Kemal Maulana Alhasa, Heru Dwi Wahyono,
Satmoko Yudo, Irwan Kustianto

Praktik Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Low-Cost Sensor

Buku ini tidak diperjualbelikan

Praktik Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Low-Cost Sensor

Buku ini tidak diperjualbelikan

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN
Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Buku ini tidak diperjualbelikan

**Kemal Maulana Alhasa, Heru Dwi Wahyono,
Satmoko Yudo, Irwan Kustianto**

Praktik Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Low-Cost Sensor

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan

© 2026 Kemal Maulana Alhasa, Heru Dwi Wahyono, Satmoko Yudo, Irwan Kustianto

Katalog dalam Terbitan (KDT)
Praktik Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Low-Cost Sensor/Kemal Maulana Alhasa, Heru Dwi Wahyono, Satmoko Yudo, Irwan Kustianto–Jakarta: Penerbit BRIN, 2026.

xvi + 207 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-634-7933-40-9 (*e-book*)

1. Pemantauan kualitas udara
2. Pencemaran udara
3. *Low-cost sensor* (LCS)

628.53

Editor Akuisisi	: Anggy Denok S.
Copy editor	: Christina Tulalessy
Proofreader	: Christina Tulalessy
Penata isi	: Rahma Hilma Taslima, Prayitno
Desainer sampul	: Rahma Hilma Taslima, Prayitno

Edisi pertama : November 2026

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Isi

Daftar Gambar vii
Daftar Tabel ix
Pengantar Penerbit xi
Kata Sambutan xiii
Prakata xv

BAB I TRANSFORMASI PEMANTAUAN KUALITAS UDARA ... 1

BAB II KUALITAS UDARA 7
A. Kualitas Udara Luar Ruangan 8
B. Pencemaran Udara 9
C. Dampak Pencemaran Udara 11
D. Pemantauan Kualitas Udara 13
E. Baku Mutu Kualitas Udara 19
F. Indeks Standar Pencamaran Udara (ISPU) 20

BAB III TEKNOLOGI LOW-COST SENSORS (LCS) 25
A. Latar Belakang Perkembangan Teknologi LCS 25
B. Jenis-Jenis LCS 26
C. Karakteristik LCS 38
D. Gangguan Pada LCS 40

BAB IV EVALUASI KINERJA LCS 45
A. Metode Evaluasi 45
B. Evaluasi Metrik 60

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB V KALIBRASI 65
A. Metode Kalibrasi 66
B. Parameter yang Dikoreksi 76
C. Strategi Kalibrasi Berbasis Jaringan 79

BAB VI PANDUAN TEKNIS IMPLEMENTASI LCS 87
A. Tujuan Dasar Penggunaan Aplikasi LCS 88
B. Penetapan Perencanaan 90
C. Penyiapan Kegiatan Pemantauan 106
D. Pengumpulan Data 121

BAB VII PENGELOLAAN DATA DAN EVALUASI SISTEM LCS 133
A. Manajeman Data dan Visualisasi 133
B. Evaluasi 149
C. Studi Kasus dan Praktik Penerapan LCS di Negara Lain 153

BAB VIII PENUTUP 163

Daftar Pustaka 167
Glosarium 191
Tentang Penulis 197
Indeks 201

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Gambar

Gambar 2.1 Ilustrasi Perbandingan Kualitas Udara di Sebuah Kawasan Perkotaan 9
Gambar 2.2 Sumber dan Klasifikasi Pencemaran Udara Berdasarkan Proses Pembetukannya. 10
Gambar 2.3 Ilustrasi Prinsip Kerja Sensor Pasif dan Sensor Aktif pada Pengindraan Jauh Berbasis Satelit 17
Gambar 3.1 Struktur LCS Tipe MOS (a) dan Contoh LCS MOS Komersial yang Dipabrikasi Oleh Figaro (b) 28
Gambar 3.2 Struktur LCS EC Empat Elektrode..... 30
Gambar 3.3 Struktur LCS NDIR..... 32
Gambar 3.4 Struktur LCS PID..... 33
Gambar 3.5 Prinsip Kerja LCS-PM Berbasis Optik..... 35
Gambar 4.1 Skema Sistem Pengujian Laboratorium LCS-PM 48
Gambar 4.2 Skema Sistem Pengujian Laboratorium LCS Gas 52
Gambar 4.3 Ilustrasi Kolokasi LCS di SPKU..... 60
Gambar 5.1 Alur Kerja Kalibrasi LCS 67
Gambar 5.2 Alur Pengembangan Model Kalibrasi Berbasis Pembelajaran Mesin..... 71
Gambar 5.3 Ilustrasi Blind Calibration 81
Gambar 5.4 Ilustrasi *Collaborative Calibration*..... 83
Gambar 5.5 Ilustrasi *Transfer Calibration* 85
Gambar 6.1 Alur Implementasi Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis LCS 88
Gambar 6.2 Diagram Alur Pemilihan LCS Berdasarkan Target Pengukuran yang Telah Ditetapkan 91
Gambar 6.3 Contoh Ilustrasi Akurasi, Presisi dan Bias dari Sebuah LCS Ketika Mengukur Konsentrasi O_3 94

Buku ini tidak diperjualbelikan

Gambar 6.4 Contoh pengaruh kelembapan terhadap akurasi pengukuran PM menggunakan LCS. 95
Gambar 6.5 Contoh Ilustrasi Sensitivitas Silang Pada LCS Gas Sensor Ketika Mengukur Konsentrasi O_3 96
Gambar 6.6 Alur Diagram Pemilihan LCS Berdasarkan Evaluasi Kinerja 98
Gambar 6.7 Ilustrasi peletakan sensor di dalam enclosure: (a) dekat bukaan; (b) di bagian tengah *enclosure*. 104
Gambar 6.8 Struktur Perangkat Keras LCS 107
Gambar 6.9 Contoh Struktur *Firmware* 116
Gambar 6.10 Contoh (a) *drift* dan (b) *outlier* pada data hasil pengukuran LCS. 129
Gambar 7.1 Komponen dan Fungsi Utama dari Sistem Manajemen Data (SMD) 136
Gambar 7.2 Diagram Blok (A) Protokol HTTP dan (B) Protokol MQTT 138
Gambar 7.3 Relasi Antartabel pada Basis Data Sistem LCS 144
Gambar 7.4 Contoh Tampilan *Dashboard* Visualisasi Data Menggunakan ThingSpeak 147
Gambar 7.5 Contoh Aplikasi Web *AirSensor DataViewer* Berbasis R 148

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Tabel

Tabel 2.1 Perbandingan Instrumen Rujukan dan Sensor Biaya Rendah (LCS) 18
Tabel 2.2 Baku Mutu Udara Di Indonesia Berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VII 19
Tabel 2.3 Konversi Konsentrasi Pencemar menjadi Nilai ISPU 22
Tabel 2.4 Kategori Rentang ISPU 23
Tabel 3.1 Daftar Beberapa Sensor LCS-PM yang Umun Digunakan dan yang Tersedia Secara Komersial 36
Tabel 3.2 Jenis-Jenis Karakteristik dari LCS yang Perlu Dipertimbangkan 38
Tabel 3.3 Ringkasan Sensitivitas Silang pada Beberapa Sensor Gas LCS 43
Tabel 4.1 Ringkasan Metrik Akurasi 61
Tabel 4.2 Ringkasan Metrik Presisi 64
Tabel 5.1 Perbedaan Antara Kalibrasi Laboratorium dan Kalibrasi Lapangan 65
Tabel 5.2 Ringkasan Kelebihan dan kekurangan Metode Kalibrasi 73
Tabel 6.1 Daftar Papan Rangkaian yang Umum Digunakan di Sistem LCS 109
Tabel 6.2 Perbandingan Media Penyimpanan Lokal 110
Tabel 6.3 Jaringan Komunikasi yang Dapat Diadopsi pada Sistem LCS 112
Tabel 6.4 Daftar Aplikasi untuk Memeriksa Cakupan Jaringan Komunikasi 122
Tabel 6.5 Pengecekan Umum Terkait dengan Peninjauan Data Berkala 127

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 7.1 Struktur Tabel Data Node LCS 141
Tabel 7.2 Struktur Tabel Data Mentah Sensor Gas 142
Tabel 7.3 Struktur Tabel Data Mentah Sensor PM 142
Tabel 7.4 Struktur Tabel Data Hasil Pengukuran Meteorologi 143
Tabel 7.5 Struktur Tabel Data Konsentrasi Hasil Pengukuran 144

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pengantar Penerbit

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Low-cost sensor (LCS) merupakan teknologi sensor berbiaya relatif rendah yang memungkinkan pemantauan kualitas udara dilakukan secara lebih luas, fleksibel, dan mudah diterapkan. Kehadirannya membuka peluang bagi pemerintah, peneliti, praktisi, hingga masyarakat untuk memperoleh informasi kualitas udara secara lebih dekat dengan lingkungan tempat tinggal. Namun, biaya rendah dan kemudahan penggunaan tidak serta-merta menjamin kualitas data. Akurasi, presisi, pengaruh kondisi lingkungan, sensitivitas silang, kalibrasi, serta pengelolaan data menjadi tantangan penting dalam pemanfaatan LCS.

Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Low-Cost Sensor menyajikan panduan terpadu mengenai pemanfaatan LCS, mulai dari pemahaman kualitas udara dan teknologi sensor, evaluasi kinerja, kalibrasi, hingga implementasi teknis serta pengelolaan dan evaluasi data. Dengan pendekatan aplikatif, buku ini membantu pembaca memahami LCS bukan sekadar sebagai perangkat sensor, melainkan sebagai bagian dari sistem pemantauan yang memerlukan pengujian dan pengelolaan data secara berkelanjutan. Buku ini

Buku ini tidak diperjualbelikan

bermanfaat bagi peneliti, praktisi, mahasiswa, pemangku kebijakan, dan masyarakat yang ingin memahami serta menerapkan LCS untuk menghasilkan data kualitas udara yang lebih andal.

Kami berharap hadirnya buku ini dapat menjadi referensi bacaan untuk menambah wawasan dan pengetahuan bagi seluruh pembaca. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan

Kata Sambutan

Kualitas udara merupakan salah satu aspek lingkungan yang tidak hanya memengaruhi kesehatan manusia, tetapi juga keberlangsungan ekosistem secara keseluruhan. Peningkatan polusi udara dan dampaknya yang semakin nyata mendorong kita untuk memperkuat upaya pengendalian pencemaran udara. Salah satu langkah penting yang dapat dilakukan adalah pemantauan kualitas udara secara berkelanjutan sehingga kebijakan yang diambil dapat didasarkan pada data yang memadai dan mendorong peningkatan kualitas udara. Namun, keterbatasan jumlah stasiun pemantauan kualitas udara, antara lain karena biaya pengadaan dan pengoperasiannya yang relatif tinggi, masih menjadi kendala dalam pengendalian kualitas udara, khususnya di kawasan perkotaan berpendapatan menengah dan rendah.

Kehadiran teknologi *low-cost sensor* (LCS) menjadi salah satu solusi untuk memperluas jangkauan pemantauan kualitas udara secara lebih inklusif, baik bagi pemerintah maupun masyarakat. Biaya yang relatif rendah dan kemudahan pemasangan menjadikan teknologi ini berpotensi sebagai alternatif untuk mendukung sistem pemantauan kualitas udara. Namun, di balik kemudahan dan efisiensinya, tantangan terkait akurasi dan presisi hasil pengukuran akibat berbagai faktor lingkungan tetap perlu dikelola dengan cermat. Untuk menjawab kebutuhan tersebut, para peneliti Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) menghadirkan buku ini sebagai panduan yang memadukan aspek teknis dan penerapan praktis di lapangan. Buku ini membahas berbagai jenis sensor serta metode

Buku ini tidak diperjualbelikan

untuk meningkatkan kualitas data hasil pengukuran sehingga dapat menjadi rujukan bagi praktisi dan peneliti dalam menghasilkan data kualitas udara yang kredibel untuk mendukung upaya pelestarian lingkungan.

Buku ini merupakan hasil dedikasi dan sinergi para penulis dalam mengolah berbagai aspek teknis yang kompleks menjadi panduan yang sistematis dan aplikatif. Saya berharap buku ini tidak berhenti sebagai sumber literasi, tetapi juga dapat mendorong berbagai pihak untuk berperan aktif dalam memantau, melindungi, dan meningkatkan kualitas udara demi keberlanjutan lingkungan. Upaya tersebut merupakan salah satu kontribusi nyata dalam mendukung pencapaian SDGs, khususnya Tujuan ke-3 tentang kesehatan dan kesejahteraan serta Tujuan ke-11 tentang kota dan komunitas yang berkelanjutan.

Selamat membaca. Semoga buku ini memberikan manfaat bagi para peneliti, praktisi, pemerintah, masyarakat, dan berbagai pihak yang berkepentingan dalam pemanfaatan *low-cost sensor* untuk pemantauan kualitas udara.

Serpong, 01 Februari 2025

Dr. Albertus Sulaiman, S.Si., M.Si

Kepala Pusat Riset Iklim dan Atmosfer

Buku ini tidak diperjualbelikan

Prakata

Perkembangan teknologi telah membuka peluang yang lebih luas dalam pemantauan kualitas udara. Kehadiran *low-cost sensor* (LCS) memungkinkan pemantauan dilakukan dengan perangkat yang relatif terjangkau, fleksibel dalam pemasangan, dan dapat dimanfaatkan oleh berbagai pihak. Teknologi ini tidak hanya berpotensi memperluas jangkauan pemantauan kualitas udara, tetapi juga membuka peluang bagi masyarakat untuk berpartisipasi dalam penyediaan informasi mengenai kondisi kualitas udara di lingkungannya. Namun, pemanfaatan LCS juga menghadirkan tantangan, terutama terkait kinerja, akurasi, presisi, pengaruh kondisi lingkungan, serta pengelolaan dan interpretasi data yang dihasilkan.

