemudian menghasilkan tindakan lapangan. Dalam sistem yang lebih maju, sebagian tindakan dapat dibuat otomatis melalui aktuator, tetapi otomatisasi harus tetap dirancang secara hati-hati.

1.3 Dari Pemantauan Menuju Pengambilan Keputusan

Pemantauan bukan tujuan akhir. Tujuan yang lebih penting adalah memperbaiki keputusan. Banyak proyek teknologi gagal karena berhenti pada tahap menampilkan data, tetapi tidak menjawab pertanyaan praktis: setelah data diketahui, apa yang harus dilakukan?

Dalam proyek lingkungan, pertanyaan praktis harus dirumuskan sejak awal. Jika sistem memantau kualitas udara, maka pertanyaannya dapat berupa kapan kualitas udara menurun, di lokasi mana penurunan sering terjadi, dan tindakan apa yang dapat dilakukan oleh pengguna. Jika sistem memantau kelembapan tanah, pertanyaannya adalah kapan tanaman membutuhkan air, apakah penyiraman terlalu sering, dan apakah penggunaan air dapat dikurangi tanpa merusak tanaman. Jika sistem memantau kualitas air, pertanyaannya adalah apakah terjadi perubahan yang perlu diperiksa lebih lanjut, apakah sensor perlu dikalibrasi ulang, dan apakah data cukup kuat untuk dijadikan dasar tindakan.

Rantai pengambilan keputusan berbasis IoT dapat dijelaskan melalui lima tahap. Tahap pertama adalah pengukuran, yaitu sensor membaca kondisi lingkungan. Tahap kedua adalah pengiriman, yaitu data dikirim ke sistem penyimpanan atau dashboard. Tahap ketiga adalah pemaknaan, yaitu data dibaca sebagai informasi melalui grafik, status, atau perbandingan. Tahap keempat adalah keputusan, yaitu pengguna menentukan respons. Tahap kelima adalah tindakan, yaitu perubahan dilakukan di lapangan.

Pada tahap pemaknaan, angka tidak boleh dilepaskan dari konteks. Misalnya, nilai suhu 34°C dapat memiliki makna berbeda jika diukur di ruang kelas, rumah kaca, gudang, atau lahan pertanian. Nilai pH air juga harus ditafsirkan berdasarkan konteks penggunaan air, jenis ekosistem, atau standar yang relevan. Ambang batas untuk kualitas udara, air, atau parameter lain sebaiknya merujuk pada standar resmi, pedoman teknis, atau literatur ilmiah yang sesuai. Sebagai contoh, informasi kesehatan terkait polusi udara perlu mengacu pada lembaga kesehatan atau lingkungan yang kredibel, seperti WHO atau regulasi nasional yang berlaku [5].

Sistem IoT yang baik juga perlu membedakan antara peringatan dan diagnosis. Sensor dapat memberi peringatan bahwa suatu nilai berubah atau melewati ambang tertentu. Namun, penyebab perubahan belum tentu langsung diketahui. Kekeruhan air dapat meningkat karena hujan, erosi, aktivitas manusia, gangguan sensor, atau pemasangan sensor yang buruk. Karena itu, data IoT sebaiknya digunakan sebagai dasar investigasi dan tindakan awal, bukan sebagai satu-satunya dasar kesimpulan final.

Tabel 1. 2 Perbedaan data, informasi, keputusan, dan tindakan dalam proyek IoT

Tahap	Contoh dalam proyek kualitas udara	Pertanyaan utama
Data	Nilai sensor terbaca setiap lima menit	Apakah data masuk secara konsisten?
Informasi	Grafik menunjukkan kenaikan partikulat pada jam tertentu	Pola apa yang terlihat?
Keputusan	Pengelola memutuskan membuka ventilasi atau mengubah jadwal aktivitas	Respons apa yang paling aman dan realistis?
Tindakan	Ventilasi diperbaiki, sumber polusi diperiksa, pemantauan diperluas	Apakah tindakan mengurangi masalah?

1.4 IoT dan Lingkungan Berkelanjutan

Lingkungan berkelanjutan berarti lingkungan dikelola agar kebutuhan saat ini dapat dipenuhi tanpa merusak kemampuan generasi berikutnya untuk memenuhi kebutuhannya. Dalam praktik, gagasan ini menyentuh banyak bidang: kualitas udara, air bersih, energi, pangan, kota, konsumsi, produksi, perubahan iklim, ekosistem, dan tata kelola. Agenda SDGs menunjukkan bahwa keberlanjutan memerlukan pengukuran lintas sektor melalui indikator yang dapat dipantau secara sistematis [1].

IoT dapat mendukung keberlanjutan karena ia membantu membuat kondisi lingkungan lebih terlihat. Sebuah komunitas dapat mengetahui kapan tempat sampah penuh. Pengelola gedung dapat melihat pola konsumsi listrik. Petani dapat mengatur irigasi berdasarkan kelembapan tanah, bukan hanya kebiasaan. Pemerintah lokal dapat memperoleh data awal tentang titik rawan banjir atau suhu kawasan perkotaan. Dalam konteks yang lebih luas, sensor dan sistem pemantauan dapat menjadi bagian dari infrastruktur data untuk perencanaan lingkungan.

Meskipun demikian, hubungan antara IoT dan keberlanjutan harus dipahami secara seimbang. IoT juga membutuhkan perangkat elektronik, baterai, jaringan, server, dan perawatan. Jika perangkat cepat rusak, sulit diperbaiki, atau menghasilkan limbah elektronik baru, maka manfaat lingkungannya perlu dipertanyakan. Karena itu, desain IoT berkelanjutan harus mempertimbangkan umur perangkat, efisiensi energi, kemudahan perawatan, keamanan data, dan relevansi penggunaan.

Perubahan iklim dan degradasi lingkungan memperkuat kebutuhan akan pemantauan yang lebih baik. IPCC AR6 Synthesis Report menjelaskan bahwa perubahan iklim telah menimbulkan dampak dan risiko yang luas, serta membutuhkan tindakan mitigasi dan adaptasi berdasarkan pengetahuan ilmiah yang tersedia [6]. Dalam konteks ini, IoT dapat berperan pada tingkat lokal sebagai alat untuk mengamati kondisi mikro, mendukung adaptasi, dan membantu komunitas memahami perubahan yang terjadi di lingkungannya. Namun, klaim bahwa suatu sistem IoT secara langsung menurunkan emisi, mengurangi pencemaran, atau meningkatkan kesehatan lingkungan harus dibuktikan dengan pengukuran yang memadai.

Dengan kata lain, IoT dapat menjadi bagian dari solusi lingkungan, tetapi bukan solusi yang berdiri sendiri. Ia perlu dihubungkan dengan perilaku pengguna, kebijakan organisasi, kapasitas teknis, dan mekanisme tindak lanjut. Sistem pemantauan kualitas udara tidak akan banyak berarti jika data peringatan diabaikan. Sistem irigasi otomatis tidak akan berkelanjutan jika petani tidak memahami cara merawat sensor. Dashboard energi tidak akan

menghasilkan efisiensi jika tidak ada keputusan manajerial untuk mengubah pola penggunaan.

1.5 Pendekatan Berbasis Proyek dalam Buku Ini

Buku ini menggunakan pendekatan berbasis proyek karena IoT lebih mudah dipahami ketika pembaca melihat hubungan antara masalah nyata, perangkat, data, dan tindakan. Pembaca tidak hanya diajak memahami definisi, tetapi juga merancang sistem sederhana, memilih sensor, menentukan alur data, membuat dashboard, membaca hasil, dan mengevaluasi keterbatasan.

Pendekatan berbasis proyek dimulai dari masalah, bukan dari alat. Ini prinsip penting. Banyak pemula memulai proyek IoT dengan bertanya, “Sensor apa yang harus dibeli?” Padahal pertanyaan pertama seharusnya adalah, “Masalah apa yang ingin dipahami atau diselesaikan?” Setelah masalah jelas, barulah parameter pengukuran dipilih. Setelah parameter dipilih, barulah sensor ditentukan. Setelah sensor dipilih, barulah jaringan, platform, dashboard, dan bentuk tindakan dirancang.

Sebagai contoh, jika masalahnya adalah tanaman sering layu karena penyiraman tidak teratur, maka parameter yang relevan mungkin kelembapan tanah dan suhu lingkungan. Sensor yang dipilih harus sesuai dengan jenis tanah dan kondisi pemasangan. Data perlu dikirim secara berkala. Dashboard perlu menampilkan status tanah dalam bahasa yang mudah dipahami. Jika sistem dilengkapi pompa, logika kontrol harus aman. Evaluasi tidak hanya melihat apakah pompa menyala, tetapi apakah tanaman lebih stabil dan penggunaan air menjadi lebih terkendali.

Pendekatan yang sama digunakan untuk kualitas udara dan kualitas air. Pada proyek kualitas udara, pembaca akan diarahkan untuk menentukan lokasi, memilih sensor, membuat alur data, membaca pola, dan menyusun rekomendasi. Pada proyek kualitas air, pembaca akan belajar bahwa sensor perlu dipasang dan dirawat dengan hati-hati karena kondisi air dapat memengaruhi pembacaan. Pada proyek pertanian cerdas, pembaca akan memahami hubungan antara data tanah, cuaca mikro, dan keputusan irigasi.



Gambar 1. 2 Alur berpikir proyek IoT lingkungan

Gambar 1.2 menekankan bahwa proyek IoT bukan proses satu arah. Setelah sistem diuji, desain dapat berubah. Sensor dapat diganti, posisi pemasangan dapat diperbaiki, interval pengiriman data dapat disesuaikan, dashboard dapat disederhanakan, dan ambang peringatan dapat ditinjau ulang. Siklus perbaikan ini penting karena kondisi lapangan sering berbeda dari rencana awal.

1.6 Batasan dan Risiko Penggunaan IoT

Setiap teknologi memiliki batasan. Dalam IoT lingkungan, batasan paling umum adalah kualitas sensor, kestabilan jaringan, pasokan daya, ketahanan perangkat, keamanan data, dan kemampuan pengguna membaca hasil. Jika batasan ini diabaikan, proyek dapat menghasilkan data yang menyesatkan atau sistem yang sulit dipertahankan.

Kualitas sensor menjadi isu utama karena banyak sensor berbiaya rendah dirancang untuk edukasi atau pemantauan indikatif, bukan untuk pengukuran legal atau ilmiah tingkat tinggi. Sensor dapat mengalami drift, yaitu perubahan pembacaan seiring waktu. Sensor juga dapat dipengaruhi suhu, kelembapan, debu, getaran, posisi pemasangan, dan interferensi bahan lain. Karena itu, setiap proyek perlu mencatat jenis sensor, cara kalibrasi, lokasi pemasangan, dan kondisi pengukuran.

Koneksi jaringan juga tidak selalu stabil. Perangkat yang dipasang di luar ruangan dapat kehilangan sinyal. Data dapat terlambat masuk. Baterai dapat habis. Server dapat mengalami gangguan. Untuk mengurangi risiko, sistem perlu memiliki mekanisme penyimpanan sementara, penanda waktu, dan indikator status perangkat. Pada proyek yang berdampak pada keselamatan, desain sistem harus jauh lebih ketat dan tidak boleh hanya mengandalkan satu sensor tanpa verifikasi.

Keamanan dan privasi juga perlu dipahami sejak awal. Walaupun data lingkungan tampak tidak sensitif, data lokasi, pola aktivitas, konsumsi energi, atau kondisi area tertentu dapat memiliki dampak sosial dan ekonomi. Dashboard yang terbuka tanpa pembatasan akses dapat disalahgunakan. Perangkat yang memakai kata sandi bawaan dapat menjadi titik lemah. Standar arsitektur IoT seperti ISO/IEC 30141:2024 menekankan pentingnya penggunaan kosakata, rancangan, dan praktik arsitektur yang konsisten dalam sistem IoT [7]. Walaupun buku ini tidak membahas standar tersebut secara mendalam pada Bab 1, prinsip dasarnya relevan: sistem IoT perlu dirancang sebagai sistem yang utuh, bukan sebagai rangkaian perangkat yang dipasang secara asal.

Risiko lain adalah kesalahan interpretasi. Grafik yang naik turun dapat terlihat meyakinkan, tetapi belum tentu menjelaskan sebab-akibat. Misalnya, peningkatan suhu di satu titik tidak otomatis membuktikan perubahan iklim lokal. Kenaikan kekeruhan air tidak otomatis membuktikan pencemaran industri. Penurunan kelembapan tanah tidak otomatis berarti irigasi gagal. Data IoT perlu dibaca bersama konteks lapangan, observasi manual, catatan cuaca, aktivitas manusia, dan bila perlu pengujian laboratorium.

Karena itu, etika utama dalam menggunakan IoT lingkungan adalah kejujuran terhadap keterbatasan data. Jika data hanya indikatif, sebutkan sebagai indikatif. Jika sensor belum dikalibrasi, nyatakan bahwa hasil masih perlu validasi. Jika data hilang pada jam tertentu, jangan menyembunyikannya. Jika kesimpulan membutuhkan standar atau uji laboratorium, jangan menggantinya dengan klaim berlebihan.

1.7 Studi Kasus Pembuka: Sekolah yang Ingin Memantau Kualitas Udara

Bayangkan sebuah sekolah yang memiliki beberapa ruang kelas dekat jalan raya. Guru dan siswa sering merasa ruang kelas panas dan pengap pada jam tertentu. Selama ini, keluhan hanya dibahas secara informal. Tidak ada data yang menunjukkan kapan kondisi memburuk, ruang mana yang paling sering bermasalah, dan apakah perubahan ventilasi dapat membantu.

Sekolah kemudian merancang proyek IoT sederhana. Tujuannya bukan langsung membuat kesimpulan medis, melainkan memahami pola kondisi ruang. Parameter awal yang dipantau adalah suhu, kelembapan, dan indikator kualitas udara tertentu sesuai sensor yang tersedia. Perangkat dipasang di beberapa ruang kelas dengan posisi yang tidak mengganggu aktivitas belajar. Data dikirim ke dashboard setiap beberapa menit. Guru dapat melihat grafik harian dan membandingkan kondisi antar-ruang.

Setelah beberapa minggu, sekolah mulai melihat pola. Beberapa ruang lebih panas pada siang hari. Ruang yang jarang membuka ventilasi memiliki kondisi berbeda dari ruang yang memiliki sirkulasi lebih baik. Pada jam tertentu, indikator kualitas udara berubah. Data ini tidak langsung dianggap sebagai diagnosis final, tetapi menjadi dasar diskusi. Sekolah dapat mencoba tindakan sederhana, seperti memperbaiki ventilasi, mengatur jadwal pembukaan jendela, mengurangi sumber debu dalam ruang, atau menambah titik pemantauan.

Studi kasus ini menunjukkan cara kerja IoT yang sehat. Proyek dimulai dari masalah nyata. Parameter dipilih sesuai tujuan. Data digunakan untuk memahami pola. Tindakan dilakukan secara bertahap. Kesimpulan tetap hati-hati dan tidak melampaui kualitas data. Jika sekolah ingin menilai dampak kesehatan atau kepatuhan terhadap standar kualitas udara, maka diperlukan rujukan resmi, metode pengukuran yang sesuai, dan mungkin alat yang lebih terkalibrasi [5].

Tabel 1. 3 Rancangan awal proyek pemantauan kualitas udara di sekolah

Komponen rancangan	Isi rancangan awal	Catatan kehati-hatian
Masalah	Ruang kelas terasa panas dan pengap	Keluhan perlu didukung data pengamatan
Tujuan	Memahami pola kondisi udara ruang kelas	Tidak langsung digunakan sebagai diagnosis kesehatan
Parameter	Suhu, kelembapan, indikator kualitas udara tertentu	Jenis parameter mengikuti sensor yang tersedia
Lokasi	Beberapa ruang kelas dekat jalan dan jauh dari jalan	Posisi sensor harus konsisten
Output	Grafik harian dan status sederhana pada dashboard	Tampilan harus mudah dipahami guru dan siswa
Tindakan	Perbaikan ventilasi, perubahan kebiasaan ruang, pemantauan lanjutan	Tindakan dievaluasi dengan data sebelum dan sesudah

1.8 Refleksi dan Latihan Akhir Bab

Bab ini menempatkan IoT sebagai pendekatan berbasis data untuk membantu memahami kondisi lingkungan. Gagasan utamanya sederhana: masalah lingkungan perlu diamati, pengamatan perlu diubah menjadi data, data perlu dibaca sebagai informasi, dan informasi perlu diarahkan pada tindakan. Namun, setiap tahap memiliki risiko. Sensor dapat salah, data dapat hilang, dashboard dapat membingungkan, dan keputusan dapat keliru jika data dibaca tanpa konteks.

Sebagai latihan awal, pembaca dapat memilih satu masalah lingkungan di sekitar rumah, tempat kerja, sekolah, kampus, kebun, atau komunitas. Masalah tersebut kemudian diterjemahkan menjadi parameter yang dapat diukur. Setelah itu, pembaca menyusun rancangan awal sistem IoT secara sederhana. Tujuannya bukan langsung membangun perangkat, tetapi melatih cara berpikir sistematis dari masalah menuju solusi.

Tabel 1. 4 Template latihan identifikasi proyek IoT lingkungan

Pertanyaan perancangan	Jawaban pembaca
Masalah lingkungan apa yang ingin dipantau?	
Mengapa masalah tersebut penting?	
Parameter apa yang perlu diukur?	
Sensor apa yang mungkin digunakan?	
Di mana sensor akan dipasang?	
Seberapa sering data perlu dikirim?	
Siapa yang akan membaca data?	
Tindakan apa yang mungkin dilakukan setelah data diperoleh?	
Risiko kesalahan data apa yang mungkin terjadi?	
Referensi atau standar apa yang diperlukan?	

Kesimpulan Bab

IoT dapat membantu pengelolaan lingkungan berkelanjutan dengan menyediakan data yang lebih teratur, dekat dengan lokasi masalah, dan mudah divisualisasikan. Dalam bentuk yang sederhana, IoT menghubungkan sensor, perangkat pemroses, jaringan, platform data, dashboard, pengguna, dan tindakan. Nilai utamanya bukan pada perangkat, melainkan pada kemampuan sistem membantu manusia memahami perubahan lingkungan dan mengambil keputusan yang lebih baik.

Bab ini juga menegaskan bahwa IoT harus digunakan secara kritis. Sensor tidak selalu akurat, data tidak selalu lengkap, dan dashboard tidak selalu berarti keputusan sudah benar. Karena itu, setiap proyek IoT lingkungan perlu memiliki tujuan yang jelas, parameter yang relevan, metode pengukuran yang dapat dijelaskan, serta keterbukaan terhadap keterbatasan. Pada bab berikutnya, pembahasan akan masuk ke fondasi teknologi IoT, termasuk arsitektur sistem, perangkat utama, alur data, dan prinsip desain yang diperlukan sebelum membangun proyek lingkungan.

BAB 2

Fondasi Teknologi IoT untuk Aplikasi Lingkungan

Setelah memahami mengapa Internet of Things penting untuk pengelolaan lingkungan, pembahasan perlu bergerak ke pertanyaan yang lebih teknis: bagaimana sebuah sistem IoT bekerja? Pertanyaan ini tampak sederhana, tetapi jawabannya menentukan keberhasilan proyek. Banyak proyek IoT gagal bukan karena idenya buruk, melainkan karena fondasi teknisnya tidak dirancang dengan benar. Sensor dipilih tanpa memahami kebutuhan pengukuran, perangkat pemroses dipasang tanpa memperhitungkan konsumsi daya, jaringan dipilih tanpa mempertimbangkan kondisi lapangan, dan dashboard dibuat tanpa memikirkan siapa yang akan membaca data.

Bab ini menjelaskan fondasi teknologi IoT untuk aplikasi lingkungan dengan cara yang praktis dan mudah dipahami. Pembaca tidak perlu langsung menguasai seluruh detail elektronika, pemrograman, jaringan komputer, atau komputasi awan. Yang lebih penting pada tahap ini adalah memahami peran setiap komponen, hubungan antarkomponen, dan alasan mengapa keputusan teknis harus selalu mengikuti tujuan proyek.

Dalam aplikasi lingkungan, sistem IoT biasanya berhadapan dengan kondisi yang tidak selalu ideal. Perangkat dapat dipasang di luar ruangan, terkena panas, lembap, debu, air, getaran, atau gangguan listrik. Data dapat hilang karena koneksi tidak stabil. Sensor dapat berubah pembacaannya setelah digunakan cukup lama. Karena itu, sistem IoT lingkungan harus dipahami sebagai sistem yang hidup di lapangan, bukan hanya rangkaian elektronik di meja kerja.

2.1 Arsitektur Dasar Sistem IoT

Arsitektur IoT adalah gambaran tentang bagaimana bagian-bagian sistem saling terhubung dan bekerja bersama. Dalam proyek lingkungan, arsitektur membantu pembaca melihat sistem secara utuh, mulai dari titik pengukuran di lapangan sampai informasi tampil pada dashboard. Tanpa arsitektur yang jelas, proyek sering terjebak pada pembelian perangkat tanpa arah.

Secara umum, sistem IoT dapat dipahami melalui beberapa lapisan. Lapisan pertama adalah lapisan penginderaan atau sensing layer. Pada lapisan ini, sensor membaca kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, pH, intensitas cahaya, kekeruhan air, atau konsentrasi partikel udara. Lapisan kedua adalah lapisan pemrosesan lokal, yaitu perangkat seperti mikrokontroler atau komputer kecil yang membaca data sensor dan menjalankan logika awal. Lapisan ketiga adalah lapisan komunikasi, yaitu jaringan yang mengirimkan data ke sistem lain. Lapisan keempat adalah platform data, tempat data diterima, disimpan, diproses, dan dikelola. Lapisan kelima adalah aplikasi, yaitu dashboard, notifikasi, laporan, atau antarmuka yang digunakan manusia.

NIST menjelaskan bahwa jaringan benda atau Networks of Things dibangun dari beberapa primitif dasar, yaitu sensor, aggregator, communication channel, external utility, dan decision trigger [9]. Kerangka ini penting karena menunjukkan bahwa IoT bukan hanya sensor, tetapi sistem yang melibatkan pengumpulan data, pengiriman, pemrosesan, dan pemicu keputusan. ISO/IEC 30141:2024 juga menempatkan IoT sebagai sistem yang memerlukan arsitektur referensi, kosakata bersama, desain yang dapat digunakan kembali, serta praktik terbaik agar implementasinya lebih konsisten [10].

Dalam konteks lingkungan, arsitektur ini dapat diterapkan pada kasus sederhana. Sebuah sensor suhu dan kelembapan dipasang di ruang kompos. Sensor membaca kondisi lingkungan. Mikrokontroler menerima nilai sensor dan memberi tanda waktu. Data dikirim melalui Wi-Fi ke platform penyimpanan. Dashboard menampilkan grafik harian. Jika suhu melewati batas yang telah ditentukan, sistem mengirim notifikasi kepada pengelola. Dari contoh ini, terlihat bahwa setiap lapisan memiliki fungsi yang berbeda, tetapi semuanya harus bekerja sebagai satu alur.



Gambar 2. 1 Arsitektur dasar sistem IoT untuk aplikasi lingkungan

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa sistem IoT tidak berhenti pada pengukuran. Data harus bergerak dari lingkungan fisik menuju pengguna. Jika satu lapisan gagal, keseluruhan sistem dapat terganggu. Sensor yang baik tidak berguna jika jaringan tidak stabil. Dashboard yang menarik tidak berguna jika data sensor tidak valid. Server yang kuat tidak berguna jika pengguna tidak memahami informasi yang ditampilkan.

Tabel 2. 1 Komponen arsitektur IoT dan fungsinya dalam sistem lingkungan

Lapisan sistem	Fungsi utama	Contoh dalam aplikasi lingkungan	Risiko umum
Lingkungan fisik	Sumber kondisi yang diukur	Udara ruang kelas, air kolam, tanah pertanian, tempat sampah	Kondisi berubah cepat dan dipengaruhi banyak faktor
Sensor	Mengubah kondisi fisik atau kimia menjadi data	Sensor suhu, sensor pH, sensor kekeruhan,	Pembacaan bias, drift, salah pemasangan

		sensor gas	
Perangkat pemroses	Membaca sensor dan menjalankan logika awal	ESP32, Arduino, Raspberry Pi	Memori terbatas, konsumsi daya, gangguan program
Jaringan	Mengirimkan data ke platform	Wi-Fi, LoRa, seluler, Ethernet	Sinyal lemah, data hilang, biaya komunikasi
Platform data	Menyimpan dan mengelola data	Cloud IoT, server lokal, database	Kesalahan konfigurasi, kapasitas terbatas, akses tidak aman
Aplikasi	Menampilkan informasi dan mendukung keputusan	Dashboard, grafik, notifikasi	Tampilan membingungkan, ambang peringatan tidak tepat
Pengguna	Membaca informasi dan mengambil tindakan	Guru, petani, teknisi, pengelola lingkungan	Data tidak ditindaklanjuti atau disalahartikan

2.2 Sensor, Aktuator, dan Mikrokontroler

Sensor adalah bagian sistem yang berhubungan langsung dengan lingkungan. Ia membaca kondisi tertentu dan mengubahnya menjadi sinyal yang dapat diproses. Dalam aplikasi lingkungan, sensor dapat digunakan untuk membaca suhu, kelembapan, tekanan udara, intensitas cahaya, kekeruhan air, pH, kelembapan tanah, arus listrik, atau gas tertentu. Sensor menjadi pintu masuk data, sehingga kualitas sistem sangat dipengaruhi oleh kualitas sensor.

Aktuator memiliki fungsi berbeda. Jika sensor bertugas membaca, aktuator bertugas melakukan tindakan. Pompa air, kipas, relay, katup solenoid, buzzer, lampu indikator, dan motor adalah contoh aktuator. Dalam proyek smart farming, sensor kelembapan tanah dapat membaca kondisi tanah, lalu aktuator berupa pompa air dapat menyala jika nilai kelembapan berada di bawah batas yang

ditentukan. Namun, otomatisasi semacam ini harus dibuat hati-hati, terutama jika melibatkan listrik, air, dan perangkat mekanik.

Mikrokontroler berada di antara sensor, aktuator, dan jaringan. Ia membaca sensor, memproses data awal, menjalankan logika sederhana, dan mengirimkan data. Perangkat seperti ESP32 sering dipilih dalam proyek IoT karena memiliki kemampuan Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi. Dokumentasi Espressif menjelaskan bahwa ESP32 adalah system-on-chip 2,4 GHz dengan Wi-Fi dan Bluetooth yang dirancang untuk berbagai aplikasi IoT [11]. Arduino Uno banyak digunakan untuk pembelajaran elektronika dan pemrograman perangkat karena ekosistemnya sederhana dan dokumentasinya luas [12]. Raspberry Pi memiliki karakter berbeda karena lebih tepat disebut single-board computer. Raspberry Pi 4 Model B, misalnya, memiliki prosesor, memori, konektivitas jaringan, port USB, dan dapat menjalankan sistem operasi, sehingga cocok untuk kebutuhan pemrosesan yang lebih berat dibanding mikrokontroler sederhana [13].

Pemilihan perangkat tidak boleh hanya mengikuti popularitas. ESP32 cocok untuk node sensor berdaya rendah dan komunikasi nirkabel sederhana. Arduino cocok untuk pembelajaran dasar dan kontrol perangkat sederhana, tetapi biasanya membutuhkan modul tambahan untuk koneksi internet. Raspberry Pi cocok untuk gateway, pemrosesan lokal, atau dashboard ringan, tetapi konsumsi dayanya lebih besar dan sistem operasinya memerlukan perawatan lebih serius. Dalam proyek lingkungan, perangkat terbaik adalah perangkat yang sesuai dengan masalah, lokasi, sumber daya, dan kemampuan pengguna.

Tabel 2. 2 Perbandingan umum perangkat pemroses untuk proyek IoT lingkungan

Perangkat	Karakter umum	Kelebihan	Keterbatasan	Contoh penggunaan lingkungan
Arduino	Mikrokontrol	Mudah	Tidak	Pembacaan

Uno	er untuk pembelajaran dan kontrol dasar	dipelajari, banyak contoh, komunitas luas	memiliki koneksi internet bawaan pada versi umum	sensor sederhana di laboratorium atau kelas
ESP32	Mikrokontroler dengan Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi	Cocok untuk IoT nirkabel, ukuran kecil, cukup hemat daya	Membutuhk an pemahaman konfigurasi jaringan dan catu daya	Node pemantaua n suhu, kelembapa n, kualitas udara, atau tanah
Raspberr y Pi	Komputer papan tunggal yang menjalankan sistem operasi	Pemrosesa n lebih kuat, cocok sebagai gateway atau server kecil	Konsumsi daya lebih tinggi dan lebih kompleks dirawat	Gateway data, dashboard lokal, pemrosesan awal berbasis Python

Dalam memilih sensor dan perangkat, pembaca perlu memperhatikan beberapa aspek teknis. Rentang pengukuran harus sesuai dengan kondisi lapangan. Resolusi dan akurasi harus cukup untuk tujuan proyek. Tegangan kerja sensor harus cocok dengan perangkat pemroses. Antarmuka komunikasi seperti analog, digital, I2C, SPI, atau UART harus didukung oleh perangkat. Jika perangkat dipasang di luar ruangan, casing dan perlindungan fisik menjadi bagian penting dari desain.

Spesifikasi teknis harus selalu diverifikasi dari dokumentasi resmi perangkat. Informasi dari toko daring, forum, atau video tutorial dapat berguna untuk orientasi, tetapi tidak cukup untuk memastikan batas operasional sensor dan perangkat. Jika sistem digunakan untuk

keputusan penting, maka dokumentasi teknis, prosedur kalibrasi, dan pengujian lapangan harus menjadi bagian dari proyek.

2.3 Data sebagai Inti Sistem IoT

Dalam sistem IoT, perangkat keras sering terlihat paling menarik karena dapat disentuh dan dirakit. Namun, inti sebenarnya adalah data. Sensor, mikrokontroler, jaringan, dan dashboard semuanya bekerja untuk menghasilkan, memindahkan, menyimpan, dan menampilkan data. Jika data tidak berkualitas, sistem yang tampak canggih tetap tidak berguna.

Data IoT lingkungan biasanya terdiri dari beberapa unsur. Unsur pertama adalah nilai pengukuran, misalnya suhu 29,5°C, kelembapan 70%, atau pH 6,8. Unsur kedua adalah waktu pengukuran. Tanpa waktu, data sulit dianalisis karena pembaca tidak tahu kapan kondisi tersebut terjadi. Unsur ketiga adalah lokasi atau identitas perangkat. Tanpa lokasi, data dari banyak sensor akan bercampur. Unsur keempat adalah satuan pengukuran. Nilai angka tanpa satuan mudah disalahartikan. Unsur kelima adalah status perangkat, misalnya baterai rendah, koneksi terputus, sensor gagal dibaca, atau data terlambat masuk.

Data mentah belum tentu langsung bermakna. Misalnya, dashboard menampilkan angka kelembapan tanah 420 dari pembacaan analog. Bagi pengguna umum, angka ini tidak jelas. Apakah tanah basah, lembap, atau kering? Agar bermakna, data perlu dikalibrasi, dikonversi, diberi label, dan ditampilkan dalam bentuk yang mudah dipahami. Dalam beberapa kasus, data perlu dibersihkan dari nilai ekstrem yang muncul karena gangguan sensor atau koneksi.

Tabel 2. 3 Unsur data yang perlu dicatat dalam sistem IoT lingkungan

Unsur data	Contoh	Fungsi
Nilai pengukuran	31,2	Menunjukkan hasil pembacaan sensor
Satuan	°C, %, ppm, NTU, pH	Menghindari salah tafsir angka
Timestamp	2026-05-12 09:30:00	Menunjukkan waktu

		pengukuran
Identitas perangkat	sensor_udara_01	Membedakan sumber data
Lokasi	Ruang kelas A, kolam 1, lahan utara	Memberi konteks spasial
Status perangkat	normal, baterai rendah, sensor error	Membantu diagnosis masalah sistem
Metode pengukuran	interval 5 menit, rata-rata 1 menit	Menjelaskan cara data diperoleh

Data juga harus disimpan dengan struktur yang konsisten. Jika hari ini suhu disimpan dengan nama kolom “temperature”, besok jangan berubah menjadi “temp” tanpa alasan yang jelas. Jika satuan menggunakan derajat Celsius, jangan mencampurnya dengan Fahrenheit. Jika data dari satu sensor dikirim setiap lima menit, interval ini perlu dicatat. Konsistensi seperti ini tampak sederhana, tetapi sangat menentukan ketika data dianalisis beberapa minggu atau beberapa bulan kemudian.

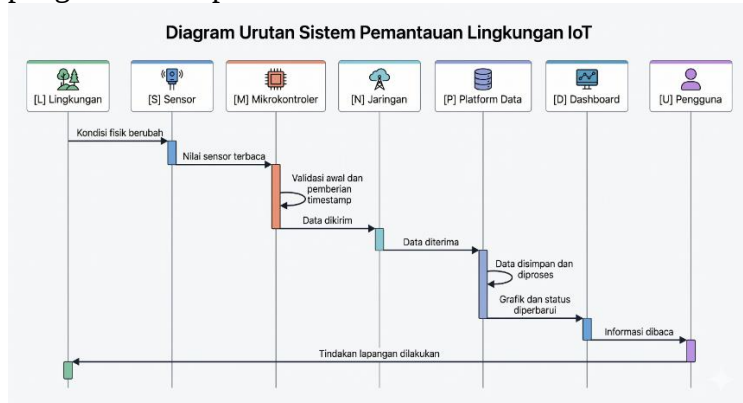
Dalam aplikasi lingkungan, data juga harus dibaca sebagai rangkaian waktu. Satu nilai tunggal sering tidak cukup untuk menyimpulkan kondisi. Nilai suhu pada satu menit tertentu tidak menjelaskan pola harian. Satu nilai pH tidak menjelaskan kestabilan air. Satu data kelembapan tanah tidak cukup untuk memahami kebutuhan irigasi. Karena itu, sistem IoT perlu dirancang untuk melihat tren, perubahan, pola berulang, dan anomali.

2.4 Alur Kerja Sistem IoT Lingkungan

Alur kerja sistem IoT lingkungan dapat dipahami sebagai perjalanan data dari dunia fisik menuju keputusan. Perjalanan ini dimulai saat sensor membaca kondisi lingkungan. Data kemudian diterima oleh mikrokontroler atau komputer kecil. Perangkat melakukan pemrosesan awal, seperti memeriksa apakah sensor terbaca, menambahkan waktu, mengubah format data, atau menghitung rata-rata sederhana. Setelah itu, data dikirim melalui jaringan ke platform. Platform menyimpan data dan menampilkannya dalam dashboard. Pengguna membaca informasi dan menentukan tindakan.

Contoh yang mudah dipahami adalah pemantauan suhu dan kelembapan di ruang kompos. Ruang kompos membutuhkan kondisi tertentu agar proses penguraian berjalan baik. Sensor membaca suhu dan kelembapan secara berkala. Mikrokontroler mengirim data ke dashboard. Pengelola melihat apakah suhu terlalu rendah, terlalu tinggi, atau berada dalam kisaran yang diharapkan. Jika data menunjukkan kelembapan terlalu rendah, pengelola dapat menambahkan air. Jika suhu tidak berubah dalam beberapa hari, pengelola dapat memeriksa kompos secara manual.

Dalam contoh ini, IoT tidak menggantikan pengetahuan pengelola kompos. IoT membantu pengelola melihat pola yang mungkin terlewat. Data memberi dasar untuk bertanya, memeriksa, dan bertindak. Dengan demikian, sistem IoT menjadi alat pendamping pengambilan keputusan.



Gambar 2. 2 Alur kerja data pada sistem IoT lingkungan

Alur kerja ini juga menunjukkan titik-titik rawan kegagalan. Sensor dapat gagal membaca. Mikrokontroler dapat berhenti karena catu daya bermasalah. Jaringan dapat terputus. Platform dapat tidak menerima data. Dashboard dapat menampilkan informasi yang terlambat. Pengguna dapat salah memahami grafik. Karena itu, sistem perlu memiliki indikator status, log kesalahan, dan prosedur pemeriksaan.

Proyek yang baik tidak hanya merancang alur saat semua berjalan normal, tetapi juga alur saat terjadi gangguan. Jika data tidak masuk

selama satu jam, sistem perlu memberi tanda. Jika sensor membaca nilai yang mustahil, data perlu ditandai sebagai anomali. Jika baterai rendah, pengguna perlu mengetahui sebelum perangkat mati. Prinsip ini penting karena lingkungan lapangan jarang seideal ruang laboratorium.

2.5 Prinsip Desain Sistem yang Andal

Sistem IoT yang andal bukan berarti sistem yang paling mahal atau paling rumit. Sistem yang andal adalah sistem yang sesuai dengan tujuan, cukup akurat untuk kebutuhan, stabil dalam kondisi penggunaan, mudah dirawat, aman, dan dapat dipahami oleh pengguna. Dalam proyek lingkungan, kesederhanaan sering lebih berguna daripada kompleksitas yang sulit dirawat.

Prinsip pertama adalah kesesuaian dengan masalah. Setiap keputusan teknis harus kembali pada tujuan pengukuran. Jika proyek hanya membutuhkan pemantauan suhu ruang kelas, sistem tidak perlu memakai perangkat komputasi yang terlalu kompleks. Jika proyek memantau beberapa titik di lahan luas, pilihan konektivitas menjadi lebih penting daripada tampilan dashboard yang rumit. Jika proyek berada di lokasi tanpa listrik stabil, konsumsi daya dan sumber energi harus menjadi pertimbangan utama.

Prinsip kedua adalah kecukupan akurasi. Tidak semua proyek membutuhkan alat kelas laboratorium, tetapi semua proyek membutuhkan pemahaman tentang batas akurasi. Untuk edukasi dan pemantauan indikatif, sensor berbiaya rendah mungkin cukup. Untuk keputusan regulatif, kesehatan, atau keselamatan, sensor dan metode pengukuran harus mengikuti standar yang relevan. Perbedaan ini harus dijelaskan kepada pengguna agar data tidak digunakan melampaui kemampuannya.

Prinsip ketiga adalah stabilitas daya dan jaringan. Banyak sistem IoT berhenti bekerja karena masalah sederhana: adaptor tidak stabil, kabel longgar, baterai habis, atau sinyal lemah. Karena itu, desain catu daya, perlindungan perangkat, dan strategi koneksi harus diperhatikan sejak awal. Perangkat luar ruangan membutuhkan perlindungan dari air, debu, panas, dan gangguan fisik.

Prinsip keempat adalah keamanan dasar. Sistem IoT yang terhubung ke jaringan perlu menggunakan kredensial yang tidak mudah ditebak, membatasi akses dashboard, dan menghindari penggunaan kata sandi bawaan. MQTT sebagai salah satu protokol yang banyak digunakan dalam komunikasi IoT dirancang sebagai protokol publish-subscribe yang ringan untuk komunikasi machine-to-machine dan IoT [14]. Namun, penggunaan protokol apa pun tetap memerlukan konfigurasi keamanan yang benar, termasuk autentikasi, pengaturan akses, dan perlindungan koneksi sesuai kebutuhan sistem.

Prinsip kelima adalah dokumentasi. Dokumentasi sering dianggap pekerjaan tambahan, padahal ia menentukan apakah sistem dapat diperbaiki, direplikasi, atau dikembangkan. Dokumentasi minimal perlu mencakup tujuan proyek, daftar komponen, diagram rangkaian, konfigurasi perangkat, struktur data, lokasi sensor, prosedur pemasangan, jadwal perawatan, dan catatan masalah. Tanpa dokumentasi, proyek mudah bergantung pada satu orang dan sulit diteruskan.

Tabel 2. 4 Prinsip desain sistem IoT lingkungan yang andal

Prinsip desain	Pertanyaan pengarah	Contoh penerapan
Sesuai tujuan	Masalah apa yang ingin dipantau?	Sensor dipilih setelah parameter lingkungan ditentukan
Akurasi cukup	Seberapa tepat data harus dibaca?	Sensor edukatif dibedakan dari sensor untuk keputusan resmi
Hemat daya	Apakah perangkat selalu mendapat listrik?	Mode tidur digunakan pada node sensor berbaterai
Koneksi stabil	Bagaimana jika jaringan terputus?	Data diberi timestamp dan disimpan sementara
Mudah dirawat	Siapa yang akan membersihkan dan	Sensor dipasang pada posisi yang mudah

	memeriksa perangkat?	dijangkau
Aman	Siapa yang boleh mengakses data dan perangkat?	Dashboard diberi autentikasi dan kredensial diganti
Terdokumentasi	Apakah orang lain dapat memahami sistem ini?	Diagram rangkaian dan konfigurasi disimpan rapi

2.6 Ilustrasi Penerapan: Sistem Suhu dan Kelembapan Ruang Kompos

Untuk memperjelas hubungan antara komponen, bayangkan sebuah proyek sederhana di komunitas urban farming. Komunitas tersebut mengelola ruang kompos, tetapi sering kesulitan mengetahui apakah kondisi kompos terlalu kering, terlalu basah, terlalu dingin, atau terlalu panas. Pengamatan manual dilakukan, tetapi tidak konsisten. Mereka ingin membuat sistem pemantauan sederhana yang dapat menampilkan suhu dan kelembapan secara berkala.

Masalah proyek adalah kurangnya informasi kondisi ruang kompos. Parameter yang dipilih adalah suhu dan kelembapan. Sensor dipasang di lokasi yang mewakili kondisi ruang. Mikrokontroler membaca data setiap lima menit. Data dikirim melalui Wi-Fi ke platform sederhana. Dashboard menampilkan nilai terkini dan grafik harian. Pengelola menggunakan informasi tersebut untuk menentukan apakah kompos perlu diaduk, diberi air, atau diperiksa secara manual.

Dalam proyek ini, arsitektur IoT dapat dibuat sederhana. Sensor membaca data. ESP32 mengolah dan mengirim data. Wi-Fi menjadi jaringan komunikasi. Platform menyimpan data. Dashboard menampilkan grafik. Pengguna melakukan tindakan. Tidak ada aktuator otomatis pada tahap awal karena komunitas ingin memahami pola terlebih dahulu. Keputusan ini tepat karena proyek pemula sebaiknya dimulai dari pemantauan sebelum masuk ke otomatisasi.

Tabel 2. 5 Contoh rancangan awal proyek pemantauan ruang kompos

Elemen rancangan	Keputusan desain	Alasan
Masalah	Kondisi ruang kompos tidak terpantau rutin	Pengamatan manual tidak konsisten
Parameter	Suhu dan kelembapan	Keduanya mudah dipahami pengguna awal
Perangkat	Sensor suhu-kelembapan dan ESP32	Mendukung pembacaan sensor dan koneksi Wi-Fi
Interval data	Setiap lima menit	Cukup untuk melihat tren tanpa membebani sistem
Platform	Dashboard sederhana berbasis cloud atau server lokal	Memudahkan pemantauan jarak jauh
Tindakan	Pemeriksaan manual, penambahan air, pengadukan	Menghindari otomatisasi terlalu dini
Evaluasi	Kelengkapan data, stabilitas perangkat, kemudahan pembacaan dashboard	Menilai apakah sistem benar-benar membantu pengguna

Contoh ini menunjukkan bahwa proyek IoT yang baik tidak harus langsung kompleks. Yang penting adalah alur berpikirnya benar. Masalah didefinisikan, parameter dipilih, perangkat disesuaikan, data ditampilkan, tindakan ditentukan, dan evaluasi dilakukan.

2.7 Latihan Akhir Bab

Latihan pada akhir bab ini bertujuan membantu pembaca mengubah pemahaman arsitektur menjadi rancangan awal. Pilih satu kasus lingkungan di sekitar Anda. Kasus tersebut dapat berupa pemantauan kualitas udara ruang, pemantauan kolam ikan,

kelembapan tanah tanaman, konsumsi energi ruang kerja, atau volume tempat sampah. Setelah itu, susun rancangan arsitektur sistem IoT menggunakan template berikut.

Tabel 2. 6 Template rancangan arsitektur IoT lingkungan

Komponen rancangan	Jawaban pembaca
Masalah lingkungan yang dipilih	
Tujuan pemantauan	
Parameter yang akan diukur	
Sensor yang mungkin digunakan	
Perangkat pemroses yang dipilih	
Jenis koneksi yang digunakan	
Platform penyimpanan data	
Bentuk dashboard atau laporan	
Pengguna utama	
Tindakan yang mungkin dilakukan berdasarkan data	
Risiko teknis utama	
Cara mengurangi risiko	

Setelah tabel diisi, gambar arsitektur sederhana yang menunjukkan hubungan antara lingkungan fisik, sensor, perangkat pemroses, jaringan, platform, dashboard, dan pengguna. Gambar tidak harus rumit. Yang penting adalah alurnya jelas dan dapat dijelaskan kepada orang lain.

Kesimpulan Bab

Fondasi teknologi IoT untuk aplikasi lingkungan terdiri atas arsitektur sistem, sensor, aktuator, mikrokontroler, jaringan, platform data, dashboard, pengguna, dan tindakan. Setiap komponen memiliki peran yang berbeda, tetapi semuanya saling bergantung. Sensor menghasilkan data, mikrokontroler memproses data, jaringan mengirim data, platform menyimpan data, dashboard menampilkan informasi, dan pengguna mengambil keputusan.

Bab ini menekankan bahwa sistem IoT harus dirancang dari masalah, bukan dari perangkat. Pilihan sensor, mikrokontroler, jaringan, dan platform harus mengikuti tujuan proyek, kondisi lapangan, kemampuan pengguna, serta kebutuhan perawatan. Data menjadi inti sistem, sehingga kualitas, struktur, waktu, satuan, dan konteks data harus diperhatikan sejak awal.

Pada bab berikutnya, pembahasan akan masuk lebih khusus pada sensor lingkungan dan prinsip pengukuran. Fokusnya adalah bagaimana memilih sensor, memahami keterbatasannya, melakukan kalibrasi awal, dan menempatkan sensor agar data yang diperoleh lebih dapat dipercaya.

BAB 3

Sensor Lingkungan dan Prinsip Pengukuran

Sensor adalah pintu masuk utama data dalam sistem Internet of Things untuk lingkungan. Tanpa sensor, sistem IoT tidak memiliki cara untuk membaca kondisi fisik atau kimia di lapangan. Sensor membuat lingkungan yang sebelumnya hanya dapat dirasakan secara subjektif menjadi data yang dapat dicatat, dikirim, dibandingkan, dan dianalisis. Suhu yang terasa panas dapat diubah menjadi angka dalam derajat Celsius. Air yang tampak keruh dapat diukur sebagai tingkat kekeruhan. Tanah yang terlihat kering dapat dipantau melalui nilai kelembapan. Udara yang terasa tidak nyaman dapat diamati melalui parameter tertentu seperti partikulat, suhu, dan kelembapan. Namun, sensor tidak boleh dipahami sebagai alat yang selalu benar. Sensor menghasilkan estimasi berdasarkan prinsip kerja tertentu, kualitas komponen, cara pemasangan, kondisi lingkungan, dan prosedur kalibrasi. Dua sensor dengan model yang sama pun dapat memberikan hasil berbeda jika ditempatkan pada posisi berbeda, terkena aliran udara berbeda, atau belum dikalibrasi dengan cara yang sama. Karena itu, penggunaan sensor lingkungan membutuhkan sikap kritis.

Bab ini membahas cara memahami, memilih, dan menggunakan sensor lingkungan secara lebih bertanggung jawab. Pembahasan dimulai dari fungsi sensor sebagai jembatan antara lingkungan dan data, dilanjutkan dengan sensor kualitas udara, sensor kualitas air, sensor tanah, sensor cuaca mikro, dan sensor energi. Bagian akhir bab membahas kalibrasi, validasi, penempatan sensor, serta studi kasus tentang mengapa dua sensor udara dapat menghasilkan nilai berbeda di lokasi yang sama.

3.1 Sensor sebagai Jembatan antara Lingkungan dan Data

Sensor bekerja dengan mengubah kondisi fisik atau kimia menjadi sinyal yang dapat dibaca oleh perangkat elektronik. Sinyal tersebut dapat berupa tegangan analog, pulsa digital, data serial, atau paket data melalui antarmuka tertentu. Mikrokontroler kemudian

membaca sinyal tersebut dan mengubahnya menjadi nilai yang dapat ditampilkan atau dikirim ke platform IoT.

Dalam konteks lingkungan, sensor dapat membaca berbagai parameter. Sensor suhu membaca perubahan temperatur. Sensor kelembapan membaca kandungan uap air di udara atau kadar air pada media tertentu. Sensor cahaya membaca intensitas pencahayaan. Sensor pH membaca tingkat keasaman atau kebasaan larutan. Sensor turbidity membaca tingkat kekeruhan air. Sensor arus dan tegangan membaca konsumsi energi. Setiap sensor memiliki prinsip kerja, batas pengukuran, sensitivitas, dan keterbatasan yang berbeda.

Hal yang perlu ditekankan sejak awal adalah bahwa nilai sensor bukan kebenaran mutlak. Nilai sensor adalah hasil pembacaan alat dalam kondisi tertentu. Hasil ini dapat dipengaruhi oleh kualitas sensor, umur sensor, posisi pemasangan, suhu sekitar, kelembapan, getaran, debu, aliran udara, cahaya matahari langsung, kontaminasi, gangguan listrik, serta cara data diproses. Dalam panduan sensor udara, U.S. Environmental Protection Agency menekankan pentingnya perencanaan pemantauan, pemilihan sensor, penempatan lokasi, kolokasi, koreksi data, dan quality assurance/quality control agar data sensor dapat digunakan secara lebih tepat [15].

Karena itu, proyek IoT lingkungan perlu membedakan antara pengukuran indikatif dan pengukuran referensi. Pengukuran indikatif biasanya digunakan untuk edukasi, pemantauan awal, pemetaan kasar, atau deteksi pola. Pengukuran referensi digunakan untuk keputusan yang menuntut akurasi lebih tinggi, misalnya keputusan regulatif, evaluasi kepatuhan, atau kajian ilmiah formal. Sensor berbiaya rendah dapat bermanfaat untuk memperluas pemantauan, tetapi tidak otomatis setara dengan alat referensi.

Dalam praktik, sensor harus dipahami sebagai bagian dari sistem pengukuran, bukan perangkat tunggal yang berdiri sendiri. Sistem pengukuran mencakup sensor, perangkat pembaca, catu daya, casing, lokasi pemasangan, interval pembacaan, metode kalibrasi, metode penyimpanan data, dan cara interpretasi. Kesalahan pada salah satu bagian dapat memengaruhi kualitas data.

Tabel 3. 1 Faktor yang memengaruhi hasil pembacaan sensor lingkungan

Faktor	Contoh pengaruh	Dampak terhadap data	Cara mengurangi risiko
Kualitas sensor	Sensor murah memiliki variasi antarunit	Data antarperangkat tidak seragam	Uji beberapa sensor sebelum dipasang
Posisi pemasangan	Sensor udara terlalu dekat dinding atau sumber panas	Data tidak mewakili kondisi ruang	Ikuti pedoman penempatan dan dokumentasikan lokasi
Suhu dan kelembapan	Sensor gas atau partikulat dapat dipengaruhi kelembapan	Pembacaan berubah bukan karena polutan utama	Catat parameter pendukung seperti suhu dan kelembapan
Kontaminasi	Sensor air tertutup lumut atau sedimen	Pembacaan menjadi tidak stabil	Bersihkan sensor secara berkala
Catu daya	Tegangan tidak stabil	Sensor gagal terbaca atau data meloncat	Gunakan sumber daya yang sesuai dan stabil
Kalibrasi	Sensor belum dikalibrasi	Nilai sulit dipercaya	Lakukan kalibrasi awal dan pemeriksaan berkala
Pemrosesan data	Konversi satuan salah	Informasi yang ditampilkan menyesatkan	Periksa rumus, satuan, dan dokumentasi kode

3.2 Sensor Kualitas Udara

Sensor kualitas udara digunakan untuk membaca parameter yang berkaitan dengan kondisi udara. Parameter yang umum dibahas dalam pemantauan udara meliputi particulate matter atau partikulat, gas tertentu, suhu, kelembapan, tekanan udara, dan kadang parameter pendukung lain. Dalam konteks kesehatan dan lingkungan, WHO Global Air Quality Guidelines 2021 membahas polutan seperti PM_{2.5}, PM₁₀, ozon, nitrogen dioksida, sulfur dioksida, dan karbon monoksida sebagai bagian dari rekomendasi kualitas udara berbasis bukti [16]. Jika buku ini menyebut ambang batas kualitas udara, angka tersebut harus dirujuk pada pedoman resmi atau regulasi yang berlaku di wilayah penggunaan.

Sensor partikulat banyak digunakan dalam proyek IoT lingkungan karena dapat memberi gambaran awal tentang konsentrasi partikel di udara. Prinsip umum sensor partikulat optik adalah mendeteksi hamburan cahaya oleh partikel yang melewati ruang sensor. Sensor kemudian memperkirakan konsentrasi partikel berdasarkan sinyal optik. Prinsip ini berguna untuk pemantauan indikatif, tetapi hasilnya dapat dipengaruhi oleh ukuran partikel, komposisi partikel, kelembapan, aliran udara, dan algoritma internal sensor.

Sensor gas juga banyak digunakan, tetapi perlu dipahami dengan hati-hati. Beberapa sensor gas berbiaya rendah menggunakan prinsip elektrokimia, metal oxide semiconductor, atau prinsip lain. Sensor gas dapat dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, gas lain yang mengganggu, umur sensor, dan kebutuhan pemanasan. Karena itu, hasil sensor gas murah sering lebih tepat dipakai sebagai indikator perubahan relatif daripada angka absolut untuk keputusan resmi, kecuali telah diuji dan dikalibrasi dengan metode yang sesuai.

Suhu dan kelembapan sering dipasang bersama sensor udara karena keduanya memengaruhi kenyamanan, kualitas pembacaan sensor, dan interpretasi data. Di ruang tertutup, suhu dan kelembapan juga membantu memahami konteks ventilasi. Misalnya, peningkatan kelembapan dapat terjadi karena aktivitas manusia, ventilasi buruk, proses memasak, atau kondisi cuaca luar. Namun, suhu dan kelembapan tidak boleh langsung disamakan dengan kualitas udara secara keseluruhan. Keduanya adalah parameter pendukung.

U.S. EPA menyatakan bahwa sensor udara berbiaya lebih rendah, portabel, dan mudah digunakan telah banyak dimanfaatkan untuk memahami kondisi kualitas udara, tetapi pengguna tetap perlu memahami performa, operasi, dan penerapan sensor tersebut [17]. Ini berarti proyek IoT kualitas udara sebaiknya tidak hanya memasang sensor, tetapi juga menyusun rencana pemantauan. Rencana tersebut perlu menjawab tujuan pengukuran, lokasi pemasangan, durasi pengukuran, frekuensi pembacaan, cara validasi, dan cara komunikasi hasil.

Tabel 3. 2 Parameter kualitas udara dan catatan penggunaannya dalam proyek IoT

Parameter	Fungsi pemantauan	Contoh sensor atau pendekatan	Keterbatasan utama	Kebutuhan kalibrasi atau validasi
PM2.5 dan PM10	Memantau partikulat halus dan kasar	Sensor partikulat optik	Dipengaruhi kelembapan, jenis partikel, dan aliran udara	Kolokasi dengan alat referensi atau pembanding yang lebih andal
CO2	Indikator ventilasi ruang tertutup	Sensor NDIR CO2	Tidak langsung menunjukkan seluruh kualitas udara	Pemeriksaan berkala dan validasi pada udara luar atau gas standar jika tersedia
CO	Indikator gas berbahaya dari pembakaran tidak	Sensor elektrokimia atau sensor gas lain	Perlu akurasi tinggi untuk keselamatan	Harus mengikuti standar keselamatan dan alat terkalibrasi

	sempurna			
NO ₂ , SO ₂ , O ₃	Polutan udara luar tertentu	Sensor elektrokimia atau instrumen referensi	Interferensi antar-gas dan pengaruh cuaca	Perlu kalibrasi dan validasi kuat
Suhu dan kelembapan	Parameter pendukung dan kenyamanan	Sensor digital suhu-kelembapan	Posisi sensor sangat memengaruhi hasil	Bandingkan dengan termohigrometer referensi

Dalam buku ini, pembahasan sensor kualitas udara sebaiknya diarahkan untuk penggunaan edukatif, pemantauan awal, dan dukungan pengambilan keputusan lokal. Jika data akan digunakan untuk klaim kesehatan, kepatuhan hukum, atau pelaporan resmi, maka perangkat, metode, dan prosedur validasi harus mengikuti pedoman lembaga yang berwenang.

3.3 Sensor Kualitas Air

Sensor kualitas air digunakan untuk membaca kondisi fisik dan kimia air. Parameter yang sering digunakan dalam proyek IoT meliputi pH, suhu air, kekeruhan, total dissolved solids atau TDS, konduktivitas listrik, dan dissolved oxygen atau oksigen terlarut. Setiap parameter memiliki makna yang berbeda, sehingga pengguna tidak boleh menafsirkan satu parameter sebagai gambaran lengkap kualitas air.

pH menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan air. Nilai pH dapat berubah karena proses alami, aktivitas biologis, limbah, bahan kimia, atau perubahan kondisi lingkungan. Sensor pH umumnya membutuhkan kalibrasi dengan larutan buffer standar. Tanpa kalibrasi, nilai pH dapat bergeser dan menyesatkan. Sensor pH juga perlu dirawat karena elektroda dapat kotor, mengering, atau menurun performanya.

Turbidity atau kekeruhan menunjukkan seberapa banyak partikel tersuspensi yang memengaruhi kejernihan air. Air keruh dapat terjadi karena sedimen, alga, bahan organik, atau gangguan fisik

pada badan air. Sensor turbidity pada proyek IoT sederhana dapat membantu mendeteksi perubahan, tetapi pembacaan perlu divalidasi jika digunakan untuk keputusan penting. Suhu air memengaruhi proses biologis dan juga memengaruhi parameter lain seperti oksigen terlarut.

TDS dan konduktivitas sering digunakan untuk memperkirakan kandungan ion terlarut dalam air. Konduktivitas mengukur kemampuan air menghantarkan listrik, sedangkan TDS sering dihitung melalui hubungan empiris dari konduktivitas. Karena hubungan ini dipengaruhi oleh jenis ion dalam air, nilai TDS dari sensor sederhana harus dibaca secara hati-hati. Dissolved oxygen atau DO penting untuk memahami kondisi ekosistem perairan, terutama bagi ikan dan organisme air. Pengukuran DO memerlukan sensor yang sesuai dan prosedur perawatan yang lebih serius dibanding beberapa sensor sederhana lain.

USGS National Field Manual menjelaskan prosedur dan panduan untuk pengumpulan data kualitas air, termasuk pengukuran suhu, dissolved oxygen, specific electrical conductance, pH, oxidation-reduction potential, alkalinity, dan turbidity [18]. Manual tersebut menekankan pentingnya standarisasi prosedur agar data kualitas air memiliki tingkat keandalan yang lebih baik. Dalam konteks buku ini, prinsipnya adalah bahwa pengukuran air tidak hanya soal mencelupkan sensor ke air, tetapi juga memahami prosedur, kalibrasi, kondisi lapangan, dan dokumentasi.

Tabel 3. 3 Parameter kualitas air, fungsi, dan catatan kehati-hatian

Parameter	Makna umum	Contoh penggunaan	Catatan kehati-hatian
pH	Tingkat asam atau basa	Kolam ikan, akuaponik, sungai kecil	Wajib dikalibrasi dengan larutan buffer untuk hasil yang lebih dapat dipercaya
Suhu air	Kondisi termal	Kolam,	Memengaruhi

	air	sungai, reservoir	reaksi kimia dan kondisi biologis
Turbidity	Tingkat kekeruhan	Deteksi sedimen atau perubahan kejernihan	Tidak selalu menunjukkan jenis pencemar
TDS	Perkiraan zat terlarut total	Air irigasi, akuaponik, hidroponik	Sering dihitung dari konduktivitas dan bergantung komposisi ion
Konduktivitas	Kemampuan air menghantarkan listrik	Pemantauan perubahan kandungan ion	Perlu kompensasi suhu dan interpretasi kontekstual
Dissolved oxygen	Oksigen terlarut dalam air	Kolam ikan dan ekosistem perairan	Sensor perlu perawatan dan kalibrasi lebih ketat

Proyek IoT kualitas air sebaiknya dimulai dari tujuan yang jelas. Jika tujuannya adalah edukasi, sensor sederhana dapat digunakan untuk memahami pola perubahan. Jika tujuannya adalah mendukung manajemen kolam ikan, sensor perlu dikalibrasi dan dibandingkan dengan alat pembanding yang lebih andal. Jika tujuannya adalah pelaporan kualitas air untuk kepatuhan regulasi, maka metode pengukuran harus mengikuti standar resmi dan tidak cukup mengandalkan sensor murah tanpa validasi.

Penempatan sensor air juga memerlukan perhatian. Sensor yang terlalu dekat permukaan mungkin tidak mewakili kondisi air secara keseluruhan. Sensor yang terlalu dekat dasar dapat terkena sedimen. Sensor yang dipasang di lokasi aliran deras dapat bergerak atau rusak. Sensor yang dibiarkan terlalu lama dapat tertutup lumut, biofilm, atau kotoran. Semua kondisi ini harus dicatat dalam dokumentasi proyek.

3.4 Sensor Tanah, Cuaca Mikro, dan Energi

Selain udara dan air, aplikasi IoT lingkungan juga banyak digunakan untuk memantau tanah, cuaca mikro, dan energi. Tiga area ini sering muncul dalam proyek pertanian cerdas, taman kota, rumah kaca, bangunan hemat energi, dan pengelolaan ruang publik.

Sensor tanah yang paling umum digunakan dalam proyek sederhana adalah sensor kelembapan tanah. Sensor ini membantu pengguna memahami kondisi air di sekitar akar tanaman. Ada sensor resistif dan kapasitif. Sensor resistif cenderung lebih murah, tetapi lebih rentan terhadap korosi karena arus listrik melewati media tanah. Sensor kapasitif umumnya lebih tahan, tetapi tetap memerlukan kalibrasi karena hasil pembacaan dipengaruhi jenis tanah, kepadatan tanah, salinitas, suhu, dan kedalaman pemasangan. Kajian terbaru tentang sensor kelembapan tanah berbiaya rendah menunjukkan bahwa variasi sensor, kalibrasi lapangan, dan posisi pemasangan dapat memengaruhi hasil pembacaan secara signifikan [19].

Sensor cuaca mikro digunakan untuk membaca kondisi lingkungan pada skala lokal. Parameter yang umum dipantau adalah suhu udara, kelembapan udara, tekanan udara, curah hujan, intensitas cahaya, arah angin, dan kecepatan angin. Data cuaca mikro berguna karena kondisi di satu lokasi kecil dapat berbeda dari data stasiun cuaca resmi yang jaraknya jauh. Misalnya, suhu di rumah kaca, taman kota, atap bangunan, dan lahan terbuka dapat berbeda meskipun berada dalam satu wilayah administratif.

Sensor intensitas cahaya dapat digunakan untuk memahami paparan matahari pada tanaman atau panel surya. Sensor curah hujan dapat membantu pengambilan keputusan irigasi. Sensor kecepatan angin dapat digunakan untuk konteks rumah kaca, stasiun cuaca mini, atau pemantauan lingkungan terbuka. Namun, sensor cuaca mikro perlu ditempatkan dengan hati-hati. Sensor suhu yang terkena matahari langsung dapat membaca nilai terlalu tinggi. Sensor hujan yang terhalang atap atau pohon tidak mewakili curah hujan sebenarnya. Anemometer yang terlalu rendah atau terhalang bangunan dapat membaca kecepatan angin lebih rendah dari kondisi terbuka.

Sensor energi digunakan untuk memantau penggunaan listrik, arus, tegangan, daya, dan kadang faktor daya. Dalam konteks lingkungan

berkelanjutan, sensor energi dapat membantu pengguna memahami pola konsumsi, mendeteksi pemborosan, dan mengevaluasi penghematan. Misalnya, dashboard energi dapat menunjukkan kapan beban listrik tertinggi terjadi, perangkat apa yang sering menyala, atau apakah sistem tenaga surya menghasilkan daya sesuai harapan. Akan tetapi, pengukuran energi melibatkan risiko keselamatan listrik. Pemasangan sensor pada sistem listrik rumah atau bangunan harus dilakukan dengan prosedur aman dan, bila perlu, oleh teknisi yang kompeten.

Tabel 3. 4 Sensor tanah, cuaca mikro, dan energi dalam aplikasi lingkungan

Kategori	Parameter	Contoh aplikasi	Catatan teknis
Tanah	Kelembapan tanah	Irigasi cerdas, pertanian kota, rumah kaca	Dipengaruhi jenis tanah, kedalaman, salinitas, dan kalibrasi
Tanah	Suhu tanah	Pemantauan kondisi akar dan media tanam	Perlu posisi pemasangan yang konsisten
Cuaca mikro	Suhu dan kelembapan udara	Rumah kaca, taman kota, ruang kompos	Hindari paparan matahari langsung tanpa pelindung radiasi
Cuaca mikro	Curah hujan	Irigasi dan peringatan limpasan	Sensor harus bebas dari penghalang
Cuaca mikro	Intensitas cahaya	Pertanian, panel surya, ruang terbuka	Orientasi sensor memengaruhi pembacaan
Cuaca mikro	Kecepatan dan arah angin	Stasiun cuaca mini, rumah kaca	Perlu ketinggian dan lokasi pemasangan yang representatif
Energi	Arus,	Dashboard	Perlu

	tegangan, daya	energi bangunan atau sistem surya	memperhatikan keselamatan listrik
--	-------------------	---	--------------------------------------

Dalam proyek pertanian, sensor tanah dan cuaca mikro sebaiknya digunakan bersama. Kelembapan tanah saja tidak selalu cukup untuk menentukan kebutuhan air. Kondisi cuaca, jenis tanaman, fase pertumbuhan, jenis tanah, dan metode irigasi juga berpengaruh. FAO menekankan pentingnya pengukuran lapangan dalam evaluasi irigasi, termasuk pengamatan kondisi fisik dan kebutuhan air sebagai bagian dari penilaian sistem irigasi [20]. Dengan demikian, IoT dapat membantu pengamatan, tetapi keputusan irigasi tetap perlu mempertimbangkan konteks agronomis.

3.5 Kalibrasi, Validasi, dan Penempatan Sensor

Kalibrasi adalah proses menyesuaikan atau memeriksa pembacaan sensor dengan standar atau acuan yang diketahui. Validasi adalah proses menilai apakah data sensor cukup dapat dipercaya untuk tujuan tertentu. Penempatan sensor adalah keputusan tentang lokasi, posisi, orientasi, dan kondisi pemasangan sensor. Ketiganya menentukan kualitas data.

Kalibrasi dapat dilakukan dengan berbagai tingkat ketelitian. Untuk sensor pH, kalibrasi dapat menggunakan larutan buffer dengan nilai pH tertentu. Untuk sensor suhu, pembacaan dapat dibandingkan dengan termometer referensi. Untuk sensor kelembapan, dapat dibandingkan dengan alat pembanding yang lebih andal atau prosedur uji yang terdokumentasi. Untuk sensor partikulat, salah satu pendekatan yang sering digunakan adalah kolokasi, yaitu menempatkan sensor berbiaya rendah di dekat instrumen referensi atau perangkat pembanding untuk melihat hubungan pembacaan. Panduan EPA membahas kolokasi dan koreksi data sebagai bagian dari praktik penggunaan sensor udara [15].

Validasi tidak selalu berarti membuat sensor menjadi sempurna. Validasi berarti memahami apakah data cukup baik untuk tujuan proyek. Untuk proyek edukasi, validasi sederhana mungkin cukup. Untuk proyek manajemen operasional, validasi harus lebih ketat. Untuk keputusan regulatif atau kesehatan, validasi harus mengikuti

standar resmi. Karena itu, pertanyaan penting bukan hanya “apakah sensor ini akurat?”, tetapi “apakah sensor ini cukup sesuai untuk keputusan yang akan dibuat?”

Penempatan sensor sering menjadi sumber kesalahan yang tidak disadari. Sensor udara yang dipasang dekat jendela, kipas, sumber panas, jalan, atau dinding dapat membaca kondisi yang sangat lokal. Sensor suhu yang terkena matahari langsung dapat membaca suhu lebih tinggi daripada udara sekitar. Sensor air yang diletakkan dekat inlet atau outlet dapat membaca kondisi aliran tertentu, bukan kondisi rata-rata kolam. Sensor tanah yang dipasang terlalu dangkal atau terlalu dalam dapat menghasilkan interpretasi yang berbeda tentang kebutuhan air tanaman.

Pencatatan kondisi pengukuran juga penting. Setiap data sebaiknya dapat ditelusuri kembali ke informasi dasar: sensor apa yang digunakan, kapan dipasang, di mana posisinya, bagaimana cara kalibrasinya, berapa interval pembacaannya, dan apakah ada peristiwa khusus saat data dikumpulkan. Tanpa catatan ini, data historis sulit dianalisis.

Tabel 3. 5 Checklist kalibrasi, validasi, dan penempatan sensor

Aspek	Pertanyaan pemeriksaan	Catatan tindakan
Tujuan pengukuran	Untuk edukasi, operasional, penelitian, atau kepatuhan?	Tingkat validasi mengikuti tujuan
Acuan pembandingan	Apakah ada alat referensi atau standar pembandingan?	Gunakan alat yang lebih andal bila tersedia
Kalibrasi awal	Apakah sensor diperiksa sebelum dipasang?	Catat tanggal dan metode kalibrasi
Penempatan	Apakah posisi sensor mewakili kondisi yang ingin dipantau?	Hindari lokasi bias seperti sumber panas atau aliran langsung
Kondisi lingkungan	Apakah suhu, kelembapan, cahaya, atau kontaminasi memengaruhi	Catat parameter pendukung

	sensor?	
Interval pembacaan	Seberapa sering sensor membaca data?	Sesuaikan dengan dinamika parameter
Perawatan	Apakah sensor perlu dibersihkan atau diganti?	Buat jadwal pemeriksaan rutin
Dokumentasi	Apakah konfigurasi dan lokasi sensor dicatat?	Simpan diagram, foto lokasi, dan catatan teknis

Kalibrasi dan validasi juga harus dipahami sebagai proses berulang. Sensor yang baik pada minggu pertama belum tentu tetap baik setelah beberapa bulan. Sensor luar ruangan dapat mengalami perubahan karena panas, hujan, debu, serangga, karat, atau gangguan fisik. Sensor air dapat tertutup biofilm. Sensor tanah dapat berubah responsnya karena perubahan salinitas atau kepadatan tanah. Karena itu, proyek IoT lingkungan perlu memiliki jadwal pemeriksaan, bukan hanya jadwal pemasangan.

3.6 Studi Kasus: Mengapa Dua Sensor Udara Memberi Hasil Berbeda di Lokasi yang Sama

Sebuah komunitas memasang dua sensor kualitas udara di halaman sekolah. Kedua sensor memiliki model yang sama dan dipasang pada hari yang sama. Setelah beberapa jam, dashboard menunjukkan hasil yang berbeda. Sensor pertama membaca nilai partikulat lebih tinggi dibanding sensor kedua. Pengguna mulai bertanya apakah salah satu sensor rusak.

Perbedaan hasil seperti ini tidak selalu berarti sensor rusak. Ada beberapa kemungkinan penyebab. Sensor pertama mungkin dipasang lebih dekat ke jalan atau area parkir. Sensor kedua mungkin lebih terlindung dari aliran udara. Salah satu sensor mungkin terkena sinar matahari langsung sehingga suhu internalnya berbeda. Kelembapan lokal dapat memengaruhi pembacaan sensor partikulat. Debu atau serangga kecil dapat masuk ke jalur aliran udara sensor. Selain itu, variasi produksi antarunit juga dapat membuat dua sensor memiliki respons yang tidak identik.

Langkah pertama yang sebaiknya dilakukan adalah memeriksa posisi pemasangan. Apakah kedua sensor berada pada ketinggian

yang sama? Apakah jaraknya terlalu jauh? Apakah salah satu sensor dekat sumber polusi lokal? Apakah ada penghalang seperti tembok, tanaman, kendaraan, atau ventilasi? Langkah kedua adalah melakukan uji kolokasi. Kedua sensor ditempatkan berdampingan dalam kondisi yang sama selama periode tertentu. Jika hasilnya tetap berbeda secara konsisten, pengguna dapat membuat koreksi sederhana atau memilih salah satu sensor sebagai pembanding internal. Jika perbedaannya acak dan ekstrem, sensor atau sistem pembacaan perlu diperiksa.

Langkah ketiga adalah membandingkan data dengan informasi eksternal jika tersedia. Misalnya, data dari stasiun pemantauan resmi terdekat, alat referensi, atau perangkat lain yang lebih terkalibrasi. Namun, perbandingan harus dilakukan dengan hati-hati karena lokasi, ketinggian, dan jenis alat dapat berbeda. Tujuan perbandingan bukan mencari angka yang persis sama, melainkan memahami apakah pola yang terbaca masuk akal.

Studi kasus ini memperlihatkan prinsip penting: data sensor perlu ditafsirkan bersama konteks pemasangan. Jika dua sensor berbeda, jangan langsung memilih angka yang lebih disukai. Periksa lokasi, kondisi, kalibrasi, dan histori data. Perbedaan antar sensor dapat menjadi kesempatan untuk memperbaiki metode pemantauan.

Tabel 3. 6 Analisis penyebab perbedaan dua sensor udara

Kemungkinan penyebab	Indikasi	Cara pemeriksaan
Posisi berbeda	Sensor dekat jalan membaca lebih tinggi	Samakan lokasi dan ketinggian pemasangan
Aliran udara berbeda	Salah satu sensor dekat kipas, ventilasi, atau penghalang	Periksa kondisi fisik sekitar sensor
Kelembapan berbeda	Pembacaan naik saat kelembapan tinggi	Bandingkan dengan data kelembapan
Variasi antarunit	Selisih konsisten saat sensor berdampingan	Lakukan kolokasi beberapa hari

Debu atau kotoran	Data melonjak tidak wajar	Periksa dan bersihkan jalur sensor
Gangguan daya atau koneksi	Data hilang atau meloncat	Periksa log perangkat dan catu daya

3.7 Latihan Akhir Bab

Latihan pada bab ini bertujuan membantu pembaca memilih sensor secara lebih kritis. Pilih satu proyek lingkungan yang ingin dibuat, misalnya pemantauan kualitas udara ruang kelas, pemantauan kolam ikan, irigasi tanaman, stasiun cuaca mini, atau dashboard energi sederhana. Setelah itu, isi tabel berikut untuk menilai apakah sensor yang dipilih sesuai dengan tujuan proyek.

Tabel 3. 7 Template kriteria pemilihan sensor untuk proyek IoT lingkungan

Kriteria	Jawaban pembaca
Masalah lingkungan yang ingin dipantau	
Parameter yang perlu diukur	
Alasan memilih parameter tersebut	
Jenis sensor yang dipertimbangkan	
Rentang pengukuran yang dibutuhkan	
Tingkat akurasi yang diperlukan	
Apakah sensor perlu kalibrasi?	
Alat atau metode pembandingan yang tersedia	
Lokasi pemasangan sensor	
Risiko gangguan lingkungan	
Jadwal perawatan sensor	
Apakah data akan digunakan untuk edukasi, operasional, atau keputusan resmi?	

Setelah tabel diisi, pembaca perlu menuliskan satu paragraf singkat yang menjelaskan mengapa sensor tersebut dipilih dan apa keterbatasannya. Paragraf ini penting karena dalam proyek IoT, keputusan teknis harus dapat dijelaskan, bukan hanya mengikuti rekomendasi umum.

Kesimpulan Bab

Sensor adalah jembatan antara lingkungan fisik dan data digital. Dalam proyek IoT lingkungan, sensor memungkinkan kondisi udara, air, tanah, cuaca mikro, dan energi dibaca secara berkala. Namun, sensor tidak menghasilkan kebenaran mutlak. Sensor menghasilkan estimasi yang dipengaruhi oleh prinsip kerja, kualitas perangkat, cara pemasangan, kondisi lingkungan, kalibrasi, validasi, dan pemrosesan data.

Bab ini menekankan bahwa pemilihan sensor harus selalu dimulai dari tujuan proyek. Sensor kualitas udara perlu digunakan dengan memahami batas performa dan pedoman kualitas udara. Sensor kualitas air memerlukan kalibrasi dan prosedur lapangan yang hati-hati. Sensor tanah dan cuaca mikro harus ditempatkan sesuai kondisi lapangan. Sensor energi harus dipasang dengan memperhatikan keselamatan. Kalibrasi, validasi, dan dokumentasi menjadi bagian yang tidak dapat dipisahkan dari sistem IoT yang dapat dipercaya.