Buku **Pemantauan Kualitas Udara Berbasis *Low-Cost Sensor*** disusun untuk memberikan pemahaman sekaligus panduan praktis mengenai pemanfaatan LCS dalam pemantauan kualitas udara. Buku ini ditujukan bagi peneliti, praktisi, mahasiswa, pemangku kebijakan, serta pihak lain yang berkepentingan dengan pemantauan dan pengelolaan kualitas udara. Melalui buku ini, pembaca diharapkan tidak hanya memahami prinsip dan teknologi LCS, tetapi juga mampu mempertimbangkan berbagai aspek yang diperlukan untuk menghasilkan data pemantauan yang lebih andal.

Buku ini terdiri atas delapan bab. Bab I, Transformasi Pemantauan Kualitas Udara, membahas perkembangan pemantauan kualitas udara dan perubahan pendekatan pemantauan seiring perkembangan teknologi. Bab II, Kualitas Udara, memberikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

landasan mengenai kualitas udara dan berbagai aspek yang berkaitan dengan pencemaran udara. Bab III, Teknologi *Low-Cost Sensors* (LCS), membahas karakteristik dan jenis teknologi sensor yang digunakan dalam pemantauan kualitas udara. Selanjutnya, Bab IV, Evaluasi Kinerja LCS, membahas berbagai aspek yang digunakan untuk menilai kinerja sensor. Bab V, Kalibrasi, membahas pendekatan dan teknik kalibrasi untuk meningkatkan kualitas hasil pengukuran LCS. Bab VI, Panduan Teknis Implementasi LCS, menyajikan aspek teknis yang perlu diperhatikan dalam penerapan LCS di lapangan. Bab VII, Pengelolaan Data dan Evaluasi Sistem LCS, membahas pengelolaan, pengolahan, dan evaluasi data serta sistem pemantauan berbasis LCS. Buku ini ditutup dengan Bab VIII, Penutup, yang merangkum pembahasan dan memberikan arahan untuk pemanfaatan LCS secara lebih efektif.

Salah satu keunggulan buku ini ialah penyajian pemanfaatan LCS secara terpadu, mulai dari pemahaman kualitas udara dan teknologi sensor, evaluasi kinerja, kalibrasi, implementasi di lapangan, hingga pengelolaan dan evaluasi data. Dengan pendekatan tersebut, buku ini tidak hanya membahas sensor sebagai perangkat pengukuran, tetapi juga menempatkannya sebagai bagian dari suatu sistem pemantauan yang memerlukan pengujian, kalibrasi, pengelolaan data, dan evaluasi secara berkelanjutan.

Kami menyadari bahwa perkembangan teknologi pemantauan kualitas udara akan terus berlangsung dan menghadirkan berbagai tantangan serta peluang baru. Oleh karena itu, buku ini diharapkan dapat menjadi salah satu rujukan praktis bagi pembaca dalam memahami dan menerapkan teknologi LCS secara tepat, sekaligus mendorong pemanfaatan data kualitas udara yang lebih andal untuk mendukung penelitian, pengambilan kebijakan, dan peningkatan kesadaran masyarakat terhadap kualitas lingkungan.

Serpong, Januari 2025

Tim Penulis

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB I

TRANSFORMASI PEMANTAUAN KUALITAS UDARA

Pencemaran kualitas udara luar ruangan atau ambien (*outdoor air pollution*) merupakan ancaman serius bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Berdasarkan laporan *World Health Organization* (WHO), pada tahun 2019, pencemaran udara telah menyebabkan sekitar 4,2 juta kematian dini di seluruh dunia (WHO 2024). Kematian dini tersebut umumnya berkaitan dengan meningkatnya risiko penyakit kardiovaskular, sistem pernapasan, dan kanker akibat paparan terus-menerus polutan udara seperti partikel halus (*fine particulate matter*-$PM_{2.5}$).

Pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi yang pesat telah meningkatkan emisi dari sektor industri, pembangkit listrik dan transportasi telah meningkatkan beban pencemaran udara di negara-negara maju dan berkembang. Data WHO menunjukkan hampir 99% penduduk dunia menghirup udara yang melebihi pedoman kualitas udara WHO. Negara-negara yang berpenghasilan rendah dan menengah mengalami tingkat paparan tertinggi.

Upaya pengendalian kualitas udara, termasuk pemantauannya masih menghadapi banyak hambatan, terutama di negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah yang menghadapi kendala

Buku ini tidak diperjualbelikan

keterbatasan anggaran, infrastruktur, dan kompleksitas teknologi pemantauan. Pemerintah daerah sering kali tidak memiliki anggaran dan infrastruktur yang memadai untuk melaksanakan pemantauan kualitas udara yang komprehensif dan berkelanjutan. Hal ini menimbulkan kebutuhan akan pendekatan yang efisien dalam pengendalian kualitas udara yang menggabungkan metode pemantauan konvensional dengan teknologi yang lebih terjangkau.

Di negara-negara maju, berbagai teknologi atau metode pemantauan alternatif telah dikembangkan untuk mendukung masyarakat untuk melakukan pemantauan kualitas udara secara waktu nyata (*real-time*), menggunakan teknologi *low-cost sensors* (LCS). LCS merupakan perangkat sensor berbiaya rendah yang dirancang untuk mengukur konsentrasi polutan udara secara lebih sederhana dibandingkan instrumen pemantauan rujukan *(reference-grade monitor)*. Teknologi ini menggabungkan perangkat keras seperti sensor optik (*optical sensor*) atau elektrokimia (*electrochemical sensor*) yang sensitif terhadap partikel dan gas pencemar, dengan perangkat lunak yang mampu memproses data dalam waktu singkat. Dengan memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT), data yang dihasilkan dapat dikirim secara langsung ke perangkat bergerak (*mobile device*) atau platform pemantauan publik, memungkinkan data diakses secara cepat dan akurat.

Teknologi ini juga membuka peluang besar bagi pemerintah kota di negara berpendapatan rendah dan menengah untuk mengatasi kesenjangan data dalam pemantauan kualitas udara, yang sebelumnya mungkin terbatas oleh biaya tinggi dan infrastruktur yang kompleks. Dengan mengintegrasikan LCS ke dalam sistem pemantauan kualitas udara, kota-kota ini dapat membangun sistem pemantauan yang terjangkau, mempercepat pengambilan keputusan Pemerintah, dan mendorong kesadaran publik tentang polusi udara, menuju lingkungan yang lebih sehat dan berkelanjutan.

Berbagai studi menunjukkan bahwa LCS telah diterapkan sebagai pelengkap sistem pemantauan kualitas udara di berbagai

Buku ini tidak diperjualbelikan

wilayah di dunia. Wilayah tersebut antara lain di Kota Nairobi (Kenya), berbagai kota di Amerika Serikat seperti Los Angeles, New York, dan San Joaquin Valley., Greater London, Accra (Ghana), serta kawasan Sub-Sahara Afrika di Kota Adama (Ethiopia) (Manshur et al. 2023; Ahangar et al. 2022; Lu et al. 2021; Sadighi et al. 2018; Abera 2020; Peters et al. 2022; Raheja et al. 2023). Penerapan tersebut memberikan berbagai manfaat, seperti memperluas cakupan pemantauan kualitas udara, menyediakan data yang lebih cepat diakses, serta meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap dampak pencemaran udara bagi kesehatan.

Walaupun memiliki potensi yang menjajikan, penerapannya tetap memerlukan kehati-hatian agar data yang dihasilkan dapat mendukung pengelolaan kualitas udara dan kebijakan udara bersih. Berbagai penelitian menunjukkan, teknologi LCS masih memiliki banyak keterbatasan, khususnya dalam kualitas data yang dihasilkan. Ketelitian dan keakurasian LCS sangat bergantung pada beberapa faktor, di antaranya sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) terhadap berbagai jenis polutan serta kondisi meteorologi, seperti suhu, kelembaban, dan kecepatan angin, yang dapat memengaruhi kinerja sensor secara signifikan (Russell et al. 2022; Zaidan et al. 2020).

Kebergantungan ini membuat data LCS rentan terhadap variabilitas dan ketidakakuratan, yang perlu diperhitungkan dalam pengambilan keputusan terkait kualitas udara. Selain itu, banyaknya jenis LCS komersial yang beredar di pasaran memerlukan pertimbangan yang matang terkait kemampuan, keterbatasan, spesifikasi teknis, serta proses seleksi dan penerapan sensor tersebut sesuai dengan kebutuhan dan konteks penggunanya.

Ke depannya, teknologi LCS diperkirakan akan terus berkembang dan mengalami peningkatan baik di dalam akurasi maupun daya tahan. Penerapan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), dalam hal ini pembelajaran mesin (*machine learning*), untuk membantu kalibrasi di lokasi pengambilan sampel dapat

Buku ini tidak diperjualbelikan

membantu meningkatkan kualitas data yang dihasilkan oleh LCS. Selain itu, dengan penerapan tersebut, teknologi LCS dapat membantu mengenali tren dan pola pencemaran udara serta mengidentifikasi sumber polusi, memberi wawasan yang lebih mendalam bagi pemantauan lingkungan.

Namun, tanpa pemeliharaan yang terjadwal, LCS rentan terhadap degradasi kinerja sensor yang berdampak pada kualitas data yang dapat disebabkan oleh faktor lingkungan atau usia komponen. Oleh karena itu, perlu ada prosedur pemeliharaan dan kalibrasi berkala, seperti pemeriksaan komponen optik atau elektrokimia dan kalibrasi ulang terhadap standar referensi untuk menjaga akurasi.

Terlepas dari perkembangan tersebut, panduan teknis penggunaan LCS dalam pemantauan kualitas udara masih terbatas, terutama di negara-negara berkembang. Minimnya panduan yang mencakup pemilihan, instalasi, kalibrasi, dan pemeliharaan sensor sering kali menyebabkan kesalahan dalam pengukuran dan interpretasi data. Padahal, tanpa panduan yang memadai, pengguna berpotensi mengalami kesulitan dalam memahami batasan teknis LCS dan memastikan data bahwa prosedur pengukuran dilakukan dengan benar sehingga data yang dihasilkan akurat. Oleh karena itu, panduan yang lebih terperinci dan sesuai kondisi lapangan sangat diperlukan untuk mengoptimalkan pemanfaatan LCS dalam pemantauan kualitas udara, terutama di wilayah dengan keterbatasan sumber daya dan infrastruktur pemantauan.

Berangkat dari kebutuhan tersebut, buku ini disusun sebagai panduan teknis untuk mendukung penerapan LCS pada pemantauan kualitas udara. Fokus buku ini adalah memberikan kerangka kerja menyeluruh (*end-to-end*) yang dapat diikuti pembaca, mulai dari konsep dasar kualitas udara, pengenalan jenis dan karakteristik LCS, evaluasi performa dan kalibrasi, sampai perencanaan pemasangan di lapangan, pengelolaan data, serta praktik jaminan kualitas dan pengendalian mutu (QA/QC).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini ditujukan terutama untuk praktisi (pemerintah daerah, instansi terkait, konsultan, komunitas, pengelola kawasan/ industri, dan pihak lain) serta mahasiswa S1 dan pembaca pemula yang membutuhkan rujukan operasional dari tahap pemilihan sensor hingga pemanfaatan data. Keunggulan utama buku ini ialah menyajikan materi secara terintegrasi, mulai dari petunjuk teknis yang menjembatani teori dasar dan kebutuhan praktik lapangan, dengan keunggulan pada kelengkapan materi yang terintegrasi dari pemilihan sensor, instalasi, kolokasi, evaluasi performa, kalibrasi, hingga visualisasi dan komunikasi hasil.

Perlu ditegaskan bahwa data LCS umumnya bersifat indikatif dan dipengaruhi kondisi lingkungan serta karakter sensor; karena itu hasil LCS lebih tepat digunakan untuk pemetaan variasi spasial dan temporal, edukasi publik, dan pelengkap pemantauan rujukan, bukan sebagai satu-satunya dasar penetapan kepatuhan baku mutu atau keputusan regulasi tanpa prosedur evaluasi, kolokasi, dan QA/ QC yang memadai.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB II
Kualitas Udara

Sebelum membahas penggunaan *low-cost sensor* (LCS) dalam pemantauan kualitas udara, pembaca perlu memahami konsep dasar mengenai kualitas udara beserta faktor-faktor yang memengaruhinya. Pemahaman ini menjadi landasan penting untuk menentukan parameter yang diukur, menafsirkan hasil pengukuran, serta mengevaluasi kondisi kualitas udara berdasarkan standar yang berlaku. Tanpa pemahaman tersebut, data yang dihasilkan oleh sistem pemantauan, termasuk LCS, akan sulit dimanfaatkan secara tepat dalam mendukung pengelolaan kualitas udara.

Bab ini menguraikan konsep kualitas udara luar ruangan (udara ambien), sumber dan karakteristik pencemar udara, parameter yang umum digunakan dalam pemantauan, serta dampak pencemaran udara terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Selain itu, bab ini juga menjelaskan baku mutu kualitas udara dan berbagai aspek yang menjadi dasar dalam interpretasi hasil pemantauan kualitas udara. Pemahaman terhadap materi dalam bab ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi pembaca sebelum mempelajari teknologi, metode pengukuran, dan penerapan LCS pada bab-bab berikutnya.

Buku ini tidak diperjualbelikan

A. Kualitas Udara Luar Ruangan

Udara merupakan salah satu komponen terpenting bagi keberlangsungan kehidupan mahluk hidup di muka bumi. Kualitas udara merupakan istilah umum yang sering digunakan untuk menggambarkan seberapa banyak kondisi udara ambien terkontaminasi oleh bahan pencemar udara, sebagaimana yang dicontohkan pada Gambar 2.1.