Pada bab berikutnya, pembahasan akan berlanjut ke konektivitas dan komunikasi data IoT. Setelah sensor menghasilkan data, pertanyaan berikutnya adalah bagaimana data tersebut dikirim secara andal dari lapangan menuju platform pemantauan.

BAB 4

Konektivitas dan Komunikasi Data IoT

Sensor yang baik belum cukup untuk membangun sistem Internet of Things yang berguna. Setelah sensor membaca kondisi lingkungan, data harus berpindah dari lokasi pengukuran menuju tempat penyimpanan, dashboard, atau sistem pengambilan keputusan. Perpindahan data inilah yang membuat konektivitas menjadi bagian penting dalam proyek IoT.

Dalam proyek lingkungan, konektivitas sering menjadi tantangan utama. Perangkat dapat dipasang di ruang kelas, kebun, rumah kaca, bantaran sungai, area parkir, atap bangunan, tempat sampah komunal, kolam ikan, atau lahan pertanian yang jauh dari jaringan internet. Kondisi lapangan seperti jarak, penghalang fisik, cuaca, ketersediaan listrik, dan biaya operasional sangat memengaruhi pilihan jaringan.

Bab ini membahas bagaimana data IoT bergerak dari sensor menuju platform pemantauan. Pembahasan dimulai dari alasan mengapa konektivitas menentukan keberhasilan proyek, kemudian dilanjutkan dengan perbandingan Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, dan seluler. Setelah itu, bab ini menjelaskan protokol komunikasi seperti HTTP, MQTT, dan CoAP, fungsi gateway, integrasi perangkat, serta strategi menghadapi koneksi yang tidak stabil.

Tujuan utama bab ini bukan membuat pembaca menjadi ahli jaringan komputer, melainkan membantu pembaca memilih konektivitas dan protokol secara rasional. Pilihan jaringan terbaik bukan selalu yang paling cepat, tetapi yang paling sesuai dengan lokasi, jenis data, kebutuhan daya, biaya, jangkauan, dan tujuan proyek.

4.1 Mengapa Konektivitas Menentukan Keberhasilan Proyek

Konektivitas menentukan apakah data dari sensor dapat sampai ke pengguna. Jika sensor berhasil membaca suhu, kelembapan, pH, atau partikulat, tetapi data tidak pernah terkirim, maka dashboard tidak dapat diperbarui. Jika data terlambat dikirim, peringatan bisa

terlambat. Jika koneksi sering putus, data menjadi berlubang dan sulit dianalisis. Karena itu, konektivitas bukan bagian tambahan, melainkan bagian inti dari sistem IoT.

Dalam proyek lingkungan, perangkat sering bekerja di lokasi yang tidak ideal. Sensor kualitas air dapat dipasang di tepi kolam atau sungai kecil. Sensor kelembapan tanah dapat dipasang di lahan pertanian yang jauh dari router Wi-Fi. Sensor tempat sampah dapat dipasang di area publik yang tidak memiliki sumber listrik tetap. Sensor cuaca mikro dapat ditempatkan di atap bangunan yang terkena panas dan hujan. Kondisi seperti ini membuat desain komunikasi data harus mempertimbangkan realitas lapangan.

Ada empat pertanyaan dasar yang perlu dijawab sebelum memilih konektivitas. Pertama, seberapa jauh perangkat dari titik akses jaringan? Kedua, seberapa sering data perlu dikirim? Ketiga, berapa besar data yang dikirim? Keempat, dari mana perangkat memperoleh daya? Jawaban terhadap empat pertanyaan ini biasanya lebih penting daripada merek perangkat yang digunakan.

Jika sensor berada di dalam gedung dan dekat dengan jaringan internet, Wi-Fi dapat menjadi pilihan praktis. Jika sensor hanya perlu dikonfigurasi dari jarak dekat, Bluetooth dapat digunakan. Jika sensor berada jauh di lahan pertanian dan hanya mengirim data kecil, LoRa atau LoRaWAN dapat dipertimbangkan. Jika sensor berada di lokasi luas yang memiliki cakupan operator seluler, koneksi seluler seperti 4G, LTE-M, atau NB-IoT dapat menjadi pilihan. Namun, setiap pilihan memiliki konsekuensi biaya, konsumsi daya, jangkauan, kompleksitas, dan regulasi.

Konektivitas juga memengaruhi desain data. Sistem yang memakai Wi-Fi dan listrik stabil dapat mengirim data lebih sering. Sistem berbaterai yang memakai jaringan jarak jauh mungkin harus mengirim data lebih jarang agar baterai tahan lama. Sistem yang mengirim data setiap lima detik membutuhkan jaringan dan daya yang berbeda dari sistem yang mengirim data setiap lima belas menit. Dengan demikian, interval pengiriman data harus mengikuti tujuan pemantauan dan kemampuan jaringan.

Tabel 4. 1 Hubungan kebutuhan proyek dengan pilihan konektivitas

Kebutuhan proyek	Implikasi teknis	Pilihan konektivitas yang mungkin
Sensor berada di dalam gedung dengan internet tersedia	Jarak pendek, daya relatif tersedia, data dapat dikirim sering	Wi-Fi atau Ethernet melalui gateway
Sensor hanya perlu dikonfigurasi dari ponsel	Komunikasi jarak dekat, data tidak selalu dikirim ke cloud	Bluetooth atau Bluetooth Low Energy
Sensor berada di lahan luas dan mengirim data kecil	Jarak jauh, konsumsi daya rendah, payload kecil	LoRa atau LoRaWAN
Sensor berada di lokasi terpencar dengan cakupan operator	Tidak bergantung pada router lokal, biaya kartu SIM atau layanan	Seluler, LTE-M, atau NB-IoT
Sensor harus tetap berjalan saat internet terputus	Perlu penyimpanan lokal dan pengiriman ulang	Gateway lokal, buffer data, atau edge device

4.2 Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, dan Seluler

Wi-Fi adalah pilihan populer dalam proyek IoT karena mudah ditemukan di rumah, sekolah, kampus, kantor, dan laboratorium. Wi-Fi sesuai untuk perangkat yang berada dalam jangkauan router dan memiliki sumber daya yang cukup. IEEE 802.11 adalah keluarga standar untuk wireless local area network atau WLAN, dan IEEE mencatat bahwa IEEE Std 802.11-2024 telah dipublikasikan sebagai revisi standar WLAN terbaru [21]. Dalam proyek IoT lingkungan, Wi-Fi cocok untuk pemantauan ruang kelas, ruang kompos, rumah kaca kecil, laboratorium, atau bangunan yang memiliki jaringan internet stabil.

Kelemahan Wi-Fi adalah konsumsi daya relatif lebih tinggi dibanding beberapa teknologi jarak jauh berdaya rendah. Wi-Fi juga

bergantung pada ketersediaan router dan kualitas sinyal. Di luar ruangan, sinyal Wi-Fi dapat melemah karena jarak, dinding, pohon, logam, atau interferensi. Karena itu, Wi-Fi sebaiknya dipilih jika lokasi pemasangan masih dapat dijangkau jaringan dengan stabil.

Bluetooth digunakan untuk komunikasi jarak dekat. Dalam konteks IoT, Bluetooth Low Energy atau BLE sering dipakai untuk perangkat berdaya rendah, konfigurasi perangkat dari ponsel, beacon, wearable, atau sensor yang tidak perlu selalu tersambung ke internet. Bluetooth SIG menerbitkan Bluetooth Core Specification sebagai dokumen teknis utama untuk teknologi Bluetooth; versi 5.4 merupakan salah satu versi spesifikasi resmi yang tersedia pada situs Bluetooth SIG [22]. Dalam proyek lingkungan, Bluetooth dapat digunakan untuk membaca data dari sensor lokal melalui ponsel, mengatur konfigurasi awal perangkat, atau menghubungkan node sensor ke gateway terdekat.

Keterbatasan Bluetooth adalah jangkauan yang relatif pendek dan kebutuhan perangkat perantara jika data harus dikirim ke cloud. Bluetooth tidak selalu cocok untuk sensor yang tersebar jauh, misalnya di sepanjang sungai atau lahan pertanian luas, kecuali dirancang dengan gateway atau mesh tertentu. Karena itu, Bluetooth lebih tepat dipahami sebagai konektivitas jarak dekat, bukan solusi utama untuk semua proyek IoT lingkungan.

LoRa adalah teknologi komunikasi nirkabel jarak jauh berdaya rendah. LoRa sering digunakan bersama LoRaWAN, yaitu protokol jaringan yang mengatur komunikasi antara perangkat akhir, gateway, network server, dan application server. LoRa Alliance menjelaskan bahwa LoRaWAN L2 1.0.4 adalah spesifikasi protokol jaringan yang dioptimalkan untuk perangkat akhir bertenaga baterai, baik bergerak maupun tetap [23]. Dalam proyek lingkungan, LoRaWAN cocok untuk sensor yang mengirim data kecil secara berkala, misalnya kelembapan tanah, tinggi air, suhu, atau status tempat sampah.

Keunggulan LoRaWAN adalah jangkauan yang relatif jauh dan konsumsi daya rendah. Namun, LoRaWAN tidak cocok untuk data besar atau komunikasi yang sangat sering. Payload biasanya kecil, laju data rendah, dan penggunaan kanal radio harus mengikuti

regulasi setempat. Di Indonesia atau wilayah lain, penggunaan frekuensi radio harus mengikuti ketentuan regulator yang berlaku [perlu referensi lokal]. Karena itu, sebelum menggunakan LoRaWAN secara luas, pengguna perlu memeriksa regulasi spektrum dan ketersediaan jaringan atau gateway.

Konektivitas seluler menggunakan jaringan operator telekomunikasi. Untuk IoT, pilihan dapat mencakup 2G, 4G, LTE-M, NB-IoT, atau teknologi seluler lain yang tersedia di wilayah tertentu. GSMA menjelaskan bahwa NB-IoT merupakan teknologi akses radio seluler yang distandarkan oleh 3GPP untuk memenuhi kebutuhan konektivitas low power wide area, dengan beberapa mode deployment seperti standalone, LTE guardband, dan LTE in-band [24]. Koneksi seluler berguna untuk perangkat yang tersebar luas dan tidak memiliki jaringan lokal. Contohnya adalah sensor kualitas air di lokasi terpencil, sensor banjir, sensor tempat sampah kota, atau stasiun cuaca kecil.

Kelemahan konektivitas seluler adalah biaya modul, konsumsi daya, kebutuhan kartu SIM atau layanan operator, kualitas cakupan, dan ketergantungan pada infrastruktur operator. Teknologi seperti NB-IoT dan LTE-M dapat lebih sesuai untuk data kecil dan perangkat berdaya rendah, tetapi ketersediaannya bergantung pada operator dan wilayah. Oleh karena itu, sebelum memilih konektivitas seluler, proyek harus memastikan cakupan jaringan, biaya paket data, dukungan perangkat, dan keberlanjutan layanan.

Tabel 4. 2 Perbandingan umum Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, dan seluler untuk proyek IoT lingkungan

Teknologi	Jangkauan umum	Konsumsi daya	Ukuran data	Kelebihan	Keterbatasan	Contoh penggunaan
Wi-Fi	Pendek sampai menengah, bergantung	Sedang sampai tinggi	Kecil sampai cukup	Mudah digunakan di gedung, akses	Bergantung router, kurang ideal untuk	Ruang kelas, laboratorium, rumah kaca

	router dan penghalang		besar	internet langsung	lokasi jauh berbaterai	kecil
Bluetooth/BLE	Pendek	Rendah	Kecil	Cocok untuk konfigurasi dan koneksi lokal	Perlu gateway untuk internet, jangkauan terbatas	Sensor lokal yang dibaca ponsel atau gateway
LoRaWAN	Jauh, bergantung gateway dan kondisi radio	Rendah	Kecil	Cocok untuk sensor tersebar dan data periodik	Tidak cocok untuk data besar, perlu gateway dan regulasi spektrum	Lahan pertanian, sungai kecil, tempat sampah kota
Seluler	Luas, bergantung cakupan operator	Sedang, dapat dioptimalkan	Kecil sampai sedang	Tidak perlu router lokal, cocok untuk lokasi terpencil	Perlu biaya layanan, modul, dan cakupan operator	Sensor banjir, kualitas air, stasiun cuaca terpencil

Tabel 4.2 perlu dibaca sebagai panduan umum, bukan angka mutlak. Jangkauan, konsumsi daya, dan biaya sangat dipengaruhi perangkat, antena, kondisi fisik, konfigurasi, regulasi, dan layanan jaringan. Untuk buku atau proyek yang memerlukan angka teknis spesifik,

data harus diambil dari datasheet perangkat, standar resmi, hasil pengujian lapangan, atau dokumen regulator [perlu referensi].

4.3 Protokol Komunikasi: HTTP, MQTT, dan CoAP

Selain konektivitas fisik atau jaringan, sistem IoT membutuhkan protokol komunikasi. Jika konektivitas adalah jalannya, protokol adalah aturan percakapannya. Protokol menentukan bagaimana data dikirim, diterima, diberi format, dan dipahami oleh sistem lain.

HTTP adalah protokol yang sangat umum digunakan di web. Dalam model sederhana, perangkat mengirim permintaan ke server, lalu server memberi respons. IETF RFC 9110 mendefinisikan semantik HTTP, termasuk arsitektur, terminologi, metode permintaan, kode status respons, header field, dan konsep inti lain [25]. Dalam proyek IoT, HTTP mudah dipahami dan mudah diintegrasikan dengan layanan web. Misalnya, mikrokontroler dapat mengirim data sensor melalui permintaan POST ke server.

Kelebihan HTTP adalah sederhana bagi pengembang web, luas digunakan, dan mudah diuji. Kelemahannya adalah overhead dapat lebih besar dibanding protokol yang lebih ringan, terutama untuk perangkat terbatas atau jaringan berbiaya tinggi. HTTP cocok untuk sistem yang tidak terlalu dibatasi daya dan bandwidth, atau untuk prototipe yang membutuhkan integrasi cepat.

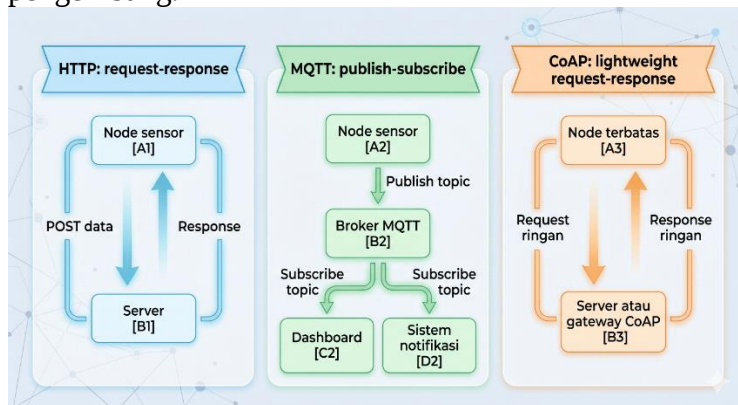
MQTT adalah protokol yang banyak digunakan dalam IoT karena ringan dan menggunakan pola publish-subscribe. Dalam MQTT, perangkat tidak harus mengirim data langsung ke semua penerima. Perangkat cukup menerbitkan data ke topik tertentu melalui broker. Pengguna atau aplikasi lain dapat berlangganan topik tersebut. OASIS mendefinisikan MQTT Version 5.0 sebagai protokol transport pesan client-server publish-subscribe yang ringan, terbuka, sederhana, dan dirancang untuk konteks Machine-to-Machine serta IoT ketika footprint kode kecil atau bandwidth jaringan terbatas diperlukan [26].

Dalam proyek lingkungan, MQTT cocok untuk sistem yang memiliki banyak sensor dan dashboard. Misalnya, sensor kelembapan tanah menerbitkan data ke topik lahan1/tanah/kelembapan. Dashboard berlangganan topik tersebut

dan memperbarui grafik. Jika ada beberapa sensor, setiap sensor dapat memakai topik berbeda. MQTT juga mendukung kualitas layanan atau Quality of Service, meskipun penggunaan QoS perlu disesuaikan dengan kebutuhan agar tidak menambah beban sistem secara tidak perlu.

CoAP atau Constrained Application Protocol adalah protokol yang dirancang untuk perangkat dan jaringan terbatas. IETF RFC 7252 menjelaskan bahwa CoAP menyediakan model interaksi request/response, mendukung discovery layanan dan sumber daya, menggunakan konsep web seperti URI dan media type, serta dirancang untuk constrained nodes dan constrained networks dengan overhead rendah dan kesederhanaan [27]. CoAP relevan untuk sistem IoT yang membutuhkan protokol ringan, terutama pada perangkat terbatas dan jaringan low-power lossy.

Jika dibandingkan secara sederhana, HTTP mudah digunakan dan luas didukung, MQTT unggul untuk sistem publish-subscribe dengan banyak perangkat, sedangkan CoAP dirancang untuk perangkat terbatas yang tetap ingin menggunakan pola web. Pemilihan protokol perlu mempertimbangkan perangkat, jaringan, server, keamanan, kebutuhan real-time, dan kemampuan pengembang.



Gambar 4. 1 Perbandingan pola komunikasi HTTP, MQTT, dan CoAP

Tabel 4. 3 Perbandingan HTTP, MQTT, dan CoAP dalam proyek IoT

Protokol	Pola komunikasi	Kelebihan	Keterbatasan	Cocok untuk
HTTP	Request-response	Mudah dipahami, luas digunakan, mudah diintegrasikan dengan web	Overhead relatif lebih besar untuk perangkat terbatas	Prototipe, dashboard web, pengiriman data sederhana
MQTT	Publish-subscribe melalui broker	Ringan, cocok untuk banyak sensor dan topik data	Membutuhkan broker dan pengaturan topik yang rapi	Sistem pemantauan banyak node, dashboard real-time ringan
CoAP	Request-response ringan untuk perangkat terbatas	Overhead rendah, dirancang untuk constrained devices	Implementasi tidak sepopuler HTTP pada pemula	Perangkat terbatas dan jaringan low-power lossy

Keamanan protokol tidak boleh diabaikan. HTTP sebaiknya menggunakan HTTPS ketika data dikirim melalui internet. MQTT dapat diamankan dengan TLS, autentikasi, dan pengaturan hak akses topic. CoAP dapat menggunakan mekanisme keamanan seperti DTLS atau pendekatan lain sesuai implementasi. Namun, keamanan bukan sekadar fitur protokol. Keamanan bergantung pada konfigurasi, manajemen kredensial, pembaruan perangkat lunak, dan pembatasan akses.

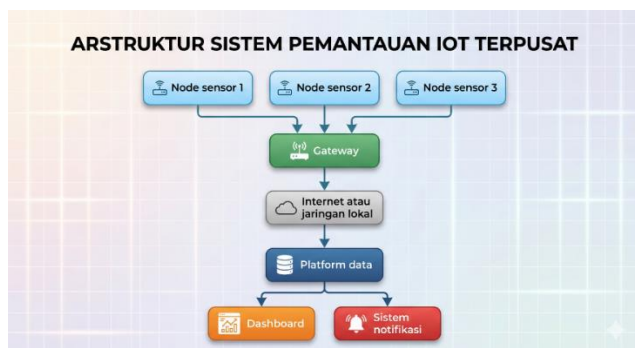
4.4 Gateway dan Integrasi Perangkat

Gateway adalah perangkat penghubung antara node sensor dan sistem yang lebih besar. Dalam proyek IoT lingkungan, gateway sering digunakan ketika sensor tidak dapat langsung terhubung ke internet atau ketika beberapa sensor perlu dikumpulkan dalam satu titik sebelum data dikirim ke platform.

Contoh sederhana adalah sistem LoRaWAN. Node sensor di lahan pertanian mengirim data menggunakan LoRa ke gateway. Gateway menerima data dari banyak node, lalu meneruskan data ke network server melalui internet. Pada sistem Bluetooth, sensor dapat mengirim data ke ponsel atau gateway lokal, kemudian gateway meneruskan data ke cloud. Pada sistem lokal, Raspberry Pi dapat berperan sebagai gateway yang membaca data dari beberapa sensor melalui kabel atau komunikasi lokal, menyimpan data sementara, lalu mengirimkannya ke server.

Gateway memiliki beberapa fungsi. Pertama, gateway menjembatani perbedaan protokol. Sensor dapat memakai LoRa, Bluetooth, Zigbee, serial, atau protokol lokal, sedangkan server memakai IP, HTTP, atau MQTT. Kedua, gateway dapat melakukan pemrosesan awal. Misalnya, gateway dapat menghitung rata-rata data, membuang data rusak, memberi timestamp, atau menambahkan identitas lokasi. Ketiga, gateway dapat menyimpan data sementara saat koneksi internet terputus. Keempat, gateway dapat menjadi titik keamanan dengan membatasi akses perangkat ke jaringan utama.

Namun, gateway juga menambah kompleksitas. Jika gateway mati, banyak sensor dapat kehilangan jalur komunikasi. Jika konfigurasi gateway salah, data dapat masuk dengan format yang keliru. Jika gateway tidak diamankan, ia dapat menjadi titik lemah jaringan. Karena itu, gateway harus diperlakukan sebagai komponen kritis dalam arsitektur sistem.



Gambar 4. 2 Peran gateway dalam integrasi perangkat IoT lingkungan

Dalam proyek lingkungan, gateway sangat berguna untuk lokasi yang memiliki banyak sensor. Misalnya, satu kebun memiliki sepuluh node kelembapan tanah. Daripada setiap node memakai koneksi seluler sendiri, node dapat mengirim data ke gateway lokal. Gateway kemudian mengirim semua data ke platform. Desain ini dapat mengurangi biaya operasional dan memudahkan pengelolaan perangkat. Namun, desain ini juga membuat gateway menjadi titik yang harus dijaga keandalannya.

Integrasi perangkat juga membutuhkan standar format data. Jika setiap sensor mengirim data dengan format berbeda, platform akan sulit membaca data secara konsisten. Format data sederhana dapat dibuat dalam bentuk JSON, misalnya berisi identitas perangkat, timestamp, parameter, nilai, satuan, lokasi, dan status perangkat. Yang penting bukan format paling canggih, melainkan konsistensi dan dokumentasi.

Tabel 4. 4 Contoh struktur data sederhana untuk pengiriman data sensor

Elemen data	Contoh isi	Fungsi
device_id	udara_01	Membedakan perangkat sumber data
timestamp	2026-05-12T09:30:00+07:00	Menunjukkan waktu pengukuran

location	ruang_kelas_A	Memberi konteks lokasi
parameter	temperature	Menjelaskan parameter yang diukur
value	30.5	Menunjukkan nilai pengukuran
unit	°C	Mencegah salah tafsir angka
battery	78%	Menunjukkan status daya perangkat
signal_quality	-67 dBm	Membantu diagnosis koneksi
status	normal	Menunjukkan kondisi perangkat

4.5 Strategi Menghadapi Koneksi Tidak Stabil

Koneksi tidak stabil adalah kondisi yang umum dalam proyek IoT lingkungan. Jaringan Wi-Fi dapat melemah, sinyal seluler dapat berubah, gateway dapat mati, server dapat tidak merespons, atau perangkat dapat kehilangan daya. Karena itu, sistem harus dirancang dengan asumsi bahwa koneksi tidak selalu tersedia.

Strategi pertama adalah memberi timestamp lokal pada data. Jika data hanya diberi waktu saat tiba di server, maka data yang terlambat dapat terlihat seolah-olah baru diukur. Timestamp lokal membantu pengguna mengetahui kapan data sebenarnya dibaca oleh sensor. Untuk sistem yang membutuhkan waktu akurat, perangkat perlu memiliki sumber waktu yang memadai, misalnya sinkronisasi jaringan, real-time clock, atau strategi pembaruan waktu melalui gateway.

Strategi kedua adalah menyimpan data sementara. Jika perangkat tidak dapat mengirim data, data dapat disimpan di memori lokal, kartu SD, atau gateway. Setelah koneksi kembali, data dikirim ulang. Strategi ini penting untuk mencegah kehilangan data, terutama pada proyek yang membutuhkan tren historis. Namun, penyimpanan lokal harus disesuaikan dengan kapasitas perangkat. Mikrokontroler kecil memiliki memori terbatas, sehingga tidak semua data dapat disimpan terlalu lama.

Strategi ketiga adalah pengiriman ulang dengan batas yang jelas. Jika data gagal dikirim, perangkat dapat mencoba kembali. Namun, percobaan ulang tanpa batas dapat menghabiskan baterai dan memenuhi jaringan. Karena itu, sistem perlu menentukan interval pengiriman ulang, jumlah percobaan, dan cara menandai data yang gagal terkirim.

Strategi keempat adalah indikator kualitas sinyal dan status perangkat. Dashboard sebaiknya tidak hanya menampilkan nilai lingkungan, tetapi juga kondisi sistem. Misalnya, status online/offline, waktu terakhir data diterima, kualitas sinyal, level baterai, dan jumlah data gagal. Informasi ini membantu pengguna membedakan antara masalah lingkungan dan masalah sistem. Jika data kualitas air tidak berubah selama dua hari, penyebabnya mungkin air stabil, tetapi bisa juga sensor mati.

Strategi kelima adalah desain degradasi layanan. Artinya, sistem tetap memiliki fungsi minimum meskipun koneksi terganggu. Misalnya, sistem irigasi berbasis sensor tanah dapat tetap menjalankan logika lokal meskipun internet putus. Dashboard cloud mungkin tidak diperbarui, tetapi perangkat lokal tetap dapat mencegah tanaman kekurangan air. Pendekatan ini sering disebut sebagai bagian dari edge computing, yaitu pemrosesan lebih dekat dengan sumber data.

Tabel 4. 5 Strategi menghadapi koneksi tidak stabil

Masalah koneksi	Risiko	Strategi mitigasi
Data terlambat sampai server	Analisis waktu menjadi keliru	Gunakan timestamp lokal
Internet terputus sementara	Data hilang	Simpan data sementara di perangkat atau gateway
Pengiriman gagal berulang	Baterai cepat habis	Batasi percobaan ulang dan gunakan interval adaptif
Sensor tampak diam	Pengguna tidak tahu apakah sensor	Tampilkan status perangkat dan waktu

dashboard	normal atau mati	data terakhir
Sinyal lemah	Data tidak konsisten	Catat kualitas sinyal dan perbaiki posisi antena atau gateway
Server tidak merespons	Sistem berhenti mengirim	Gunakan antrean data dan pengiriman ulang terjadwal

Dalam desain yang lebih matang, sistem juga perlu membedakan data normal, data terlambat, data hasil kirim ulang, dan data yang dicurigai rusak. Pembedaan ini dapat dilakukan dengan metadata. Misalnya, setiap data memiliki status normal, delayed, retry, atau error. Dengan demikian, pengguna tidak hanya melihat angka, tetapi juga mengetahui kualitas proses pengiriman data.

4.6 Ilustrasi Penerapan: Memilih Konektivitas untuk Tiga Skenario

Untuk memahami pilihan konektivitas, bayangkan tiga skenario berbeda: sekolah, lahan pertanian, dan sungai terpencil. Ketiganya sama-sama membutuhkan IoT lingkungan, tetapi kondisi lapangannya berbeda.

Pada skenario pertama, sebuah sekolah ingin memantau suhu, kelembapan, dan indikator kualitas udara di beberapa ruang kelas. Sekolah memiliki jaringan Wi-Fi dan sumber listrik. Data perlu tampil di dashboard setiap beberapa menit. Dalam skenario ini, Wi-Fi menjadi pilihan yang praktis karena perangkat berada di dalam gedung dan jaringan tersedia. Tantangan utama bukan jangkauan jauh, melainkan kestabilan router, keamanan akses, dan penempatan sensor.

Pada skenario kedua, kelompok tani ingin memantau kelembapan tanah di beberapa titik lahan. Lokasi sensor tersebar dan tidak semua titik memiliki Wi-Fi. Data hanya perlu dikirim setiap 10 sampai 30 menit. Perangkat sebaiknya hemat daya karena menggunakan baterai atau panel surya kecil. Dalam skenario ini, LoRaWAN dapat menjadi pilihan yang layak jika gateway tersedia dan regulasi frekuensi dipenuhi. Alternatif lain adalah seluler jika cakupan operator baik dan biaya layanan dapat diterima.

Pada skenario ketiga, komunitas ingin memantau tinggi air atau kualitas air di sungai kecil yang jauh dari permukiman. Tidak ada Wi-Fi. Lokasi sulit dijangkau. Data penting untuk peringatan awal, tetapi sistem harus tahan terhadap cuaca. Dalam skenario ini, koneksi seluler dapat dipertimbangkan jika cakupan operator tersedia. LoRaWAN juga mungkin digunakan jika gateway dapat dipasang di lokasi strategis. Desain harus memperhatikan daya, casing, keamanan fisik, dan penyimpanan data sementara.

Tabel 4. 6 Latihan pemilihan konektivitas untuk tiga skenario

Skenario	Kondisi lokasi	Kebutuhan data	Konektivitas yang disarankan	Alasan
Sekolah	Dalam gedung, Wi-Fi tersedia, listrik tersedia	Data cukup sering, dashboard lokal atau cloud	Wi-Fi	Praktis, murah, dan mudah diintegrasikan
Lahan pertanian	Area luas, Wi-Fi terbatas, perangkat tersebar	Data kecil dan periodik	LoRaWAN atau seluler	LoRaWAN hemat daya untuk data kecil; seluler berguna jika cakupan operator baik
Sungai terencil	Jauh dari jaringan lokal, kondisi cuaca berat	Data periodik dan peringatan	Seluler atau LoRaWAN dengan gateway strategis	Tidak bergantung pada router lokal, tetapi perlu evaluasi cakupan dan daya

Latihan ini menunjukkan bahwa tidak ada satu teknologi yang paling baik untuk semua situasi. Teknologi yang tepat adalah teknologi yang sesuai dengan konteks penggunaan. Proyek kecil di

sekolah tidak membutuhkan konektivitas yang sama dengan proyek sungai terpencil. Sistem pertanian tidak harus memakai koneksi internet langsung pada setiap sensor jika gateway dapat bekerja lebih efisien.

4.7 Latihan Akhir Bab

Latihan akhir bab ini meminta pembaca memilih konektivitas untuk satu proyek lingkungan. Pilih salah satu kasus: pemantauan kualitas udara sekolah, pemantauan kelembapan tanah lahan pertanian, pemantauan kualitas air sungai, atau proyek lain yang relevan. Setelah itu, isi tabel berikut.

Tabel 4. 7 Template pemilihan konektivitas proyek IoT lingkungan

Pertanyaan desain	Jawaban pembaca
Masalah lingkungan yang dipantau	
Lokasi pemasangan perangkat	
Apakah tersedia listrik tetap?	
Apakah tersedia Wi-Fi?	
Apakah tersedia sinyal seluler?	
Berapa jarak sensor dari gateway atau router?	
Seberapa sering data perlu dikirim?	
Seberapa besar data yang dikirim?	
Apakah perangkat harus hemat daya?	
Apakah data perlu real-time?	
Teknologi konektivitas yang dipilih	
Protokol komunikasi yang dipilih	
Risiko koneksi utama	
Strategi jika koneksi putus	

Setelah tabel diisi, pembaca perlu menggambar arsitektur komunikasi. Gambar harus menunjukkan node sensor, jaringan yang digunakan, gateway jika ada, platform data, dashboard, dan pengguna. Gambar ini akan membantu memastikan bahwa alur data dipahami sebelum perangkat dipasang.

Kesimpulan Bab

Konektivitas menentukan apakah data IoT dapat bergerak dari lokasi pengukuran menuju platform pemantauan. Dalam proyek lingkungan, pilihan konektivitas harus mengikuti kondisi lapangan, jarak, konsumsi daya, ukuran data, frekuensi pengiriman, biaya, dan ketersediaan infrastruktur. Wi-Fi cocok untuk lokasi dengan jaringan tersedia. Bluetooth cocok untuk komunikasi jarak dekat atau konfigurasi lokal. LoRaWAN cocok untuk data kecil, jarak jauh, dan perangkat hemat daya. Seluler cocok untuk lokasi terpencar yang memiliki cakupan operator.

Selain konektivitas, protokol komunikasi juga menentukan cara data dikirim. HTTP mudah digunakan dan luas didukung. MQTT cocok untuk sistem publish-subscribe dengan banyak perangkat. CoAP dirancang untuk perangkat dan jaringan terbatas. Gateway dapat membantu mengintegrasikan banyak sensor, menjembatani protokol berbeda, melakukan pemrosesan awal, dan menyimpan data sementara.

Bab ini juga menegaskan bahwa koneksi tidak boleh diasumsikan selalu stabil. Sistem IoT lingkungan harus memiliki timestamp lokal, penyimpanan sementara, mekanisme pengiriman ulang, indikator kualitas sinyal, dan desain yang tetap berguna ketika koneksi terganggu. Pada bab berikutnya, pembahasan akan berlanjut ke platform, cloud, edge, dan dashboard lingkungan sebagai tempat data disimpan, divisualisasikan, dan digunakan untuk mendukung keputusan.

BAB 5

Platform, Cloud, Edge, dan Dashboard Lingkungan

Data sensor tidak otomatis menjadi informasi yang berguna. Sensor dapat membaca suhu, kelembapan, pH, partikulat, tinggi air, atau konsumsi energi, tetapi angka-angka tersebut masih perlu dikirim, disimpan, diproses, ditampilkan, dan ditafsirkan. Di sinilah platform, cloud, edge computing, dan dashboard memiliki peran penting.

Dalam sistem Internet of Things untuk lingkungan, platform berfungsi sebagai tempat data diterima, dikelola, dan dihubungkan dengan aplikasi. Cloud memungkinkan data diakses dari banyak tempat melalui internet. Server lokal memberi kendali lebih besar kepada pengguna yang ingin menyimpan dan mengelola data di lokasi sendiri. Edge computing memungkinkan sebagian pemrosesan dilakukan dekat dengan sumber data, sehingga sistem dapat merespons lebih cepat tanpa selalu menunggu cloud. Dashboard membantu manusia membaca kondisi lingkungan secara ringkas melalui angka, grafik, status, peta, dan peringatan.

Bab ini menjelaskan bagaimana data IoT bergerak dari data mentah menjadi informasi yang dapat digunakan. Pembahasan dimulai dari proses memberi konteks pada data, lalu dilanjutkan dengan platform IoT, penyimpanan data, cloud, server lokal, edge computing, dashboard, notifikasi, dan sistem peringatan dini. Bab ini juga menyertakan studi kasus dashboard kualitas udara untuk ruang publik dan latihan merancang dashboard satu halaman.

Tujuan utama bab ini adalah membantu pembaca memahami bahwa keberhasilan IoT tidak hanya ditentukan oleh sensor dan jaringan. Sistem yang baik juga membutuhkan pengelolaan data, tampilan informasi yang jelas, dan mekanisme respons yang sesuai dengan kebutuhan pengguna.

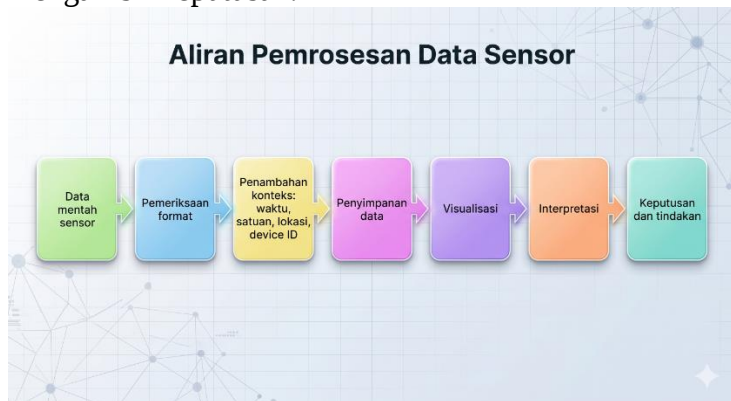
5.1 Dari Data Mentah Menjadi Informasi

Data mentah adalah data yang baru keluar dari sensor atau perangkat tanpa banyak pemrosesan. Contohnya adalah angka 31.2, 72, 6.8, 410, atau 1023. Bagi sistem elektronik, angka ini dapat dibaca.

Namun, bagi pengguna umum, angka tersebut belum tentu bermakna. Apakah 31.2 adalah suhu dalam derajat Celsius? Apakah 72 adalah kelembapan udara dalam persen? Apakah 6.8 adalah pH air? Apakah 410 adalah pembacaan analog kelembapan tanah atau konsentrasi CO₂? Tanpa konteks, data mudah disalahartikan.

Agar data mentah menjadi informasi, data perlu diberi satuan, waktu, lokasi, identitas perangkat, status sensor, dan konteks interpretasi. Nilai suhu 31.2°C pada pukul 13.00 di ruang kelas memiliki makna berbeda dari nilai yang sama pada rumah kaca, gudang, ruang kompos, atau area luar ruangan. Nilai pH 6.8 pada kolam ikan juga perlu ditafsirkan berdasarkan jenis ikan, suhu air, dan tujuan pemantauan. Dengan kata lain, informasi lahir ketika angka diberi konteks.

Transformasi data menjadi informasi biasanya melibatkan beberapa tahap. Pertama, data diterima dari perangkat. Kedua, data diperiksa apakah formatnya benar. Ketiga, data diberi metadata seperti waktu, lokasi, satuan, dan identitas perangkat. Keempat, data disimpan dalam database. Kelima, data ditampilkan dalam bentuk grafik, status, atau ringkasan. Keenam, data dibandingkan dengan ambang tertentu atau pola historis. Ketujuh, sistem atau pengguna mengambil keputusan.



Gambar 5. 1 Alur transformasi data mentah menjadi informasi lingkungan

Dalam proyek IoT lingkungan, kualitas informasi sangat bergantung pada kualitas data. Jika sensor tidak dikalibrasi, maka dashboard hanya menampilkan data yang tampak rapi tetapi belum tentu benar. Jika timestamp tidak akurat, maka grafik tren dapat menyesatkan. Jika lokasi sensor tidak dicatat, data sulit digunakan untuk membandingkan area. Jika status perangkat tidak ditampilkan, pengguna tidak dapat membedakan antara lingkungan yang stabil dan sensor yang mati.

Tabel 5. 1 Unsur konteks yang perlu ditambahkan pada data sensor

Unsur konteks	Contoh	Alasan penting
Satuan	°C, %, pH, NTU, ppm, µg/m ³	Mencegah salah tafsir angka
Timestamp	2026-05-12 10:30:00 WIB	Menunjukkan waktu pengukuran
Identitas perangkat	udara_01, air_02, tanah_03	Membedakan sumber data
Lokasi	Taman kota, ruang kelas A, kolam 1	Memberi konteks spasial
Status sensor	normal, error, offline	Membantu menilai keandalan data
Status daya	baterai 82%, listrik utama	Membantu perawatan perangkat
Kualitas koneksi	RSSI, latency, packet loss	Membantu diagnosis komunikasi
Metode pembacaan	rata-rata 1 menit, interval 5 menit	Menjelaskan cara data dihitung

Data juga perlu dibersihkan sebelum digunakan. Pembersihan data dapat mencakup penghapusan duplikasi, penandaan data hilang, pengecekan nilai ekstrem, dan penyesuaian format waktu. Namun, pembersihan data harus terdokumentasi. Nilai ekstrem tidak boleh langsung dihapus hanya karena terlihat aneh. Bisa jadi nilai tersebut menunjukkan peristiwa penting, misalnya lonjakan partikulat karena pembakaran terbuka atau kenaikan kekeruhan air setelah hujan.

Karena itu, data ekstrem sebaiknya ditandai dan diperiksa, bukan dihilangkan tanpa alasan.

Dalam konteks buku ini, informasi yang baik memiliki tiga ciri. Pertama, mudah dipahami oleh pengguna sasaran. Kedua, dapat ditelusuri kembali ke sumber data. Ketiga, cukup andal untuk mendukung keputusan yang akan dibuat. Jika pengguna adalah masyarakat umum, informasi perlu dibuat sederhana. Jika pengguna adalah teknisi, detail status sistem dapat ditampilkan lebih lengkap. Jika pengguna adalah pengambil kebijakan, dashboard perlu menampilkan ringkasan, tren, lokasi prioritas, dan rekomendasi tindakan.

5.2 Platform IoT dan Penyimpanan Data

Platform IoT adalah sistem yang menerima, menyimpan, mengelola, memproses, dan menampilkan data dari perangkat IoT. Platform dapat berbasis cloud, server lokal, atau perangkat edge. Dalam proyek sederhana, platform dapat berupa layanan online yang menerima data dari sensor dan menampilkan grafik. Dalam proyek yang lebih besar, platform dapat mencakup manajemen perangkat, autentikasi, basis data, rule engine, dashboard, API, notifikasi, dan integrasi dengan sistem lain.

NIST mendefinisikan cloud computing sebagai model yang memungkinkan akses jaringan secara luas, nyaman, dan sesuai permintaan ke kumpulan sumber daya komputasi yang dapat dikonfigurasi, seperti jaringan, server, penyimpanan, aplikasi, dan layanan, yang dapat disediakan dan dilepas dengan cepat dengan usaha pengelolaan minimal [28]. Definisi ini penting karena membantu pembaca memahami bahwa cloud bukan sekadar “menyimpan data di internet”. Cloud adalah model penyediaan sumber daya komputasi yang fleksibel.

Dalam proyek IoT lingkungan, platform cloud memiliki beberapa keunggulan. Data dapat diakses dari lokasi berbeda. Kapasitas penyimpanan dapat ditingkatkan. Dashboard dapat dibagikan kepada pengguna. Integrasi dengan notifikasi dan analitik lebih mudah dilakukan. Namun, cloud juga memiliki keterbatasan. Sistem bergantung pada koneksi internet. Biaya dapat meningkat ketika

jumlah perangkat dan data bertambah. Pengguna juga perlu memperhatikan keamanan, privasi, lokasi penyimpanan data, dan ketentuan layanan penyedia platform.

Server lokal adalah alternatif ketika pengguna ingin menyimpan data di lokasi sendiri. Server lokal dapat berupa komputer kecil seperti Raspberry Pi, mini PC, server kantor, atau perangkat jaringan tertentu. Keuntungan server lokal adalah kendali lebih besar terhadap data, tidak selalu bergantung pada layanan pihak ketiga, dan dapat tetap bekerja dalam jaringan lokal meskipun internet mati. Kelemahannya adalah pengguna harus mengelola perangkat, penyimpanan, pembaruan, keamanan, backup, dan perawatan.

Platform open-source dapat menjadi pilihan untuk pendidikan, komunitas, riset, atau organisasi yang ingin memiliki kendali lebih besar terhadap sistem. ThingsBoard, misalnya, memposisikan diri sebagai platform IoT open-source untuk pengumpulan data, pemrosesan, visualisasi, dan manajemen perangkat [29]. Grafana banyak digunakan untuk visualisasi data dan dashboard; dokumentasinya menjelaskan dashboard sebagai kumpulan satu atau lebih panel yang memberikan tampilan ringkas atas informasi terkait [30]. Node-RED dapat digunakan untuk membangun alur data berbasis visual dan dijelaskan sebagai alat low-code untuk aplikasi event-driven yang dapat berjalan di edge seperti Raspberry Pi maupun cloud [31]. Penyebutan platform tertentu dalam buku ini bersifat contoh, bukan promosi. Pemilihan platform harus mengikuti kebutuhan proyek, kapasitas teknis, biaya, keamanan, dan kemudahan perawatan.

Tabel 5. 2 Perbandingan kategori platform IoT

Kategori platform	Kelebihan	Keterbatasan	Cocok untuk
Cloud komersial	Mudah diskalakan, akses jarak jauh, integrasi luas	Bergantung internet, biaya dapat meningkat, perlu pengelolaan keamanan	Proyek multi-lokasi, organisasi, dashboard publik terbatas

Server lokal	Kendali data lebih besar, dapat berjalan di jaringan lokal	Perlu perawatan teknis, backup, dan keamanan sendiri	Sekolah, laboratorium, komunitas, sistem tertutup
Platform open-source	Fleksibel, dapat dipelajari dan dimodifikasi	Membutuhkan kemampuan instalasi dan konfigurasi	Pendidikan, riset, prototipe, komunitas teknologi
Platform sederhana berbasis spreadsheet atau database ringan	Cepat dibuat dan mudah dipahami	Skalabilitas dan keamanan terbatas	Demonstrasi, pelatihan, proyek awal
Edge platform	Respons cepat, dapat tetap bekerja saat internet terganggu	Kapasitas perangkat terbatas dan perlu desain lokal	Irigasi otomatis, alarm lokal, pemantauan lapangan kritis

Penyimpanan data juga perlu dirancang sejak awal. Data sensor biasanya berbentuk time-series, yaitu data yang berubah seiring waktu. Database time-series dapat membantu menyimpan dan menampilkan data semacam ini secara efisien. Namun, untuk proyek kecil, database sederhana juga dapat digunakan selama strukturnya konsisten. Yang penting adalah data memiliki timestamp, identitas perangkat, parameter, nilai, satuan, lokasi, dan status.

Selain penyimpanan utama, sistem juga perlu backup. Data lingkungan sering dikumpulkan dalam jangka panjang. Jika data hilang karena kartu memori rusak, server mati, atau akun cloud tidak aktif, maka pola historis ikut hilang. Backup dapat dilakukan secara berkala ke perangkat lain atau layanan penyimpanan berbeda. Untuk proyek komunitas, prosedur backup harus sederhana dan terdokumentasi.

Keamanan platform tidak boleh dianggap sebagai urusan akhir. Platform IoT menerima data dari perangkat, menyimpan informasi,

dan mungkin mengendalikan aktuator. Karena itu, akses pengguna harus diatur. Kata sandi harus kuat. Token perangkat tidak boleh dibagikan sembarangan. Dashboard publik harus dibatasi hanya untuk informasi yang memang layak dibagikan. Data mentah yang sensitif terhadap lokasi atau aktivitas komunitas perlu dipertimbangkan sebelum dipublikasikan.

5.3 Edge Computing untuk Respons Cepat

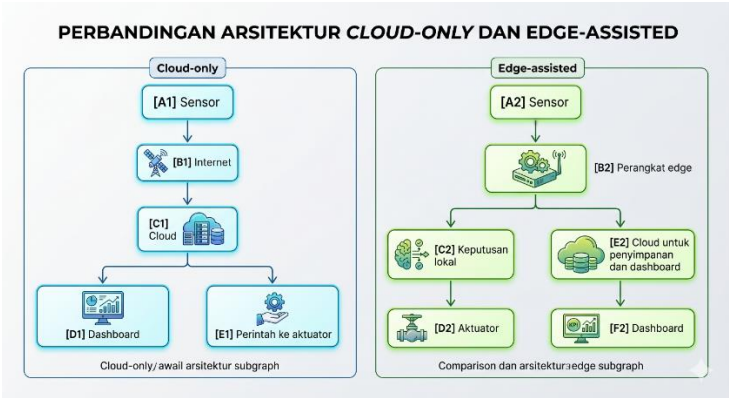
Edge computing berarti sebagian pemrosesan data dilakukan dekat dengan sumber data, bukan seluruhnya menunggu cloud. Dalam proyek IoT lingkungan, edge computing dapat dilakukan oleh mikrokontroler, gateway, Raspberry Pi, atau perangkat lokal lain. Tujuannya adalah mengurangi keterlambatan, menghemat bandwidth, meningkatkan ketahanan sistem, dan memungkinkan respons lokal.

NIST menjelaskan fog computing sebagai model yang memperluas cloud computing ke tepi jaringan, sehingga sumber daya komputasi, penyimpanan, komunikasi, kontrol, dan pengambilan keputusan dapat ditempatkan lebih dekat dengan pengguna akhir dan sumber data [32]. Dalam praktik, istilah edge dan fog sering digunakan berdekatan. Untuk pembaca umum, perbedaannya tidak perlu dibuat terlalu rumit. Yang penting dipahami adalah gagasan bahwa tidak semua keputusan harus menunggu cloud.

Contoh sederhana adalah sistem irigasi berbasis kelembapan tanah. Sensor membaca kelembapan tanah. Jika data dikirim ke cloud terlebih dahulu, lalu cloud mengirim perintah kembali ke pompa, maka sistem bergantung pada internet. Jika koneksi putus, pompa mungkin tidak bekerja. Dengan edge computing, perangkat lokal dapat langsung menjalankan logika: jika kelembapan tanah di bawah batas tertentu dan kondisi aman, pompa menyala selama durasi tertentu. Cloud tetap dapat digunakan untuk menyimpan data dan menampilkan dashboard, tetapi keputusan cepat dilakukan di lokal.

Edge computing juga berguna untuk sistem peringatan. Misalnya, sensor tinggi air dapat memicu alarm lokal jika air naik melewati batas tertentu, meskipun internet sedang terganggu. Sensor kualitas udara dalam ruangan dapat menyalakan lampu indikator lokal ketika

kondisi memburuk. Sistem energi dapat memutuskan beban tertentu berdasarkan aturan keselamatan yang dijalankan di perangkat lokal. Namun, otomatisasi lokal harus dirancang hati-hati, terutama jika melibatkan pompa, listrik, katup, atau perangkat yang dapat menimbulkan risiko fisik.



Gambar 5. 2 Perbedaan alur cloud-only dan edge-assisted

Edge bukan pengganti cloud untuk semua kebutuhan. Cloud tetap berguna untuk penyimpanan jangka panjang, akses jarak jauh, dashboard multi-pengguna, analitik historis, backup, dan integrasi sistem. Edge lebih berguna untuk respons cepat, penyaringan data awal, pemrosesan lokal, dan ketahanan saat koneksi terganggu. Dalam banyak proyek, desain terbaik adalah kombinasi keduanya.

Tabel 5. 3 Perbandingan cloud, server lokal, dan edge computing

Pendekatan	Fungsi utama	Kelebihan	Keterbatasan	Contoh penggunaannya lingkungan
Cloud	Penyimpanan, dashboard, akses jarak jauh,	Skalabel dan mudah diakses	Bergantung internet dan biaya layanan	Dashboard kualitas udara multi-lokasi

	analitik			
Server lokal	Penyimpanan dan dashboard dalam jaringan lokal	Kendali data lebih besar	Perlu perawatan teknis	Laboratorium sekolah atau kampus
Edge computing	Pemrosesan dan respons dekat sensor	Cepat dan tetap berguna saat internet terganggu	Kapasitas terbatas dan perlu logika lokal	Irigasi otomatis, alarm tinggi air, indikator kualitas udara lokal

Dalam merancang edge computing, aturan keputusan harus dibuat jelas. Ambang batas tidak boleh ditentukan sembarangan. Misalnya, batas kelembapan tanah untuk menyalakan pompa perlu disesuaikan dengan jenis tanah, tanaman, dan hasil pengujian. Batas kualitas air atau udara perlu merujuk standar atau pedoman resmi jika menyangkut kesehatan atau keselamatan. Sistem juga perlu memiliki mekanisme manual override agar pengguna dapat menghentikan aktuator jika terjadi kesalahan.

5.4 Membuat Dashboard yang Mudah Dipahami

Dashboard adalah antarmuka yang membantu pengguna membaca kondisi sistem. Dashboard yang baik tidak hanya indah, tetapi juga jelas, relevan, dan membantu tindakan. Dalam proyek lingkungan, dashboard dapat menampilkan nilai terkini, grafik tren, status perangkat, indikator peringatan, peta lokasi, ringkasan harian, dan rekomendasi sederhana.

Prinsip pertama dashboard adalah kesesuaian dengan pengguna. Dashboard untuk teknisi dapat menampilkan banyak detail seperti RSSI, uptime, log error, tegangan baterai, dan latency. Dashboard untuk masyarakat umum sebaiknya lebih sederhana, misalnya status “baik”, “perlu perhatian”, atau “bahaya” dengan penjelasan singkat. Dashboard untuk pengambil keputusan dapat menampilkan

ringkasan lokasi prioritas, tren mingguan, dan tindakan yang direkomendasikan.

Prinsip kedua adalah menghindari kelebihan informasi. Dashboard satu halaman sebaiknya menjawab pertanyaan utama: apa kondisi saat ini, apakah ada masalah, di mana masalah terjadi, bagaimana trennya, dan apa tindakan yang perlu dilakukan. Jika terlalu banyak grafik dan angka, pengguna non-teknis dapat bingung. Informasi teknis tambahan dapat ditempatkan pada halaman lanjutan.

Prinsip ketiga adalah konsistensi visual. Satuan harus konsisten. Warna status harus digunakan secara hati-hati. Grafik waktu harus memiliki skala yang jelas. Label harus mudah dipahami. Jika menggunakan status warna, pastikan status tersebut juga ditulis dalam teks agar tetap terbaca oleh pengguna dengan keterbatasan persepsi warna. Dashboard juga perlu mencantumkan waktu pembaruan terakhir agar pengguna tahu apakah data masih aktif.

Prinsip keempat adalah transparansi data. Dashboard sebaiknya tidak menyembunyikan status sensor. Jika sensor offline, tampilkan. Jika data terlambat, beri tanda. Jika sensor belum dikalibrasi, beri catatan. Jika nilai merupakan estimasi, jelaskan. Transparansi ini penting agar pengguna tidak mengambil keputusan berdasarkan data yang tampak pasti padahal belum cukup kuat.

Tabel 5. 4 Elemen dashboard lingkungan dan fungsinya

Elemen dashboard	Fungsi	Pengguna sasaran	Catatan desain
Nilai terkini	Menampilkan kondisi terbaru	Semua pengguna	Sertakan satuan dan waktu pembaruan
Grafik tren	Menunjukkan perubahan dari waktu ke waktu	Teknisi, pengelola, peneliti	Gunakan rentang waktu yang jelas
Status normal/peringatan	Memudahkan pembacaan cepat	Masyarakat umum, pengelola	Ambang harus memiliki dasar yang jelas
Peta lokasi	Menunjukkan	Pengelola	Hindari

	posisi sensor	wilayah, komunitas	membuka lokasi sensitif tanpa pertimbangan
Status perangkat	Menunjukkan online/offline, baterai, koneksi	Teknisi	Membantu perawatan dan diagnosis
Ringkasan tindakan	Memberi arahan respons	Pengguna non-teknis	Hindari instruksi berlebihan tanpa dasar
Catatan data	Menjelaskan kalibrasi, keterbatasan, dan periode data	Peneliti, pengelola	Meningkatkan akuntabilitas interpretasi



Gambar 5. 3 Contoh struktur dashboard satu halaman

Dalam dashboard kualitas udara ruang publik, misalnya, halaman utama dapat menampilkan status umum kualitas udara, nilai partikulat terkini, suhu, kelembapan, grafik tren 24 jam, lokasi sensor, dan waktu pembaruan terakhir. Jika data berasal dari sensor indikatif, dashboard perlu menyertakan catatan bahwa data

digunakan untuk pemantauan awal dan bukan pengukuran referensi resmi. Jika ambang status memakai pedoman tertentu, pedoman tersebut harus dicantumkan.

Dashboard juga perlu diuji dengan pengguna. Pengembang sering merasa dashboard sudah jelas karena mereka memahami sistemnya. Pengguna umum belum tentu demikian. Uji sederhana dapat dilakukan dengan meminta pengguna menjawab tiga pertanyaan: apa kondisi saat ini, apakah ada masalah, dan tindakan apa yang perlu dilakukan. Jika pengguna tidak dapat menjawab dari dashboard, maka desain perlu diperbaiki.

5.5 Notifikasi dan Sistem Peringatan Dini

Notifikasi adalah pesan yang dikirim ketika kondisi tertentu terjadi. Sistem peringatan dini adalah mekanisme yang lebih luas untuk mendeteksi kondisi berisiko, memverifikasi informasi, menyampaikan peringatan, dan mendorong tindakan. Dalam IoT lingkungan, notifikasi dapat dikirim melalui aplikasi, email, SMS, pesan instan, sirene lokal, lampu indikator, atau dashboard.

Notifikasi terlihat sederhana, tetapi desainnya harus hati-hati. Jika terlalu sering, pengguna dapat mengabaikannya. Jika terlalu lambat, peringatan kehilangan nilai. Jika ambang terlalu sensitif, sistem menghasilkan banyak peringatan palsu. Jika ambang terlalu longgar, sistem terlambat memberi tanda. Karena itu, notifikasi harus dirancang berdasarkan tujuan, risiko, kualitas sensor, dan kapasitas pengguna merespons.

Dalam konteks peringatan dini, United Nations Office for Disaster Risk Reduction menjelaskan bahwa sistem peringatan dini yang efektif mencakup pengetahuan risiko, pemantauan dan layanan peringatan, diseminasi dan komunikasi, serta kemampuan respons [33]. Prinsip ini relevan untuk IoT lingkungan. Sensor dan dashboard hanya mencakup sebagian dari sistem. Peringatan baru berguna jika pengguna memahami risiko, menerima pesan dengan jelas, dan tahu tindakan yang harus dilakukan.

Logika notifikasi biasanya menggunakan ambang batas. Misalnya, jika suhu ruang kompos melewati nilai tertentu selama lebih dari 30 menit, sistem mengirim peringatan. Jika kelembapan tanah berada di

bawah batas selama tiga kali pembacaan berturut-turut, sistem menyarankan penyiraman. Jika sensor kualitas air menunjukkan perubahan pH cepat, sistem meminta pemeriksaan manual. Penggunaan beberapa pembacaan berturut-turut dapat membantu mengurangi peringatan palsu akibat noise sensor.

Tabel 5. 5 Contoh logika notifikasi dalam proyek IoT lingkungan

Kasus	Kondisi pemicu	Notifikasi	Strategi mengurangi peringatan palsu
Kelembapan tanah rendah	Nilai di bawah ambang selama 3 pembacaan berturut-turut	“Periksa kebutuhan penyiraman”	Gunakan rata-rata bergerak dan cek sensor
Suhu ruang kompos tinggi	Suhu melewati batas selama 30 menit	“Periksa ruang kompos dan ventilasi”	Hindari pemicu dari satu pembacaan ekstrem
Sensor air berubah cepat	pH berubah tajam dalam periode pendek	“Lakukan pemeriksaan manual air”	Bandingkan dengan suhu dan riwayat sensor
Kualitas udara memburuk	Partikulat meningkat melebihi ambang sementara	“Kurangi aktivitas luar/cek sumber polusi”	Gunakan durasi minimum dan catatan kalibrasi
Perangkat offline	Tidak ada data masuk selama periode tertentu	“Sensor tidak mengirim data”	Bedakan masalah lingkungan dari masalah perangkat

Sistem peringatan juga perlu memiliki eskalasi. Peringatan tingkat rendah dapat muncul di dashboard. Peringatan tingkat sedang dapat dikirim ke pengelola. Peringatan tingkat tinggi dapat dikirim ke beberapa pihak sekaligus. Namun, eskalasi harus disusun sesuai konteks. Tidak semua proyek membutuhkan peringatan darurat. Untuk proyek edukasi, notifikasi cukup berupa pengingat pemeriksaan. Untuk proyek keselamatan, sistem harus mengikuti prosedur dan standar resmi yang berlaku.

Selain itu, notifikasi harus menyertakan informasi yang dapat ditindaklanjuti. Pesan seperti “nilai sensor tinggi” kurang membantu. Pesan yang lebih baik adalah “Sensor kualitas udara di Taman A menunjukkan nilai partikulat meningkat selama 30 menit terakhir. Periksa sumber lokal dan kurangi aktivitas sensitif jika diperlukan.” Pesan tetap harus hati-hati dan tidak membuat klaim yang melampaui validitas data.

5.6 Studi Kasus: Dashboard Kualitas Udara untuk Ruang Publik

Sebuah komunitas kota ingin memantau kualitas udara di taman publik. Taman tersebut berada dekat jalan utama dan sering digunakan untuk olahraga pagi, kegiatan anak, dan pertemuan warga. Selama ini, warga hanya mengandalkan persepsi, seperti udara terasa berdebu atau tidak nyaman pada jam tertentu. Komunitas ingin membuat dashboard sederhana agar warga dapat melihat pola kondisi udara secara lebih objektif.

Tujuan proyek bukan membuat sistem pengukuran resmi, melainkan menyediakan pemantauan indikatif untuk edukasi dan kesadaran lingkungan. Parameter yang dipilih adalah partikulat, suhu, kelembapan, dan status perangkat. Sensor dipasang pada lokasi yang aman, tidak terlalu dekat sumber panas, tidak mengganggu aktivitas warga, dan dilindungi dari hujan langsung. Data dikirim ke platform setiap beberapa menit. Dashboard dapat diakses oleh pengelola komunitas dan ditampilkan pada layar informasi.

Dashboard satu halaman menampilkan lima bagian utama. Bagian pertama adalah status umum, misalnya “normal”, “perlu perhatian”, atau “data tidak tersedia”. Bagian kedua menampilkan nilai terkini

untuk setiap parameter. Bagian ketiga menampilkan grafik tren 24 jam. Bagian keempat menunjukkan waktu data terakhir dan status perangkat. Bagian kelima berisi catatan interpretasi, termasuk bahwa data bersifat indikatif dan perlu validasi lebih lanjut untuk kesimpulan resmi.

Tabel 5. 6 Rancangan dashboard kualitas udara ruang publik

Bagian dashboard	Isi tampilan	Tujuan
Header	Nama lokasi, tanggal, waktu pembaruan terakhir	Memberi konteks data
Status utama	Normal, perlu perhatian, atau data tidak tersedia	Memudahkan pembacaan cepat
Nilai terkini	Partikulat, suhu, kelembapan	Menampilkan kondisi saat ini
Grafik tren	Tren 24 jam dan 7 hari	Menunjukkan pola waktu
Status perangkat	Online/offline, baterai, kualitas sinyal	Memisahkan masalah data dari masalah perangkat
Catatan interpretasi	Keterangan sensor indikatif, kalibrasi, dan batas penggunaan	Mencegah klaim berlebihan
Rekomendasi tindakan	Cek sumber debu, kurangi aktivitas sensitif, verifikasi kondisi	Menghubungkan data dengan respons praktis

Dalam studi kasus ini, ambang status tidak boleh dibuat sembarangan. Jika komunitas ingin memakai pedoman kualitas udara tertentu, mereka harus merujuk pada pedoman resmi seperti WHO atau regulasi nasional yang berlaku. Jika sensor yang digunakan belum terkalibrasi terhadap alat referensi, dashboard perlu menampilkan catatan keterbatasan. Keterbukaan ini penting

agar dashboard tidak menimbulkan rasa aman palsu atau kepanikan yang tidak perlu.

Studi kasus ini juga menunjukkan bahwa dashboard tidak hanya masalah desain visual. Dashboard adalah alat komunikasi risiko. Ia harus menjelaskan kondisi, ketidakpastian, dan tindakan. Jika pengguna tidak memahami keterbatasan data, informasi dapat disalahgunakan. Jika dashboard terlalu teknis, masyarakat umum tidak terbantu. Karena itu, desain dashboard harus menyeimbangkan kesederhanaan, akurasi, dan transparansi.

5.7 Latihan Akhir Bab

Latihan akhir bab ini meminta pembaca merancang dashboard satu halaman untuk satu proyek IoT lingkungan. Pilih salah satu kasus: kualitas udara ruang publik, kualitas air kolam, kelembapan tanah pertanian, konsumsi energi bangunan, atau tempat sampah pintar. Gunakan tabel berikut sebagai panduan.

Tabel 5. 7 Template rancangan dashboard satu halaman

Komponen rancangan	Jawaban pembaca
Nama proyek	
Pengguna utama dashboard	
Masalah lingkungan yang dipantau	
Parameter utama	
Nilai terkini yang ditampilkan	
Grafik tren yang diperlukan	
Status atau ambang peringatan	
Informasi lokasi	
Status perangkat yang perlu tampil	
Catatan keterbatasan data	
Notifikasi yang dibutuhkan	
Tindakan yang disarankan	

Setelah tabel diisi, buat sketsa dashboard satu halaman. Sketsa dapat dibuat di kertas atau aplikasi gambar sederhana. Pastikan dashboard menjawab tiga pertanyaan utama: bagaimana kondisi saat ini, apakah ada masalah, dan apa tindakan yang perlu dilakukan. Hindari

menambahkan terlalu banyak grafik jika tidak membantu pengguna mengambil keputusan.

Kesimpulan Bab

Platform, cloud, edge, dan dashboard adalah bagian penting dalam sistem IoT lingkungan. Data sensor harus diubah menjadi informasi melalui penambahan konteks, penyimpanan, pemrosesan, visualisasi, dan interpretasi. Platform IoT membantu menerima dan mengelola data. Cloud memudahkan akses jarak jauh dan skalabilitas. Server lokal memberi kendali lebih besar terhadap data. Edge computing memungkinkan respons cepat dan membuat sistem tetap berguna saat internet terganggu.

Dashboard harus dirancang berdasarkan kebutuhan pengguna. Dashboard yang baik menampilkan nilai terkini, grafik tren, status perangkat, peringatan, lokasi, dan catatan interpretasi secara jelas. Notifikasi dan sistem peringatan dini harus dibuat hati-hati agar tidak menimbulkan peringatan palsu, kepanikan, atau kelelahan notifikasi. Data lingkungan perlu dikomunikasikan secara jujur, termasuk keterbatasan sensor, kalibrasi, dan status perangkat.

Pada bab berikutnya, pembahasan akan masuk ke proyek implementasi pertama, yaitu sistem pemantauan kualitas udara. Bab tersebut akan menghubungkan konsep sensor, konektivitas, platform, dashboard, dan interpretasi data dalam satu proyek yang lebih konkret.

BAB 6

Proyek 1: Sistem Pemantauan Kualitas Udara

Bab ini mulai membawa pembaca dari pemahaman konsep menuju implementasi proyek. Setelah mempelajari sensor, konektivitas, platform, edge, dan dashboard, pembaca sekarang diarahkan untuk melihat bagaimana seluruh komponen tersebut disusun menjadi satu sistem pemantauan kualitas udara.

Proyek kualitas udara dipilih sebagai proyek pertama karena mudah dikaitkan dengan kehidupan sehari-hari. Udara di ruang kelas, bengkel, halaman sekolah, ruang kerja, area parkir, atau lingkungan permukiman sering berubah karena aktivitas manusia, ventilasi, lalu lintas, pembakaran, debu, cuaca, dan kondisi bangunan. Banyak orang dapat merasakan udara terasa pengap, panas, berdebu, atau tidak nyaman, tetapi persepsi tersebut sering belum didukung data terukur.

Sistem IoT dapat membantu mengubah pengamatan subjektif menjadi data yang lebih teratur. Sensor membaca parameter tertentu, mikrokontroler mengirim data, platform menyimpan data, dashboard menampilkan pola, dan pengguna menyusun tindakan. Namun, proyek ini harus dipahami sebagai pemantauan indikatif, bukan pengganti alat pemantauan resmi. U.S. Environmental Protection Agency menjelaskan bahwa sensor udara dapat memberi informasi yang berguna untuk berbagai aplikasi apabila digunakan dengan perencanaan, pengoperasian, dan interpretasi yang hati-hati [34].

Bab ini membimbing pembaca melalui tahap perumusan masalah, pemilihan lokasi, pemilihan sensor dan perangkat, perancangan alur data, pembuatan dashboard, pengujian awal, validasi sederhana, interpretasi data, serta penyusunan rekomendasi. Penekanan utama diberikan pada cara berpikir proyek, bukan sekadar daftar komponen.

6.1 Menentukan Masalah dan Lokasi Pemantauan

Proyek IoT yang baik tidak dimulai dari membeli sensor. Proyek yang baik dimulai dari masalah yang jelas. Dalam pemantauan kualitas udara, masalah dapat muncul dalam berbagai bentuk. Ruang kelas terasa pengap pada siang hari. Bengkel memiliki bau dan debu saat jam kerja. Area parkir terasa lebih panas dan berpolusi pada jam tertentu. Lingkungan permukiman terganggu asap pembakaran. Halaman sekolah terasa berdebu saat lalu lintas padat. Semua contoh tersebut dapat menjadi titik awal proyek.

Langkah pertama adalah merumuskan pertanyaan proyek. Pertanyaan yang baik harus cukup spesifik agar dapat dijawab dengan data. Pertanyaan seperti “apakah udara di sekolah buruk?” masih terlalu umum. Pertanyaan yang lebih baik adalah “pada jam berapa indikator kualitas udara di ruang kelas meningkat?”, “apakah ruang kelas dekat jalan memiliki nilai partikulat lebih tinggi dibanding ruang yang jauh dari jalan?”, atau “apakah ventilasi memengaruhi perubahan suhu, kelembapan, dan indikator udara dalam ruangan?”

Lokasi pemantauan harus dipilih berdasarkan tujuan. Jika tujuan proyek adalah membandingkan ruang kelas, maka sensor perlu dipasang di beberapa ruang dengan kondisi yang berbeda. Jika tujuan proyek adalah melihat pengaruh lalu lintas, maka sensor dapat ditempatkan di area dekat jalan dan area yang lebih jauh. Jika tujuan proyek adalah memantau bengkel, maka sensor perlu ditempatkan pada area kerja yang relevan tetapi aman dari gangguan langsung, benturan, panas ekstrem, atau bahan kimia yang dapat merusak sensor.

Pemilihan lokasi juga perlu mempertimbangkan keterwakilan data. Sensor yang dipasang terlalu dekat dengan jendela, kipas, pintu, kompor, kendaraan, dinding, atau sumber debu dapat membaca kondisi yang sangat lokal. Data tersebut tetap berguna jika memang sumber lokal itu yang ingin diamati, tetapi tidak boleh langsung dianggap mewakili seluruh ruangan atau kawasan. EPA menekankan pentingnya penentuan tujuan pemantauan, pemilihan lokasi, pemasangan sensor, kolokasi, dan pengelolaan data dalam penggunaan sensor udara [34].

Tabel 6. 1 Contoh perumusan masalah proyek pemantauan kualitas udara

Lokasi	Masalah awal	Pertanyaan proyek	Parameter awal yang mungkin dipantau
Ruang kelas	Ruang terasa pengap saat jam belajar	Kapan kondisi ruang berubah dan apakah berkaitan dengan ventilasi?	Suhu, kelembapan, CO2 jika tersedia, partikulat
Halaman sekolah	Udara terasa berdebu saat jam masuk dan pulang	Apakah indikator partikulat meningkat pada jam lalu lintas padat?	PM2.5, PM10, suhu, kelembapan
Bengkel	Debu dan bau muncul saat aktivitas kerja	Kapan indikator udara meningkat selama aktivitas bengkel?	Partikulat, gas tertentu sesuai risiko, suhu, kelembapan
Area parkir	Udara terasa panas dan tidak nyaman	Apakah jam tertentu menunjukkan peningkatan indikator udara dan suhu?	PM2.5, PM10, suhu, kelembapan
Permukiman	Keluhan asap pembakaran	Kapan indikator partikulat meningkat dan apakah berulang?	PM2.5, PM10, suhu, kelembapan, catatan aktivitas

Setelah masalah dan lokasi dipilih, pembaca perlu menentukan batas proyek. Proyek pemula sebaiknya tidak langsung mencakup banyak lokasi dan banyak parameter. Lebih baik memulai dari satu atau dua lokasi dengan parameter yang jelas, lalu memperluas sistem setelah

metode pengukuran dan dashboard berjalan stabil. Pembatasan ini penting agar proyek tetap realistis dan dapat dievaluasi.

6.2 Memilih Sensor dan Perangkat

Pemilihan sensor harus mengikuti parameter yang ingin diamati. Untuk pemantauan kualitas udara sederhana, parameter yang sering digunakan adalah partikulat, suhu, dan kelembapan. Pada ruang tertutup, CO₂ juga sering digunakan sebagai indikator ventilasi, meskipun CO₂ tidak mewakili semua aspek kualitas udara. Untuk gas tertentu seperti CO, NO₂, SO₂, O₃, atau senyawa organik volatil, pemilihan sensor harus lebih hati-hati karena berkaitan dengan keselamatan, interferensi, kalibrasi, dan interpretasi.

WHO Global Air Quality Guidelines 2021 memberikan rekomendasi berbasis kesehatan untuk PM_{2.5}, PM₁₀, ozon, nitrogen dioksida, sulfur dioksida, dan karbon monoksida [35]. Pedoman ini dapat menjadi rujukan konseptual ketika membahas parameter kualitas udara. Namun, penggunaan angka ambang pada dashboard harus disesuaikan dengan tujuan proyek, standar nasional atau lokal yang berlaku, serta kualitas sensor yang digunakan. Untuk konteks Indonesia, standar dan indeks resmi kualitas udara perlu merujuk regulasi pemerintah atau lembaga berwenang terbaru [perlu referensi lokal].

Sensor partikulat optik banyak digunakan dalam proyek IoT karena tersedia dalam bentuk modul digital. Contohnya adalah Sensirion SPS30 dan Plantower PMS5003. Datasheet Sensirion menjelaskan bahwa SPS30 adalah sensor particulate matter berbasis prinsip laser scattering untuk pemantauan kualitas udara [36]. Plantower PMS5003 dijelaskan sebagai sensor konsentrasi partikel digital yang dapat memperoleh jumlah partikel tersuspensi di udara dan mengeluarkannya melalui antarmuka digital [37]. Klaim performa seperti rentang ukur, respons waktu, konsumsi arus, tegangan kerja, dan umur perangkat harus selalu diambil dari datasheet resmi atau pengujian yang terdokumentasi.

Selain sensor, proyek membutuhkan mikrokontroler atau komputer kecil. ESP32 dapat digunakan karena memiliki Wi-Fi bawaan dan cukup umum dipakai dalam proyek IoT. Arduino dapat digunakan

untuk pembelajaran dasar, tetapi biasanya membutuhkan modul tambahan untuk koneksi internet. Raspberry Pi dapat digunakan sebagai gateway atau dashboard lokal, tetapi konsumsi daya dan kompleksitas perawatannya lebih besar dibanding mikrokontroler. Pemilihan perangkat perlu mengikuti kebutuhan proyek, bukan sekadar mengikuti perangkat yang populer.

Sumber daya juga harus direncanakan. Jika perangkat dipasang di dalam ruangan, adaptor listrik dapat digunakan. Jika perangkat dipasang di luar ruangan, baterai atau panel surya kecil mungkin diperlukan, tetapi desain daya menjadi lebih kompleks. Sensor partikulat biasanya membutuhkan kipas atau aliran udara internal sehingga konsumsi dayanya perlu diperhatikan. Untuk proyek luar ruangan, casing harus melindungi perangkat dari hujan dan debu, tetapi tetap memungkinkan udara mengalir ke sensor. Casing yang terlalu tertutup dapat membuat sensor tidak membaca udara sekitar dengan baik.

Tabel 6. 2 Contoh daftar komponen proyek pemantauan kualitas udara mini

Komponen	Fungsi	Contoh pilihan	Catatan pemilihan
Sensor partikulat	Membaca indikator PM2.5 dan PM10	SPS30, PMS5003, atau modul sejenis	Periksa datasheet, antarmuka, tegangan, dan kebutuhan aliran udara
Sensor suhu-kelembapan	Memberi konteks kondisi udara	DHT22, SHT31, BME280, atau sejenis	Periksa akurasi, rentang operasi, dan posisi pemasangan
Mikrokontroler	Membaca sensor dan mengirim data	ESP32 atau perangkat setara	Cocok jika Wi-Fi tersedia dan data dikirim ke

			cloud/server
Catu daya	Menyediakan listrik stabil	Adaptor 5V, power bank, baterai, panel surya	Sesuaikan dengan lokasi dan lama operasi
Casing	Melindungi perangkat	Kotak proyek dengan ventilasi udara	Harus melindungi perangkat tanpa menghambat aliran udara sensor
Konektivitas	Mengirim data ke platform	Wi-Fi, LoRaWAN, seluler	Pilih berdasarkan lokasi dan ketersediaan jaringan
Platform	Menyimpan dan menampilkan data	Cloud IoT, server lokal, ThingsBoard, Grafana, spreadsheet	Pilih sesuai kemampuan teknis dan kebutuhan data
Dashboard	Menampilkan informasi	Grafik, status, nilai terkini	Harus mudah dibaca pengguna sasaran

Estimasi biaya sebaiknya tidak ditulis sebagai angka tetap tanpa pengecekan harga aktual. Harga sensor, mikrokontroler, casing, dan layanan jaringan dapat berubah menurut waktu, lokasi, pemasok, kurs mata uang, dan ketersediaan barang. Karena itu, saat naskah final disiapkan, bagian estimasi biaya harus diperbarui berdasarkan harga pasar pada waktu penulisan [perlu referensi harga aktual].

6.3 Merancang Alur Data dan Dashboard

Setelah sensor dan perangkat dipilih, tahap berikutnya adalah merancang alur data. Alur data menjelaskan bagaimana informasi

bergerak dari sensor ke pengguna. Dalam proyek kualitas udara, alur dasar dapat dimulai dari sensor membaca data, mikrokontroler memproses data awal, data dikirim melalui jaringan, platform menyimpan data, dashboard menampilkan informasi, dan pengguna membaca hasil.