Berdasarkan kajian saintifik, udara yang tercemar oleh polutan udara memiliki dampak terhadap kesehatan dan lingkungan. Menurut WHO pencemaran udara merupakan salah satu penyebab utama terjadinya kematian manusia secara global (WHO 2021). Studi saintifik menunjukkan bahwa pencemaran udara memiliki keterkaitan dengan beberapa permasalahan kesehatan seperti penurunan fungsi paru-paru, terganggunya pernapasan, penyakit jantung dan meningkatnya risiko penyakit asma (Cheong et al. 2019; Xing et al. 2016).

Selain itu, udara yang tercemar juga memiliki efek terhadap lingkungan seperti terbatasnya jarak pandang, dan mengganggu ekosistem tumbuhan dan hewan (Chuwah et al. 2015; Latif et al. 2018). Contohnya, deposisi hujan asam yang jatuh ke tanah menyebabkan tanah menjadi asam dan akan merusak sistem ekologi. Jika hujan asam itu mengenai struktur bangunan, hal itu akan mempercepat korosi. Pencemaran udara yang terjadi diketahui juga dapat menggangu keseimbangan iklim di bumi karena terdapat beberapa polutan yang berkaitan dengan pemanasan global (Kirschbaum 2014).

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber:Antara Foto/M Risyal Hidayat (2000)

Gambar 2.1 Ilustrasi Perbandingan Kualitas Udara di Sebuah Kawasan Perkotaan

B. Pencemaran Udara

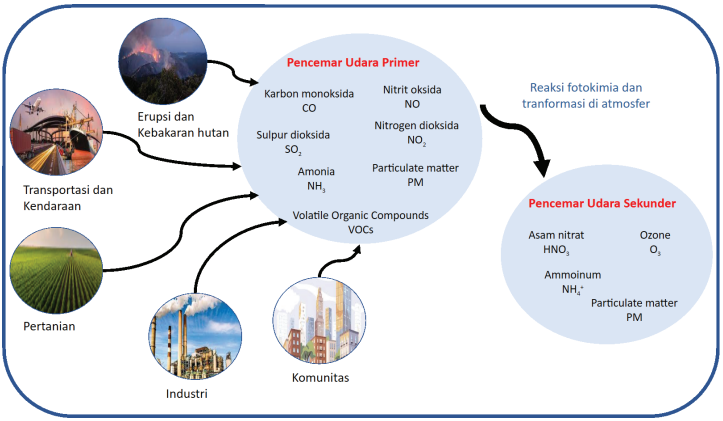
Pencemaran udara merupakan kondisi ketika udara ambien terkontaminasi oleh zat, energi, atau komponen lain dalam jumlah tertentu sehingga kualitasnya menurun dan dapat menimbulkan dampak buruk terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup lainnya, lingkungan, serta keseimbangan iklim. Zat atau bahan yang menyebabkan terjadinya pencemaran udara disebut pencemar udara. pencemar tersebut dapat berbentuk partikel padat dengan berbagai ukuran, tetesan cairan maupun gas.

Sebagian besar pencemar udara bersumber dari aktivitas antropogenik (*anthropogenic activity*) dan alamiah. Sumber antropogenik meliputi kegiatan seperti pembangkit listrik, kendaraan, fasilitas produksi minyak dan gas, dan akitivitas pembakaran bahan bakar (Kurt et al. 2017). Sementara itu, sumber alami meliputi kebakaran hutan, badai debu, aktivitas gunung berapi, dan sumber biogenik (misalnya tanaman dan tanah) (Bai et al. 2018).

Berdasarkan proses pembetukannya, pencemar udara diklasifikasikan menjadi dua, yaitu pencemar udara primer (*primary pollutant*) dan pencemar udara sekunder (*secondary pollutant*)

Buku ini tidak diperjualbelikan

(Daly and Zannetti 2007). Pencemar udara primer merupakan zat pencemar yang dilepaskan secara langsung ke atmosfer dari sumber emisinya, seperti karbon monoksida, sulfur dioksida, nitrogen monoksida, dan partikulat. Sebaliknya, pencemar udara sekunder tidak dilepaskan secara langsung dari sumber emisi, tetapi terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia atau transformasi yang melibatkan pencemar primer dan komponen lain di udara. Contoh pencemar udara sekunder meliputi ozon, asam nitrat, amonium, dan partikulat sekunder. Gambar 2.2 menunjukkan klasifikasi pencemaran berdasarkan proses pembentukannya.



Sumber :Daly and Zannetti(2007)

Gambar 2.2 Sumber dan Klasifikasi Pencemar Udara Berdasarkan Proses Pembentukannya

Sumber Pencemaran

Menurut dokumen yang diterbitkan oleh WHO, pencemar udara utama ialah:

a. partikulat ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}),
b. ozon (O_3),
c. sulfur dioksida (SO_2),
d. nitrogen dioksida (NO_2),
e. karbon monoksida (CO),

Buku ini tidak diperjualbelikan

f. timbal (Pb),
g. amonia (NH3),
h. senyawa organik mudah menguap (*volatile organic compounds*-VOCs),
i. merkuri, dan
j. pencemar beracun lainnya.

Di Indonesia, terdapat tujuh parameter pencemar udara yang digunakan sebagai dasar penilaian kualitas udara. Ketujuh parameter itu diatur dalam Baku Mutu Udara Ambien pada PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VII, yaitu SO_2, CO, NO_2, O_3, Hidrokarbon Non Metana (NMHC), Partikulat debu, Timbal (Pb). Enam parameter digunakan dalam perhitungan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), sedangkan timbal (Pb) tidak termasuk parameter yang digunakan dalam perhitungan ISPU.

C. Dampak Pencemaran Udara

Berdasarkan beberapa kajian ilmiah, diketahui bahwa dampak dari pencemaran udara dapat mencakup kesehatan manusia, lingkungan, ekonomi, iklim, dan material/bangunan. Dalam buku ini, dampak pencemaran udara dibahas dari dua aspek utama: dampak pada kesehatan manusia dan (b) dampak terhadap lingkungan.

1. Dampak terhadap Kesehatan

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pencemaran udara berkaitan dengan berbagai gangguan kondisi kesehatan pada manusia. Besarnya dampak yang ditimbulkan bergantung pada jenis pencemaran, konsentrasi, dan lama paparan (jangka pendek atau jangka panjang) (WHO 2021). Dampak tersebut dapat berupa penurunan fungsi paru-paru, memburuknya penyakit pernapasan dan kardiovaskular, serta meningkatnya penyakit asma (Kelly and Fussell 2015; Kurt et al. 2017).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Misalnya, paparan CO pada konsentrasi tinggi dapat menyebabkan keracunan yang berpotensi berujung pada kematian. Hal ini terjadi karena CO berikatan dengan hemoglobin dalam sel darah merah membentuk karboksihemoglobin (COHb) sehingga mengurangi kemampuan darah mengangkut oksigen ke jaringan tubuh. Kadar COHb yang tinggi di dalam tubuh berpotensi menimbulkan kerusakan jaringan organ tubuh seperti jantung dan paru-paru (WHO 2021). Paparan CO pada konsentrasi tinggi dalam waktu pendek dapat menurunkan kadar oksiden di dalam tubuh. Kondisi ini sangat berbahaya terutama bagi penderita penyakit jantung karena dapat memicu angina, yaitu nyeri dada akibat berkurangnya aliran darah ke otot jantung. Kondisi ini memperburuk risiko komplikasi kardiovaskular dan dapat meningkatkan kemungkinan serangan jantung pada mereka yang rentan (WHO 2016).

Contoh lain ialah paparan NO_2 pada konsentrasi tinggi akan mengakibatkan iritasi paru-paru dan infeksi saluran pernapasan. Di sisi lain, untuk jangka panjang, paparan NO_2 pada konsentrasi tinggi akan meningkatkan kejadian penyakit asma dan berpotensi meningkatkan kerentanan terhadap infeksi saluran pernapasan (WHO 2021). Selain itu, NO_2 merupakan prekursor gas lain seperti O_3 dan berkontribusi terhadap pembentukan PM di atmosfer. Sementara itu, paparan partikulat (PM_{10} dan $PM_{2.5}$) dapat meningkatkan risiko kanker paru-paru dan penyakit kardiovaskular. Selain itu, paparan partikulat juga dapat memperburuk gejala gangguan pernapasan, seperti iritasi saluran napas, batuk, dan sesak napas (Kurt et al., 2017).

2. Dampak terhadap Lingkungan

Salah satu dampak pencemaran udara terhadap lingkungan ialah terbentuknya hujan asam. Hujan asam terjadi melalui reaksi kimia sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2) di atmosfer. Reaksi tersebut menghasilkan asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat

Buku ini tidak diperjualbelikan

(HNO_3). Hujan asam diketahui dapat mengurangi kesuburan tanah karena tanah menjadi lebih asam, dan dapat merusak biota air akibat pengasaman perairan di danau dan di sungai (Prakash et al. 2022). Selain itu, hujan asam juga dapat merusak struktur bangunan melalui proses korosi yang lebih cepat (Sun et al. 2022).

Lebih lanjut, gas NO_2 dengan konsentrasi tinggi diketahui juga dapat menyebabkan terjadinya kerusakan jaringan pada tumbuhan yang dikenal dengan istilah nekrosis. Gas pencemar lainnya yang tidak kalah penting yang dapat memperlambat pertumbuhan tumbuhan ialah O_3. Paparan O_3 dapat mengganggu proses fotosintesis sehingga menghambat pertumbuhan tanaman dan meningkatkan kerentanannya terhadap penyakit (Chuwah et al., 2015).

D. Pemantauan Kualitas Udara

Pemantauan kualitas udara adalah kegiatan pengukuran, pengamatan, dan evaluasi terhadap kondisi kualitas udara berdasarkan parameter pencemar di udara ambien pada lokasi dan waktu tertentu. Pemantauan dapat dilakukan secara kontinu maupun berkala. Berdasarkan bentuk pelaksanaannya, pemantauan dapat menggunakan stasiun tetap, perangkat bergerak, perangkat portabel, atau penginderaan jauh.

Pemilihan metode dan instrumen pemantauan perlu disesuaikan dengan tujuan pemantauan, parameter pencemar yang diukur, karakteristik lokasi, kebutuhan resolusi waktu dan ruang, serta sumber daya yang tersedia. Instrumen yang digunakan dapat berupa instrumen rujukan, instrumen dengan metode setara, maupun sensor berbiaya rendah (*low-cost sensor*/LCS).

Selain kesesuaian metode atau instrumen yang digunakan perlu memperhatikan jaminan mutu (*quality assurance*) dan pengendalian mutu (*quality control*) untuk memastikan keakuratan, keandalan, ketertelusuran, dan konsistensi data yang dihasilkan.

Tujuan utama pemantauan kualitas udara ialah mengevaluasi efektivitas upaya pengendalian pencemaran udara. Evaluasi tersebut

Buku ini tidak diperjualbelikan

dilakukan untuk menilai apakah upaya yang telah dilaksanakan mampu menurunkan konsentrasi pencemar hingga memenuhi baku mutu yang ditetapkan. Tujuan lain pemantauan kualitas udara meliputi hal-hal berikut.

1. Memantau tren kualitas udara secara harian, bulanan, dan tahunan;
2. Mengetahui tingkat pencemaran udara;
3. Menyediakan informasi mengenai tingkat pencemaran udara kepada masyarakat; dan
4. Menyediakan data untuk validasi model serta mendukung penelitian jangka panjang mengenai dampak pencemaran udara terhadap kesehatan.

Berbagai metode telah dikembangkan dan digunakan untuk melakukan pengukuran pencemar udara. Bagian berikut menguraikan tiga pendekatan pemantauan, yaitu metode rujukan, penginderaan jauh, dan sensor berbiaya rendah .

1. Metode Rujukan

Metode rujukan (*reference method*) merupakan metode utama untuk memantau konsentrasi pencemar di udara luar ruangan. Metode ini digunakan secara luas oleh berbagai negara dan organisasi yang bergerak di bidang pemantauan kualitas udara. Dua metode yang diakui sebagai metode rujukan di dalam melakukan pemantauan pencemaran udara, yaitu *Federal Reference Methods* (FRMs) dan Federal Equivalent Methods (FEMs). Kedua metode tersebut dikembangkan dan dievaluasi oleh US Environmental Protection Agency (USEPA) dan diatur secara spesifik di dalam *Title 40 Code of Federal Regulations* (40 CFR) Bagian 50, 53, dan 58.

Menurut panduan USEPA (2011), FRMs merupakan metode rujukan utama untuk pengambilan dan analisis sampel dalam pemantauan kualitas udara. Adapun FEMs merupakan metode alternatif yang telah dievaluasi memiliki kinerja yang setara

Buku ini tidak diperjualbelikan

atau mendekati FRMs. FRMs digunakan sebagai acuan karena menghasilkan data dengan tingkat akurasi dan ketertelusuran yang tinggi sehingga menjadi standar pembanding bagi metode lainnya.

Dalam hal ini, USEPA membagi FEMs ke dalam tiga jenis kelas, yaitu kelas I, II, dan kelas III. Pengklasifikasian tersebut bertujuan untuk menunjukkan tingkat kesetaraan kinerja metode FEMs terhadap metode FRMs, sekaligus menjadi indikator tingkat kesesuaiannya sebagai metode alternatif. Makin tinggi kelas FEMs, makin tinggi pula tingkat kesetaraannya terhadap FRMs. Oleh karena itu, kelas I memiliki tingkat kesetaraan tertinggi, sedangkan kelas III memiliki tingkat kesetaraan terendah, tetapi tetap diakui sebagai metode alternatif. Daftar instrumen yang telah ditetapkan sebagai FRMs dan FEMs dapat dilihat pada dokumen berikut (Gilliam and Hall 2016) .