Alur data perlu dirancang sebelum perangkat dipasang agar sistem tidak berkembang secara acak. Pertanyaan yang perlu dijawab antara lain: data dikirim setiap berapa menit, format data seperti apa yang digunakan, satuan apa yang ditampilkan, bagaimana jika koneksi putus, bagaimana status sensor ditampilkan, dan siapa yang akan membaca dashboard. Jika pertanyaan ini tidak dijawab, proyek sering mengalami masalah saat data mulai terkumpul.

Dashboard kualitas udara mini sebaiknya menampilkan informasi yang sederhana. Halaman utama dapat memuat nilai terkini PM2.5, PM10, suhu, kelembapan, status perangkat, waktu pembaruan terakhir, grafik 24 jam, dan catatan keterbatasan data. Jika sistem digunakan untuk masyarakat umum, status sebaiknya menggunakan kata yang mudah dipahami. Jika sistem digunakan oleh teknisi, dashboard dapat menampilkan detail tambahan seperti kualitas sinyal, tegangan baterai, dan log pengiriman data.



Gambar 6. 1 Alur data proyek pemantauan kualitas udara

Format data harus konsisten. Setiap data sebaiknya memuat identitas perangkat, waktu pengukuran, lokasi, parameter, nilai, satuan, dan status perangkat. Format sederhana seperti JSON dapat digunakan

jika perangkat mengirim data ke server atau broker MQTT. Contoh struktur data dapat mencakup device_id, timestamp, location, pm25, pm10, temperature, humidity, battery, signal_quality, dan status.

Tabel 6. 3 Contoh struktur data untuk proyek kualitas udara

Elemen data	Contoh isi	Fungsi
device_id	udara_kelas_A_01	Mengidentifikasi perangkat
timestamp	2026-05-12T09:30:00+07:00	Menunjukkan waktu pembacaan
location	ruang_kelas_A	Menunjukkan lokasi sensor
pm25	18.5	Nilai indikator PM2.5
pm10	35.0	Nilai indikator PM10
temperature	30.2	Nilai suhu udara
humidity	68	Nilai kelembapan relatif
unit	µg/m³, °C, %	Menjelaskan satuan
battery	85%	Menunjukkan status daya jika relevan
status	normal	Menunjukkan kondisi perangkat

Dashboard juga perlu menampilkan catatan kualitas data. Jika sensor belum dikalibrasi, tuliskan. Jika data digunakan untuk indikasi awal, tuliskan. Jika sensor sedang offline, tampilkan. Transparansi seperti ini lebih penting daripada membuat dashboard terlihat seolah-olah sangat pasti. Data kualitas udara dapat memengaruhi persepsi risiko masyarakat, sehingga penyajiannya harus bertanggung jawab.

6.4 Pengujian, Kalibrasi Awal, dan Validasi Sederhana

Perangkat tidak boleh langsung dipasang di lokasi utama tanpa pengujian. Tahap pengujian awal membantu memastikan sensor terbaca, mikrokontroler berjalan stabil, koneksi data berhasil, platform menerima data, dan dashboard menampilkan nilai dengan satuan yang benar. Pengujian awal dapat dilakukan di meja kerja

selama beberapa jam atau beberapa hari sebelum perangkat dipasang di lokasi sebenarnya.

Pengujian pertama adalah pengujian fungsi. Sensor harus terbaca secara konsisten. Data harus memiliki format yang benar. Mikrokontroler tidak boleh sering restart. Koneksi harus dapat mengirim data sesuai interval. Dashboard harus menampilkan waktu pembaruan terakhir. Jika ada data yang hilang, sistem harus dapat menunjukkan status tersebut. Pengujian sederhana ini sering menemukan masalah dasar seperti kabel longgar, catu daya tidak stabil, salah satuan, atau kesalahan program.

Kalibrasi awal dan validasi sederhana perlu dilakukan sesuai kemampuan proyek. Untuk sensor partikulat berbiaya rendah, pendekatan yang sering dianjurkan adalah kolokasi, yaitu menempatkan sensor di dekat alat pembanding atau sensor lain dalam periode tertentu untuk melihat konsistensi pembacaan. EPA membahas kolokasi, koreksi data, quality assurance, dan quality control sebagai bagian dari praktik penggunaan sensor udara [34]. Kolokasi tidak membuat sensor otomatis menjadi alat referensi, tetapi membantu memahami perilaku sensor.

Jika tidak tersedia alat referensi, pembaca dapat melakukan validasi sederhana dengan beberapa cara. Pertama, gunakan dua sensor yang sama dan letakkan berdampingan untuk melihat apakah pola pembacaannya mirip. Kedua, bandingkan data dengan stasiun pemantauan resmi terdekat jika tersedia, dengan catatan bahwa lokasi dan metode pengukuran berbeda. Ketiga, catat peristiwa lapangan seperti hujan, lalu lintas padat, pembakaran, kegiatan bengkel, atau perubahan ventilasi. Catatan ini membantu menjelaskan pola data.

Validasi harus dipahami sebagai proses meningkatkan kepercayaan terhadap data, bukan jaminan akurasi absolut. Sensor dapat tetap memiliki bias meskipun sudah diuji. Pembacaan dapat berubah seiring waktu. Casing dapat memengaruhi aliran udara. Kelembapan dapat memengaruhi sensor partikulat. Oleh karena itu, hasil pengukuran harus selalu disertai keterangan metode, perangkat, lokasi, durasi, dan keterbatasan.

Tabel 6. 4 Checklist pengujian awal sistem pemantauan kualitas udara

Aspek pengujian	Pertanyaan pemeriksaan	Status
Pembacaan sensor	Apakah sensor membaca data secara konsisten?	
Satuan data	Apakah nilai dan satuan tampil benar?	
Timestamp	Apakah waktu pembacaan tercatat dengan benar?	
Koneksi	Apakah data terkirim sesuai interval?	
Platform	Apakah data masuk ke database atau platform?	
Dashboard	Apakah nilai terkini dan grafik tampil?	
Status perangkat	Apakah online/offline dan waktu terakhir tampil?	
Catu daya	Apakah perangkat stabil selama pengujian?	
Casing	Apakah udara tetap dapat mengalir ke sensor?	
Dokumentasi	Apakah konfigurasi, kode, dan lokasi pemasangan dicatat?	

Setelah pengujian awal selesai, perangkat dapat dipasang di lokasi pemantauan. Namun, pemasangan tetap harus disertai periode observasi awal. Selama periode ini, pengguna perlu memeriksa apakah data masuk stabil, apakah sensor terkena gangguan fisik, apakah casing terlalu panas, apakah posisi sensor aman, dan apakah dashboard dapat dipahami oleh pengguna.

6.5 Membaca Data dan Menyusun Rekomendasi

Membaca data kualitas udara membutuhkan kehati-hatian. Data tidak boleh hanya dilihat dari satu angka sesaat. Yang lebih penting adalah pola. Apakah nilai meningkat pada jam tertentu? Apakah nilai berbeda antara hari kerja dan akhir pekan? Apakah hujan menurunkan atau mengubah pola partikulat? Apakah ruang dengan

ventilasi lebih baik menunjukkan nilai berbeda? Apakah data meningkat saat aktivitas tertentu berlangsung?

Langkah pertama dalam membaca data adalah melihat kelengkapan data. Jika banyak data hilang, kesimpulan harus dibatasi. Langkah kedua adalah melihat tren waktu. Grafik 24 jam dapat membantu melihat pola harian. Grafik tujuh hari dapat membantu melihat pola mingguan. Langkah ketiga adalah membandingkan data dengan catatan lapangan. Misalnya, lonjakan partikulat pada pagi hari mungkin berkaitan dengan lalu lintas, pembersihan ruang, pembakaran sampah, aktivitas bengkel, atau kondisi cuaca.

Langkah keempat adalah menyusun rekomendasi praktis. Rekomendasi harus mengikuti tingkat keyakinan data. Jika data masih indikatif, rekomendasi sebaiknya berupa tindakan pemeriksaan dan perbaikan ringan, bukan keputusan besar. Contohnya adalah memperbaiki ventilasi, mengatur waktu membuka jendela, membersihkan sumber debu, memindahkan sensor ke lokasi yang lebih representatif, menambah titik pengukuran, atau melakukan pemantauan lebih lama.

Jika rekomendasi menyangkut kesehatan atau keselamatan, rujukan harus berasal dari lembaga resmi. WHO menyatakan bahwa pedoman kualitas udara global memberikan rekomendasi berbasis kesehatan untuk beberapa polutan utama [35]. Namun, penerjemahan data sensor murah menjadi rekomendasi kesehatan harus dilakukan sangat hati-hati. Sensor indikatif tidak boleh digunakan untuk menyatakan diagnosis kesehatan atau kepatuhan regulasi tanpa metode yang sesuai.

Tabel 6. 5 Contoh pembacaan data dan rekomendasi praktis

Pola data yang terlihat	Kemungkinan pertanyaan lanjutan	Rekomendasi awal yang aman
Nilai partikulat meningkat pada jam masuk sekolah	Apakah terkait lalu lintas, debu jalan, atau aktivitas pembersihan?	Tambah catatan lapangan dan pertimbangkan titik sensor dekat/jauh dari jalan
Suhu dan	Apakah ventilasi	Periksa ventilasi dan

kelembapan ruang tinggi saat kelas penuh	cukup?	pola buka-tutup jendela
Data melonjak singkat lalu kembali normal	Apakah ada aktivitas lokal atau gangguan sensor?	Cek catatan kegiatan dan status sensor sebelum menyimpulkan
Sensor sering offline	Apakah sinyal Wi-Fi lemah atau catu daya tidak stabil?	Perbaiki posisi router, antena, atau sumber daya
Dua sensor berbeda cukup jauh	Apakah lokasi dan casing berbeda?	Lakukan kolokasi dan periksa pemasangan

Laporan sederhana sebaiknya disusun setelah data terkumpul dalam periode tertentu. Laporan tidak perlu panjang, tetapi harus jelas. Isi minimal laporan meliputi tujuan proyek, lokasi pemantauan, periode pengukuran, perangkat yang digunakan, parameter, metode pengiriman data, ringkasan hasil, grafik utama, catatan keterbatasan, dan rekomendasi. Laporan harus membedakan antara temuan, interpretasi, dan rekomendasi.

Tabel 6. 6 Struktur laporan sederhana proyek kualitas udara

Bagian laporan	Isi utama
Judul proyek	Nama proyek dan lokasi pemantauan
Tujuan	Pertanyaan yang ingin dijawab
Metode	Sensor, perangkat, lokasi, interval data, platform
Periode data	Tanggal dan jam pengumpulan data
Hasil utama	Pola penting, nilai tinggi/rendah, grafik tren
Catatan lapangan	Aktivitas, cuaca, gangguan, perubahan lokasi
Keterbatasan	Kalibrasi, sensor indikatif, data hilang, lokasi terbatas
Rekomendasi	Tindakan praktis dan kebutuhan pemantauan lanjutan

6.6 Skema Rangkaian dan Implementasi Sederhana

Proyek pemantauan kualitas udara mini dapat dibuat dengan satu mikrokontroler, satu sensor partikulat, satu sensor suhu-kelembapan, sumber daya, dan platform pemantauan. Pada tahap awal, Wi-Fi dapat dipilih jika lokasi memiliki jaringan yang stabil. Jika lokasi jauh dari Wi-Fi, desain dapat disesuaikan dengan LoRaWAN atau seluler, tetapi kompleksitas dan biaya akan meningkat.

Skema rangkaian perlu mengikuti dokumentasi setiap perangkat. Sensor partikulat tertentu dapat menggunakan antarmuka UART atau I2C. Sensor suhu-kelembapan dapat menggunakan I2C, single-wire, atau antarmuka lain. Tegangan kerja harus diperiksa. Tidak semua sensor aman langsung dihubungkan ke semua mikrokontroler. Jika terdapat perbedaan level logika, rangkaian perlu disesuaikan. Kesalahan tegangan dapat merusak sensor atau mikrokontroler.



Gambar 6. 2 Skema konseptual rangkaian sistem pemantauan kualitas udara

Gambar 6.2 bersifat konseptual, bukan diagram kabel detail. Diagram kabel akhir harus dibuat berdasarkan tipe sensor dan papan mikrokontroler yang dipilih. Setiap pin, tegangan, ground, dan antarmuka komunikasi harus mengikuti datasheet resmi. Untuk publikasi buku, gambar rangkaian detail dapat dibuat setelah perangkat spesifik ditentukan.

Tabel 6. 7 Estimasi komponen dan catatan teknis proyek kualitas udara mini

Komponen	Jumlah	Fungsi	Catatan teknis	Estimasi biaya
Mikrokontroler ESP32 atau setara	1	Membaca sensor dan mengirim data	Pastikan Wi-Fi stabil dan catu daya cukup	[perlu harga aktual]
Sensor partikulat	1	Membaca indikator PM2.5/PM10	Pilih berdasarkan datasheet dan kebutuhan proyek	[perlu harga aktual]
Sensor suhu-kelembapan	1	Memberi konteks udara	Periksa akurasi dan rentang operasi	[perlu harga aktual]
Adaptor daya atau baterai	1	Menyediakan daya	Periksa kebutuhan arus sensor partikulat	[perlu harga aktual]
Casing berventilasi	1	Melindungi perangkat	Jangan menghalangi aliran udara sensor	[perlu harga aktual]
Kabel dan konektor	sesuai kebutuhan	Menghubungkan komponen	Gunakan koneksi yang kuat dan rapi	[perlu harga aktual]
Platform data	1	Menyimpan dan menampilkan	Cloud, server lokal, atau	[perlu harga aktual]

		data	open-source	jika berbayar]
--	--	------	-------------	-----------------------

Implementasi sebaiknya dimulai dalam tiga tahap. Tahap pertama adalah uji meja, yaitu memastikan sensor terbaca dan data tampil di komputer. Tahap kedua adalah uji koneksi, yaitu memastikan data dapat dikirim ke platform dan dashboard. Tahap ketiga adalah uji lokasi, yaitu memasang perangkat di lokasi sebenarnya dan memantau stabilitas selama beberapa hari. Tahap bertahap ini mengurangi risiko kesalahan yang sulit dilacak.

6.7 Latihan Akhir Bab

Latihan akhir bab ini meminta pembaca merancang proyek pemantauan kualitas udara mini. Pilih satu lokasi nyata, seperti ruang kelas, ruang kerja, bengkel, halaman sekolah, rumah ibadah, area parkir, atau lingkungan permukiman. Gunakan tabel berikut untuk menyusun rancangan awal.

Tabel 6. 8 Template rancangan proyek pemantauan kualitas udara mini

Komponen rancangan	Jawaban pembaca
Nama proyek	
Lokasi pemantauan	
Masalah awal	
Pertanyaan proyek	
Parameter yang dipantau	
Sensor yang dipilih	
Mikrokontroler atau gateway	
Sumber daya	
Jenis koneksi	
Platform penyimpanan data	
Elemen dashboard	
Interval pengiriman data	
Rencana pengujian awal	
Rencana validasi sederhana	

Risiko teknis	
Cara mengurangi risiko	
Bentuk laporan akhir	

Setelah tabel diisi, buat sketsa alur data dari sensor sampai dashboard. Kemudian tulis satu paragraf yang menjelaskan keterbatasan proyek. Keterbatasan dapat mencakup sensor yang belum dikalibrasi, lokasi pengukuran yang terbatas, data yang belum cukup panjang, atau belum adanya alat referensi. Penulisan keterbatasan merupakan bagian penting dari integritas proyek.

Kesimpulan Bab

Proyek pemantauan kualitas udara menghubungkan banyak konsep dasar IoT dalam satu implementasi. Proyek dimulai dari masalah dan pertanyaan pemantauan, bukan dari perangkat. Lokasi sensor harus dipilih dengan mempertimbangkan keterwakilan data dan keamanan pemasangan. Sensor dan perangkat harus dipilih berdasarkan parameter yang ingin diamati, dokumentasi teknis, sumber daya, casing, dan konektivitas.

Alur data perlu dirancang sejak awal agar data dari sensor dapat bergerak menuju platform dan dashboard secara konsisten. Dashboard harus menampilkan nilai terkini, grafik tren, status perangkat, dan catatan keterbatasan data. Pengujian, kalibrasi awal, dan validasi sederhana membantu meningkatkan kepercayaan terhadap data, tetapi tidak menjamin akurasi absolut. Interpretasi data harus dilakukan berdasarkan pola, konteks lapangan, dan rujukan resmi jika menyangkut kesehatan atau keselamatan.

Bab ini menekankan bahwa proyek kualitas udara yang baik bukan hanya proyek teknis, tetapi juga proyek komunikasi data. Data harus dikumpulkan dengan hati-hati, ditampilkan dengan jelas, dan digunakan secara bertanggung jawab. Pada bab berikutnya, pembahasan akan berlanjut ke proyek pemantauan kualitas air dan risiko pencemaran, dengan tantangan yang berbeda karena sensor harus bekerja dalam lingkungan cair yang lebih kompleks.

BAB 7

Proyek 2: Pemantauan Kualitas Air dan Risiko Pencemaran

Air adalah salah satu komponen lingkungan yang paling sensitif untuk dipantau. Perubahan kualitas air dapat berdampak pada kesehatan manusia, ekosistem, pertanian, perikanan, industri kecil, dan kehidupan masyarakat sehari-hari. Air yang tampak jernih belum tentu aman. Sebaliknya, air yang tampak keruh belum tentu memiliki penyebab yang sama di semua lokasi. Karena itu, pemantauan kualitas air harus dilakukan secara hati-hati, bertahap, dan bertanggung jawab.

Internet of Things dapat membantu pemantauan kualitas air dengan cara membaca parameter tertentu secara berkala, mengirim data ke platform, menampilkan grafik perubahan, dan memberi notifikasi awal ketika terjadi perubahan yang perlu diperiksa. Namun, sistem IoT tidak boleh dipahami sebagai pengganti uji laboratorium atau pengukuran resmi. Sensor pH, suhu, kekeruhan, TDS, konduktivitas, dan dissolved oxygen dapat memberi gambaran awal, tetapi interpretasi data tetap membutuhkan konteks, kalibrasi, validasi, dan rujukan standar yang sesuai.

Bab ini membahas penerapan IoT untuk pemantauan kualitas air. Pembahasan dimulai dari penentuan konteks pemantauan, pemilihan parameter, desain perangkat, tantangan lapangan, pengiriman data, ambang batas, notifikasi, pelaporan hasil, dan studi kasus kolam ikan berbasis sensor pH dan suhu. Penekanan utama diberikan pada prinsip kehati-hatian: data sensor harus diperlakukan sebagai bukti awal yang perlu ditafsirkan bersama kondisi lapangan.

7.1 Menentukan Konteks Pemantauan Air

Langkah pertama dalam proyek pemantauan kualitas air adalah menentukan konteks penggunaan air. Air dapat dipantau di kolam ikan, sungai kecil, saluran irigasi, tambak, akuaponik, reservoir, sumur, instalasi pengolahan air sederhana, atau badan air di sekitar permukiman. Setiap konteks memiliki tujuan dan risiko yang

berbeda. Karena itu, parameter yang dipilih, jenis sensor, frekuensi pengukuran, dan cara pelaporan tidak boleh disamakan untuk semua lokasi.

Pemantauan air dapat dibagi menjadi tiga tingkat. Tingkat pertama adalah pemantauan edukatif. Pada tingkat ini, tujuan utamanya adalah memahami prinsip dasar kualitas air dan melihat perubahan sederhana. Contohnya adalah proyek sekolah untuk membaca pH dan suhu air kolam. Tingkat kedua adalah pemantauan operasional. Pada tingkat ini, data digunakan untuk membantu pengelolaan kegiatan tertentu, seperti kolam ikan, akuaponik, irigasi, atau tambak. Tingkat ketiga adalah pemantauan resmi atau regulatif. Pada tingkat ini, data digunakan untuk menyatakan kepatuhan terhadap standar mutu, keamanan air minum, atau dugaan pencemaran. Tingkat ketiga memerlukan metode, alat, prosedur, dan otoritas yang jauh lebih ketat.

USGS National Field Manual menjelaskan bahwa pengumpulan data kualitas air memerlukan prosedur dan protokol terdokumentasi untuk menjaga konsistensi dan kualitas teknis pengukuran, termasuk untuk air permukaan dan air tanah [38]. Prinsip ini penting untuk proyek IoT, walaupun proyek yang dibangun berskala kecil. Tanpa prosedur yang jelas, data mudah menjadi kumpulan angka yang sulit dipercaya.

Dalam konteks air minum, WHO Guidelines for Drinking-water Quality menyatakan bahwa pedoman tersebut menjadi dasar otoritatif untuk penyusunan regulasi dan standar nasional dalam mendukung kesehatan masyarakat [39]. Ini menunjukkan bahwa pemantauan yang berkaitan dengan air minum tidak boleh dilakukan secara sembarangan. Data dari sensor IoT sederhana tidak cukup untuk menyatakan air aman diminum. Sensor dapat membantu pemantauan awal, tetapi keputusan kesehatan publik harus mengikuti standar dan pengujian resmi.

Dalam konteks pertanian, kualitas air juga harus dipahami berdasarkan tujuan penggunaannya. FAO menjelaskan bahwa kualitas air berkaitan dengan karakteristik pasokan air yang memengaruhi kesesuaiannya untuk penggunaan tertentu, termasuk pengaruhnya terhadap tanah dan tanaman [40]. Artinya, air yang

tidak sesuai untuk air minum belum tentu tidak dapat digunakan untuk irigasi, dan air yang tampak baik untuk irigasi belum tentu aman untuk konsumsi manusia. Konteks penggunaan menjadi kunci interpretasi.

Tabel 7. 1 Konteks pemantauan air dan tujuan penggunaan data

Konteks pemantauan	Tujuan umum	Contoh parameter awal	Catatan kehati-hatian
Kolam ikan	Menjaga kondisi operasional budidaya	Suhu, pH, dissolved oxygen, kekeruhan	Data membantu pengelolaan, tetapi perlu validasi jika terjadi kematian ikan atau gangguan besar
Sungai kecil	Mengamati perubahan kondisi air	Suhu, pH, kekeruhan, konduktivitas	Dugaan pencemaran perlu ditindaklanjuti dengan metode resmi
Saluran irigasi	Menilai kesesuaian awal untuk pertanian	Konduktivitas, TDS, pH, suhu	Interpretasi harus mempertimbangkan jenis tanaman, tanah, dan praktik irigasi
Tambak	Mendukung pengelolaan kualitas air budidaya	Suhu, pH, DO, salinitas, kekeruhan	Sensor perlu tahan lingkungan korosif dan dirawat rutin
Akuaponik	Menjaga keseimbangan sistem ikan dan tanaman	pH, suhu, DO, konduktivitas	Perubahan kecil dapat memengaruhi sistem biologis
Reservoir	Memantau perubahan	Suhu, kekeruhan,	Data sensor perlu dipadukan dengan

	umum dan peringatan awal	pH, konduktivitas	pengamatan manual dan uji laboratorium
--	--------------------------	-------------------	--

Menentukan konteks juga berarti menentukan batas klaim. Jika sistem hanya memantau pH dan suhu, maka laporan tidak boleh menyimpulkan kualitas air secara menyeluruh. Jika sistem tidak mengukur bakteri, logam berat, pestisida, atau nutrisi, maka aspek tersebut tidak boleh diklaim aman. Integritas proyek terletak pada kejelasan apa yang diukur dan apa yang tidak diukur.

7.2 Parameter Kualitas Air yang Relevan

Parameter kualitas air harus dipilih berdasarkan tujuan proyek. Untuk proyek awal, parameter yang umum digunakan adalah pH, suhu air, kekeruhan, TDS, konduktivitas, dan dissolved oxygen. Parameter-parameter ini tidak menggambarkan seluruh kualitas air, tetapi dapat memberi indikasi awal tentang perubahan kondisi.

pH menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan air. Nilai pH penting karena dapat memengaruhi proses kimia dan biologis dalam air. Pada kolam ikan, perubahan pH dapat memengaruhi kenyamanan dan kesehatan organisme. Pada irigasi, pH berhubungan dengan kesesuaian air bagi tanah dan tanaman. Namun, pembacaan pH sangat bergantung pada kalibrasi elektroda, suhu, kebersihan probe, dan larutan buffer yang digunakan. USGS menyediakan prosedur lapangan untuk pengukuran pH sebagai bagian dari pengukuran kualitas air [41].

Suhu air adalah parameter dasar yang sering diukur. Suhu memengaruhi proses biologis, reaksi kimia, dan kelarutan gas dalam air. EPA menjelaskan bahwa suhu termasuk parameter umum dalam pemantauan kualitas air dan berkaitan dengan kondisi ekosistem perairan [42]. Dalam sistem IoT, sensor suhu relatif mudah digunakan, tetapi penempatannya tetap perlu diperhatikan agar tidak terkena panas langsung dari matahari atau posisi yang tidak mewakili badan air.

Kekeruhan atau turbidity menunjukkan tingkat hamburan cahaya oleh partikel tersuspensi di air. Kekeruhan dapat meningkat karena sedimen, alga, limpasan permukaan, aktivitas manusia, atau

gangguan fisik. Sensor turbidity dapat membantu mendeteksi perubahan visual air, tetapi tidak menjelaskan jenis partikel atau sumber pencemar. Kekeruhan yang tinggi perlu ditafsirkan bersama kondisi hujan, arus, aktivitas sekitar, dan pengamatan lapangan.

TDS atau total dissolved solids menunjukkan perkiraan jumlah zat terlarut dalam air. Banyak sensor TDS sederhana sebenarnya menghitung estimasi TDS dari konduktivitas listrik. Karena komposisi ion berbeda-beda, hubungan antara konduktivitas dan TDS tidak selalu sama untuk semua jenis air. Konduktivitas sendiri menunjukkan kemampuan air menghantarkan listrik, yang berkaitan dengan konsentrasi ion terlarut. Untuk irigasi, FAO membahas salinitas dan konduktivitas listrik sebagai faktor penting yang memengaruhi kesesuaian air bagi tanaman dan tanah [40].

Dissolved oxygen atau DO menunjukkan jumlah oksigen terlarut dalam air. Parameter ini sangat penting untuk kolam ikan, tambak, sungai, dan ekosistem perairan. DO dipengaruhi oleh suhu, aktivitas biologis, fotosintesis, dekomposisi bahan organik, aerasi, dan aliran air. Sensor DO biasanya membutuhkan perawatan dan kalibrasi lebih serius daripada sensor suhu sederhana. Untuk penggunaan operasional yang penting, sensor DO harus dipilih dan dirawat dengan teliti.

Tabel 7. 2 Parameter kualitas air, satuan, fungsi pengamatan, sensor potensial, dan catatan validasi

Parameter	Satuan umum	Fungsi pengamatan	Sensor potensial	Catatan validasi
pH	unit pH	Menilai tingkat asam/basa air	Probe pH analog/digital	Perlu kalibrasi dengan larutan buffer dan kompensasi suhu jika tersedia
Suhu air	°C	Memberi	Sensor suhu	Bandingkan

		konteks proses biologis dan kimia	tahan air	n dengan termometer referensi
Kekeruhan	NTU atau nilai relatif sensor	Mengamati partikel tersuspensi dan perubahan kejernihan	Sensor turbidity optik	Perlu pembandingan atau larutan standar untuk data kuantitatif
TDS	mg/L atau ppm	Estimasi zat terlarut	Sensor TDS berbasis konduktivitas	Interpretasi bergantung komposisi ion dan kalibrasi
Konduktivitas	$\mu\text{S/cm}$ atau mS/cm	Mengamati ion terlarut dan salinitas relatif	Sensor electrical conductivity	Perlu kompensasi suhu dan larutan standar
Dissolved oxygen	mg/L atau % saturasi	Menilai oksigen tersedia bagi organisme air	Sensor DO galvanic, polarographic, atau optical	Perlu kalibrasi dan perawatan rutin

Parameter tambahan seperti salinitas, oxidation-reduction potential, amonia, nitrat, fosfat, E. coli, pestisida, dan logam berat mungkin relevan untuk beberapa kasus. Namun, banyak parameter tersebut memerlukan metode laboratorium atau sensor khusus yang lebih kompleks. Karena itu, proyek IoT pemula sebaiknya tidak mengklaim mampu mendeteksi seluruh risiko pencemaran hanya dengan beberapa sensor dasar.

7.3 Desain Perangkat dan Tantangan Lapangan

Pemantauan kualitas air memiliki tantangan fisik yang lebih berat daripada pemantauan udara dalam ruangan. Sensor dapat terendam, terkena arus, tertutup lumpur, ditumbuhi lumut, digigit hewan, terkena panas matahari, mengalami korosi, atau rusak karena kabel tertarik. Perangkat elektronik harus dipisahkan dari air, tetapi sensor tetap harus bersentuhan dengan air. Desain mekanik menjadi sama pentingnya dengan desain elektronik.

Tantangan pertama adalah perlindungan perangkat. Mikrokontroler, baterai, modul komunikasi, dan konektor harus ditempatkan dalam kotak tahan air atau minimal terlindung dari percikan dan hujan. Namun, casing tidak boleh membuat perangkat terlalu panas atau menyulitkan perawatan. Kabel sensor harus diberi strain relief agar tidak mudah tertarik. Konektor luar ruangan perlu dilindungi dari korosi.

Tantangan kedua adalah biofouling. Biofouling adalah penempelan organisme, alga, biofilm, atau kotoran pada permukaan sensor. Pada sensor pH, turbidity, DO, dan konduktivitas, biofouling dapat mengganggu pembacaan. Sensor yang awalnya bekerja baik dapat berubah pembacaannya setelah beberapa hari atau minggu di dalam air. Karena itu, pemantauan air memerlukan jadwal pembersihan dan pemeriksaan fisik.

Tantangan ketiga adalah posisi sensor. Sensor yang terlalu dekat permukaan dapat dipengaruhi cahaya matahari, gelombang, atau sampah mengapung. Sensor yang terlalu dekat dasar dapat tertutup sedimen. Sensor yang ditempatkan dekat inlet, outlet, aerator, atau aliran deras mungkin membaca kondisi lokal, bukan kondisi keseluruhan. Jika tujuan proyek adalah memantau kolam secara umum, posisi sensor harus dipilih agar mewakili kondisi utama. Jika tujuan proyek adalah memantau titik buangan atau saluran masuk, sensor memang dapat ditempatkan dekat titik tersebut, tetapi interpretasinya harus spesifik.

Tantangan keempat adalah sumber daya. Lokasi air sering tidak memiliki listrik tetap. Jika menggunakan baterai, interval pengiriman data dan konsumsi daya sensor harus diperhitungkan. Beberapa sensor membutuhkan waktu pemanasan, stabilisasi, atau

arus yang lebih besar. Jika menggunakan panel surya, desain harus memperhitungkan cuaca, posisi panel, kapasitas baterai, dan keamanan fisik.

Tantangan kelima adalah keselamatan. Pemasangan sensor di sungai, tambak, atau reservoir dapat berisiko. Pengguna harus memperhatikan arus, kedalaman air, tanah licin, cuaca, hewan, akses lokasi, dan keamanan peralatan. Jika perangkat terhubung ke listrik utama, instalasi harus mengikuti prosedur keselamatan listrik dan sebaiknya dilakukan oleh personel yang kompeten.

Tabel 7. 3 Tantangan lapangan dalam proyek IoT kualitas air dan strategi mitigasi

Tantangan	Dampak terhadap sistem	Strategi mitigasi
Sensor terendam terus-menerus	Risiko kerusakan, drift, dan biofouling	Pilih sensor sesuai lingkungan dan buat jadwal pembersihan
Korosi konektor dan kabel	Data tidak stabil atau perangkat mati	Gunakan konektor terlindung dan inspeksi berkala
Arus air atau gelombang	Sensor bergerak atau rusak	Gunakanudukan yang kuat dan posisi yang aman
Sedimen dan lumpur	Sensor tertutup dan pembacaan bias	Hindari dasar berlumpur kecuali memang menjadi target pengukuran
Sinar matahari langsung	Casing panas dan data suhu bias	Gunakan pelindung dan posisi pemasangan yang sesuai
Lokasi tanpa listrik	Perangkat cepat mati	Gunakan baterai, panel surya, interval data efisien
Koneksi lemah	Data hilang atau terlambat	Gunakan buffer lokal, gateway, atau konektivitas alternatif
Risiko keselamatan	Bahaya bagi pengguna	Gunakan prosedur kerja aman dan hindari

pemasangan		pemasangan saat kondisi berbahaya
------------	--	-----------------------------------

Desain perangkat sebaiknya diuji di lingkungan terkendali sebelum dipasang di lokasi utama. Sensor dapat diuji dalam ember atau kolam kecil untuk memastikan pembacaan masuk akal, casing tidak bocor, kabel cukup kuat, dan data terkirim stabil. Setelah itu, perangkat dapat dipasang di lokasi lapangan untuk periode uji pendek sebelum digunakan jangka panjang.

7.4 Pengiriman Data, Ambang Batas, dan Notifikasi

Dalam proyek kualitas air, data tidak selalu perlu dikirim setiap detik. Banyak parameter seperti pH, suhu, konduktivitas, dan kekeruhan dapat dikirim setiap beberapa menit atau puluhan menit, tergantung tujuan. Untuk kolam ikan, interval 5 sampai 15 menit mungkin cukup untuk pemantauan operasional awal, tetapi kebutuhan sebenarnya bergantung pada dinamika sistem. Untuk sungai yang rawan perubahan cepat setelah hujan, interval dapat dibuat lebih rapat pada kondisi tertentu. Untuk proyek edukasi, interval lebih jarang mungkin cukup.

Pengiriman data harus memuat timestamp, identitas sensor, lokasi, parameter, nilai, satuan, dan status perangkat. Jika koneksi terputus, perangkat atau gateway sebaiknya menyimpan data sementara. Data yang terlambat harus tetap membawa timestamp asli agar grafik tidak menyesatkan. Jika sensor membutuhkan kalibrasi ulang atau terjadi error, status tersebut perlu dikirim bersama data.

Ambang batas harus ditentukan berdasarkan konteks. Untuk kolam ikan, ambang pH dan suhu harus disesuaikan dengan jenis ikan, fase budidaya, dan pedoman budidaya yang relevan [perlu referensi spesifik]. Untuk air minum, ambang harus mengikuti standar nasional atau pedoman WHO serta uji laboratorium yang sesuai [39]. Untuk irigasi, interpretasi konduktivitas, TDS, dan pH perlu merujuk pedoman kualitas air pertanian seperti FAO [40]. Untuk sungai atau badan air umum, ambang harus merujuk regulasi mutu air yang berlaku di wilayah tersebut [perlu referensi regulasi lokal]. Notifikasi sebaiknya tidak langsung dipicu oleh satu pembacaan ekstrem. Sensor air dapat menghasilkan lonjakan sesaat karena

gelembung, kotoran, gangguan kabel, atau perubahan aliran. Sistem dapat menggunakan beberapa pembacaan berturut-turut, rata-rata bergerak, atau durasi minimum sebelum mengirim peringatan. Misalnya, notifikasi dikirim jika pH berada di luar rentang operasional selama tiga pembacaan berturut-turut, bukan hanya satu kali.

Tabel 7. 4 Contoh logika notifikasi kualitas air

Kasus	Kondisi pemicu	Notifikasi	Catatan kehati-hatian
pH berubah tajam	Perubahan besar dalam periode pendek	“Periksa sensor pH dan kondisi air”	Pastikan bukan akibat sensor kotor atau perlu kalibrasi
Suhu air meningkat	Suhu lebih tinggi dari batas operasional proyek	“Periksa lokasi sensor, naungan, dan kondisi kolam”	Batas harus sesuai konteks organisme atau penggunaan
Kekeruhan naik	Kenaikan bertahan beberapa pembacaan	“Periksa limpasan, sedimen, atau gangguan fisik”	Kekeruhan tidak otomatis menunjukkan jenis pencemar
DO menurun	DO turun selama periode tertentu	“Periksa aerasi dan aktivitas biologis”	Interpretasi DO perlu memperhatikan suhu dan waktu
Sensor offline	Tidak ada data masuk selama periode tertentu	“Perangkat tidak mengirim data”	Bedakan masalah sistem dari masalah kualitas air

Notifikasi yang baik harus berisi informasi yang dapat ditindaklanjuti. Pesan “pH abnormal” kurang membantu. Pesan yang lebih baik adalah “Sensor pH kolam 1 menunjukkan nilai di luar

rentang operasional selama 15 menit. Periksa probe, lakukan pembacaan manual, dan amati kondisi ikan.” Pesan tersebut tidak langsung menyimpulkan pencemaran, tetapi mengarahkan pengguna untuk memverifikasi.

7.5 Pelaporan Hasil Pemantauan

Pelaporan adalah bagian penting dari proyek pemantauan kualitas air. Tanpa laporan, data hanya tersimpan di dashboard dan sulit digunakan untuk pembelajaran, evaluasi, atau keputusan. Laporan tidak harus panjang, tetapi harus jelas, jujur, dan membedakan antara temuan awal dan kesimpulan definitif.

Laporan kualitas air sebaiknya memuat tujuan pemantauan, lokasi, periode pengukuran, metode, perangkat, parameter, frekuensi data, hasil utama, grafik, catatan lapangan, keterbatasan, dan rekomendasi. Jika sensor belum dikalibrasi dengan alat referensi, tuliskan. Jika ada data hilang, tuliskan. Jika lokasi sensor hanya satu titik, jangan menyimpulkan kondisi seluruh badan air. Jika parameter yang diukur terbatas, jangan menyimpulkan kualitas air secara menyeluruh.

USGS menekankan pentingnya prosedur terdokumentasi dalam pengumpulan data kualitas air untuk menjaga konsistensi dan kualitas teknis [38]. Prinsip dokumentasi ini dapat diterapkan pada proyek IoT sederhana. Setiap laporan perlu menjelaskan bagaimana data diperoleh, bukan hanya menampilkan hasil. Dengan demikian, pembaca laporan dapat menilai seberapa kuat data tersebut.

Tabel 7. 5 Struktur laporan sederhana pemantauan kualitas air

Bagian laporan	Isi yang disarankan
Judul	Nama proyek, lokasi, dan periode pemantauan
Latar belakang	Masalah atau alasan pemantauan dilakukan
Tujuan	Pertanyaan yang ingin dijawab
Lokasi	Deskripsi lokasi, foto, koordinat jika diperlukan dan aman
Metode	Sensor, perangkat, interval data, platform, prosedur pemasangan

Kalibrasi dan validasi	Cara kalibrasi, alat pembanding, tanggal pemeriksaan
Hasil	Grafik, tabel ringkasan, pola penting
Catatan lapangan	Hujan, aktivitas manusia, perubahan warna/bau, gangguan sensor
Keterbatasan	Sensor, lokasi, durasi, data hilang, belum ada uji laboratorium
Rekomendasi	Tindakan praktis, pemantauan lanjutan, kebutuhan pengujian resmi

Dalam menulis hasil, gunakan bahasa yang proporsional. Kalimat “air tercemar” sebaiknya dihindari jika data hanya berasal dari satu sensor kekeruhan tanpa uji pendukung. Kalimat yang lebih tepat adalah “sensor menunjukkan peningkatan kekeruhan pada periode tertentu, sehingga diperlukan pemeriksaan lapangan dan pengujian lanjutan untuk mengetahui penyebabnya.” Bahasa semacam ini menjaga integritas ilmiah dan menghindari kesimpulan berlebihan.

7.6 Studi Kasus: Pemantauan Kolam Ikan Berbasis Sensor pH dan Suhu

Sebuah kelompok budidaya ikan kecil ingin memantau kondisi kolam karena beberapa kali ikan terlihat kurang aktif pada pagi hari. Kelompok tersebut belum memiliki sistem pemantauan otomatis. Pengamatan dilakukan manual, tetapi tidak tercatat dengan baik. Mereka memutuskan membangun sistem IoT sederhana untuk memantau pH dan suhu air.

Tujuan proyek adalah memahami pola harian pH dan suhu, bukan langsung mendiagnosis penyebab gangguan ikan. Lokasi sensor dipilih pada bagian kolam yang relatif mewakili kondisi air, tidak terlalu dekat inlet, outlet, atau aerator. Sensor pH dikalibrasi menggunakan larutan buffer sebelum dipasang. Sensor suhu dibandingkan dengan termometer manual. Data dikirim setiap 10 menit ke dashboard.

Dashboard menampilkan nilai pH, suhu, grafik 24 jam, grafik 7 hari, status perangkat, dan catatan kalibrasi terakhir. Notifikasi dikirim jika pH berubah tajam atau suhu melewati batas operasional yang ditentukan oleh pengelola berdasarkan pedoman budidaya yang

relevan [perlu referensi spesifik]. Notifikasi tidak langsung menyatakan air berbahaya, tetapi meminta pengguna melakukan pemeriksaan manual.

Setelah dua minggu, data menunjukkan bahwa suhu air meningkat pada siang hari dan turun pada malam hingga pagi. pH juga menunjukkan pola harian tertentu. Pada beberapa hari, terjadi perubahan pH yang tidak biasa setelah hujan. Kelompok budidaya kemudian menambahkan catatan cuaca dan aktivitas pemberian pakan ke dalam laporan. Mereka juga menyadari bahwa sensor perlu dibersihkan karena pembacaan mulai tidak stabil.

Tabel 7. 6 Rancangan proyek pemantauan kolam ikan berbasis pH dan suhu

Elemen proyek	Keputusan rancangan	Catatan
Tujuan	Memahami pola pH dan suhu kolam	Tidak digunakan sebagai diagnosis tunggal
Parameter	pH dan suhu air	Parameter awal, belum mencakup DO atau amonia
Sensor	Probe pH dan sensor suhu tahan air	Perlu kalibrasi dan perawatan
Interval data	Setiap 10 menit	Dapat disesuaikan setelah uji awal
Lokasi sensor	Area yang relatif mewakili kolam	Hindari dekat inlet, outlet, atau aerator jika tujuan umum
Dashboard	Nilai terkini, grafik 24 jam, grafik 7 hari, status perangkat	Sertakan catatan kalibrasi
Notifikasi	Perubahan tajam atau nilai di luar rentang operasional	Rentang harus berdasarkan pedoman budidaya atau pengalaman tervalidasi
Validasi	Bandingkan suhu dengan termometer dan pH dengan alat	Catat tanggal dan hasil pemeriksaan

	manual	
Keterbatasan	Belum mengukur DO, amonia, nitrit, atau bakteri	Jangan menyimpulkan kualitas air secara menyeluruh

Studi kasus ini menunjukkan bahwa proyek sederhana tetap dapat berguna jika batasnya jelas. Dengan dua sensor saja, pengguna dapat melihat pola harian dan mendeteksi perubahan awal. Namun, jika masalah ikan berlanjut, sistem perlu diperluas dengan parameter lain seperti dissolved oxygen atau uji laboratorium sesuai kebutuhan.

7.7 Latihan Akhir Bab

Latihan akhir bab ini meminta pembaca menyusun format laporan kualitas air untuk satu proyek. Pilih salah satu konteks: kolam ikan, sungai kecil, saluran irigasi, akuaponik, tambak, atau reservoir. Setelah itu, isi tabel berikut sebagai rancangan laporan awal.

Tabel 7. 7 Template rancangan laporan pemantauan kualitas air

Komponen laporan	Jawaban pembaca
Judul proyek	
Lokasi pemantauan	
Jenis badan air atau sistem air	
Tujuan pemantauan	
Parameter yang diukur	
Sensor yang digunakan	
Interval pengukuran	
Periode pemantauan	
Metode kalibrasi	
Metode validasi sederhana	
Catatan lapangan yang perlu dicatat	
Bentuk dashboard	
Ambang atau logika notifikasi	
Dasar rujukan ambang	
Keterbatasan data	
Rekomendasi tindak lanjut	

Setelah tabel diisi, buat satu paragraf kesimpulan sementara yang tidak berlebihan. Gunakan pola berikut: “Berdasarkan parameter yang dipantau, data menunjukkan ... Namun, karena pengukuran hanya mencakup ..., hasil ini belum dapat digunakan untuk menyimpulkan ... Diperlukan ... untuk verifikasi lebih lanjut.” Pola ini membantu pembaca membedakan temuan awal dari kesimpulan definitif.

Kesimpulan Bab

Pemantauan kualitas air berbasis IoT dapat membantu pengguna memahami perubahan kondisi air secara lebih teratur. Sensor pH, suhu, kekeruhan, TDS, konduktivitas, dan dissolved oxygen dapat memberi informasi awal yang berguna untuk edukasi, pengelolaan kolam, irigasi, akuaponik, tambak, dan pengamatan badan air. Namun, kualitas air adalah isu sensitif karena berkaitan dengan kesehatan, ekosistem, dan regulasi. Karena itu, data sensor harus ditafsirkan secara hati-hati.

Bab ini menekankan bahwa konteks penggunaan air menentukan desain pemantauan. Pemantauan edukatif berbeda dari pemantauan operasional, dan keduanya berbeda dari pemantauan resmi. Ambang batas tidak boleh dibuat sembarangan. Interpretasi harus merujuk standar, pedoman, atau konteks penggunaan yang relevan. Desain perangkat harus memperhatikan sensor terendam, korosi, biofouling, posisi pemasangan, sumber daya, konektivitas, dan keselamatan.

Pelaporan hasil harus membedakan temuan awal dari kesimpulan definitif. Jika data hanya berasal dari sensor sederhana, laporan harus menyatakan keterbatasannya. Jika diperlukan keputusan kesehatan, hukum, atau regulatif, pengujian resmi dan metode standar harus digunakan. Pada bab berikutnya, pembahasan akan berlanjut ke proyek smart farming dan konservasi sumber daya, dengan fokus pada kelembapan tanah, cuaca mikro, irigasi cerdas, dan efisiensi penggunaan air.

BAB 8

Proyek 3: Smart Farming dan Konservasi Sumber Daya

Pertanian selalu bergantung pada kemampuan manusia membaca kondisi lahan. Petani memperhatikan warna daun, kelembapan tanah, cuaca, pertumbuhan tanaman, hama, dan ketersediaan air. Pengamatan semacam ini tetap penting dan tidak dapat sepenuhnya digantikan oleh teknologi. Namun, Internet of Things dapat membantu membuat sebagian kondisi lahan lebih terukur dan terdokumentasi. Data dari sensor dapat memberi gambaran kapan tanah mulai kering, kapan suhu lingkungan meningkat, kapan curah hujan terjadi, dan bagaimana sistem irigasi merespons kondisi tersebut.

Smart farming atau pertanian cerdas tidak harus dimulai dari sistem besar yang mahal. Untuk banyak pengguna, langkah pertama yang lebih realistis adalah membangun sistem kecil yang memantau kelembapan tanah, suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya, dan kondisi irigasi. Dari data sederhana tersebut, pengguna dapat mulai memahami pola lahan dan membuat keputusan yang lebih terarah. Sistem dapat dikembangkan secara bertahap, dari pemantauan manual berbasis dashboard menuju irigasi semi-otomatis atau otomatis.

Bab ini membahas penerapan IoT dalam smart farming dan konservasi sumber daya. Fokus utama bab ini adalah pemantauan kelembapan tanah, cuaca mikro, irigasi cerdas, penggunaan aktuator, optimasi air dan energi, serta evaluasi sistem. Bab ini tidak memposisikan IoT sebagai pengganti pengalaman petani, tetapi sebagai alat bantu untuk memperkuat pengamatan, pencatatan, dan pengambilan keputusan.

8.1 Pertanian Berbasis Data dalam Skala Sederhana

Pertanian berbasis data berarti keputusan pengelolaan lahan tidak hanya dibuat berdasarkan kebiasaan, tetapi juga didukung oleh pengamatan terukur. Dalam skala sederhana, data dapat berasal dari

sensor kelembapan tanah, suhu udara, kelembapan udara, curah hujan, intensitas cahaya, atau catatan manual tentang penyiraman dan kondisi tanaman. Data tersebut membantu pengguna melihat hubungan antara cuaca, kondisi tanah, dan respons tanaman.

Precision agriculture atau pertanian presisi secara umum menggunakan teknologi untuk mengamati variasi kondisi lahan dan mendukung keputusan yang lebih tepat. Literatur terbaru tentang sensor pintar dan data pintar dalam pertanian presisi menunjukkan bahwa integrasi sensor, IoT, big data, dan kecerdasan buatan banyak diarahkan untuk optimasi pengelolaan tanaman, penggunaan sumber daya, dan keberlanjutan sektor pertanian [44]. Namun, pada tingkat pengguna umum, konsep ini dapat dimulai dari pertanyaan praktis: kapan tanaman benar-benar membutuhkan air?

Pertanyaan tersebut tampak sederhana, tetapi jawabannya tidak selalu mudah. Tanah bagian atas dapat terlihat kering, sementara bagian akar masih cukup lembap. Sebaliknya, permukaan tanah dapat terlihat basah setelah hujan ringan, tetapi kelembapan belum cukup masuk ke zona akar. Jenis tanah juga berpengaruh. Tanah berpasir cepat kehilangan air. Tanah liat dapat menahan air lebih lama tetapi juga berisiko tergenang. Karena itu, sensor kelembapan tanah dapat membantu memberi indikasi kondisi media tanam pada kedalaman tertentu.

Sistem kecil untuk pertanian berbasis data dapat dimulai dari satu bedeng tanaman, satu pot besar, satu rumah kaca kecil, atau satu lahan percobaan. Sensor dipasang pada kedalaman yang relevan dengan akar tanaman. Data dikirim ke dashboard setiap beberapa menit atau puluhan menit. Pengguna mencatat kapan penyiraman dilakukan dan bagaimana kondisi tanaman berubah. Setelah beberapa minggu, pola mulai terlihat. Pengguna dapat mengetahui apakah penyiraman terlalu sering, terlalu jarang, atau tidak sesuai dengan perubahan cuaca.

Tabel 8. 1 Contoh pertanyaan pertanian yang dapat dibantu dengan data IoT

Pertanyaan lapangan	Data yang dibutuhkan	Bentuk keputusan
Kapan tanaman perlu disiram?	Kelembapan tanah, suhu, cuaca, jenis tanaman	Menentukan waktu penyiraman
Apakah lahan terlalu sering disiram?	Riwayat irigasi, kelembapan tanah, kondisi tanaman	Mengurangi frekuensi atau durasi irigasi
Apakah rumah kaca terlalu panas?	Suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya	Membuka ventilasi atau menyalakan kipas
Apakah hujan cukup menggantikan penyiraman?	Curah hujan, kelembapan tanah setelah hujan	Menunda irigasi manual
Apakah pompa bekerja sesuai jadwal?	Status pompa, arus listrik, kelembapan tanah sebelum-sesudah	Mengevaluasi kinerja aktuator

Pendekatan skala kecil penting karena mengurangi risiko. Pengguna tidak perlu langsung memasang puluhan sensor atau mengotomatisasi seluruh lahan. Sistem yang terlalu besar sejak awal sering sulit dirawat dan sulit dievaluasi. Lebih baik memulai dari satu titik yang jelas, mempelajari perilaku sensor, memahami pola tanah, lalu memperluas sistem jika manfaatnya terbukti.

8.2 Sensor Tanah dan Cuaca Mikro

Sensor tanah dan cuaca mikro adalah dasar banyak proyek smart farming. Sensor tanah membantu membaca kondisi media tanam, sedangkan sensor cuaca mikro membantu membaca kondisi atmosfer lokal di sekitar tanaman. Keduanya saling melengkapi. Tanah menunjukkan ketersediaan air di zona akar, sedangkan cuaca mikro menunjukkan faktor yang memengaruhi penguapan, stres tanaman, dan kebutuhan irigasi.

Sensor kelembapan tanah yang banyak digunakan dalam proyek IoT berbiaya rendah biasanya bekerja dengan prinsip resistif atau kapasitif. Sensor resistif mengukur perubahan hambatan listrik di tanah. Sensor ini murah, tetapi lebih rentan terhadap korosi karena kontak listrik langsung dengan media basah. Sensor kapasitif mengukur perubahan sifat dielektrik media di sekitar sensor. Sensor kapasitif umumnya lebih tahan dibanding sensor resistif, tetapi tetap memerlukan kalibrasi karena responsnya dipengaruhi jenis tanah, kepadatan, salinitas, suhu, dan cara pemasangan.

Kajian tentang kalibrasi sensor kelembapan tanah berbasis permitivitas dielektrik menekankan bahwa efektivitas metode kalibrasi bergantung pada tipe sensor, jenis tanah, dan kondisi lingkungan [45]. Artinya, angka sensor tidak boleh langsung dianggap sama untuk semua lahan. Nilai yang menunjukkan “cukup lembap” pada tanah berpasir belum tentu sama maknanya pada tanah liat atau media tanam organik. Karena itu, proyek smart farming harus melakukan kalibrasi lokal atau setidaknya pengamatan pembandingan.

Kedalaman sensor juga sangat penting. Jika sensor dipasang terlalu dangkal, data sangat dipengaruhi pengeringan permukaan dan tidak selalu mewakili zona akar. Jika sensor terlalu dalam, data mungkin tidak sensitif terhadap kebutuhan air tanaman muda. Kedalaman yang tepat bergantung pada jenis tanaman, fase pertumbuhan, struktur akar, dan sistem irigasi. Untuk tanaman sayuran daun, kedalaman sensor dapat berbeda dari tanaman cabai, tomat, atau tanaman tahunan. Angka kedalaman spesifik perlu merujuk pedoman agronomi atau hasil uji lapangan untuk tanaman yang dimaksud [perlu referensi spesifik tanaman].

Sensor cuaca mikro mencakup suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya, curah hujan, kecepatan angin, dan tekanan udara. Suhu dan kelembapan udara membantu memahami kondisi lingkungan tanaman. Intensitas cahaya membantu mengevaluasi paparan matahari, terutama pada rumah kaca atau tanaman dalam naungan. Curah hujan membantu menentukan apakah irigasi perlu ditunda. Kecepatan angin dapat memengaruhi evapotranspirasi dan kondisi rumah kaca.

FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 menjelaskan prosedur untuk menghitung evapotranspirasi tanaman berdasarkan data meteorologi dan koefisien tanaman [46]. Dalam proyek IoT skala sederhana, pembaca tidak harus langsung menghitung evapotranspirasi secara penuh. Namun, prinsipnya penting: kebutuhan air tanaman dipengaruhi oleh cuaca, tanaman, tanah, dan pengelolaan. Sensor kelembapan tanah saja berguna, tetapi data cuaca mikro membuat interpretasi menjadi lebih kuat.

Tabel 8. 2 Sensor tanah dan cuaca mikro untuk smart farming

Parameter	Sensor potensial	Fungsi dalam proyek	Catatan validasi
Kelembapan tanah	Sensor resistif, kapasitif, atau sensor profil tanah	Menilai indikasi ketersediaan air di media tanam	Perlu kalibrasi lokal berdasarkan jenis tanah dan kedalaman
Suhu tanah	Sensor suhu tanah	Memantau kondisi zona akar	Perlu posisi pemasangan konsisten
Suhu udara	Sensor suhu digital	Menilai kondisi iklim mikro	Hindari paparan matahari langsung tanpa pelindung
Kelembapan udara	Sensor kelembapan digital	Menilai kondisi iklim mikro dan potensi stres	Perlu perlindungan dari air langsung dan kondensasi
Intensitas cahaya	Sensor cahaya atau PAR sensor	Memantau paparan cahaya	Orientasi sensor memengaruhi hasil
Curah hujan	Rain gauge	Menentukan pengaruh hujan terhadap irigasi	Harus bebas dari penghalang seperti atap atau

			pohon
Kecepatan angin	Anemometer	Memahami penguapan dan ventilasi	Ketinggian dan penghalang memengaruhi pembacaan

Penempatan sensor harus terdokumentasi. Setiap sensor tanah sebaiknya dicatat kedalaman, jarak dari tanaman, jenis media, posisi terhadap emitter irigasi, dan tanggal pemasangan. Sensor cuaca mikro sebaiknya dicatat ketinggian, pelindung, arah, dan penghalang di sekitarnya. Dokumentasi ini membantu ketika data terlihat aneh atau ketika sistem diperluas ke lokasi lain.

8.3 Irigasi Cerdas dan Aktuator

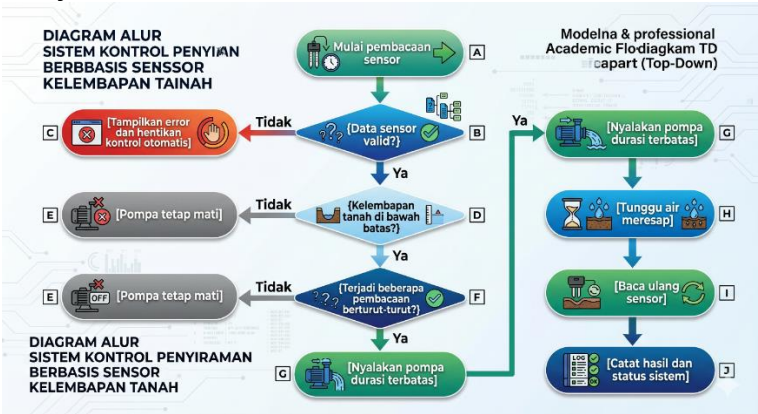
Irigasi cerdas adalah penggunaan data untuk membantu keputusan penyiraman. Pada tahap awal, sistem dapat hanya memberi rekomendasi, misalnya “tanah mulai kering, periksa kebutuhan penyiraman.” Pada tahap berikutnya, sistem dapat mengaktifkan aktuator seperti pompa atau katup solenoid. Namun, otomatisasi irigasi harus dirancang dengan hati-hati karena melibatkan air, listrik, tekanan, dan risiko kegagalan mekanik.

Aktuator yang umum digunakan dalam proyek irigasi cerdas adalah relay, pompa air, solenoid valve, dan kadang motor penggerak. Relay berfungsi sebagai saklar elektrik yang memungkinkan mikrokontroler mengendalikan perangkat berdaya lebih besar. Pompa mengalirkan air dari sumber ke tanaman. Solenoid valve membuka atau menutup aliran air pada pipa. Dalam sistem yang lebih rapi, relay atau modul pengendali ditempatkan terpisah dari rangkaian sensor, dan perangkat daya tinggi diberi proteksi sesuai standar keselamatan.

Prinsip keselamatan utama adalah memisahkan rangkaian kontrol tegangan rendah dari rangkaian daya tinggi. Mikrokontroler seperti ESP32 bekerja pada tegangan rendah, sedangkan pompa AC atau sistem listrik bangunan dapat berbahaya. Pengguna pemula tidak boleh menyambungkan perangkat listrik utama tanpa pemahaman dan prosedur keselamatan. Instalasi yang melibatkan tegangan listrik rumah atau pompa besar sebaiknya dilakukan oleh teknisi yang

kompeten. Untuk pelatihan, sistem dapat dimulai dengan pompa DC tegangan rendah agar risiko lebih terkendali.

Logika kontrol irigasi sederhana dapat menggunakan ambang kelembapan tanah. Misalnya, jika kelembapan tanah berada di bawah batas bawah selama beberapa pembacaan berturut-turut, sistem menyalakan pompa selama durasi tertentu. Setelah itu, sistem menunggu beberapa waktu sebelum membaca ulang. Logika ini lebih aman daripada menyalakan pompa terus-menerus sampai sensor langsung berubah, karena air memerlukan waktu untuk menyebar di tanah.



Gambar 8. 1 Logika dasar irigasi berbasis kelembapan tanah

Logika kontrol harus memiliki pengaman. Pertama, batas durasi pompa perlu ditentukan agar pompa tidak menyala terlalu lama. Kedua, sistem perlu memiliki jeda setelah penyiraman agar air meresap dan sensor membaca perubahan secara lebih stabil. Ketiga, sistem perlu mendeteksi error sensor. Jika sensor rusak dan membaca tanah selalu kering, pompa dapat menyala terus-menerus. Keempat, sistem perlu menyediakan mode manual agar pengguna dapat mengambil alih kontrol.

Tabel 8. 3 Kebutuhan data, perangkat, keputusan otomatis, dan risiko kegagalan

Kebutuhan sistem	Data atau perangkat	Keputusan otomatis	Risiko kegagalan	Mitigasi
Menentukan tanah kering	Sensor kelembapan tanah	Menyalakan pompa jika di bawah batas	Sensor rusak membaca kering terus	Validasi sensor dan batas durasi pompa
Menunda penyiraman saat hujan	Sensor curah hujan atau data cuaca	Menunda irigasi	Sensor hujan terhalang atau tidak akurat	Verifikasi dengan kelembapan tanah setelah hujan
Mengatur aliran air	Solenoid valve atau pompa	Membuka aliran sesuai zona	Katup macet atau pompa gagal	Tambahkan status aktuator dan inspeksi rutin
Menghemat energi	Sensor arus atau timer operasi	Membatasi waktu pompa	Data energi tidak terbaca	Gunakan proteksi listrik dan log operasi
Menjaga keamanan sistem	Relay, sekering, casing, pemisahan rangkaian	Memutus sistem saat error	Hubungan pendek atau air masuk casing	Gunakan casing aman dan teknisi kompeten

Irigasi otomatis sebaiknya dimulai dalam mode rekomendasi sebelum mode kontrol penuh. Pada mode rekomendasi, sistem hanya memberi notifikasi bahwa tanah perlu diperiksa. Setelah data cukup dan pengguna memahami pola lahan, sistem dapat masuk ke mode semi-otomatis. Pada mode semi-otomatis, sistem memberi saran dan

pengguna menekan tombol untuk menyiram. Mode otomatis penuh sebaiknya digunakan setelah sensor, aktuator, dan logika kontrol terbukti stabil.

8.4 Optimasi Air dan Energi

Salah satu tujuan smart farming adalah menggunakan sumber daya secara lebih bijak. Dalam konteks irigasi, sumber daya utama adalah air dan energi. IoT dapat membantu dengan cara menunjukkan kapan air benar-benar dibutuhkan, berapa lama pompa bekerja, bagaimana respons tanah setelah penyiraman, dan apakah penyiraman tertentu tidak memberi manfaat berarti.

Namun, klaim efisiensi air harus hati-hati. Mengurangi durasi penyiraman tidak selalu berarti menghemat air secara nyata jika tanaman mengalami stres atau hasil panen menurun. Sebaliknya, peningkatan efisiensi di satu titik lahan belum tentu berarti penghematan air di tingkat daerah aliran sungai. FAO menekankan bahwa penghematan air yang nyata bersifat kontekstual dan perlu dianalisis melalui aliran air dalam sistem, bukan hanya melihat pengurangan penggunaan di permukaan [47]. Karena itu, buku ini sebaiknya membedakan antara pengurangan volume penyiraman pada sistem tertentu dan klaim penghematan air secara luas.

Dalam proyek IoT skala kecil, optimasi air dapat dimulai dengan membandingkan data sebelum dan sesudah sistem digunakan. Misalnya, catat durasi pompa harian sebelum sistem sensor dipasang. Setelah sistem berjalan, catat durasi pompa, kelembapan tanah, kondisi tanaman, dan hasil panen sederhana jika relevan. Jika durasi pompa berkurang tetapi tanaman tetap sehat, sistem mungkin membantu mengurangi penyiraman berlebih. Namun, kesimpulan ini tetap harus ditulis berdasarkan data pengamatan, bukan asumsi.

Energi juga perlu dipantau. Pompa air, gateway, router, sensor, dan aktuator membutuhkan listrik. Sistem yang dimaksudkan untuk mendukung keberlanjutan sebaiknya tidak boros energi tanpa alasan. Sensor arus dan tegangan dapat digunakan untuk memantau konsumsi energi pompa atau sistem. Data operasi pompa juga dapat menjadi indikator energi, misalnya total menit pompa menyala per

hari. Jika menggunakan panel surya, sistem perlu mencatat tegangan baterai, status pengisian, dan waktu operasi.

Tabel 8. 4 Indikator optimasi air dan energi dalam sistem smart farming

Indikator	Cara pengukuran	Tujuan evaluasi	Catatan interpretasi
Durasi pompa harian	Log waktu nyala pompa	Menilai intensitas irigasi	Tidak otomatis sama dengan volume air jika debit tidak diketahui
Volume air	Flow meter atau pengukuran manual debit x waktu	Mengukur air yang digunakan	Perlu kalibrasi debit dan kondisi tekanan
Kelembapan tanah sebelum-sesudah irigasi	Sensor tanah	Menilai respons tanah terhadap penyiraman	Dipengaruhi jenis tanah dan posisi sensor
Kondisi tanaman	Pengamatan visual, tinggi, jumlah daun, hasil panen	Menilai apakah pengurangan air tidak merugikan tanaman	Perlu pencatatan konsisten
Konsumsi energi pompa	Sensor arus/tegangan atau meter energi	Menilai biaya energi	Perlu pemasangan aman
Status baterai/panel surya	Tegangan baterai, arus pengisian	Menilai ketahanan sistem off-grid	Dipengaruhi cuaca dan kapasitas baterai

Optimasi juga dapat dilakukan dengan jadwal adaptif. Misalnya, sistem tidak menyiram setelah hujan jika kelembapan tanah masih cukup. Sistem dapat menghindari penyiraman pada siang hari yang sangat panas jika penguapan tinggi dan penyiraman dapat dijadwalkan pagi atau sore, sesuai praktik agronomi yang relevan [perlu referensi spesifik tanaman dan wilayah]. Sistem dapat menyesuaikan durasi pompa berdasarkan respons sensor setelah penyiraman.

Penting untuk menulis hasil optimasi dengan akurat. Kalimat “sistem ini menghemat air 40%” hanya boleh digunakan jika ada data perbandingan, metode pengukuran volume air, periode pengamatan, dan kondisi tanaman yang jelas. Jika data belum cukup, kalimat yang lebih tepat adalah “sistem ini membantu mengidentifikasi periode penyiraman yang kemungkinan berlebih dan memerlukan evaluasi lanjutan untuk menghitung penghematan air.”

8.5 Evaluasi Sistem Smart Farming

Evaluasi sistem smart farming tidak cukup hanya melihat apakah sensor menyala dan dashboard tampil. Sistem perlu dievaluasi berdasarkan stabilitas perangkat, kualitas data, respons irigasi, konsumsi air, konsumsi energi, kesehatan tanaman, biaya perawatan, dan kemudahan penggunaan oleh petani atau pengguna lapangan.

Indikator pertama adalah stabilitas sistem. Periksa apakah sensor mengirim data secara konsisten, apakah perangkat sering offline, apakah baterai cukup, apakah dashboard dapat diakses, dan apakah aktuator bekerja sesuai perintah. Sistem yang sering mati akan sulit dipercaya, walaupun konsepnya baik.

Indikator kedua adalah kualitas data. Data kelembapan tanah harus dicek apakah masuk akal terhadap kondisi lapangan. Jika tanah baru disiram tetapi sensor tidak berubah, mungkin posisi sensor salah, sensor rusak, atau air tidak mencapai zona sensor. Jika nilai sensor melonjak tanpa alasan, perlu diperiksa kabel, catu daya, atau gangguan lingkungan. Evaluasi kualitas data harus mencakup kalibrasi, validasi, dan catatan lapangan.

Indikator ketiga adalah respons irigasi. Sistem harus menunjukkan hubungan yang logis antara kondisi tanah, keputusan penyiraman, dan perubahan data setelah penyiraman. Jika pompa menyala tetapi kelembapan tanah tidak berubah, mungkin debit air tidak cukup, emitter tersumbat, atau sensor terlalu jauh dari zona basah. Jika tanah terlalu basah setelah penyiraman, durasi pompa perlu dikurangi.

Indikator keempat adalah dampak pada tanaman dan sumber daya. Tanaman perlu diamati secara rutin. Daun layu, perubahan warna, pertumbuhan terhambat, atau gejala busuk akar dapat menunjukkan bahwa sistem irigasi belum sesuai. Konsumsi air dan energi perlu dicatat jika proyek ingin mengklaim efisiensi. Biaya perawatan juga perlu dihitung, termasuk penggantian sensor, baterai, kabel, pompa, dan waktu pengguna.

Tabel 8. 5 Indikator evaluasi sistem smart farming

Aspek evaluasi	Indikator	Cara menilai
Stabilitas perangkat	Persentase data masuk, waktu offline, restart perangkat	Log sistem dan dashboard
Kualitas data	Nilai masuk akal, tren sesuai kondisi lapangan, data tidak banyak hilang	Validasi manual dan catatan lapangan
Respons irigasi	Kelembapan tanah berubah setelah penyiraman	Bandingkan data sebelum-sesudah pompa menyala
Konsumsi air	Volume air atau durasi pompa	Flow meter atau log operasi pompa
Konsumsi energi	Daya pompa dan perangkat	Meter energi atau sensor arus/tegangan
Kondisi tanaman	Pertumbuhan, warna daun, gejala stres	Pengamatan visual terjadwal
Biaya perawatan	Penggantian sensor, baterai, pompa, casing	Catatan biaya berkala

Kemudahan penggunaan	Pengguna memahami dashboard dan notifikasi	Wawancara singkat atau observasi penggunaan
----------------------	--	---

Evaluasi sebaiknya dilakukan dalam periode yang cukup. Data satu atau dua hari biasanya belum cukup untuk menilai keberhasilan sistem pertanian. Tanaman dan tanah memiliki dinamika yang dipengaruhi cuaca, fase pertumbuhan, dan praktik pengelolaan. Untuk proyek pelatihan, periode satu sampai dua minggu dapat memberi gambaran awal. Untuk klaim efisiensi atau dampak hasil tanaman, periode evaluasi perlu lebih panjang dan metodenya harus lebih ketat [perlu referensi metodologi evaluasi].

8.6 Studi Kasus: Irigasi Otomatis untuk Tanaman Cabai atau Sayuran Daun

Sebuah kelompok belajar ingin membangun sistem irigasi otomatis untuk tanaman cabai atau sayuran daun dalam skala kecil. Mereka memiliki beberapa pot atau bedeng kecil, sumber air, pompa DC, sensor kelembapan tanah, sensor suhu-kelembapan udara, dan mikrokontroler dengan koneksi Wi-Fi. Tujuan proyek adalah memahami hubungan antara kelembapan tanah dan keputusan penyiraman.

Tahap pertama adalah pemantauan tanpa otomatisasi. Sensor kelembapan tanah dipasang pada kedalaman yang sesuai dengan zona akar tanaman. Pengguna menyiram tanaman secara manual seperti biasa, tetapi sistem mencatat perubahan kelembapan tanah sebelum dan sesudah penyiraman. Data dikumpulkan selama beberapa hari untuk memahami pola. Pada tahap ini, belum ada pompa otomatis.

Tahap kedua adalah rekomendasi. Sistem mulai memberi notifikasi jika tanah berada di bawah batas tertentu selama beberapa pembacaan berturut-turut. Pengguna tetap memutuskan apakah akan menyiram. Catatan manual dibuat untuk melihat apakah rekomendasi sistem sesuai dengan kondisi tanaman. Jika banyak rekomendasi tidak sesuai, batas kelembapan atau posisi sensor perlu diperbaiki.

Tahap ketiga adalah otomatisasi terbatas. Pompa DC tegangan rendah dihubungkan melalui modul relay atau driver yang sesuai. Sistem menyalakan pompa hanya selama durasi singkat, misalnya beberapa detik atau menit sesuai kebutuhan uji. Setelah pompa mati, sistem menunggu air meresap sebelum membaca ulang sensor. Mode manual tetap tersedia untuk menghentikan sistem jika terjadi masalah.

Tabel 8. 6 Rancangan studi kasus irigasi otomatis tanaman cabai atau sayuran daun

Elemen proyek	Rancangan awal	Catatan kehati-hatian
Tujuan	Mengatur penyiraman berdasarkan indikasi kelembapan tanah	Tidak langsung mengklaim efisiensi tanpa data pembanding
Tanaman	Cabai atau sayuran daun	Kebutuhan air berbeda menurut jenis dan fase tanaman
Sensor utama	Kelembapan tanah	Perlu kalibrasi lokal dan posisi sesuai zona akar
Sensor pendukung	Suhu dan kelembapan udara	Membantu membaca konteks cuaca mikro
Aktuator	Pompa DC atau solenoid valve	Mulai dari tegangan rendah untuk pelatihan
Kontrol	Ambang kelembapan + beberapa pembacaan berturut-turut	Hindari pompa menyala akibat satu pembacaan error
Dashboard	Kelembapan tanah, status pompa, suhu, riwayat irigasi	Tampilkan waktu terakhir data masuk
Evaluasi	Respons tanah, kondisi tanaman, durasi pompa, konsumsi air	Perlu pencatatan manual dan data sensor

Studi kasus ini menunjukkan bahwa otomatisasi harus dibangun secara bertahap. Sistem yang langsung otomatis penuh berisiko

menyiram terlalu banyak atau terlalu sedikit karena sensor belum dikalibrasi. Dengan pendekatan bertahap, pengguna dapat belajar dari data dan memperbaiki sistem sebelum mempercayakan keputusan pada aktuator.

8.7 Latihan Akhir Bab

Latihan akhir bab ini meminta pembaca menyusun logika kontrol irigasi berbasis kelembapan tanah. Pilih satu jenis tanaman dan satu skenario lahan, misalnya pot cabai, bedeng sayuran daun, rumah kaca kecil, atau taman sekolah. Isi tabel berikut sebagai rancangan awal.

Tabel 8. 7 Template rancangan logika kontrol irigasi

Komponen rancangan	Jawaban pembaca
Jenis tanaman	
Lokasi atau media tanam	
Tujuan sistem	
Sensor kelembapan tanah yang digunakan	
Kedalaman pemasangan sensor	
Sensor pendukung	
Aktuator yang digunakan	
Sumber daya	
Batas kelembapan bawah	
Jumlah pembacaan berturut-turut sebelum pompa aktif	
Durasi maksimum pompa menyala	
Waktu tunggu setelah penyiraman	
Kondisi yang membuat sistem berhenti otomatis	
Mode manual override	
Data yang ditampilkan di dashboard	
Risiko kegagalan utama	
Cara mitigasi risiko	

Setelah tabel diisi, buat diagram alur keputusan seperti pada Gambar 8.1. Kemudian tulis satu paragraf yang menjelaskan keterbatasan rancangan. Keterbatasan dapat mencakup sensor belum dikalibrasi untuk jenis tanah tertentu, kebutuhan air tanaman belum diverifikasi, debit pompa belum diukur, atau belum ada data pembandingan konsumsi air sebelum dan sesudah sistem digunakan.

Kesimpulan Bab

Smart farming berbasis IoT dapat dimulai dari sistem sederhana yang memantau kelembapan tanah dan cuaca mikro. Data tersebut membantu pengguna memahami kondisi lahan, menyusun jadwal penyiraman yang lebih masuk akal, dan mengevaluasi respons tanaman. Sistem tidak harus langsung besar atau otomatis penuh. Pendekatan bertahap lebih aman: mulai dari pemantauan, dilanjutkan rekomendasi, kemudian otomatisasi terbatas setelah data cukup dipahami.

Sensor tanah perlu digunakan secara kritis karena hasilnya dipengaruhi jenis tanah, kedalaman, salinitas, suhu, kepadatan, dan cara pemasangan. Sensor cuaca mikro membantu memberi konteks tambahan. Irigasi cerdas menggunakan aktuator seperti relay, pompa, dan solenoid valve, tetapi harus memperhatikan keselamatan listrik dan pemisahan rangkaian kontrol tegangan rendah dari perangkat daya tinggi.

Optimasi air dan energi harus dibuktikan dengan data. Klaim penghematan tidak boleh dibuat tanpa pengukuran volume air, durasi pompa, kondisi tanaman, dan periode pembandingan. Evaluasi sistem perlu mencakup stabilitas perangkat, kualitas data, respons irigasi, konsumsi air, konsumsi energi, kesehatan tanaman, biaya perawatan, dan kemudahan penggunaan. Pada bab berikutnya, pembahasan akan masuk ke keamanan, etika, validitas data, dan keberlanjutan sistem IoT.

BAB 9

Keamanan, Etika, Validitas Data, dan Keberlanjutan Sistem

Proyek Internet of Things untuk lingkungan sering dinilai berhasil ketika perangkat menyala, sensor mengirim data, dan dashboard menampilkan grafik. Penilaian seperti itu belum cukup. Sistem IoT yang benar-benar layak digunakan harus aman, etis, menghasilkan data yang dapat dipertanggungjawabkan, dapat dirawat, dan tetap relevan bagi pengguna. Jika perangkat mudah diretas, dashboard terbuka untuk publik tanpa kendali, data salah ditafsirkan, sensor tidak pernah dikalibrasi, atau biaya perawatan terlalu tinggi, maka proyek dapat berubah dari solusi menjadi sumber masalah baru.

Bab ini memperkuat sisi kritis buku. Setelah pembaca memahami sensor, konektivitas, platform, dan contoh proyek, pembahasan perlu bergerak ke pertanyaan yang lebih reflektif: apakah sistem ini aman? Apakah data dikumpulkan secara etis? Apakah data cukup valid untuk keputusan yang dibuat? Apakah sistem dapat dirawat dalam jangka panjang? Apakah proyek masih layak diteruskan?