Walaupun metode ini memiliki tingkat akurasi dan ketertelusuran yang tinggi, tetapi biaya pengadaan yang perlu dikeluarkan oleh pemangku kebijakan cukup besar. Metode rujukan memerlukan pemeliharaan rutin, terutama kalibrasi berkala (Castell et al., 2017; Mead et al., 2013). Pengoperasian dan pemeliharaannya juga memerlukan tenaga yang terampil. Akibatnya, banyak negara berkembang, terutama negara berpenghasilan rendah, mengalami kesulitan menerapkan metode rujukan. Kondisi ini menyulitkan evaluasi efektivitas upaya pengendalian kualitas udara.

2. Pengindraan Jauh

Penginderaan jauh (*remote sensing*) merupakan salah satu metode pemantauan kualitas udara yang dilakukan tanpa kontak langsung dengan objek yang diukur. Metode ini memanfaatkan radiasi elektromagnetik untuk mendeteksi keberadaan dan konsentrasi pencemar di udara. Metode ini memanfaatkan energi cahaya yang dipantulkan atau dipancarkan oleh objek dalam rentang *ultraviolet* (UV) dan inframerah tengah (*mid-infrared* (IR).

Buku ini tidak diperjualbelikan

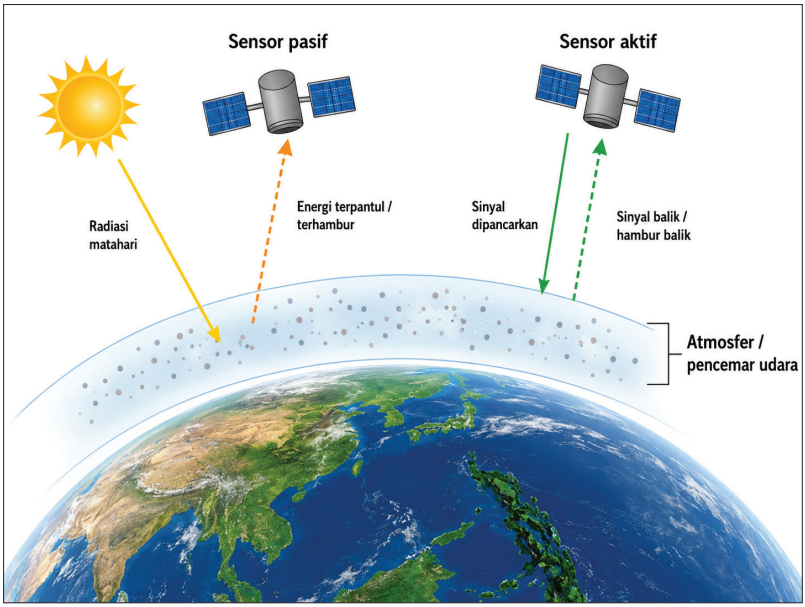
Pengertian objek di sini ialah pencemar yang ada di udara (Simonds et al. 1994). Dalam pengoperasiannya pengindraan jauh diklasifikasikan menjadi dua tipe, yaitu metode pasif dan metode aktif. Perbedaan kedua metode terletak pada sumber radiasi atau cahaya yang digunakan untuk mendeteksi keberadaaan pencemar udara (Wei et al. 2020).

Metode aktif menggunakan sumber radiasi yang dipancarkan ke objek. Radiasi yang dipantulkan atau dihamburkan oleh objek kemudian diterima oleh detektor untuk diukur. Pada metode pasif, energi atau radiasi yang diukur berasal dari sumber yang tidak terkontrol seperti matahari. Gambar 2.3 menjelaskan pengoperasian dari kedua metode tersebut.

Instrumen pengindraan jauh dapat dipasang pada berbagai platform, seperti satelit, pesawat, dan stasiun berbasis darat (*ground-based*). Platform tersebut memungkinkan pemantauan kualitas udara di wilayah yang sulit dijangkau atau terisolasi.

Keuntungan menggunakan metode pengidraan jauh ialah pengukuran pencemaran dapat dilakukan dalam skala global, *real-time*, dan dapat mengukur berbagai jenis pencemar secara bersamaan. Kelemahan metode ini ialah jika menggunakan platfom satelit, data yang dihasilkan bergantung pada lintasan orbit satelit dan data yang dihasilkan bergantung pada kondisi cuaca setempat. Selain itu, biaya pengadaan cukup mahal dan memerlukan tenaga ahli terampil untuk pengoperasian dan analisis data.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber :Kumar et al(2023) .

Gambar 2.3 Ilustrasi Prinsip Kerja Sensor Pasif dan Sensor Aktif pada Pengindraan Jauh Berbasis Satelit

3. *Low Cost Sensor* (LCS)

Sensor berbiaya rendah (*low -cost sensor* (LCS) merupakan hasil perkembangan teknologi di bidang elektronika yang mampu mengukur parameter pencemar udara. Dibandingkan dengan instrumen rujukan, LCS lebih murah, mudah dibawa, dan lebih mudah dioperasikan (WMO 2018). Namun, sensor udara ini bersifat indikatif yang hasil pengukurannya tidak dapat dijadikan dasar penetapan regulasi terkait dengan kualitas udara (Clements et al. 2022). Secara umum, sensor udara terbagi menjadi dua kategori: sensor untuk mengukur konsentrasi gas dan sensor untuk mengukur partikulat (PM).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Umumnya, sensor udara tidak dapat berfungsi sendiri. Sensor harus terintegrasi dengan beberapa perangkat agar membentuk suatu sistem sensor udara. Sistem sensor udara terdiri atas empat komponen, yaitu: (1) elemen sensor untuk mendeteksi pencemar udara; (2) transduser untuk mengubah respons sensor menjadi sinyal listrik; (3) perangkat penyimpanan dan transmisi data; serta (4) sumber daya, seperti baterai atau listrik. Teknologi ini lebih murah, mudah dibawa, dan mudah dioperasikan. Namun, perangkat ini tetap memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Keterbatasan yang dimiliki oleh sensor udara di antaranya ialah dari segi keakuratan, masa pakai, keandalan, dan sensitivitas. Keterbasan tersebut disebabkan oleh beberapa faktor di antaranya ialah elemen sensor yang digunakan, kondisi lingkungan, kualitas komponen yang digunakan dan cara pengoperasian. Tabel 2.1 menjelaskan secara singkat mengenai perbedaan sensor kualitas udara dan metode rujukan. Penjelasan lebih rinci mengenai sensor berbiaya rendah akan dibahas pada Bab 3.

Tabel 2.1 Perbandingan Instrumen Rujukan dan Sensor Biaya Rendah (LCS)

Perbandingan	Instrumen Rujukan	Sensor Berbiaya Rendah
Rentang harga	US $15,000– $50,000	US $100–$2500
Operator Terlatih	Memerlukan operator terlatih	Pelatihan dasar dan panduan penggunaan
Biaya penyelengaraan	Tinggi; memerlukan bangunan, operator, pemeliharaan, dan QA/QC	Lebih rendah; sensor portabel dengan biaya pemeliharaan dan pengelolaan data yang lebih kecil
Penempatan	Lokasi tetap (*fixed location*) misalnya bangunan atau trailer	Fleksibel; dapat dipindahkan dan tidak memerlukan lokasi tetap
Kualitas data	Akurat, konsisten, dan tertelusur	Bervariasi; dipengaruhi kondisi lingkungan dan karakteristik sensor

Buku ini tidak diperjualbelikan

Perbandingan	Instrumen Rujukan	Sensor Berbiaya Rendah
Rentang waktu pengoperasian	≥10 tahun (bergantung pada pemeliharaan)	1–3 tahun; akurasi dapat menurun seiring waktu
Digunakan untuk regulasi pemantauan	Dapat digunakan	Belum dapat digunakan, hanya sebagai pelengkap stasiun pemantauan rujukan

Sumber :Diadaptasi dari The Enhanced Air Sensor Guideboo Clements et al(2022) .

E. Baku Mutu Kualitas Udara

Untuk mengendalikan dan mengurangi pencemaran udara, dibuatlah suatu peraturan yang mengatur batas maksimum konsentrasi pencemar udara. di udara ambien. Ketentuan tersebut disebut *air quality standard* (AQS) atau baku mutu udara. Penentuan baku mutu udara didasarkan pada kajian dampak pencemaran udara terhadap kesehatan manusia. Setiap negara memiliki baku mutu udara masing-masing. Di Indonesia, baku mutu udara ambien diatur dalam PP Nomor 22 Tahun 2021. Menurut PP Nomor 22 Tahun 2021 Pasal 174, baku mutu udara di Indonesia ditetapkan berdasarkan hasil inventaris udara dan aspek kesehatan, sosial, ekonomi, dan lingkungan. Terdapat tujuh parameter yang diatur di dalam PP Nomor 22 Tahun 2021 pada lampiran VII memiliki baku mutu. Tabel 2.2 menjelaskan nilai baku mutu yang dimiliki oleh setiap parameter.

Tabel 2.2 Baku Mutu Udara Di Indonesia Berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VII

NO	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu	Sistem Pengukuran
1	Sulfur Dioksida (SO_2)	1 Jam	150 µg/m^3	aktif kontinu
				aktif manual
		24 Jam	75 µg /m^3	aktif kontinu
		1 Tahun	45 µg /m^3	aktif kontinu

Buku ini tidak diperjualbelikan

NO	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu	Sistem Pengukuran
2	Karbon Monoksida (CO)	1 Jam	1.000 µg /m^3	aktif kontinu
		8 Jam	4.000 µg /m^3	aktif kontinu
3	Nitrogen Dioksida (NO_2)	1 Jam	200 µg /m^3	aktif kontinu
				aktif manual
		24 Jam	65 µg /m^3	aktif kontinu
		1 Tahun	50 µg /m^3	aktif kontinu
4	Oksidan fotokimia (Ox) sebagai Ozon ($O_{3)}$	1 Jam	150 µg /m^3	aktif kontinu
				aktif manual *
		8 Jam	100 µg/m^3	aktif kontinu **
		1 Tahun	35 µg /m^3	aktif kontinu
5	Hidrokarbon Non Metana (NMHC)	3 Jam	160 µg /m^3	aktif kontinu ***
6	Partikulat debu < 100 µm (TSP)	24 Jam	230 µg /m^3	aktif manual
	Partikulat debu < 10 µm (PM_{10})	24 Jam	75 µg /m^3	aktif kontinu
				aktif manual
		1 Tahun	40 µg /m^3	aktif kontinu
	Partikulat debu < 2,5 um (PM2,5)	24 Jam	55 µg /m^3	aktif kontinu
				aktif manual
		1 Tahun	15 µg /m^3	aktif kontinu
7	Timbal (Pb)	24 Jam	2 µg /m^3	aktif manual

Sumber: PP No 22 Tahun 2021

F. Indeks Standar Pencamaran Udara (ISPU)

Hasil pengukuran yang dilakukan oleh perangkat pemantauan kualitas udara kurang informatif karena masih dalam bentuk nilai konsentrasi pencemar. Informasi berupa nilai konsentrasi pencemar umumnya hanya dapat dipahami oleh kalangan yang memiliki

Buku ini tidak diperjualbelikan

pengetahuan di bidang kualitas udara. Oleh karena itu, diperlukan suatu indeks yang mengubah nilai konsentrasi pencemar menjadi informasi mengenai status kualitas udara yang mudah dipahami masyarakat. Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) merupakan sebuah indeks yang digunakan untuk memberikan informasi kepada masyarakat untuk menggambarkan status mutu udara. Makin tinggi nilai ISPU, makin buruk kualitas udara dan semakin besar potensi dampaknya terhadap kesehatan.

Penyusunan nilai ISPU didasarkan pada efek pencemaran udara terhadap kesehatan manusia. Nilai ISPU dapat digunakan sebagai sistem peringatan dini (*early warning system*) bagi masyarakat terhadap status mutu kualitas udara. Tujuan utama penyusunan ISPU adalah menyeragamkan informasi mengenai status mutu udara ambien pada wilayah dan waktu tertentu. Informasi tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan bagi pengambil kebijakan dalam upaya pengendalian pencemaran udara.

Perhitungan ISPU dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melalui Peraturan Menteri (Permen) Lingkungan Hidup dan Kehutanan (LHK) nomor 14 tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara yang merupakan pengganti dari Keputusan Menteri (Kepmen) Lingkungan Hidup No. 45 Tahun 1997 tentang Perhitungan dan Pelaporan serta Informasi Indeks Standar Pencemar Udara. Di dalam peraturan pengganti ini, terdapat dua tambahan parameter pencemaran, yaitu HC dan $PM_{2.5}$, dari lima parameter sebelumnya, yaitu PM_{10}, NO_2, SO_2, CO, dan O_3.

Permen LHK Nomor 14 Tahun 2020 juga mengatur informasi yang harus disampaikan dalam pelaporan ISPU. Informasi tersebut meliputi:

- waktu dan periode pelaporan,
- wilayah atau lokasi pemantauan,
- nilai ISPU untuk setiap parameter yang diukur,
- nilai ISPU maksimum,
- parameter pencemar dominan,

Buku ini tidak diperjualbelikan

- kategori ISPU,
- penjelasan kategori, serta
- rentang nilai ISPU.

Contohnya, hasil perhitungan ISPU parameter $PM_{2.5}$ disampaikan kepada publik tiap jam selama 24 jam. Untuk parameter $PM_{2.5}$, nilai ISPU disampaikan kepada publik setiap jam selama 24 jam. Sementara itu, untuk parameter PM_{10}, NO_2, SO_2, CO, O_3, dan HC, nilai ISPU disampaikan sedikitnya dua kali sehari, yaitu pada pukul 09.00 dan 15.00.. Tabel 2.3 memperlihatkan konversi nilai konsentrasi mejadi nilai ISPU.