Keamanan, etika, validitas data, dan keberlanjutan sistem tidak boleh dianggap sebagai tambahan di akhir proyek. Keempat aspek tersebut harus dipikirkan sejak tahap perencanaan. Sistem pemantauan kualitas udara di sekolah, sensor kualitas air di kolam, atau irigasi otomatis di kebun semuanya memiliki risiko. Risiko tersebut dapat berupa risiko teknis, sosial, operasional, finansial, dan etis.

9.1 Keamanan Perangkat dan Jaringan

Keamanan perangkat dan jaringan adalah fondasi utama sistem IoT yang dapat dipercaya. Perangkat IoT biasanya terhubung ke jaringan, mengirim data, dan kadang mengendalikan aktuator. Jika sistem tidak diamankan, pihak yang tidak berwenang dapat mengakses dashboard, mengubah data, mengambil alih perangkat, mematikan sensor, atau mengaktifkan aktuator. Pada proyek lingkungan, dampaknya dapat berupa data pemantauan yang rusak,

keputusan yang salah, atau risiko fisik jika perangkat mengendalikan pompa, katup, alarm, atau sistem listrik.

Risiko keamanan dasar sering berasal dari hal yang sederhana. Kata sandi masih menggunakan nilai bawaan pabrik. Token akses ditulis di kode dan dibagikan sembarangan. Dashboard dapat diakses tanpa autentikasi. Perangkat tidak pernah diperbarui. Jaringan Wi-Fi menggunakan kata sandi lemah. Port server terbuka ke internet tanpa perlindungan. Perangkat dipasang di lokasi publik tanpa perlindungan fisik. Risiko seperti ini tidak selalu membutuhkan serangan canggih; kelalaian konfigurasi saja sudah cukup untuk membuat sistem rentan.

NISTIR 8259 menjelaskan aktivitas dasar keamanan siber yang perlu dipertimbangkan oleh produsen perangkat IoT, termasuk kemampuan perangkat untuk dikelola secara aman dan tersedianya informasi keamanan yang dibutuhkan pengguna [48]. Walaupun dokumen tersebut ditujukan untuk produsen, prinsipnya relevan bagi pengembang proyek IoT skala kecil: perangkat harus dapat dikonfigurasi, diperbarui, dipantau, dan diamankan secara wajar. ETSI EN 303 645 juga memberikan ketentuan dasar keamanan untuk perangkat IoT konsumen, termasuk perlindungan terhadap kelemahan mendasar seperti penggunaan kata sandi yang mudah ditebak [49].

Dalam proyek IoT lingkungan, langkah praktis pertama adalah mengganti semua kredensial bawaan. Router, dashboard, broker MQTT, server lokal, dan akun cloud harus menggunakan kata sandi kuat. Jika platform mendukung autentikasi dua faktor, fitur tersebut sebaiknya diaktifkan. Token perangkat harus disimpan dengan aman dan tidak ditulis dalam dokumen publik. Jika kode dibagikan sebagai contoh pembelajaran, token dan kata sandi harus dihapus.

Langkah kedua adalah membatasi akses. Tidak semua pengguna perlu memiliki hak yang sama. Masyarakat umum mungkin hanya perlu melihat dashboard ringkasan. Teknisi perlu melihat status perangkat. Admin boleh mengubah konfigurasi. Pembatasan hak akses mengurangi risiko kesalahan dan penyalahgunaan. Dashboard publik sebaiknya hanya menampilkan data yang memang layak dibagikan.

Langkah ketiga adalah pembaruan perangkat lunak. Firmware, library, sistem operasi gateway, dan platform perlu diperbarui secara berkala. Pembaruan tidak boleh dilakukan sembarangan pada sistem operasional, tetapi harus direncanakan. Catat versi perangkat lunak, tanggal pembaruan, dan perubahan konfigurasi. Jika pembaruan menyebabkan gangguan, catatan ini membantu proses pemulihan.

Langkah keempat adalah keamanan fisik. Sensor yang dipasang di ruang publik, lahan, sungai, atau tempat sampah komunal dapat diambil, dibuka, dipindahkan, atau dirusak. Casing perlu kuat, kabel perlu rapi, perangkat perlu diberi label, dan lokasi pemasangan perlu mempertimbangkan risiko vandalisme. Untuk proyek komunitas, pemberitahuan kepada warga dapat mengurangi kecurigaan dan risiko gangguan.

Tabel 9. 1 Risiko keamanan dasar dan tindakan mitigasi

Risiko keamanan	Contoh kejadian	Dampak	Mitigasi praktis
Kata sandi lemah	Dashboard memakai kata sandi bawaan	Data dapat diakses atau diubah pihak tidak berwenang	Gunakan kata sandi kuat dan autentikasi dua faktor jika tersedia
Token perangkat bocor	Token MQTT/API tertulis di kode publik	Perangkat palsu dapat mengirim data	Simpan token secara aman dan rotasi token jika bocor
Dashboard terbuka	Dashboard dapat diakses tanpa login	Data lokasi atau status sistem tersebar	Batasi akses dan pisahkan tampilan publik dari admin
Firmware tidak diperbarui	Perangkat memakai library lama	Kerentanan tidak tertangani	Buat jadwal pembaruan dan catatan versi
Perangkat mudah	Sensor publik dapat	Data menjadi tidak	Gunakan casing, label, dan

dimanipulasi	dipindahkan	representatif	pemeriksaan berkala
Jaringan tidak dipisahkan	Perangkat IoT berada di jaringan utama kantor	Risiko merambat ke sistem lain	Gunakan jaringan terpisah atau segmentasi dasar

Kerangka NIST Cybersecurity Framework 2.0 menyediakan pendekatan pengelolaan risiko keamanan siber melalui fungsi tata kelola, identifikasi, perlindungan, deteksi, respons, dan pemulihan [50]. Untuk proyek IoT kecil, kerangka ini dapat diterjemahkan secara sederhana. Identifikasi perangkat dan data penting. Lindungi akses dan konfigurasi. Deteksi gangguan. Siapkan respons jika perangkat bermasalah. Siapkan cara memulihkan sistem jika data hilang atau perangkat rusak.

9.2 Privasi dan Etika Data Lingkungan

Data lingkungan sering dianggap tidak personal. Suhu udara, kelembapan tanah, pH air, atau kekeruhan sungai tampak seperti data netral. Namun, dalam beberapa kasus, data lingkungan dapat berkaitan dengan lokasi, aktivitas manusia, reputasi wilayah, pola konsumsi energi, atau kondisi ekonomi komunitas. Karena itu, pengumpulan dan publikasi data lingkungan tetap memerlukan pertimbangan etis.

Contohnya, data kualitas udara di sekitar permukiman dapat memengaruhi reputasi kawasan. Data konsumsi energi bangunan dapat menunjukkan pola aktivitas penghuni. Data tempat sampah pintar dapat memperlihatkan pola kegiatan komunitas. Data kualitas air di sekitar usaha tertentu dapat memicu dugaan pencemaran sebelum ada verifikasi resmi. Data lokasi sensor di area rawan dapat disalahgunakan untuk mencuri atau merusak perangkat. Karena itu, data lingkungan tidak selalu bebas risiko.

Prinsip etika pertama adalah kejelasan tujuan. Sebelum data dikumpulkan, pengguna dan pihak terkait perlu mengetahui tujuan pemantauan. Apakah untuk edukasi, pengelolaan operasional, penelitian, publikasi komunitas, atau pelaporan resmi? Tujuan

menentukan jenis data yang dikumpulkan, siapa yang boleh mengakses, dan bagaimana hasil disampaikan.

Prinsip kedua adalah minimisasi data. Kumpulkan data yang diperlukan, bukan semua data yang mungkin dikumpulkan. Jika proyek hanya membutuhkan nilai kelembapan tanah, tidak perlu mencatat data pribadi pengguna. Jika dashboard publik hanya perlu menampilkan status umum, tidak perlu menampilkan lokasi sensor secara terlalu rinci. Data yang tidak dikumpulkan tidak perlu diamankan dan tidak dapat disalahgunakan.

Prinsip ketiga adalah persetujuan dan komunikasi. Jika sensor dipasang di sekolah, permukiman, lahan komunitas, tempat ibadah, atau ruang publik tertentu, pihak terkait perlu diberi informasi. Komunikasi ini tidak harus selalu berupa dokumen hukum yang kompleks, tetapi harus jelas: apa yang dipantau, di mana perangkat dipasang, siapa pengelola data, dan bagaimana data digunakan.

Prinsip keempat adalah kehati-hatian dalam publikasi. Dashboard publik sebaiknya menyajikan data dengan konteks, keterbatasan, dan keterangan metode. Jangan mempublikasikan klaim pencemaran, bahaya kesehatan, atau pelanggaran standar tanpa verifikasi yang memadai. Jika data masih indikatif, tuliskan sebagai indikatif. Jika sensor belum dikalibrasi, tuliskan. Jika lokasi hanya satu titik, jangan menyimpulkan seluruh wilayah.

Tabel 9. 2 Pertimbangan etis dalam publikasi data lingkungan

Jenis data	Risiko etis	Cara mengurangi risiko
Lokasi sensor	Perangkat dapat dicuri atau data dikaitkan dengan pihak tertentu	Tampilkan lokasi umum, bukan koordinat rinci, jika tidak diperlukan
Kualitas udara kawasan	Reputasi wilayah dapat terdampak	Sertakan metode, keterbatasan, dan status validasi
Kualitas air dekat usaha atau permukiman	Dugaan pencemaran dapat muncul sebelum verifikasi	Hindari kesimpulan definitif tanpa pengujian resmi

Konsumsi energi bangunan	Pola aktivitas pengguna terbaca dapat	Batasi akses dan tampilkan data agregat
Data komunitas	Warga merasa diawasi	Lakukan komunikasi tujuan dan pengelolaan data

Etika data lingkungan juga terkait keadilan. Sistem IoT sebaiknya tidak hanya menguntungkan pihak yang memiliki akses teknologi. Jika data dikumpulkan dari komunitas, komunitas perlu memperoleh manfaat dari data tersebut. Hasil pemantauan sebaiknya disampaikan dalam bahasa yang dapat dipahami, bukan hanya tersimpan di server atau laporan teknis. Partisipasi pengguna lapangan penting agar sistem tidak menjadi proyek teknologi yang terlepas dari kebutuhan nyata.

9.3 Validitas, Bias, dan Kualitas Data

Validitas data adalah pertanyaan tentang apakah data benar-benar mengukur apa yang ingin diukur dan cukup layak digunakan untuk tujuan tertentu. Dalam proyek IoT lingkungan, validitas data sangat penting karena dashboard dapat terlihat meyakinkan meskipun data di baliknya bermasalah. Grafik yang rapi tidak menjamin pengukuran benar.

Sumber kesalahan data dapat muncul dari sensor, lokasi, jaringan, platform, dan interpretasi. Sensor yang tidak dikalibrasi dapat menghasilkan nilai bias. Sensor yang dipasang di lokasi tidak representatif dapat membaca kondisi lokal yang tidak sesuai dengan tujuan. Data dapat hilang karena koneksi putus. Timestamp dapat salah karena perangkat tidak sinkron. Nilai ekstrem dapat muncul karena gangguan listrik atau kotoran pada sensor. Pengguna dapat terlalu cepat menyimpulkan sebab-akibat dari pola yang hanya kebetulan.

ISO/IEC 25012 mendefinisikan model kualitas data untuk data terstruktur dalam sistem komputer dan dapat digunakan untuk menetapkan kebutuhan kualitas data, ukuran kualitas data, serta evaluasi kualitas data [51]. Dalam konteks IoT lingkungan, prinsip kualitas data dapat diterjemahkan menjadi beberapa pertanyaan

praktis. Apakah data akurat? Apakah lengkap? Apakah konsisten? Apakah masih mutakhir? Apakah dapat ditelusuri? Apakah sesuai dengan tujuan keputusan?

Bias data dapat terjadi ketika sensor tidak mewakili lokasi yang ingin dipantau. Misalnya, sensor kualitas udara dipasang dekat jendela yang sering terbuka, sehingga tidak mewakili seluruh ruang kelas. Sensor kelembapan tanah dipasang terlalu dekat emitter irigasi, sehingga tanah tampak selalu basah. Sensor kualitas air dipasang dekat outlet, sehingga data hanya mewakili titik keluaran. Dalam setiap kasus, masalahnya bukan hanya sensor, tetapi desain pengambilan data.

Data hilang juga perlu dilaporkan. Jika dashboard hanya menampilkan grafik dari data yang tersedia tanpa menunjukkan celah data, pengguna dapat mengira sistem bekerja penuh. Padahal, data mungkin hilang pada jam penting. Oleh karena itu, dashboard perlu menampilkan waktu pembaruan terakhir, status online/offline, dan persentase data masuk. Laporan juga perlu mencatat periode data hilang.

Pembacaan ekstrem perlu diperlakukan hati-hati. Nilai ekstrem bisa menjadi sinyal penting, tetapi juga bisa menjadi noise. Jika sensor partikulat tiba-tiba melonjak, mungkin terjadi pembakaran, debu, gangguan aliran udara, atau kesalahan sensor. Jika pH air berubah tajam, mungkin terjadi perubahan kimia, tetapi bisa juga probe kotor atau kabel longgar. Karena itu, nilai ekstrem sebaiknya ditandai dan diperiksa, bukan langsung dihapus atau langsung dijadikan kesimpulan.

Tabel 9. 3 Sumber kesalahan data dan cara mengendalikannya

Sumber kesalahan	Contoh	Dampak	Pengendalian
Sensor tidak dikalibrasi	Sensor pH bergeser setelah digunakan	Nilai tidak dapat dipercaya	Kalibrasi berkala dan catatan kalibrasi
Lokasi tidak representatif	Sensor udara dekat kipas	Data bias lokasi	Dokumentasikan dan evaluasi posisi

			sensor
Data hilang	Koneksi putus saat hujan	Tren tidak lengkap	Buffer lokal dan tampilkan status data
Timestamp salah	Jam perangkat tidak sinkron	Analisis waktu keliru	Sinkronisasi waktu atau RTC
Pembacaan ekstrem	Lonjakan nilai sesaat	Kesimpulan terlalu cepat	Tandai anomali dan verifikasi lapangan
Salah satuan	Data suhu tertukar °C dan °F	Interpretasi salah	Standarisasi format data
Interpretasi berlebihan	Sensor indikatif dianggap alat resmi	Klaim tidak valid	Tulis keterbatasan dan tingkat penggunaan data

Menulis keterbatasan data secara terbuka bukan kelemahan. Justru itu tanda integritas. Laporan yang baik menyebutkan sensor yang digunakan, metode kalibrasi, lokasi pemasangan, periode data, data hilang, serta batas interpretasi. Kalimat seperti “data ini bersifat indikatif dan belum menggantikan pengukuran referensi” perlu digunakan ketika sesuai. Kejujuran metodologis melindungi pengguna dari keputusan yang melampaui kualitas data.

9.4 Perawatan Sistem dan Biaya Operasional

Sistem IoT membutuhkan perawatan. Sensor perlu dibersihkan dan dikalibrasi. Baterai perlu diganti. Panel surya perlu diperiksa. Casing dapat retak atau kemasukan air. Kabel dapat longgar. Jaringan dapat berubah. Server perlu diperbarui. Dashboard perlu disesuaikan. Pengguna perlu dilatih. Jika aspek perawatan diabaikan, sistem yang awalnya berfungsi dapat berhenti dalam beberapa minggu atau bulan.

Perawatan sensor bergantung pada jenis sensor dan lingkungan pemasangan. Sensor kualitas air lebih rentan terhadap biofouling dan korosi. Sensor udara luar ruangan dapat terkena debu, serangga, dan kelembapan. Sensor tanah dapat rusak karena kelembapan terus-

menerus, pupuk, atau gangguan mekanik. Sensor energi perlu diperiksa dengan prosedur keselamatan. Jadwal perawatan harus dibuat sejak awal, bukan setelah sistem bermasalah.

Biaya operasional juga perlu dihitung. Banyak proyek hanya menghitung biaya pembelian awal, padahal biaya jangka panjang dapat lebih besar. Biaya operasional dapat mencakup koneksi seluler, langganan cloud, listrik, penggantian sensor, baterai, casing, kabel, kunjungan lapangan, kalibrasi, perbaikan perangkat, dan waktu tenaga kerja. Untuk proyek komunitas atau sekolah, waktu pengelola juga harus dianggap sebagai sumber daya.

Estimasi biaya harus dinyatakan sebagai contoh dan diperbarui sesuai harga aktual saat penulisan atau pelaksanaan. Harga perangkat IoT berubah cepat karena kurs, ketersediaan barang, merek, kualitas, dan lokasi pembelian. Karena itu, buku ini tidak menetapkan angka biaya permanen. Pada tahap implementasi, pembaca perlu membuat daftar komponen dan mencari harga aktual dari pemasok terpercaya [perlu referensi harga aktual].

Tabel 9. 4 Komponen biaya operasional sistem IoT lingkungan

Komponen biaya	Contoh	Frekuensi	Catatan
Sensor pengganti	Sensor pH, sensor kelembapan tanah, sensor partikulat	Sesuai umur dan kondisi lapangan	Sensor lapangan dapat rusak lebih cepat dari perkiraan
Kalibrasi	Larutan buffer, alat pembanding, jasa kalibrasi	Berkala	Diperlukan untuk meningkatkan kepercayaan data
Konektivitas	Paket data seluler, internet lokasi	Bulanan atau tahunan	Bergantung jumlah perangkat dan frekuensi data
Platform	Cloud, server,	Bulanan atau	Perlu evaluasi

	domain, penyimpanan	tahunan	biaya saat data bertambah
Daya	Listrik, baterai, panel surya	Berkala	Sistem luar ruangan perlu desain daya matang
Casing dan instalasi	Kotak pelindung, tiang, kabel, konektor	Saat pemasangan dan perbaikan	Penting untuk ketahanan lapangan
Tenaga perawatan	Kunjungan lapangan, pembersihan, pengecekan	Rutin	Sering dilupakan dalam perhitungan biaya
Pelatihan pengguna	Panduan, sosialisasi, pendampingan	Saat awal dan saat sistem berubah	Menentukan keberlanjutan penggunaan

Dokumentasi perawatan perlu dibuat sederhana. Pengguna lapangan harus tahu kapan sensor dibersihkan, siapa yang bertanggung jawab, bagaimana memeriksa status baterai, bagaimana membaca error, dan kapan melapor. Dokumentasi yang terlalu teknis dapat tidak digunakan. Lebih baik membuat checklist singkat yang benar-benar dipakai daripada manual panjang yang tidak pernah dibaca.

9.5 Kapan Sistem Perlu Dihentikan atau Didesain Ulang

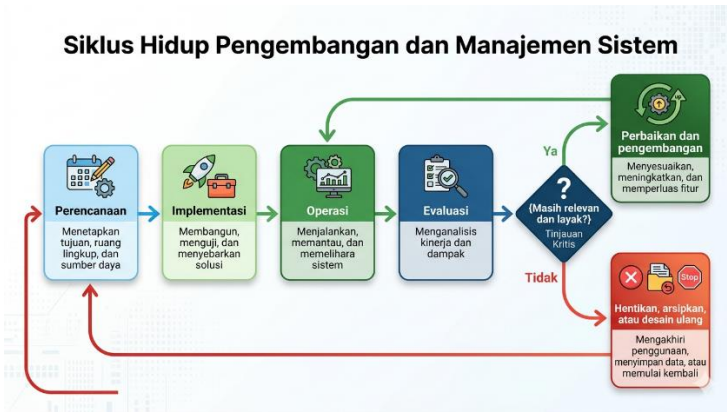
Tidak semua sistem IoT harus diteruskan. Kadang proyek perlu dihentikan, dikurangi cakupannya, atau didesain ulang. Keputusan ini tidak selalu berarti gagal. Dalam banyak kasus, menghentikan sistem yang tidak efektif adalah keputusan yang bertanggung jawab. Sistem perlu dievaluasi ulang jika data tidak digunakan. Jika dashboard berjalan tetapi tidak ada pengguna yang membaca atau menindaklanjuti data, maka nilai sistem rendah. Penyebabnya bisa karena dashboard sulit dipahami, data tidak relevan, pengguna tidak dilibatkan, atau masalah awal sudah berubah. Dalam kasus seperti ini, solusi bukan selalu menambah sensor, tetapi memperbaiki tujuan dan keterlibatan pengguna.

Sistem juga perlu dievaluasi jika biaya terlalu tinggi dibanding manfaat. Misalnya, sensor sering rusak, paket data mahal, atau perawatan membutuhkan tenaga besar. Jika manfaatnya hanya kecil, sistem perlu disederhanakan. Bisa jadi pemantauan manual berkala lebih tepat daripada IoT penuh. Teknologi tidak boleh dipertahankan hanya karena sudah dibangun.

Sensor yang sering gagal juga menjadi tanda perlunya desain ulang. Jika sensor air terus tertutup biofilm, mungkin posisi pemasangan salah atau jenis sensor tidak sesuai. Jika sensor tanah cepat rusak, mungkin lingkungan terlalu korosif atau sensor tidak cocok. Jika perangkat luar ruangan sering mati, mungkin desain daya dan casing perlu diganti. Mengganti satu komponen tanpa meninjau desain keseluruhan sering hanya menunda masalah.

Sistem juga perlu didesain ulang jika pengguna tidak memahami dashboard. Dashboard yang rumit dapat membuat pengguna mengabaikan data. Jika pengguna hanya membutuhkan status sederhana, jangan memaksa mereka membaca grafik teknis. Jika teknisi membutuhkan detail error, sediakan halaman teknis terpisah. Desain informasi harus mengikuti kebutuhan pengguna.

Tujuan awal proyek dapat berubah. Sekolah yang awalnya memantau suhu ruang kelas mungkin kemudian fokus pada ventilasi. Kelompok tani yang awalnya ingin otomatisasi penuh mungkin memilih mode rekomendasi karena lebih aman. Komunitas yang memantau kualitas air mungkin membutuhkan pengujian laboratorium setelah sensor menunjukkan perubahan. Perubahan tujuan bukan masalah, selama sistem ikut disesuaikan.



Gambar 9. 1 Siklus hidup sistem IoT lingkungan

Tabel 9. 5 Indikator sistem perlu dihentikan atau didesain ulang

Kondisi	Tanda yang terlihat	Keputusan yang mungkin
Data tidak digunakan	Dashboard jarang dibuka, tidak ada tindakan	Perbaiki tujuan, ubah dashboard, atau hentikan sistem
Biaya terlalu tinggi	Sensor sering diganti, biaya cloud meningkat	Sederhanakan sistem atau ubah arsitektur
Sensor sering gagal	Data banyak hilang atau tidak masuk akal	Ganti jenis sensor, ubah lokasi, atau desain ulang casing
Pengguna tidak memahami sistem	Notifikasi diabaikan, grafik tidak dibaca	Buat tampilan lebih sederhana dan pelatihan ulang
Tujuan berubah	Parameter lama tidak lagi relevan	Rancang ulang parameter dan dashboard
Risiko etis meningkat	Data menimbulkan konflik atau salah tafsir	Batasi publikasi, perbaiki komunikasi, atau hentikan publikasi
Keamanan tidak	Akses tidak jelas,	Audit konfigurasi atau

terkelola	perangkat diperbarui	tidak	nonaktifkan sampai aman	sistem
-----------	----------------------	-------	-------------------------	--------

Penghentian sistem harus dilakukan dengan rapi. Data perlu diarsipkan jika masih berguna. Perangkat perlu dilepas dengan aman. Akun cloud dan token akses perlu dinonaktifkan. Laporan akhir perlu dibuat untuk mencatat hasil, keterbatasan, pelajaran, dan rekomendasi. Dengan demikian, proyek yang dihentikan tetap menghasilkan pembelajaran.

9.6 Refleksi Akhir Bab: Menilai Risiko Proyek IoT Sendiri

Refleksi akhir bab ini meminta pembaca menilai proyek IoT yang sedang atau akan dirancang. Tujuannya adalah memastikan bahwa pembaca tidak hanya memikirkan perangkat dan dashboard, tetapi juga keamanan, etika, validitas data, biaya, dan keberlanjutan operasional.

Gunakan matriks berikut untuk mengidentifikasi risiko. Beri nilai tingkat risiko secara sederhana: rendah, sedang, atau tinggi. Setelah itu, tuliskan tindakan mitigasi yang realistis. Jangan menulis mitigasi yang tidak mungkin dilakukan oleh tim atau pengguna lapangan.

Tabel 9. 6 Matriks risiko teknis, sosial, operasional, dan etis

Kategori risiko	Pertanyaan penilaian	Tingkat risiko	Mitigasi yang direncanakan
Keamanan akses	Siapa yang dapat masuk ke dashboard dan mengubah konfigurasi?		
Keamanan perangkat	Apakah perangkat dapat diambil, dibuka, atau dipindahkan?		
Keamanan jaringan	Apakah kredensial dan token disimpan aman?		
Privasi lokasi	Apakah lokasi sensor		

	perlu disembunyikan atau disamarkan?		
Etika publikasi	Apakah data dapat menimbulkan salah tafsir atau konflik?		
Validitas data	Apakah sensor telah dikalibrasi dan divalidasi?		
Bias lokasi	Apakah posisi sensor mewakili kondisi yang ingin dipantau?		
Data hilang	Bagaimana jika koneksi putus atau perangkat mati?		
Biaya operasi	Apakah biaya perawatan dan platform sudah dihitung?		
Kapasitas pengguna	Apakah pengguna memahami dashboard dan tindakan yang diperlukan?		
Keberlanjutan sistem	Siapa yang merawat sistem setelah proyek selesai?		
Penghentian sistem	Apakah ada prosedur jika sistem harus dihentikan?		

Setelah matriks diisi, pembaca perlu menulis satu paragraf keputusan. Paragraf tersebut dapat berbunyi: “Sistem ini layak dilanjutkan dengan syarat ...”, “Sistem ini perlu diuji ulang karena ...”, atau “Sistem ini sebaiknya disederhanakan karena ...”. Tujuannya adalah melatih pembaca membuat keputusan proyek berdasarkan risiko, bukan hanya antusiasme teknologi.

Kesimpulan Bab

Keberhasilan proyek IoT lingkungan tidak hanya ditentukan oleh perangkat yang menyala dan data yang tampil di dashboard. Sistem harus aman, etis, valid, dapat dirawat, dan berkelanjutan. Keamanan perangkat dan jaringan perlu memperhatikan kredensial, pembatasan akses, pembaruan firmware, segmentasi jaringan, dan perlindungan fisik. Etika data lingkungan perlu memperhatikan tujuan pengumpulan, minimisasi data, persetujuan, publikasi, dan dampak sosial.

Validitas data harus dijaga melalui kalibrasi, validasi, penempatan sensor yang representatif, pengelolaan data hilang, dan interpretasi yang hati-hati. Keterbatasan data harus ditulis secara terbuka. Perawatan sistem dan biaya operasional perlu direncanakan sejak awal, termasuk sensor, daya, konektivitas, platform, casing, kalibrasi, dan tenaga perawatan.

Sistem IoT juga perlu dievaluasi secara berkala. Jika data tidak digunakan, biaya terlalu tinggi, sensor sering gagal, pengguna tidak memahami dashboard, atau tujuan awal berubah, sistem perlu dihentikan, disederhanakan, atau didesain ulang. Pada bab terakhir, pembahasan akan diarahkan pada penyusunan roadmap solusi IoT lingkungan berkelanjutan, sehingga pembaca dapat mengintegrasikan konsep, teknologi, implementasi, evaluasi, dan rencana pengembangan secara utuh.

BAB 10

Merancang Roadmap Solusi IoT Lingkungan Berkelanjutan

Bab terakhir ini menyatukan seluruh pembahasan buku menjadi satu kerangka kerja yang dapat digunakan untuk merancang solusi Internet of Things bagi lingkungan berkelanjutan. Pada bab-bab sebelumnya, pembaca telah mempelajari konsep dasar IoT, arsitektur sistem, sensor lingkungan, konektivitas, platform, dashboard, proyek kualitas udara, proyek kualitas air, smart farming, keamanan, etika, validitas data, serta keberlanjutan operasional. Semua pengetahuan tersebut perlu dirangkai menjadi roadmap implementasi yang realistis.

Roadmap bukan sekadar jadwal kerja. Roadmap adalah peta jalan yang menjelaskan bagaimana ide berkembang menjadi proposal, prototipe, uji lapangan, sistem operasional, evaluasi, dan pengembangan lanjutan. Roadmap membantu tim menghindari dua kesalahan umum. Kesalahan pertama adalah terlalu cepat membeli perangkat tanpa memahami masalah. Kesalahan kedua adalah terlalu lama merancang konsep tanpa pernah menguji solusi di lapangan.

Dalam konteks IoT lingkungan, roadmap harus menjawab beberapa pertanyaan utama. Masalah lingkungan apa yang ingin diselesaikan atau dipantau? Data apa yang dibutuhkan? Siapa pengguna datanya? Sensor apa yang layak digunakan? Bagaimana data dikirim dan disimpan? Dashboard seperti apa yang mudah dipahami? Risiko apa yang harus dikendalikan? Bagaimana keberhasilan diukur? Siapa yang akan merawat sistem setelah proyek selesai?

Bab ini membahas penyusunan proposal proyek, indikator keberhasilan, dokumentasi teknis dan dokumentasi pengguna, replikasi dan skalabilitas, kolaborasi, serta arah masa depan IoT untuk lingkungan berkelanjutan. Fokusnya bukan hanya membuat perangkat, tetapi menyusun solusi yang dapat diuji, dikembangkan, dikomunikasikan, dan dipertanggungjawabkan.

10.1 Dari Ide ke Proposal Proyek

Setiap proyek IoT lingkungan biasanya dimulai dari pengamatan masalah. Udara di ruang kelas terasa pengap. Air kolam berubah

warna. Tanah cepat kering. Tempat sampah sering penuh sebelum diangkut. Konsumsi energi gedung meningkat. Masalah seperti ini dapat menjadi ide awal. Namun, ide belum cukup untuk menjalankan proyek. Ide perlu diubah menjadi proposal singkat yang menjelaskan masalah, tujuan, metode, kebutuhan teknis, risiko, jadwal, dan indikator keberhasilan.

Proposal proyek membantu tim berpikir sistematis. Proposal juga membantu menjelaskan proyek kepada pihak lain, seperti sekolah, komunitas, pemerintah desa, pengelola gedung, kelompok tani, sponsor, dosen pembimbing, atau mitra industri. Proposal yang baik tidak harus panjang, tetapi harus jelas dan dapat diuji. Ia harus menunjukkan hubungan antara masalah, data, teknologi, dan tindakan.

Dalam manajemen proyek, fokus tidak hanya pada keluaran teknis, tetapi juga hasil yang ingin dicapai. Project Management Institute menjelaskan bahwa PMBOK Guide berisi praktik dasar untuk membantu manajer proyek mencapai hasil organisasi dan keunggulan pelaksanaan proyek [52]. Prinsip ini relevan untuk proyek IoT lingkungan. Keluaran proyek dapat berupa sensor dan dashboard, tetapi hasil yang diharapkan adalah pemahaman kondisi lingkungan, respons yang lebih cepat, atau keputusan pengelolaan yang lebih baik.

Proposal proyek IoT lingkungan sebaiknya memuat sepuluh komponen utama. Pertama, latar belakang masalah. Kedua, tujuan proyek. Ketiga, lokasi dan pengguna. Keempat, parameter yang diukur. Kelima, perangkat yang digunakan. Keenam, alur data. Ketujuh, dashboard atau bentuk pelaporan. Kedelapan, risiko teknis, sosial, dan etis. Kesembilan, jadwal implementasi. Kesepuluh, indikator keberhasilan.

Tabel 10. 1 Struktur proposal singkat proyek IoT lingkungan

Komponen proposal	Isi yang perlu dijelaskan	Contoh pertanyaan pengarah
Latar belakang	Masalah lingkungan dan alasan pentingnya proyek	Masalah apa yang terjadi dan siapa yang terdampak?

Tujuan	Hasil yang ingin dicapai melalui pemantauan IoT	Apakah proyek untuk edukasi, operasional, riset, atau peringatan awal?
Lokasi	Area pemasangan sensor dan batas wilayah pemantauan	Di mana sensor akan dipasang dan mengapa?
Pengguna	Pihak yang membaca data dan mengambil keputusan	Siapa pengguna dashboard dan siapa teknisi sistem?
Parameter	Variabel lingkungan yang akan diukur	Suhu, pH, PM2.5, kelembapan tanah, energi, atau parameter lain?
Perangkat	Sensor, mikrokontroler, gateway, aktuator, sumber daya	Apakah perangkat sesuai dengan kondisi lapangan?
Alur data	Cara data dibaca, dikirim, disimpan, dan ditampilkan	Apakah memakai Wi-Fi, LoRaWAN, seluler, cloud, atau server lokal?
Dashboard	Bentuk visualisasi dan notifikasi	Informasi apa yang harus terlihat dalam satu halaman?
Risiko	Risiko teknis, etis, keamanan, biaya, dan perawatan	Apa yang dapat membuat proyek gagal atau disalahartikan?
Jadwal	Tahap kerja dari desain sampai evaluasi	Kapan prototipe diuji dan kapan evaluasi dilakukan?
Indikator keberhasilan	Ukuran keberhasilan teknis dan manfaat pengguna	Bagaimana proyek dinyatakan berhasil?

Proposal juga harus membedakan ruang lingkup awal dan ruang lingkup lanjutan. Pada tahap awal, proyek sebaiknya berukuran kecil dan dapat diuji. Misalnya, satu titik sensor kualitas udara di ruang kelas, satu kolam ikan, satu bedeng tanaman, atau satu titik tempat sampah. Setelah sistem terbukti berjalan, cakupan dapat diperluas.

Pendekatan bertahap mengurangi biaya kegagalan dan memudahkan pembelajaran.

10.2 Menyusun Indikator Keberhasilan

Keberhasilan proyek IoT tidak cukup diukur dari perangkat yang menyala. Banyak proyek menampilkan dashboard yang menarik, tetapi datanya tidak digunakan. Ada juga proyek yang sensor dan jaringan berfungsi, tetapi tidak membantu keputusan. Karena itu, indikator keberhasilan harus mencakup aspek teknis, data, pengguna, operasional, dan dampak.

OECD DAC mendefinisikan enam kriteria evaluasi, yaitu *relevance*, *coherence*, *effectiveness*, *efficiency*, *impact*, dan *sustainability*, sebagai kerangka normatif untuk menilai nilai atau manfaat suatu intervensi [53]. Kriteria ini dapat diadaptasi untuk proyek IoT lingkungan. *Relevansi* berarti proyek sesuai dengan masalah. *Efektivitas* berarti proyek mencapai tujuan. *Efisiensi* berarti sumber daya digunakan secara wajar. *Dampak* berarti proyek memberi perubahan yang dapat diamati. *Keberlanjutan* berarti manfaat atau sistem dapat dipertahankan. *Koherensi* berarti proyek selaras dengan kebijakan, program, atau kebutuhan lain.

Dalam proyek IoT, indikator teknis dapat mencakup persentase data yang berhasil terkirim, waktu offline perangkat, stabilitas sensor, ketahanan catu daya, dan respons dashboard. Indikator data dapat mencakup kelengkapan data, konsistensi satuan, keberadaan timestamp, validasi sensor, dan catatan kalibrasi. Indikator pengguna dapat mencakup apakah pengguna memahami dashboard, apakah notifikasi ditindaklanjuti, dan apakah data masuk ke proses keputusan.

Indikator operasional dapat mencakup waktu respons terhadap peringatan, biaya perawatan, kemudahan perbaikan, dan jumlah gangguan sistem. Indikator dampak dapat mencakup peningkatan pemahaman komunitas, perbaikan prosedur ventilasi, pengurangan penyiraman yang tidak perlu berdasarkan data, atau peningkatan ketepatan jadwal pengangkutan sampah. Namun, klaim dampak lingkungan harus diuji dengan data yang cukup dan metode yang jelas. Klaim seperti penurunan polusi, penghematan air, atau

peningkatan kesehatan lingkungan tidak boleh ditulis tanpa bukti pengukuran yang memadai [perlu referensi spesifik sesuai kasus].

Tabel 10. 2 Contoh indikator keberhasilan proyek IoT lingkungan

Dimensi keberhasilan	Indikator	Cara mengukur	Catatan interpretasi
Teknis	Perangkat aktif dan mengirim data	Persentase data masuk per hari	Perlu dibandingkan dengan target interval pengiriman
Data	Data memiliki timestamp, satuan, lokasi, dan status perangkat	Audit struktur data	Data rapi belum tentu valid jika sensor tidak dikalibrasi
Validitas	Sensor diuji atau dibandingkan dengan alat pembanding	Catatan kalibrasi dan validasi	Tingkat validasi mengikuti tujuan proyek
Pengguna	Dashboard dipahami pengguna	Wawancara singkat atau uji penggunaan	Dashboard baik jika membantu keputusan, bukan sekadar menarik
Operasional	Peringatan ditindaklanjuti	Catatan respons pengguna	Perlu membedakan peringatan benar dan palsu
Biaya	Biaya perawatan dapat ditanggung	Catatan biaya bulanan atau tahunan	Biaya tersembunyi seperti waktu teknisi perlu

			dihitung
Dampak	Ada perubahan tindakan berbasis data	Perbandingan sebelum-sesudah	Klaim dampak harus berbasis data cukup
Keberlanjutan	Ada penanggung jawab dan jadwal perawatan	Dokumen operasional	Tanpa pengelola, sistem sulit bertahan

Indikator harus realistis. Untuk proyek pelatihan, keberhasilan dapat berupa perangkat berjalan stabil selama dua minggu dan pengguna mampu membaca dashboard. Untuk proyek komunitas, keberhasilan dapat berupa data digunakan dalam rapat rutin dan ada jadwal perawatan. Untuk proyek riset, keberhasilan memerlukan metode pengukuran dan analisis yang lebih ketat. Untuk proyek yang berkaitan dengan keselamatan, indikator harus mengikuti standar dan prosedur resmi.

10.3 Dokumentasi Teknis dan Dokumentasi Pengguna

Dokumentasi adalah jembatan antara proyek yang berhasil sesaat dan sistem yang dapat dipelihara. Banyak proyek IoT berhenti karena hanya pembuat awal yang memahami rangkaian, kode, akun platform, atau konfigurasi perangkat. Ketika pembuat tidak lagi terlibat, sistem tidak dapat diperbaiki. Dokumentasi mencegah ketergantungan pada satu orang.