Tabel 2.3 Konversi Konsentrasi Pencemar menjadi Nilai ISPU

ISPU	PM_{10} (24 jam) (µg /m³)	$PM_{2,5}$ (24 jam) (µg /m³)	SO_2 (24 jam) (µg /m³)	CO (24 jam) (µg /m³)	O_3 (24 jam) (µg /m³)	NO_2 (24 jam) (µg /m³)	Hidro-karbon (HC) (24 jam) (µg / m³)
0-50	50	15.5	52	4000	120	80	45
51-100	150	55.4	180	8000	235	200	100
101-200	350	150.4	400	15000	400	1130	215
201-300	420	250.4	800	30000	800	2260	432
>300	500	500	1200	45000	1000	3000	648

Sumber :Permen LHK No 14 Tahun2020

Berikut ini tata cara penghitungan konversi nilai konsentrasi ke dalam nilai ISPU berdasarkan Permen LHK No 14 Tahun 2020

$$I = \frac{I_a - I_b}{x_a - x_b}(x_x - x_b) + 1_b$$

Keterangan :

I = ISPU terhitung

Ia = ISPU batas atas

Ib = ISPU batas bawah

Buku ini tidak diperjualbelikan

χ_a = Konsentrasi ambien batas atas (µg/m3)

χ_b = Konsentrasi ambien batas bawah (µg/m3)

χ_x = Konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran (µg/m3)

Berdasarkan Permen LHK No. 14 Tahun 2020, hasil perhitungan ISPU diklasifikasikan menjadi 5 kategori seperti yang diperlihatkan di dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Kategori Rentang ISPU

KATEGORI	RENTANG	Status Warna	PENJELASAN
Baik	1 - 50	Hijau	Tingkat kualitas udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan, tumbuhan
Sedang	51 - 100	Biru	Tingkat kualitas udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan. .
Tidak sehat	101 - 200	Kuning	Tingkat kualitas udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan. .
Sangat tidak sehat	201 - 300	Merah	Tingkat kualitas udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar.
Berbahaya	≥ 301	Hitam	Tingkat kualitas udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat.

Sumber: Permen LHK No 14 Tahun 2020

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB III

Teknologi Low-Cost Sensors (LCS)

Sensor berbiaya rendah (*low-cost sensors*/LCS) berperan penting dalam mendukung pemantauan kualitas udara yang lebih luas, fleksibel, dan terjangkau. Teknologi ini menjadi salah satu solusi untuk mengatasi keterbatasan pemantauan konvensional, terutama dalam konteks wilayah dengan sumber daya terbatas.

Bab ini membahas secara sistematis berbagai jenis LCS, baik untuk mengukur gas maupun partikulat. Selain itu, dibahas pula karakteristik sensor serta faktor-faktor yang memengaruhi kinerjanya, termasuk gangguan internal dan eksternal. Pemahaman terhadap materi tersebut menjadi dasar dalam memilih, mengevaluasi, dan menerapkan LCS pada sistem pemantauan kualitas udara.

A. Latar Belakang Perkembangan Teknologi LCS

Kemajuan teknologi Micro-Electromechanical Systems (MEMS) telah mendorong perubahan paradigma dalam pemantauan kualitas udara. Teknologi ini memungkinkan pembuatan perangkat elektronik yang berukuran kecil dan ringkas. Perkembangan ini juga mendorong penggunaan sensor berbiaya rendah (low-cost sensors, LCS), yang memungkinkan banyak komunitas lokal untuk terlibat langsung dalam pemantauan kualitas udara. Sebelumnya, kegiatan

Buku ini tidak diperjualbelikan

ini hampir sepenuhnya menjadi tanggung jawab lembaga pemerintah (Snyder et al. 2013).

LCS memiliki keunggulan dari sisi biaya dan kemudahan pemeliharaan dibandingkan dengan metode pemantauan konvensional (Clements et al. 2022). LCS juga dapat digunakan untuk membangun jaringan pemantauan yang lebih luas melalui penempatan sensor di berbagai lokasi sebagai pelengkap Stasiun Pemantauan Kualitas Udara (SPKU). Agar dapat beroperasi secara optimal di luar ruangan, LCS harus diintegrasikan dengan komponen lain, seperti catu daya, unit pemrosesan, penyimpanan dan transmisi data, serta pelindung terhadap cuaca ekstrem. Selain aspek teknis, operasionalisasi sistem LCS juga membutuhkan pertimbangan sumber daya seperti konektivitas internet, server data, tenaga survei lokasi, serta anggaran untuk pemeliharaan dan kalibrasi. Dengan demikian, walaupun LCS menjanjikan solusi yang terjangkau dan fleksibel, penggunaannya tetap memerlukan perencanaan, pengelolaan, dan pemeliharaan yang baik.

Terlebih lagi, kualitas data yang dihasilkan oleh LCS dipengaruhi oleh berbagai keterbatasan, seperti sensitivitas terhadap lingkungan dan faktor gangguan lainnya (WMO 2018). Bagian berikut membahas jenis-jenis sensor LCS dan faktor-faktor yang memengaruhi kinerjanya. Pembahasan ini menjadi dasar dalam merancang sistem LCS yang andal dan sesuai dengan kebutuhan.

B. Jenis-Jenis LCS

Berdasarkan jenis pencemar yang diukur, LCS dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu LCS untuk gas dan LCS untuk partikulat. LCS untuk gas digunakan untuk mengukur konsentrasi gas pencemar, seperti CO, NO_2, O_3, SO_2, dan VOC. Sementara itu, LCS untuk partikulat digunakan untuk mengukur konsentrasi massa partikel di udara, seperti $PM_{2,5}$ dan PM_{10}. Bagian ini menjelaskan karakteristik setiap jenis LCS.

Buku ini tidak diperjualbelikan

1. LCS-Gas Sensor

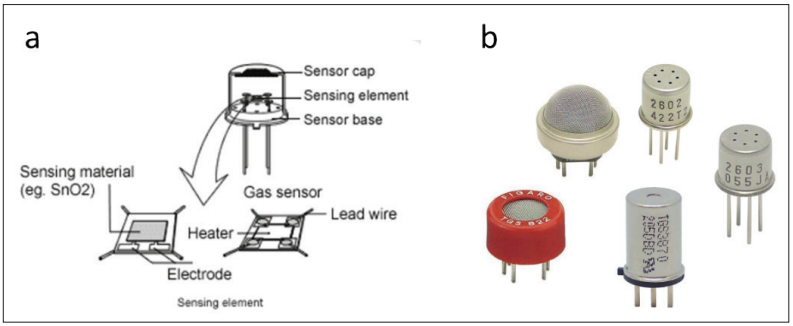
LCS untuk gas digunakan untuk mengukur konsentrasi gas pencemar di udara ambien. Sensor ini bekerja menggunakan elemen sensor yang bereaksi terhadap gas tertentu dan menghasilkan sinyal listrik berupa arus atau tegangan. Saat ini, teknologi LCS untuk gas yang paling banyak digunakan ialah *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) dan *Electrochemical* (EC) (Kumar et al. 2015; Mead et al. 2013; Rai et al. 2017). Selain itu, terdapat teknologi lain yang digunakan untuk aplikasi tertentu, yaitu *Non-Dispersive Infrared* (NDIR) dan Photo-Ionization Detector (PID).

a. Metal Oxide Sensor (MOS)

LCS tipe MOS menggunakan elemen sensor berbahan oksida logam (*metal oxide*) yang bersifat resistif. Resistansi atau konduktivitas elemen tersebut berubah ketika terpapar gas pencemar yang diukur. Pada suhu operasi tertentu, oksigen teradsorpsi di permukaan oksida logam dan memengaruhi jumlah elektron bebas sehingga resistansi sensor berubah (Dey 2018). Perubahan resistansi atau konduktivitas pada permukaan sensor bervariasi bergantung pada jumlah konsentrasi pencemaran yang ada (Isaac et al. 2022).

Perubahan ini dapat dipantau dengan menggunakan rangkaian eksternal (rangkaian penguat sinyal). Tipe LCS MOS selain sering digunakan untuk mengukur parameter pencemaran terkait dengan pencemaran udara, MOS juga sering digunakan untuk mengukur gas yang terkait dengan Gas Rumah Kaca (GRK) dan VOC (van den Bossche et al. 2017; Piedrahita et al. 2014). Gambar 3.1 memperlihatkan struktur dari MOS sensor.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: Kim et al. (2006)

Gambar 3.1 Struktur LCS Tipe MOS (a) dan Contoh LCS MOS Komersial yang Dipabrikasi Oleh Figaro (b)

Berikut kelebihan dan kekurangan LCS tipe MOS sensor

Kelebihan:

1) Memiliki ukuran yang kecil dan dapat diintegrasikan dengan teknologi IoT.
2) Memiliki harga sensor sekitar $10.
3) Memiliki sensitivitas yang cukup baik dari mg/m^3 ke µg/m^3, atau dari ppm hingga ke ppb.
4) Dapat bekerja pada suhu yang lebih tinggi dan memiliki periode pemakaian yang lebih panjang jika dibandingkan dengan tipe sensor berbasis EC.

Kekurangan:

1) Memerlukan pemanasan awal (*pre-heating*) pada permukaan elemen sensor yang menyebabkan konsumsi daya cukup tinggi.
2) Sensitif terhadap perubahan kelembapan lingkungan.
3) Mengalami sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) terhadap gas pencemar lain sehingga dapat menurunkan akurasi pengukuran.

Buku ini tidak diperjualbelikan

4) Kemungkinan penyimpangan sensitivitas permukaan oksida logam dari waktu ke waktu sehingga membutuhkan kalibrasi yang lebih sering.
5) Memiliki waktu respons yang relatif lambat (sekitar 5–50 menit) dan respons yang bersifat nonlinier.

b. Electrochemical (EC) Sensor

LCS tipe EC umumnya bekerja berdasarkan prinsip amperometrik (*amperometric*). Pada prinsip ini, gas pencemar berdifusi ke dalam sensor dan bereaksi dengan elektroda yang dilapisi elektrolit. Reaksi redoks tersebut menghasilkan arus listrik yang besarnya sebanding dengan konsentrasi gas pencemar (Mead et al. 2013; Popoola et al. 2018; Popoola et al. 2016). Umumnya, parameter pencemaran yang diukur oleh EC sensor ialah O_3, NO, NO_2, CO, dan SO_2.

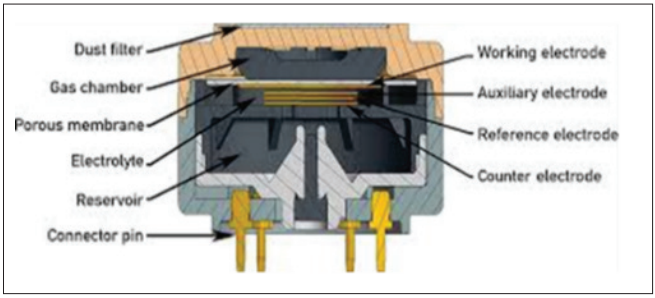
Sensor ini biasanya terdiri atas tiga elektroda yang didefinisikan dengan istilah *Working Electrode (WE)*, *Counter Electrode (CE),* dan *Reference Electrode (RE)* (Baron et al. 2017). WE merupakan tempat berlangsungnya reaksi redoks gas pencemar yang diukur. Elektroda ini biasanya dilapisi katalis tertentu untuk mengoptimalkan reaksi tersebut (Mead et al. 2013). Berbeda dengan elektrode lainya, WE dirancang untuk bersentuhan langsung dengan gas pencemar yang berdifusi ke dalam sensor.

CE merupakan elektroda yang berfungsi menyeimbangkan reaksi oksidasi atau reduksi yang terjadi di WE. Dalam kondisi ideal, potensial CE sama dengan potensial WE ketika sensor terpapar udara bersih (*zero air*). Jenis elektrode ketiga yang ada di sensor EC, yaitu RE berfungsi menjaga potensial pada WE tetap stabil. Dengan demikian, sensor dapat mempertahankan sensitivitas dan linearitas pengukuran serta meminimalkan gangguan akibat gas pencemar lain.

Selain ketiga elektroda tersebut, beberapa sensor EC juga dilengkapi dengan *auxiliary electrode*. Elektroda ini memiliki material yang sama dengan WE, tetapi tidak terpapar langsung oleh

Buku ini tidak diperjualbelikan

gas pencemar. Fungsinya ialah mengompensasi perubahan respons sensor akibat variasi suhu lingkungan. Gambar 3.2 mengilustrasikan struktur dari EC sensor.



Sumber: Baron et al. (2017)

Gambar 3.2 Struktur LCS EC Empat Elektrode

Berikut kelebihan dan kekurangan dari tipe EC sensor.

Kelebihan:

1) Lebih tahan terhadap pengaruh kelembapan dibandingkan dengan sensor MOS.
2) Memiliki sensitivitas yang baik dari mg/m^3 ke $\mu g/m^3$ atau dari ppm ke ppb.
3) Waktu respons terhadap konsentrasi gas yang cukup cepat, antara 30 dan 200 detik.
4) Tidak terlalu terpengaruh dengan nilai kelembapan yang tinggi jika dibandingkan dengan tipe MOS sensor.
5) Ringkas, portabel, dan dapat diintegrasikan dengan IoT.
6) Biaya terjangkau 50–150 USD

Kekurangan:

1) Sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan dan sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) dengan gas lain.

Buku ini tidak diperjualbelikan

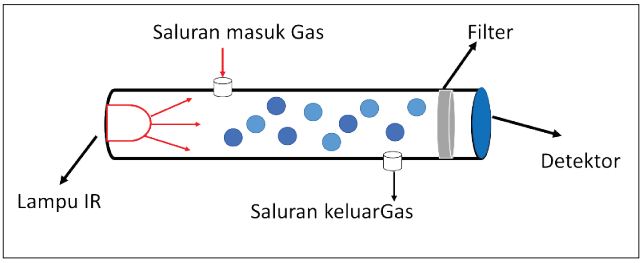
2) Umur pengoperasian lebih pendek jika dibandingkan dengan tipe LCS MOS akibat dari penurunan kinerja elektrolit dari waktu ke waktu.

c. Non-Dispersive Infrared (NDIR)

NDIR merupakan tipe LCS untuk mengukur gas yang bekerja berdasarkan Hukum Beer–Lambert. Teknologi ini memanfaatkan kemampuan molekul gas menyerap radiasi inframerah pada wilayah *mid-infrared* (Jia et al. 2019). Menurut hasil studi, diketahui bahwa molekul gas yang memiliki kemampuan kuat untuk menyerap radiasi inframerah pada panjang gelombang tertentu (wilayah *mid-infrared*) adalah gas CO_2. Oleh karena itu, teknologi NDIR umumnya digunakan untuk mengukur parameter GRK, khususnya CO_2.

Umumnya, NDIR terdiri atas empat komponen penting, yaitu sumber cahaya inframerah (*IR source*), tabung sampel (*chamber*), detektor IR, dan filter optik seperti yang digambarkan pada Gambar 3.3. Secara umum, NDIR bekerja dengan menembakkan cahaya IR (dengan gelombang sekitar 4,26 μm) ke arah filter optik dan detektor IR (Dinh et al. 2016). Ketika sampel udara masuk ke dalam *chamber* pengukuran, lampu inframerah (IR) memancarkan cahaya ke dalam *chamber*. Sebagian cahaya tersebut diserap oleh molekul gas, sedangkan sisanya diteruskan melalui filter optik menuju detektor IR. Berdasarkan Hukum Beer–Lambert *(Beer–Lambert law),* perbedaan antara jumlah cahaya IR yang dipancarkan dengan jumlah cahaya IR yang diterima dapat diukur dan dihitung. Hasil perbedaannya ialah terkait atau berbanding lurus dengan intensitas cahaya yang diterima.di dalam sampel udara.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 3.3 Struktur LCS NDIR

Berikut kelebihan dan kekurangan dari LCS NDIR.

Kelebihan:

1) Memiliki bentuk dan ukuran yang lebih ringkas serta konsumsi daya yang lebih rendah.
2) Lebih tahan dengan perubahan kondisi lingkungan dibandingkan dengan tipe LCS gas sensor lainnya seperti MOS dan EC.
3) Bekerja pada suhu yang lebih rendah sehingga tidak perlu *pre-heating*.

Kekurangan:

1) Biaya yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tipe LCS gas sensor lainnya seperti MOS dan EC.
2) Keakuratan pengukuran terpengaruh oleh kehadiran uap air pada sampel udara.
3) Batasan deteksi yang perlu ditingkatkan kembali. Saat ini sensitivitas dari teknologi NDIR hanya sebatas pada unit ppm dan vol %.

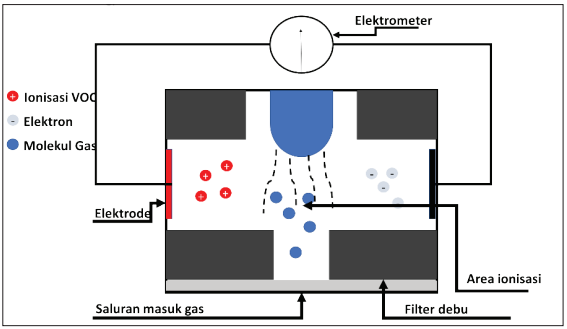
d. Photo-ionization detectors (PID)

PID merupakan tipe LCS yang digunakan untuk mengukur konsentrasi VOC. Sensor ini dilengkapi dengan lampu ultraviolet (UV) yang memancarkan foton berenergi tinggi untuk mengionisasi

Buku ini tidak diperjualbelikan

molekul gas. Penggunaan sumber UV pada pengoperasian PID menyebabkan molekul gas mengalami ionisasi. Energi foton yang digunakan di dalam PID biasanya sekitar 10 eV. Akibatnya, hanya gas yang memiliki energi ionisasi yang rendah, misalnya uap organik, yang dapat diionisasi oleh lampu PID.

Hasil dari proses ionisasi ialah arus listrik yang sebanding dengan jumlah ion yang dihasilkan. Makin banyak ion yang terbentuk, makin besar arus listrik yang dihasilkan sensor. Arus listrik tersebut kemudian dikonversi menjadi nilai konsentrasi gas. VOC terdiri atas berbagai senyawa organik yang mudah menguap. Setiap senyawa memiliki respons yang berbeda terhadap lampu UV. Oleh karena itu, produsen sensor biasanya menyediakan faktor koreksi (*correction factor*) dalam *datasheet* untuk memperkirakan konsentrasi setiap senyawa VOC. Gambar 3.4 memperlihatkan struktur LCS PID.



Sumber: Bílek et al. (2022)

Gambar 3.4 Struktur LCS PID

Berikut kelebihan dan kekurangan dari tipe LCS PID:

Kelebihan:

1) Keperluan daya yang rendah.
2) Sensitivitas yang cukup tinggi dan waktu respons yang lebih singkat kurang dari 90 s.

Buku ini tidak diperjualbelikan

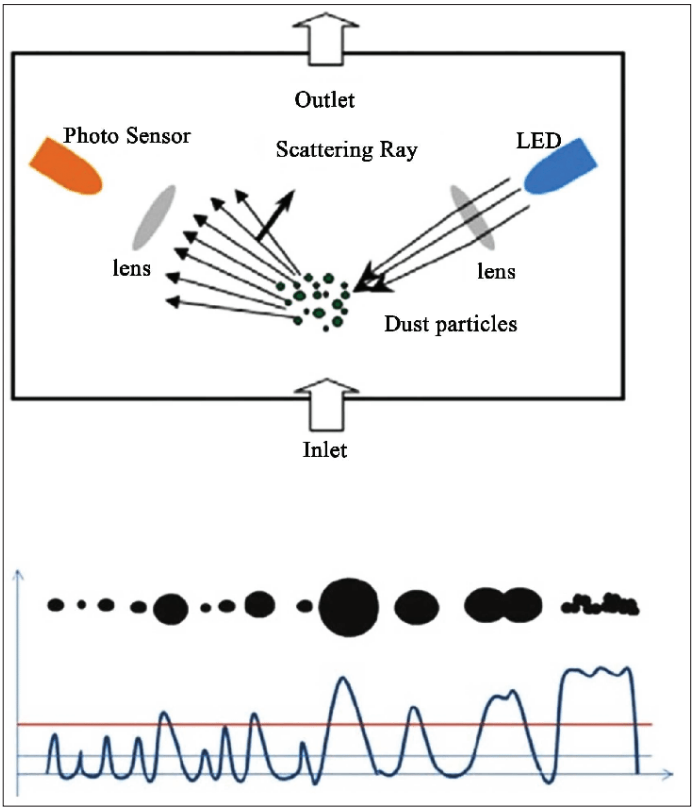
Kekurangan:

1) Biaya yang cukup mahal jika dibandingkan dengan LCS gas sensor lainya
2) Efisiensi ionisasi berbeda untuk setiap senyawa VOC. Oleh karena itu, pengukuran total VOC bersifat indikatif dan tidak selalu mewakili konsentrasi kuantitatif masing-masing senyawa penyusunnya.

2. LCS - Particulate Matter (PM)

LCS-PM umumnya menggunakan prinsip hamburan cahaya (*light scattering*) atau metode optik (Liang 2021a; Liang 2021b). Teknologi ini memanfatkan hamburan cahaya untuk menentukan konsentrasi partikel di udara. Secara prinsip, sebuah LCS-PM hanya memerlukan tiga komponen utama, yaitu sumber cahaya (*Infrared Emitting Diode* – IRED), penerima (*phototransistor*), dan *focusing lenses* (Wang 2015). Sampel udara yang masuk ke dalam sebuah ruangan atau *chamber* pengukuran dilewatkan melalui seberkas cahaya laser yang menyebabkan terjadinya hamburan cahaya. Hamburan cahaya ini yang kemudian diukur oleh penerima detektor fotometer sebagai jumlah dan massa partikel. Gambar 3.5 menjelaskan secara singkat mengenai prinsip kerja dari LCS-PM berbasis optik.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: Nguyen (2021)

Gambar 3.5 Prinsip Kerja LCS-PM Berbasis Optik

Dua metode umum yang diimplementasikan oleh sensor LCS – PM komersial yaitu *Nephelometers* dan *Optical Particle Counters* (OPC) (Antonio 2018; Giordano 2021; Hagan and Kroll 2020; Wang 2015). Pada prinsipnya, teknologi nephelometer mengukur intensitas hamburan cahaya yang dihasilkan oleh seluruh partikel di dalam ruang pengukuran. Teknologi ini tidak membedakan ukuran seetiap partikel secara individu. Oleh karena itu, karakteristik pengukuran didasarkan pada akumulasi partikel secara keseluruhan. Intensitas cahaya yang dihamburkan oleh partikel dikumpulkan dari berbagai

Buku ini tidak diperjualbelikan

sudut (idealnya 0°–180°). Nilai tersebut kemudian dikorelasikan dengan konsentrasi massa partikel yang diukur menggunakan instrumen rujukan (Giordano 2021; Wang 2015). Kinerja sensor berbasis *nephelometer* dipengaruhi oleh geometri ruang pengukuran. Oleh karena itu, sensor dengan prinsip kerja yang sama belum tentu menghasilkan kinerja yang sama (Teri et al. 2021).

Berbeda dengan *nephelometer*, teknologi OPC memiliki biaya yang lebih tinggi. Hal ini karena OPC mengukur hamburan cahaya dari setiap partikel yang masuk ke dalam *chamber* secara individual melalui berkas cahaya (Giordano 2021; Hagan and Kroll 2020). Pengukuran ini digunakan untuk menentukan ukuran partikel dan konsentrasi jumlah partikel. Di dalam metode ini, intensitas cahaya yang dihamburkan oleh masing-masing partikel diukur yang kemudian diklasifikasikan ke dalam salah satu bin (Alfano 2020). Bin (kelas ukuran partikel) di dalam konteks ini merupakan istilah di dalam mendistribusikan ukuran aerosol berdasarkan lebar dan satuan diameter partikel yang telah ditetapkan (Hagan and Kroll 2020; Li 2020). Umumnya, sebagian besar LCS-PM komersial memiliki jumlah bin antara 2-30 (Li 2020). Setiap bin dipisahkan dengan sebuah batas berdasarkan ukuran diameter. Total klasifikasi bin kemudian disajikan dalam bentuk histogram yang selanjutnya dikonversi menjadi sebuah konsentrasi massa partikel (*particle mass concentration*) (Alfano 2020; Hagan and Kroll 2020; Li 2020). Tabel 3.1 memperlihatkan karakteristik LCS-PM komersial yang umum digunakan untuk mengukur konsentrasi PM.

Tabel 3.1 Daftar Beberapa Sensor LCS-PM yang Umun Digunakan dan yang Tersedia Secara Komersial

Manufaktur	Tipe OPS	Model	Rentang Particle (μm)	Jumlah bin	Harga (USD)
Plantower	Nephelometer	PMS5003	0.3 -10.0	6	~40
Sharp	Nephelometer (photometric)	GP2Y1010AUOF		1	~20
Shinyei	Nephelometer	PPD42NS	~1	1	~20

Buku ini tidak diperjualbelikan

Manufaktur	Tipe OPS	Model	Rentang Particle (µm)	Jumlah bin	Harga (USD)
Samyoung	Nephelometer	DSM501A	~1	1	~20
Nova	Nephelometer	SDS011	0.3	2	~20
Met One	Nephelometer	NPM2	0.5-10.00	Tidak disebutkan	~2000
Sensirion	OPC	SPS30	0.3-10.0	5	~50
Alphasense	OPC	OPC-N2	0.38-17.5	16	350
Alphasense	OPC	OPC-N3	0.35-40.0	24	550
Honeywell	OPC	HPMA115C0	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	~100
Daylos	OPC	DC1700	>0.5 & >2.5	2	450

Berikut penjelasan umum mengenai kelebihan dan kekurangan dari LCS-PM yang dirangkum dari berbagai sumber.

Kelebihan:

a. Biaya lebih murah dan portabel.
b. Mudah dioperasikan dan dapat dintegrasikan dengan sistem IoT
c. Memiliki kemampuan untuk mengukur beberapa bagian dari PM. Karena sebagian besar LCS-PM dapat mengklasifikasikan beberapa diameter partikel ke dalam sebuah bin sehingga dapat mengukur $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, $PM_{4.0}$ dan PM_{10}
d. Memiliki respon yang cepat dan memiliki sensitivitas yang baik

Kekurangan:

a. Konversi jumlah partikel ke dalam konsentrasi PM berdasarkan model teoretis (Mi-Teori). Pengklasifikasian diameter partikel ke dalam sebuah bin berdasarkan asusmsi kalibrasi.
b. Kinerja dari LCS-PM bergantung pada geometris ruang pengukuran dan sudut deteksi hamburan (sudut hamburan yang sempuran 0 hingga 180^0)
c. Terpengaruh pada faktor kelembapan dan temperatur ambien. Ketika kelembapan relatif meningkat, partikel menyerap air.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Akibatnya, ukuran, massa, bentuk, indeks bias, dan kerapatan partikel berubah.