Ada dua jenis dokumentasi utama. Pertama, dokumentasi teknis. Dokumentasi ini ditujukan untuk teknisi, pengembang, peneliti, atau orang yang akan memperbaiki sistem. Isinya mencakup diagram rangkaian, daftar komponen, tipe sensor, datasheet, kode program, konfigurasi jaringan, format data, topik MQTT atau endpoint HTTP, akun platform, prosedur instalasi, prosedur kalibrasi, prosedur backup, dan catatan perawatan.

Kedua, dokumentasi pengguna. Dokumentasi ini ditujukan untuk orang yang membaca dashboard dan mengambil tindakan. Isinya harus lebih sederhana. Pengguna perlu tahu arti nilai yang tampil, arti status normal atau peringatan, kapan harus memeriksa

perangkat, siapa yang dihubungi jika sistem offline, dan tindakan apa yang boleh atau tidak boleh dilakukan. Dokumentasi pengguna harus ditulis dengan bahasa yang mudah dipahami.

Dokumentasi juga perlu memiliki versi. Jika sensor diganti, kode diperbarui, ambang notifikasi berubah, atau dashboard dimodifikasi, dokumentasi harus diperbarui. Tanpa catatan versi, tim sulit mengetahui konfigurasi mana yang sedang digunakan. Prinsip ini selaras dengan praktik pengelolaan proyek yang menekankan pentingnya artefak, proses, dan pengetahuan proyek sebagai bagian dari pengendalian pelaksanaan [52].

Tabel 10. 3 Perbedaan dokumentasi teknis dan dokumentasi pengguna

Aspek	Dokumentasi teknis	Dokumentasi pengguna
Sasaran pembaca	Teknisi, pengembang, peneliti, operator sistem	Guru, petani, pengelola, warga, pengguna dashboard
Tujuan	Memungkinkan sistem dipasang, diperbaiki, direplikasi	Membantu pengguna memahami data dan tindakan
Isi utama	Rangkaian, kode, konfigurasi, format data, kalibrasi	Cara membaca dashboard, arti peringatan, prosedur respons
Tingkat teknis	Detail dan lengkap	Ringkas dan praktis
Format	Manual teknis, repositori kode, diagram, log perubahan	Panduan satu halaman, poster, video singkat, SOP sederhana
Risiko jika tidak ada	Sistem sulit dirawat dan direplikasi	Data tidak digunakan atau salah ditafsirkan

Dokumentasi tidak harus dibuat sempurna sejak awal, tetapi harus mulai dibuat sejak proyek dimulai. Foto pemasangan sensor, catatan lokasi, tabel komponen, dan diagram alur data sederhana sudah

sangat membantu. Pada tahap akhir, dokumentasi dapat dirapikan menjadi manual teknis dan panduan pengguna.

10.4 Replikasi, Skalabilitas, dan Kolaborasi

Setelah prototipe berhasil, pertanyaan berikutnya adalah apakah sistem dapat direplikasi dan diperluas. Replikasi berarti sistem dapat dibuat ulang pada lokasi lain dengan prosedur yang jelas. Skalabilitas berarti sistem dapat berkembang dari satu titik sensor menjadi banyak titik, dari satu pengguna menjadi banyak pengguna, atau dari proyek kecil menjadi sistem operasional. Kolaborasi berarti proyek melibatkan pihak lain agar data dan manfaatnya lebih luas.

Replikasi membutuhkan standar internal. Sensor yang digunakan perlu dicatat. Format data harus konsisten. Lokasi pemasangan harus mengikuti pedoman. Dashboard harus memiliki struktur yang dapat digunakan kembali. Jika setiap titik sensor dibuat dengan cara berbeda, data antar lokasi sulit dibandingkan. Karena itu, sebelum memperluas sistem, tim perlu membuat template perangkat, template konfigurasi, dan template laporan.

Skalabilitas menambah tantangan baru. Satu sensor mungkin mudah dikelola. Sepuluh sensor mulai membutuhkan manajemen perangkat. Seratus sensor membutuhkan sistem inventaris, pemantauan status, pembaruan firmware, pengelolaan baterai, biaya konektivitas, keamanan akses, dan dukungan teknis. Skala yang lebih besar juga meningkatkan risiko data hilang, sensor rusak, dan interpretasi yang tidak konsisten.

Dalam konteks smart city dan komunitas berkelanjutan, ITU-T memiliki kegiatan koordinasi terkait Internet of Things, digital twins, dan smart sustainable cities and communities, yang menunjukkan bahwa IoT semakin diposisikan sebagai bagian dari ekosistem standar dan tata kelola kota cerdas [54]. Hal ini relevan karena proyek IoT lingkungan yang awalnya kecil dapat berkembang menjadi bagian dari sistem kota, kampus, sekolah, atau komunitas yang lebih besar. Namun, perkembangan tersebut membutuhkan tata kelola, interoperabilitas, dan koordinasi.

Kolaborasi dapat melibatkan sekolah, kampus, komunitas warga, pemerintah daerah, kelompok tani, pengelola gedung, organisasi

lingkungan, dan sektor swasta. Kolaborasi yang baik perlu menjelaskan peran masing-masing pihak. Siapa menyediakan lokasi? Siapa membeli perangkat? Siapa memasang sensor? Siapa merawat sistem? Siapa mengelola data? Siapa boleh mengakses dashboard? Siapa menyusun laporan? Pertanyaan-pertanyaan ini perlu dijawab sebelum proyek diperluas.

Citizen science dapat menjadi pendekatan kolaboratif dalam pemantauan lingkungan. Platform European Citizen Science menampilkan berbagai proyek yang melibatkan warga dalam pengumpulan data lingkungan, termasuk isu udara, iklim, dan lingkungan lokal [55]. Dalam konteks IoT, citizen science dapat memperluas pemantauan dan meningkatkan kesadaran publik, tetapi tetap memerlukan pelatihan, panduan metode, validasi data, dan komunikasi etis.

Tabel 10. 4 Tantangan replikasi dan skalabilitas proyek IoT lingkungan

Tahap pengembangan	Tantangan utama	Strategi pengendalian
Satu prototipe	Sensor dan dashboard berjalan stabil	Dokumentasikan rangkaian, kode, lokasi, dan metode uji
Beberapa titik sensor	Data antar titik harus konsisten	Gunakan format data, interval, dan prosedur pemasangan yang sama
Banyak perangkat	Manajemen baterai, firmware, dan status perangkat	Buat inventaris perangkat dan dashboard status teknis
Banyak pengguna	Hak akses dan interpretasi data berbeda	Pisahkan dashboard publik, teknis, dan manajerial
Multi-organisasi	Peran dan kepemilikan data tidak jelas	Buat kesepakatan tata kelola data dan perawatan
Sistem	Biaya, keamanan,	Siapkan anggaran, SOP,

operasional	dan dukungan teknis meningkat	pelatihan, dan evaluasi berkala
-------------	-------------------------------	---------------------------------

Skalabilitas tidak selalu berarti memperbesar sistem. Kadang solusi yang lebih baik adalah membuat sistem kecil yang dapat direplikasi secara mandiri oleh banyak komunitas. Misalnya, sekolah-sekolah dapat memakai template proyek kualitas udara yang sama, tetapi mengelola data lokal masing-masing. Kelompok tani dapat memakai panduan sensor tanah yang sama, tetapi menyesuaikan ambang berdasarkan kondisi lahan. Pendekatan ini lebih realistis daripada memaksakan satu sistem pusat untuk semua kebutuhan.

10.5 Masa Depan IoT untuk Lingkungan Berkelanjutan

IoT untuk lingkungan berkelanjutan akan terus berkembang. Beberapa arah yang banyak dibahas adalah integrasi kecerdasan buatan, analitik prediktif, digital twin, citizen science, sistem peringatan dini, dan integrasi dengan kebijakan lingkungan. Namun, pembahasan masa depan harus dilakukan hati-hati. Tidak semua teknologi baru otomatis berguna. Nilai teknologi tetap bergantung pada masalah yang diselesaikan, kualitas data, kapasitas pengguna, dan keberlanjutan operasional.

Kecerdasan buatan dapat membantu menemukan pola, mendeteksi anomali, memperkirakan tren, dan mengoptimalkan keputusan. Misalnya, sistem dapat memprediksi kapan kelembapan tanah akan turun berdasarkan data cuaca dan riwayat irigasi. Sistem dapat mendeteksi pola tidak biasa pada kualitas air. Sistem dapat membantu mengelompokkan lokasi dengan risiko kualitas udara lebih tinggi. Namun, model AI membutuhkan data yang cukup, valid, dan representatif. Jika data sensor buruk, hasil AI juga dapat menyesatkan.

Analitik prediktif dapat membantu perencanaan. Dalam pemantauan banjir, data tinggi air, hujan, dan historis kejadian dapat membantu menyusun peringatan awal. Dalam energi, data konsumsi dapat membantu mengidentifikasi pola pemborosan. Dalam pertanian, data kelembapan tanah dan cuaca dapat membantu jadwal irigasi. Akan tetapi, prediksi harus selalu disertai ketidakpastian. Sistem tidak boleh menampilkan prediksi seolah-olah pasti.

Digital twin adalah representasi digital dari objek, proses, atau sistem fisik yang diperbarui dengan data. Dalam konteks lingkungan, digital twin dapat digunakan untuk menggambarkan bangunan, kawasan, lahan, sistem irigasi, atau kota. Kajian terbaru tentang integrasi IoT, AI, dan digital twins dalam pengembangan smart city menunjukkan bahwa digital twin semakin dipandang sebagai teknologi untuk representasi real-time, simulasi, dan manajemen sistem perkotaan [56]. Namun, digital twin membutuhkan data yang kuat, model yang jelas, dan tata kelola yang matang. Untuk sebagian besar proyek kecil, dashboard dan model sederhana sudah lebih realistis daripada digital twin penuh.

Sistem peringatan dini juga akan menjadi area penting. Sensor, jaringan, dashboard, notifikasi, dan protokol respons dapat digabungkan untuk membantu komunitas mengenali risiko lebih cepat. Namun, sebagaimana dibahas pada bab sebelumnya, peringatan dini bukan hanya sensor. Ia memerlukan pemahaman risiko, pemantauan, komunikasi, dan kapasitas respons [57]. Tanpa pengguna yang tahu harus melakukan apa, peringatan tidak banyak berguna.

Masa depan IoT lingkungan juga harus memperhatikan keberlanjutan perangkat. Lebih banyak sensor berarti lebih banyak perangkat elektronik, baterai, dan potensi limbah. Karena itu, desain masa depan perlu mempertimbangkan umur perangkat, kemampuan perbaikan, efisiensi energi, penggunaan ulang, dan pengelolaan limbah elektronik. IoT untuk keberlanjutan tidak boleh menciptakan masalah lingkungan baru.

Tabel 10. 5 Arah perkembangan IoT lingkungan dan catatan kehati-hatian

Arah perkembangan	Potensi manfaat	Catatan kehati-hatian
Kecerdasan buatan	Deteksi pola, anomali, dan rekomendasi otomatis	Membutuhkan data valid dan representatif
Analitik prediktif	Membantu perencanaan dan	Prediksi harus menyertakan

	peringatan awal	ketidakpastian
Digital twin	Simulasi dan visualisasi sistem fisik	Membutuhkan model, data, dan tata kelola matang
Citizen science	Memperluas pemantauan dan partisipasi warga	Perlu pelatihan, validasi, dan komunikasi etis
Sistem peringatan dini	Respons lebih cepat terhadap risiko	Perlu prosedur respons, bukan hanya notifikasi
Edge AI	Respons lokal tanpa selalu bergantung cloud	Keterbatasan perangkat dan risiko keputusan otomatis
Desain rendah energi	Mengurangi konsumsi daya sistem	Perlu evaluasi siklus hidup perangkat

Masa depan yang paling relevan bagi pembaca bukan selalu teknologi paling canggih, tetapi teknologi yang dapat digunakan secara bertanggung jawab. Sistem kecil yang dirawat dengan baik, menghasilkan data yang jujur, dan membantu keputusan lokal sering lebih bermanfaat daripada sistem besar yang tidak dipahami pengguna.

10.6 Peta Jalan Implementasi dari Prototipe ke Sistem Operasional
Roadmap implementasi membantu tim bergerak dari ide menuju sistem operasional secara bertahap. Tahap pertama adalah identifikasi masalah. Tahap kedua adalah desain awal. Tahap ketiga adalah prototipe. Tahap keempat adalah uji laboratorium atau uji meja. Tahap kelima adalah uji lapangan terbatas. Tahap keenam adalah evaluasi. Tahap ketujuh adalah perbaikan. Tahap kedelapan adalah implementasi operasional. Tahap kesembilan adalah replikasi atau pengembangan.



Gambar 10. 1 Peta jalan implementasi IoT lingkungan berkelanjutan

Roadmap ini menunjukkan bahwa evaluasi bukan akhir, tetapi bagian dari siklus perbaikan. Jika prototipe tidak bekerja, proyek tidak harus dianggap gagal. Tim dapat menyederhanakan parameter, mengganti sensor, mengubah lokasi, memperbaiki dashboard, atau memperjelas tujuan. Yang penting adalah keputusan didasarkan pada data dan pembelajaran, bukan sekadar keinginan mempertahankan alat.

Tabel 10. 6 Template roadmap proyek IoT lingkungan

Tahap	Aktivitas utama	Luaran	Penanggung jawab	Kebutuhan data	Risiko utama	Indikator keberhasilan
Identifikasi masalah	Observasi lokasi dan diskusi pengguna	Rumusan masalah	Tim proyek dan pengguna	Catatan masalah, foto, wawancara	Masalah terlalu umum	Masalah dapat dijelaskan secara spesifik
Propos	Menyusun	Propo	Koordi	Inform	Tujuan	Proposa

al	un tujuan, paramet er, lokasi, risiko	sal singk at	nator proyek	asi lokasi dan kebutu han pengg una	tidak realistis	l disetuju i pihak terkait
Desain sistem	Memilih sensor, jaringan, platform , dashboa rd	Desai n arsite ktur	Tim teknis	Datash eet, regulas i, kebutu han data	Perangka t tidak sesuai	Desain dapat dijelask an dan diuji
Prototi pe	Merakit perangk at dan kode awal	Peran gkat awal	Tim teknis	Data uji sensor	Rangkai an tidak stabil	Sensor terbaca dan data terkirim
Uji meja	Menguji fungsi sebelum lapanga n	Catat an uji	Tim teknis	Log data, status perang kat	Error tidak terdoku mentasi	Sistem stabil dalam periode uji
Uji lapang an terbata s	Memasa ng di lokasi kecil	Data lapan gan awal	Tim teknis dan penggu na	Data sensor dan catatan lapang an	Sensor rusak atau data bias	Data masuk dan dapat dibaca penggu na
Evalua si	Menilai data, dashboa rd, risiko,	Lapor an evalu asi	Semua pihak	Data histori s dan umpan balik	Kesimpu lan berlebiha n	Keterba tasan dan perbaik an jelas

	biaya					
Perbaikan	Menyesuaikan sensor, casing, dashboard, notifikasi	Versisistem lebih baik	Tim teknis	Hasil evaluasi	Perbaikan tidak menyasar masalah	Masalah utama berkurang
Operasional	Menjalankan sistem rutin	Sistem digunakan	Pengelola sistem	Data rutin, log perawatan	Tidak ada penanggungan jawab	Ada SOP dan jadwal perawatan
Replikasi	Memperluas ke lokasi lain	Sistem multi-lokasi	Mitra dan pengelola	Template dan standar data	Data tidak konsisten	Lokasi baru mengikuti prosedur yang sama

Template ini dapat digunakan untuk proyek kualitas udara, kualitas air, smart farming, energi, sampah, atau pemantauan lingkungan lain. Isi setiap tahap perlu disesuaikan dengan konteks. Untuk proyek sekolah, penanggung jawab dapat berupa guru dan tim siswa. Untuk proyek komunitas, penanggung jawab dapat berupa pengurus lingkungan. Untuk proyek profesional, penanggung jawab dapat berupa tim teknis dan unit operasional.

10.7 Latihan Akhir Bab: Menyusun Roadmap Proyek Lengkap

Latihan terakhir buku ini meminta pembaca menyusun roadmap proyek IoT lingkungan lengkap. Pilih satu masalah nyata yang ingin dipantau. Gunakan seluruh prinsip yang telah dibahas dalam buku ini: masalah, parameter, sensor, jaringan, platform, dashboard,

validasi, keamanan, etika, biaya, perawatan, indikator keberhasilan, dan roadmap.

Tabel 10. 7 Template rancangan akhir proyek IoT lingkungan

Komponen rancangan akhir	Jawaban pembaca
Judul proyek	
Masalah lingkungan	
Tujuan proyek	
Lokasi pemantauan	
Pengguna utama	
Parameter yang diukur	
Sensor dan perangkat	
Konektivitas	
Platform dan penyimpanan data	
Dashboard dan notifikasi	
Metode validasi data	
Risiko keamanan	
Risiko etika dan sosial	
Biaya awal dan biaya operasional	
Jadwal perawatan	
Indikator keberhasilan	
Rencana evaluasi	
Rencana replikasi atau pengembangan	
Kondisi penghentian atau desain ulang	

Setelah tabel diisi, tulis ringkasan proposal satu halaman. Ringkasan tersebut harus dapat dibaca oleh orang non-teknis. Gunakan struktur sederhana: masalah, solusi yang diusulkan, cara kerja sistem, manfaat yang diharapkan, risiko, kebutuhan sumber daya, dan indikator keberhasilan. Hindari klaim dampak yang belum didukung data.

Kesimpulan Bab

Roadmap solusi IoT lingkungan berkelanjutan membantu pembaca mengubah ide menjadi proyek yang dapat diuji, dikembangkan, dan dikomunikasikan. Roadmap dimulai dari perumusan masalah, dilanjutkan dengan proposal, desain sistem, prototipe, uji meja, uji

lapangan, evaluasi, perbaikan, operasi, dan replikasi. Setiap tahap membutuhkan luaran yang jelas, penanggung jawab, kebutuhan data, risiko, dan indikator keberhasilan.

Keberhasilan proyek IoT tidak hanya berarti perangkat bekerja. Keberhasilan harus mencakup kualitas data, pemahaman pengguna, respons operasional, keamanan, etika, biaya perawatan, dan keberlanjutan sistem. Dokumentasi teknis dan dokumentasi pengguna menjadi syarat penting agar sistem tidak bergantung pada satu orang. Replikasi dan skalabilitas perlu dirancang dengan standar data, prosedur pemasangan, manajemen perangkat, dan tata kelola kolaborasi.

Masa depan IoT untuk lingkungan berkelanjutan terbuka melalui kecerdasan buatan, analitik prediktif, digital twin, citizen science, edge computing, dan sistem peringatan dini. Namun, teknologi baru harus digunakan secara kritis. Nilai utama IoT tetap terletak pada kemampuannya membantu manusia memahami lingkungan, mengambil keputusan yang lebih baik, dan merawat sistem secara bertanggung jawab.

Penutup Buku

Buku ini telah membahas Internet of Things untuk lingkungan berkelanjutan dari konsep hingga implementasi. Pembaca diajak memahami bahwa IoT bukan sekadar sensor yang terhubung ke internet, tetapi sistem yang menggabungkan pengukuran, komunikasi data, platform, dashboard, keputusan, dan tindakan. Pada saat yang sama, buku ini menekankan bahwa data harus dikumpulkan, ditafsirkan, dan dipublikasikan secara hati-hati.

Pendekatan berbasis proyek menjadi inti buku ini. Pembaca tidak hanya mempelajari teori, tetapi juga diarahkan untuk merancang proyek kualitas udara, kualitas air, smart farming, serta mengevaluasi risiko keamanan, etika, validitas data, dan keberlanjutan operasional. Dengan pendekatan ini, IoT dapat dipahami sebagai alat belajar, alat pemantauan, alat komunikasi, dan alat bantu keputusan.

Tantangan lingkungan tidak dapat diselesaikan oleh teknologi saja. Teknologi memerlukan manusia yang memahami masalah, merawat sistem, membaca data dengan jujur, dan mengambil tindakan yang tepat. Karena itu, solusi IoT lingkungan yang baik adalah solusi yang tidak hanya pintar secara teknis, tetapi juga relevan secara sosial, etis secara data, hemat sumber daya, dan dapat dipertahankan dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] United Nations Statistics Division, “SDG Indicators,” United Nations. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/sdgs/>
- [2] United Nations Environment Programme, “SDG statistics,” UNEP. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.unep.org/topics/sustainable-development-goals/monitoring-progress/sdg-statistics>
- [3] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The Internet of Things: A survey,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [4] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [5] World Health Organization, “Ambient (outdoor) air pollution,” WHO. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [7] International Organization for Standardization, “ISO/IEC 30141:2024 Internet of Things (IoT) — Reference architecture,” ISO, 2024. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/88800.html>
- [8] OASIS Open, “MQTT Version 5.0,” OASIS Standard, Mar. 7, 2019. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
- [9] J. Voas, “Networks of ‘Things’,” National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, NIST Special Publication 800-183, Jul. 2016, doi: 10.6028/NIST.SP.800-183.
- [10] International Organization for Standardization, “ISO/IEC 30141:2024 Internet of Things (IoT) — Reference architecture,”

- ISO, 2024. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/88800.html>
- [11] Espressif Systems, “ESP32 Series Datasheet,” Espressif Systems. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [12] Arduino, “UNO R3,” Arduino Documentation. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
- [13] Raspberry Pi Ltd., “Raspberry Pi 4 Model B specifications,” Raspberry Pi. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
- [14] OASIS Open, “MQTT Version 5.0,” OASIS Standard, Mar. 7, 2019. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
- [15] A. Clements and R. Duvall, *The Enhanced Air Sensor Guidebook*, EPA/600/R-22/213. Washington, DC, USA: U.S. Environmental Protection Agency, Sep. 2022. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1017AWL.txt>
- [16] World Health Organization, *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2021. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [21] IEEE 802.11 Working Group, “IEEE 802.11, the Working Group Setting the Standards for Wireless LANs,” IEEE. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://ieee802.org/11/>
- [22] Bluetooth SIG, “Core Specification 5.4,” Bluetooth Technology Website. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-4/>
- [23] LoRa Alliance, “TS001-1.0.4 LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification,” LoRa Alliance, 2020. Accessed: May 12, 2026.

[Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification>

[24] GSMA, “NB-IoT Deployment Guide to Basic Feature Set Requirements,” GSMA, Jun. 2019. Accessed: May 12, 2026.

[Online]. Available: <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/internet-of-things/wp-content/uploads/2019/07/201906-GSMA-NB-IoT-Deployment-Guide-v3.pdf>

[25] R. Fielding, M. Nottingham, and J. Reschke, “HTTP Semantics,” RFC 9110, Internet Engineering Task Force, Jun. 2022, doi: 10.17487/RFC9110.

[26] A. Banks, E. Briggs, K. Borgendale, and R. Gupta, Eds., “MQTT Version 5.0,” OASIS Standard, Mar. 2019. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>

[27] Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, “The Constrained Application Protocol (CoAP),” RFC 7252, Internet Engineering Task Force, Jun. 2014, doi: 10.17487/RFC7252.

[28] P. Mell and T. Grance, “The NIST Definition of Cloud Computing,” National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, NIST Special Publication 800-145, Sep. 2011, doi: 10.6028/NIST.SP.800-145.

[29] ThingsBoard, “ThingsBoard — Open-source IoT Platform.” Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://thingsboard.io/>

[30] Grafana Labs, “Dashboards,” Grafana Documentation. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/visualizations/dashboards/>

[31] OpenJS Foundation, “Node-RED: Low-code programming for event-driven applications.” Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://nodered.org/>

[32] M. Iorga, L. Feldman, R. Barton, M. J. Martin, N. Goren, and C. Mahmoudi, “Fog Computing Conceptual Model,” National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, NIST Special Publication 500-325, Mar. 2018, doi: 10.6028/NIST.SP.500-325.

- [33] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, “Early warning systems,” UNDRR. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/terminology/early-warning-system>
- [34] A. Clements and R. Duvall, *The Enhanced Air Sensor Guidebook*, EPA/600/R-22/213. Washington, DC, USA: U.S. Environmental Protection Agency, Sep. 2022. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1017AWL.txt>
- [35] World Health Organization, *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2021. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [36] Sensirion AG, “Datasheet SPS30: Particulate Matter Sensor for Air Quality Monitoring and Control,” Sensirion. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://sensirion.com>
- [38] U.S. Geological Survey, “National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data (NFM),” USGS. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/national-field-manual-collection-water-quality-data-nfm>
- [39] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2022. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- [40] R. S. Ayers and D. W. Westcot, *Water Quality for Agriculture*, FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/T0234E/T0234E00.htm>
- [41] U.S. Geological Survey, “Chapter A6. Field Measurements,” in *National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data*.

Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/publication/twri09A6>

[42] U.S. Environmental Protection Agency, “Factsheets on Water Quality Parameters,” EPA. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/awma/factsheets-water-quality-parameters>

[43] U.S. Environmental Protection Agency, “Standard Operating Procedure: Calibration of Field Instruments for Water Quality Measurements,” EPA, 2017. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-11/documents/eqasop-fieldcalibrat3.pdf>

[44] S. S. Gill, R. Buyya, and A. K. Sangaiah, “Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review,” *Sensors*, vol. 24, no. 8, Art. no. 2647, Apr. 2024, doi: 10.3390/s24082647.

[45] F. C. Martínez-Fernández, A. González-Teruel, and M. Soto-García, “Advancements in dielectric soil moisture sensor calibration: A review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 219, 2024, Art. no. 108813, doi: 10.1016/j.compag.2024.108813.

[46] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/X0490E/x0490e00.htm>

[47] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Guidance on Realizing Real Water Savings with Crop Water Productivity Interventions*. Rome, Italy: FAO, 2020. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca8469en>

[48] M. Fagan, K. N. Megas, K. Scarfone, and M. Smith, “Foundational Cybersecurity Activities for IoT Device Manufacturers,” National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, NISTIR 8259, May 2020, doi: 10.6028/NIST.IR.8259.

[49] ETSI, “Cyber Security for Consumer Internet of Things: Baseline Requirements,” ETSI EN 303 645 V3.1.3, Sep. 2024.

Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303600_303699/303645/03.01.03_60/en_303645v030103p.pdf

[50] National Institute of Standards and Technology, “The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0,” NIST Cybersecurity White Paper 29, Feb. 2024, doi: 10.6028/NIST.CSWP.29.

[51] International Organization for Standardization, “ISO/IEC 25012:2008 Software engineering — Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Data quality model,” ISO, 2008. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/35736.html>

[52] Project Management Institute, “PMBOK Guide,” PMI. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.pmi.org/standards/pmbok>

[53] Organisation for Economic Co-operation and Development, “Evaluation Criteria,” OECD. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/development-co-operation-evaluation-and-effectiveness/evaluation-criteria.html>

[54] International Telecommunication Union, “Joint Coordination Activity on Internet of Things, digital twins and smart sustainable cities and communities,” ITU. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-T/jca/iot/Pages/default.aspx>

[55] European Citizen Science, “European Citizen Science Platform.” Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.citizenscience.eu/>

[56] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “IoT, AI, and Digital Twins in Smart Cities: A Systematic Review,” *Smart Cities*, vol. 8, no. 5, Art. no. 175, 2025, doi: 10.3390/smartcities8050175.

[57] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, “Early warning systems,” UNDRR. Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/terminology/early-warning-system>

INDEKS

A

Adaptasi perubahan iklim, xxv, 7, 155
Aktuator, xi, 19, 120
Alur data, 23, 88, 89
Alur kerja sistem IoT, 23–24
Ambang batas, 75, 107–108
Analisis data lingkungan, xi, 21, 64, 136
Arsitektur IoT, 16–18
Arsitektur sistem IoT, 16, 18, 23, 88
Arduino Uno, 19–20
Artificial Intelligence, xi
Akurasi sensor, 30–32, 41–42, 90–91

B

Bandwidth, xi, 47, 53
Banjir, xxv, 7, 155
Baterai, 24, 47, 60, 138–139
Bencana lingkungan, xxv, 10, 155
Bias data, 136–137
Bluetooth, 49–51
Bluetooth Low Energy, xi, 49–51

C

Cloud, 64, 67–71
Cloud computing, xi, 64, 67–71
CoAP, 53–55
CO₂, xi, 33–34
Cyber-Physical System, xi

D

Dashboard, 5, 10, 24, 64, 72–80, 88–89
Dashboard kualitas udara, 77–78
Data, 2–7, 21–24, 64–66

Data lingkungan, 2–3, 21–23, 64–66, 136–137

Data mentah, 64–66

Data real-time, xi, 75

Data sensor, xi, 21–22, 64–66

Data time-series, xi

Deteksi dini, 75, 107–108

Dokumentasi pengguna, 151–152

Dokumentasi teknis, 151–152

Dissolved oxygen, xi, 35–37

E

Edge computing, xi, 70–71

Efisiensi air, 122–123

Efisiensi energi, xi, 122–123, 155–157

Ekosistem, xi, 7, 155

Emisi karbon, xxv, 7

ESP32, 19–20, 27

Etika data, 134–135

Etika penggunaan IoT, 131–136

Evaluasi sistem, 125–126

F

Firmware, xi

Fog computing, xi

Fondasi teknologi IoT, 16–29

G

Gateway, 56–57

Gateway IoT, xi, 56–57

Green IoT, xi, 155–157

Green technology, 155–157

H

HTTP, 53–55

I

Implementasi sederhana, 94–95
Indikator keberhasilan, 149–150
Internet of Things, 1, 4–7, 16
IoT dan lingkungan berkelanjutan, 7–9
IoT lingkungan, 1–14, 16–29
Irigasi cerdas, 120–123
Irigasi otomatis, 120–128

K

Kalibrasi, 30–32, 41–45, 90–91
Kalibrasi awal, 90–91
Kalibrasi sensor, xi, 41–42
Kebakaran hutan, xxv, 155
Keamanan data, 131–135
Keamanan jaringan, 131–133
Keamanan perangkat, 131–133
Keberlanjutan sistem, 131–143
Kelembapan, xi, 19, 27, 33–34, 117–121
Kelembapan tanah, xi, 117–121
Kendali otomatis, xi, 120–121
Koneksi tidak stabil, 60
Konektivitas IoT, 47–63
Konservasi lingkungan, xxv, 115–129
Kualitas air, xi, 35–37, 99–113
Kualitas udara, xi, 33–34, 82–97

L

Latency, xi
Lingkungan berkelanjutan, 1, 7–9, 146–162
LoRa, 49–51
LoRaWAN, xi, 49–51

M

Machine learning, xi
Masa depan IoT lingkungan, 155–157
Mikrokontroler, xi, 19–20
Mitigasi perubahan iklim, xxv
Monitoring berkelanjutan, xi
MQTT, xi, 53–55

N

NB-IoT, xi, 49–51
Node sensor, xi

O

Open data, xi, 134–135
Optimasi air dan energi, 122–123
Otomatisasi, xi, 120–121

P

Parameter kualitas air, 102–103
Parameter kualitas udara, 33–34, 82–85
Pemantauan air, 99–113
Pemantauan kualitas air, 99–113
Pemantauan kualitas udara, 82–97
Pemantauan lingkungan, 1–3, 64–66
Pemantauan ruang publik, 77–78
Pencemaran air, xxv, 99–113
Pencemaran tanah, xxv, 115–129
Pencemaran udara, xxv, 82–97
Pengambilan keputusan, 5–7, 21–24, 64–66
Pengelolaan sampah, xxv, 3, 155–157
Pengiriman data, 47–63, 107–108
Perawatan sistem, 138–139
Perubahan iklim, xxv, 7–9, 155–157
pH, 35–37, 102–103, 110–111

pH sensor, xi, 35–37
Platform IoT, xi, 67–68
PM2.5, xi, 33–34, 82–85
PM10, xi, 33–34, 82–85
Privasi data, 134–135
Protokol komunikasi, xi, 53–55
Proyek IoT lingkungan, 9–14, 82–97, 99–113, 115–129, 146–162

R

Raspberry Pi, 19–20
Real-time monitoring, xi
Rekomendasi praktis, 92–93
Remote sensing, xi
Renewable energy, xi
Replikasi proyek, 153–154
Resiliensi lingkungan, xi
Risiko data, 10, 136–137
Risiko keamanan, 131–133
Roadmap solusi IoT, 146–162

S

Seluler, 49–51
Sensor, xi, 19, 30–45
Sensor air, 35–37, 102–103
Sensor cahaya, xi, 38–39
Sensor gas, xi, 33–34
Sensor kekeruhan, xi, 35–37
Sensor kelembapan tanah, xi, 117–121
Sensor kualitas air, 35–37, 99–113
Sensor kualitas udara, 33–34, 82–97
Sensor suhu, xi, 19, 27, 33–39
Sensor tanah, 38–39, 117–121
Sistem IoT, 16–29

Sistem peringatan dini, xxv, 75–76
Smart farming, 115–129
Smart agriculture, xi, 115–129
Smart city, xi
Smart environment, xi
Smart grid, xi
Smart irrigation, xi, 120–123
Smart waste management, xi
Studi kasus kualitas udara, 12–13, 77–78, 82–97
Studi kasus kualitas air, 110–111
Studi kasus ruang kompos, 27
Suhu, 19, 27, 33–39, 82–85, 102–103, 117–121
Sumber daya alam, xi, 115–129
Sustainability, xi

T

Tantangan lapangan, 105–106
Teknologi nirkabel, xi, 49–51
Telemetry, xi
ThingsBoard, xi
Threshold, xi, 75, 107–108
Timestamp, 21–22, 58
Turbidity, xi, 35–37, 102–103

U

Urban heat island, xi

V

Validasi data, 41–42, 90–91, 136–137
Validitas data, 136–137
Visualisasi data, xi, 64–66, 72–80

W

Water quality monitoring, xi, 99–113

Wi-Fi, xi, 49–51

Wireless Sensor Network, xi

Z

Zigbee, xi

BIODATA PENULIS



Harry Setya Hadi, S.Kom, M.Kom

*Dosen Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Ekasakti.*

Harry Setya Hadi, S.Kom., M.Kom. lahir di Lubuk Sikaping pada 23 Juli 1987. Merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Latar belakang keluarga yang dekat dengan dunia pendidikan turut membentuk karakter akademik dan profesionalnya. Ayahnya adalah seorang Pegawai Negeri Sipil yang berprofesi sebagai guru di SMAK Padang.

Harry menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri 33 Teluk Embun pada tahun 1993–1999, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 8 Padang pada tahun 1999–2002. Pendidikan menengah ditempuh di STM Muhammadiyah 1 Padang pada tahun 2002–2005. Minatnya terhadap bidang teknologi informasi mendorongnya melanjutkan studi Sarjana Sistem Komputer di Universitas Putra Indonesia “YPTK” Padang pada tahun 2006–2011. Selanjutnya, ia menyelesaikan pendidikan Magister Ilmu Komputer pada tahun 2013–2015.

Dalam bidang profesional, memiliki pengalaman dalam perancangan, pengembangan, dan implementasi sistem informasi. Pada tahun 2012–2020, menjadi konsultan Sistem SIMPAU atau Sistem Manajemen Perizinan Angkutan Umum di Dinas Perhubungan Provinsi Sumatera Barat. Sejak tahun 2017 hingga saat ini, ia juga terlibat dalam pengembangan Sistem E-MTQ melalui platform e-mtq.com di lingkungan Kementerian Agama Sumatera Barat.

Fokus penelitian Harry mencakup perancangan sistem, Internet of Things, Machine Learning, Artificial Intelligence, dan pengembangan sistem informasi berbasis web. Ia juga telah menerbitkan beberapa buku yang membahas Internet of Things dan Artificial Intelligence. Selain itu, ia aktif berkontribusi sebagai reviewer pada jurnal internasional dalam bidang Machine Learning

dan Internet of Things, sebagai bagian dari komitmennya dalam mendukung pengembangan kualitas publikasi ilmiah.

Dalam kehidupan keluarga, Harry adalah seorang suami dan ayah. Istrinya berprofesi sebagai guru Bimbingan Konseling di SMK Nasional Padang. Dari pernikahannya, ia dikaruniai dua orang anak, yaitu Nabil Hadi Hidayat dan Khalisa Nur Asyifa. Dukungan keluarga menjadi salah satu sumber motivasi penting bagi Harry dalam berkarya, mengembangkan ilmu pengetahuan, dan memberikan kontribusi nyata melalui teknologi informasi.

Melalui karya-karyanya, Harry Setya Hadi berupaya menghadirkan gagasan dan solusi teknologi yang aplikatif, inovatif, serta relevan dengan kebutuhan masyarakat, pendidikan, dan pemerintahan. Keahliannya dalam bidang sistem informasi, IoT, Machine Learning, dan Artificial Intelligence menjadi dasar penting dalam setiap karya yang dihasilkannya.

Informasi lebih lanjut bisa menghubungi email xmoensen@gmail.com dan Blog <https://h4nk.blogspot.com>



Buku Internet of Things untuk Lingkungan Berkelanjutan: Konsep, Teknologi, dan Proyek Pemantauan Berbasis Data membahas penerapan teknologi Internet of Things (IoT) sebagai solusi inovatif dalam mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Buku ini menguraikan konsep dasar IoT, arsitektur sistem, sensor, jaringan komunikasi, komputasi awan, hingga analisis data yang menjadi fondasi dalam membangun sistem pemantauan lingkungan secara real-time. Pembahasan juga dikaitkan dengan berbagai isu lingkungan, seperti kualitas udara, kualitas air, pengelolaan limbah, efisiensi energi, pertanian cerdas, dan mitigasi perubahan iklim. Selain menyajikan landasan teoritis, buku ini dilengkapi dengan berbagai contoh proyek dan implementasi pemantauan berbasis data yang dapat diterapkan dalam dunia pendidikan, penelitian, maupun industri. Dengan pendekatan yang sistematis dan aplikatif, pembaca diajak memahami bagaimana data yang diperoleh dari perangkat IoT dapat dimanfaatkan untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat, akurat, dan berbasis bukti.



Penerbit buku yang memajukan literasi dan kreativitas dengan menyediakan platform terjangkau bagi penulis berbakat dari berbagai latar belakang

Office Yogyakarta : 087777899993
Marketing 1 : 088221740145
Marketing 2 : 085961447209
Marketing 3 : 0882005806664
Instagram : @ypad_penerbit
Website : <https://ypad.store>
Email : teampenerbit@ypad.store