C. Karakteristik LCS

Berdasarkan uraian sebelumnya, setiap jenis LCS memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing. Oleh karena itu, pemilihan sensor perlu mempertimbangkan beberapa karakteristik, seperti waktu respons (*response time*), batas deteksi (*limit of detection*/LOD), *repeatability*, *reproducibility*, *cross-sensitivity*, serta pengaruh suhu dan kelembapan terhadap kinerja sensor. Tabel 3.2 merangkum karakteristik-karakteristik tersebut..

Tabel 3.2 Jenis-Jenis Karakteristik dari LCS yang Perlu Dipertimbangkan

Karak-teristik	Definisi	Metode
Sensitivitas	Sensitivitas merupakan kemampuan sensor menghasilkan perubahan keluaran akibat perubahan masukan. Sensor dengan karakteristik linear memiliki sensitivitas yang konstan sepanjang rentang pengukurannya. Keluaran sensor dapat berupa arus atau tegangan, sedangkan masukannya berupa konsentrasi pencemar.	Sensitivitas dapat dihitung dengan formula berikut : $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ di mana y adalah output dan x adalah input.
Rentang	Rentang merupakan kemampuan sensor mengukur konsentrasi pencemar dalam batas nilai minimum hingga maksimum yang telah ditentukan. Pengukuran di luar rentang kerja sensor dapat menghasilkan keluaran yang tidak akurat atau tidak valid.	Rentang pengukuran dapat dilihat di dalam *datasheet* sensor yang disediakan oleh manufaktur.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Karak-teristik	Definisi	Metode
Akurasi	Akurasi merujuk kepada seberapa besar hasil pengukuran sensor mendekati nilai konsentrasi yang dihasilkan oleh instrumen pembanding. Dalam hal ini instrumen pembanding adalah instrumen rujukan.	Akurasi dapat dihitung menggunakan formula korelasi koefisien.
Reproduc-ibility	Reproducibility merupakan indikator yang menggambarkan konsistensi keluaran dari sensor untuk input yang sama di dalam kondisi pengukuran yang berbeda.	Beberapa refensi menunjukkan coefficient of variation (CV) dapat digunakan untuk menghitung Reproducibility. $CV = \frac{\sigma}{\mu}$ di mana σ adalah Standard Deviation dan μ adalah rata-rata dari pembacaan sensor
Response time (t_{90})	*Response time* merujuk kepada waktu yang diperlukan sensor untuk mencapai 90% dari nilai akhir setelah terjadi perubahan konsentrasi. Setiap sensor memiliki tingkatan respons yang berbeda-beda, ada yang memiliki kemampuan cepat dan lambat di dalam merespons perubahan konsentrasi pencemaran.	t_{90} dihitung dari titik point 0% hingga bacaan sensor mencapai 90% *dari target poin*t yang diinginkan.
Selektivitas	Selektivitas merupakan kemampuan sensor mendeteksi parameter pencemar tertentu tanpa dipengaruhi oleh keberadaan pencemar lain. Contohnya, sensor gas OX tidak hanya sensitif terhadap parameter O_3 melainkan juga sensitive terhadap parameter NO_2 sehingga di dalam hasil pengukuran terdapat konsenstrasi NO_2. Dalam hal ini sensor OX mengalami *cross-sensitivity* terhadap NO_2.	Sensitivitas silang dapat dihitung dengan memaparkan sensor ke pencemaran lain

Buku ini tidak diperjualbelikan

Karak-teristik	Definisi	Metode
LOD	LOD merujuk kepada nilai konsentrasi terendah yang dapat dideteksi oleh sensor.	LOD dapat dihitung dengan ditentukan sebagai tiga kali simpangan baku keluaran sensor ketika sensor terpapar udara bersih (*zero air*).

D. Gangguan Pada LCS

Pertimbangan utama dalam menggunakan jaringan LCS sebagai sistem pemantauan kualitas udara adalah memastikan bahwa setiap sensor telah dikalibrasi dengan baik dan memiliki karakteristik kinerja yang jelas sehingga mampu mendeteksi polutan secara lebih akurat. Sensor LCS bekerja dengan mendeteksi perubahan fenomena fisik yang kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik berupa tegangan atau arus. Pabrikan kemudian memetakan sinyal tersebut menjadi nilai konsentrasi pencemar dan mencantumkan hubungan tersebut dalam lembar data (*datasheet*) sensor. Umumnya, hasil pemetaan tersebut dikenal dengan istilah data mentah (*raw data*).

Hasil studi menunjukkan bahwa data mentah memiliki keterbatasan dalam hal akurasi dan presisi. Kinerja sensor dapat menurun akibat perubahan kondisi lingkungan dan meteorologi, seperti suhu dan kelembapan, paparan polutan lain (cross-sensitivity), nonlinieritas, bias, offset, pergeseran sinyal (*signal drift*), serta penuaan sensor (WMO 2021). Untuk mengatasi gangguan ini, evaluasi dan kalibrasi sensor menjadi langkah penting dalam memastikan kinerja LCS yang optimal. Berdasarkan Maag et al. (2018), sumber gangguan pada LCS dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu gangguan internal dan gangguan eksternal. Berikut penjelasan singkat mengenai kedua gangguan tersebut.

Buku ini tidak diperjualbelikan

1. Gangguan Internal

Gangguan internal merupakan gangguan yang berasal dari dalam sistem LCS dan umumnya berkaitan dengan karakteristik atau prinsip kerja sensor. Maag et al. (2018) mengelompokkan gangguan internal menjadi empat jenis, yaitu *dynamic boundaries*, *systematic error*, *non-linear response*, dan *signal drift*. Berikut penjelasan dari masing-masing ganguan internal yang dialami oleh LCS

Dynamic Boundaries didefinisikan sebagai batas konsentrasi pencemar yang dapat dideteksi oleh sensor. Ganguan ini berkaitan dengan batas deteksi (*limit of detection* atau LOD) sensor. Pada beberapa LCS, nilai LOD relatif tinggi sehingga sensor kurang mampu mendeteksi konsentrasi pencemar yang rendah secara akurat.Terkadang hasil pengukuran konsentrasi pencemaran yang berlevel rendah tidak sesuai dengan kondisi yang sebenarnya di lapangan. Sebagai contoh, sensor LCS untuk SO_2 memiliki LOD lebih dari 5 ppb. Sementara itu, konsentrasi SO_2 di daerah yang jauh dari sumber emisi sering berada di bawah 10 ppb. Kondisi ini menyebabkan hasil pengukuran LCS cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan instrumen rujukan sehingga penggunaannya menjadi kurang efektif (Hagan et al. 2018).

Systematic Error adalah kesalahan yang sering dijumpai pada LCS yang menyebabkan nilai konsentrasi yang terukur bisa berada di bawah atau di atas nilai konsentrasi sebenarnya (Alhasa et al. 2018). Perbedaan ini umumnya disebabkan oleh parameter kalibrasi yang kurang tepat, bukan oleh karakteristik intrinsik sensor. Fenomena ini umum terjadi ketika menggunakan parameter kalibrasi yang disediakan oleh manufaktur.

Non-Linear Response (Tanggapan tidak linier) adalah ganguan yang disebabkan oleh karakteristik sensor atau teknik yang digunakan pada LCS, sehingga terjadi hubungan non-linear antara hasil pengukuran sensor dengan konsentrasi sebenarnya. (jika dibandingkan dengan instrumen rujukan *(reference-grade*

Buku ini tidak diperjualbelikan

instrument)). Faktor lingkungan juga dapat memicu respons nonlinier, terutama pada sensor PM dan MOS.

Signal Drift (Penyimpangan Sinyal) adalah ganguan yang terjadi akibat efek penuaan atau kontaminasi pada elemen sensor yang menyebabkan LCS tidak dapat mempertahankan kestabilan pengukuran dalam jangka waktu yang lama. Penyimpangan sinyal berlangsung secara bertahap dan akhirnya membatasi umur pakai LCS.

2. Gangguan Eksternal

Gangguan eksternal terjadi akibat faktor di luar sensor, seperti perubahan kondisi lingkungan dan keterbatasan selektivitas sensor terhadap gas target akibat sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) dengan gas lain. Gangguan eksternal dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu pengaruh lingkungan (*environmental effects*) dan selektivitas rendah (*low selectivity*). Berikut penjelasan dari kedua gangguan eksternal.

Pengaruh lingkungan merupakan salah satu tantangan utama yang dihadapi oleh semua jenis LCS. Perubahan suhu dan kelembapan berpengaruh signifikan terhadap respons sensor LCS. Beberapa kajian menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan di udara secara tidak langsung menggangu sensitivitas dari beberapa tipe LCS seperti PM, MOS, dan EC (Karagulian et al. 2019; Rai et al., 2017). Selain itu, perubahan lingkungan juga dapat memengaruhi respons linear sensor, khususnya ketika sensor terpapar dengan perubahan suhu maupun kelembapan yang tinggi (Karagulian et al., 2019). Akibatnya, kinerja LCS yang digunakan di lapangan sering kali kurang optimal dibandingkan dengan kinerjanya pada kondisi yang terkontrol, seperti di laboratorium atau di dalam ruangan.

Sementara itu, *low selectivity* merupakan keterbatasan yang dimiliki oleh LCS di dalam membedakan gas target yang akan diukur Pada prinsipnya, elemen sensor tidak hanya sensitif terhadap gas target, tetapi juga terhadap gas lain di sekitarnya. Fenomena ini dikenal sebagai sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) (Bochenkov and

Buku ini tidak diperjualbelikan

Sergeev, 2010; Castell et al. 2017; Wang et al., 2010). Permasalahan sensitivitas silang menjadi tantangan mendasar yang dihadapi oleh LCS, terutama di lingkungan luar ruangan yang memiliki komposisi udara lebih kompleks dan beragam. Tabel 3.3 menjelaskan secara singkat beberapa jenis LCS yang mengalami sensitivitas silang.

Tabel 3.3 Ringkasan Sensitivitas Silang pada Beberapa Sensor Gas LCS

Tipe Sensor	Parameter Pencemar	LCS yang Biasa Digunakan	Sensitivitas Silang
Metal Oxide Sensor (MOS)	CO	TGS203, TGS2442, MQ–7, MiC-5521S, MiCS-4514,	CH_4, Alcohol, NH3, Etanol
	O_3	MICS-2610, SM500, SM50, MICS-261, MiCS OZ-47 FIS SP-61	CO_2[a], NO[a], NH_3[a], CO[b], NO_2[b]
	NO_2	MiCS-2710, MiCS-4514, GSNT11, MiCS-2714	SO_2
	SO_2	MQ-136, MQ-6	H_2S
	CO_2		
Electrochemical Sensor (EC)	CO	CO-B4, CO-AF, MF-200	H_2, NO_2[c]
	O_3	O_3-B4. O_3_3E1F, OX-B421, OX-A431, OX-B431	NO_2
	NO_2	NO_2-B4, NO_2-A1, NO_2 ANA, NO_2_3E50	O_3[d], NO
	SO_2	SO_2-AF, SO_2-B4	NO
	NO	NO-A1, NO-B4, NO_3E100	CO, SO_2

Keterangan:

a. Berdasarkan telaah berbagai studi oleh (Rai et al. 2017), MOS sensor untuk O_3 mengalami sensitivitas silang rendah dengan CO_2, NO, dan NH_3

b. Berdasarkan telaah berbagai studi oleh (Rai et al. 2017,) MOS sensor untuk O_3 mengalami sensitivitas silang tinggi dengan CO dan NO_2.

c. Menurut Castell et al. (2017), sensor CO tidak mengalami sensitivitas silang terhadap gas NO_2. Namun, Pang et al. (2018) melaporkan bahwa sensor tersebut memiliki sensitivitas

Buku ini tidak diperjualbelikan

silang yang rendah terhadap NO_2. Saat ini sensor NO_2-B4 telah dilengkapi dengan membran filter MnO_2/PTFE untuk menghilangkan sensitivitas silang terhadap O_3 (Wei et al., 2018).

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB IV
Evaluasi Kinerja LCS

Sensor berbiaya rendah (*low-cost sensors* atau LCS) telah membuka peluang baru dalam pemantauan kualitas udara yang lebih inklusif dan terjangkau. Namun, sebelum digunakan dalam sistem pemantauan, karakteristik kinerjanya perlu dievaluasi pada berbagai kondisi. Evaluasi ini bertujuan menilai akurasi, presisi, stabilitas, serta karakteristik lain yang memengaruhi kualitas data yang dihasilkan sensor.

Bab ini membahas berbagai pendekatan evaluasi kinerja LCS, mulai dari pengujian di laboratorium hingga kolokasi (*co-location*) dengan instrumen rujukan di lapangan. Selain itu, bab ini menguraikan parameter dan metrik evaluasi yang digunakan untuk menilai kualitas kinerja sensor. Pemahaman terhadap proses evaluasi tersebut diharapkan membantu pengguna dan pengambil kebijakan memilih serta menerapkan LCS secara tepat dalam sistem pemantauan kualitas udara.

A. Metode Evaluasi

Evaluasi kinerja LCS bertujuan memastikan bahwa sensor mampu menghasilkan data yang akurat, presisi, dan konsisten sebelum digunakan dalam pemantauan kualitas udara. Berbagai lembaga internasional telah mengembangkan protokol evaluasi sebagai acuan

Buku ini tidak diperjualbelikan

untuk menilai kinerja tersebut. Meskipun hingga saat ini belum ada protokol yang disepakati secara global untuk semua jenis LCS, sejumlah protokol telah banyak digunakan dalam penelitian dan implementasi di lapangan.

Berikut ini beberapa protokol yang telah di kembangkan oleh lembaga riset internasional.

1. *Sensor field testing protocol* yang dikeluarkan oleh *South Coast Air Quality Management District* (Polidori et al., 2017).
2. CEN/TC 264 – *Air Quality WG 42 – Performance evaluation of air quality sensor system - Part 1: Gaseous pollutants in ambient air and Part 2: Performance evaluation of sensors for the determination of concentrations of particulate matter (PM_{10}; $PM_{2.5}$) in ambient air.*
3. WI 00264179ASTM *Work Item Number WK64899 Standard Test Method for the Performance Evaluation of Ambient Air Quality Sensors and other Sensor-based Instruments.*
4. *Performance Parameters and Test Protocols for Fine Particulate Matter Air Sensors* yang dipublikasikan oleh USEPA (Duvall et al. 2021a) .
5. *Performance Parameters and Test Protocols for Ozone Air Sensors* yang dipublikasi oleh USEPA (Duvall, Clements, Hagler, Kamal, Kilaru, et al., 2021).

Berdasarkan berbagai protokol dan referensi tersebut, metode evaluasi LCS dapat dikelompokkan menjadi dua pendekatan, yaitu (1) evaluasi berbasis laboratorium dan (2) kolokasi (*co-location*) dengan instrumen rujukan di lokasi pemantauan.

1. Evaluasi Laboratorium

Secara prinsip, evaluasi laboratorium dilakukan dengan menempatkan LCS di dalam ruang uji tertutup (*chamber*) atau *manifold* khusus untuk sensor EC. Seluruh kondisi lingkungan di dalam sistem tersebut diatur agar tetap terkontrol. Pendekatan ini

Buku ini tidak diperjualbelikan

memungkinkan evaluasi pengaruh suhu dan kelembapan serta pengukuran parameter kinerja sensor, seperti waktu respons (*response time*), LOD, selektivitas, dan sensitivitas. Bagian berikut menguraikan tahapan evaluasi laboratorium untuk sensor PM dan sensor gas berdasarkan berbagai protokol dan hasil penelitian.

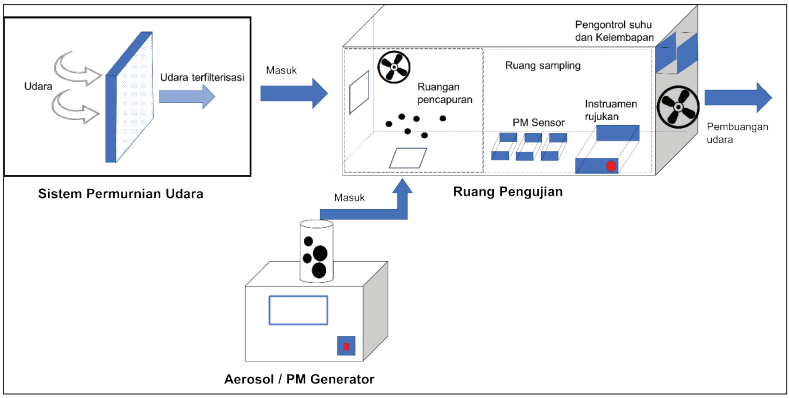
a. Evaluasi LCS-PM

Evaluasi LCS-PM di laboratorium memerlukan sejumlah prosedur agar hasil pengujian merepresentasikan kinerja sensor secara akurat dan andal. Prosedur tersebut mencakup konfigurasi ruang uji, penempatan sensor, penyiapan dan pemeriksaan instrumen, serta dokumentasi parameter pengujian. Selain itu, pengujian perlu mempertimbangkan pengaruh suhu, kelembapan, variasi konsentrasi partikel, dan kestabilan sinyal jangka panjang melalui pengujian *drift*. Tahapan evaluasi tersebut diuraikan pada bagian berikut, mulai dari persiapan hingga interpretasi hasil..

1) Sistem Pengujian LCS-PM

Evaluasi laboratorium terhadap LCS-PM bertujuan mengetahui karakteristik setiap sensor yang akan digunakan. Meskipun menggunakan teknologi yang sama, setiap sensor dapat memiliki karakteristik yang berbeda bergantung pada produsennya. Oleh karena itu, setiap sensor perlu dievaluasi sebelum digunakan. Gambar 4.1 memperlihatkan perangkat utama yang diperlukan untuk proses evaluasi LCS-PM. Secara umum, sistem pengujian terdiri atas tiga komponen utama, yaitu: (1) ruang uji (*test chamber*) yang terisolasi dari lingkungan luar dan dilengkapi dengan instrumen rujukan PM serta pengendali suhu dan kelembapan; (2) sistem pemurnian udara (*purified air system*) untuk menyuplai udara bersih ke dalam *chamber*; dan (3) pembangkit partikel (*PM generator*) untuk menghasilkan variasi konsentrasi partikel di dalam ruang uji.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 4.1 Skema Sistem Pengujian Laboratorium LCS-PM

2) Persiapan dan Pengaturan Laboratorium

Pada evaluasi laboratorium, disarankan menggunakan *chamber* berukuran cukup besar agar dapat menampung tiga sensor atau lebih secara simultan. *Chamber* tersebut dapat berbentuk kotak atau silinder, dan terbuat dari bahan yang tahan lama, seperti kaca, akrilik, atau *stainless steel* (Alfano 2020; Papapostolou et al. 2017). Selain itu, penting agar *chamber* dilengkapi dengan pengendali suhu dan kelembapan untuk mensimulasikan kondisi lingkungan ambien. Pengendalian tersebut memungkinkan evaluasi pengaruh suhu dan kelembapan terhadap kualitas sinyal yang dihasilkan sensor.

Sebagai langkah lanjutan dalam persiapan evaluasi kinerja di ruang uji, penting untuk memastikan bahwa semua peralatan berfungsi dengan baik dan sesuai standar. Pertama, pastikan instrumen rujukan telah dikalibrasi dengan memeriksa tanggal kalibrasi terakhir serta mencatat setiap pembaruan yang dilakukan. Apabila pengguna belum memahami prosedur tersebut, rujuklah manual yang disediakan produsen atau hubungi pihak manufaktur. Selain itu, lakukan pengujian dan pemeliharaan terhadap instrumen rujukan sebelum digunakan dalam evaluasi untuk menjamin akurasi hasil. Apabila menggunakan lebih dari satu sensor LCS-PM, pastikan seluruh sensor memiliki model dan versi *firmware* yang sama.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Hindari pembaruan *firmware* atau perubahan parameter kalibrasi sebelum evaluasi dimulai agar hasil pengukuran tetap konsisten. Dalam evaluasi laboratorium, data pembanding harus berasal dari instrumen rujukan yang digunakan pada sistem pengujian yang sama, bukan dari stasiun kolokasi atau lokasi pengukuran lain.

3) Dokumentasi dan Pelaksanan Evaluasi

Selama evaluasi, semua informasi penting mengenai peralatan dan pengaturan pengujian harus didokumentasikan. Informasi tersebut meliputi parameter yang diukur beserta satuannya, interval pengukuran, metode penyimpanan data, metode koreksi yang digunakan, serta perangkat lunak atau skrip untuk analisis dan koreksi data. Lokasi evaluasi serta format pelaporan juga perlu dicatat secara rinci. Sebelum pengujian dimulai, instrumen yang memerlukan waktu stabilisasi harus dioperasikan terlebih dahulu hingga mencapai kondisi kerja yang stabil sesuai petunjuk produsen. Sumber aerosol yang digunakan selama evaluasi juga perlu didokumentasikan, termasuk distribusi ukuran partikelnya. Hal ini bertujuan untuk memastikan kesesuaian dan konsistensi hasil. Penerapan prosedur tersebut membantu memastikan evaluasi dilakukan secara sistematis dan menghasilkan data yang andal.

4) Pengujian Faktor Lingkungan dan Stabilitas Sensor

Evaluasi performa sensor LCS-PM tidak hanya bergantung pada akurasi pengukuran dalam kondisi ideal, tetapi juga pada ketahanannya terhadap variasi lingkungan dan perubahan konsentrasi partikulat di udara. Oleh karena itu, pengujian lebih lanjut dilakukan untuk memahami bagaimana suhu, kelembapan, serta konsentrasi partikulat mempengaruhi sinyal yang dihasilkan sensor.

Sensor LCS-PM sangat dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan lingkungan. Untuk itu, dilakukan pengujian secara terpisah terhadap dua variabel ini dalam rentang nilai yang mencerminkan kondisi operasional nyata. Pada pengujian suhu, perubahan suhu dilakukan secara bertahap dengan menjaga kelembapan tetap konstan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Sebaliknya, pada pengujian kelembapan, suhu dipertahankan tetap konstan selama pengujian. Protokol yang diterbitkan oleh lembaga seperti USEPA (Duvall et al. 2021a) dapat digunakan sebagai acuan dalam menyusun skenario pengujian. Tujuan dari pengujian ini ialah untuk memastikan bahwa sensor tetap memberikan kinerja yang konsisten di tengah fluktuasi iklim mikro yang terjadi di lingkungan ambien

Selain pengujian faktor lingkungan, penting juga untuk menguji rentang konsentrasi, termasuk akurasi pada konsentrasi tinggi, komposisi aerosol, distribusi ukuran aerosol, dan *drift signal* dari waktu ke waktu. Meskipun belum ada protokol baku untuk evaluasi *drift signal* pada LCS PM, dokumen USEPA memberikan beberapa tahap yang dapat diikuti. Setelah sensor digunakan selama periode tertentu sesuai protokol, sensor diuji kembali. Pada hari pertama, lakukan evaluasi kinerja dengan memaparkan sensor pada konsentrasi PM rendah hingga sedang dalam kondisi suhu dan kelembapan konstan di laboratorium. Setelah periode tersebut, sensor kembali diuji dalam kondisi laboratorium untuk mengukur sejauh mana terjadi pergeseran sinyal (Duvall et al. 2021a). Pengujian pada konsentrasi PM tinggi sebaiknya menggunakan kisaran konsentrasi yang merepresentasikan data historis lokasi pemantauan.

Berbagai jenis aerosol telah digunakan sebagai sumber partikulat dalam pengujian laboratorium, antara lain *potassium chloride* yang dinebulisasi, debu, *sodium chloride* yang diatomisasi, sukrosa, larutan amonium nitrat, polistirena, asap dupa, dan asap pembakaran biomassa (Austin 2015; Duvall et al. 2021a; Hapidin 2020; Li 2020; Papapostolou et al. 2017; Sayahi 2019a; Wang 2015). Namun, perlu diperhatikan agar sumber aerosol dapat mewakili perubahan parameter yang diuji. Sebaliknya, hindari penggunaan *polystyrene latex sphere* karena material ini kurang responsif terhadap perubahan kelembapan sehingga tidak merepresentasikan sifat higroskopis partikel atmosfer.

Durasi pengumpulan data selama evaluasi laboratorium idealnya mencapai minimal tiga jam atau setara dengan dua puluh

Buku ini tidak diperjualbelikan

siklus pengukuran dalam kondisi stabil antara sensor dan instrumen rujukan (Zimmerman 2022). Resolusi waktu pengukuran pada LCS-PM dan instrumen rujukan harus diselaraskan. Jika terdapat perbedaan resolusi data antara keduanya, misalnya 1 menit pada LCS PM dan 1 jam pada instrumen rujukan, maka data LCS PM perlu di-rata-ratakan terlebih dahulu. Apabila ditemukan bias atau kesalahan pengukuran, lakukan validasi dan verifikasi data sebelum menerapkan koreksi yang diperlukan.

b. Evaluasi LCS-Gas

Sensor gas berbiaya rendah (*low-cost sensors gas* atau LCS-gas) memerlukan evaluasi yang sistematis untuk mengidentifikasi karakteristik spesifik dan kinerjanya dalam mendeteksi polutan udara. Evaluasi meliputi pengujian sensitivitas terhadap gas target, linearitas respons, dan batas deteksi setiap sensor. Evaluasi diperlukan karena variabilitas antarunit sensor masih relatif tinggi, meskipun berasal dari jenis dan teknologi yang sama. Tahapan evaluasi tersebut diuraikan pada bagian berikut.

1) Sistem Pengujian LCS-Gas

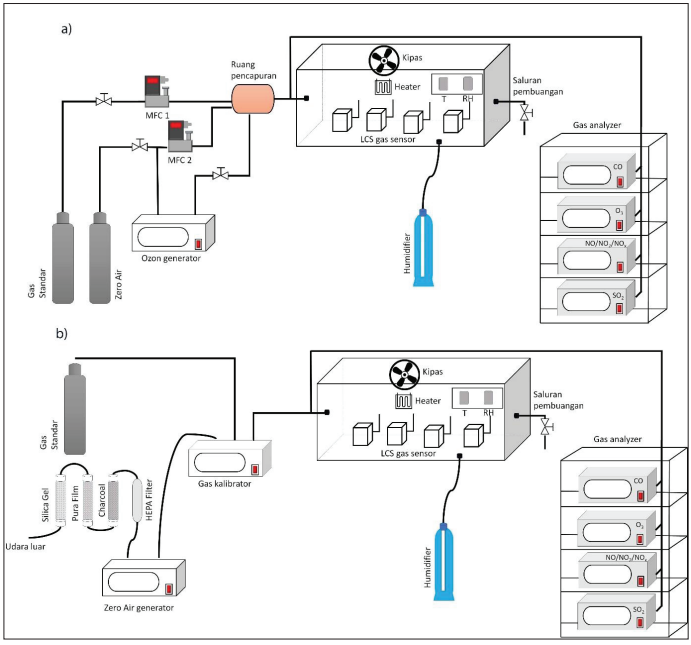
Gambar 4.2 menunjukkan skema umum serta perangkat yang digunakan dalam pengujian LCS-gas. Sistem pengujian terdiri atas ruang uji tertutup (*test chamber*) atau *manifold* yang terisolasi dari lingkungan luar. Sistem ini juga dilengkapi dengan pengendali suhu dan kelembapan untuk menjaga kondisi pengujian tetap stabil dan *reproducible* (dapat menghasilkan hasil yang konsisten ketika pengujian diulang dengan prosedur yang sama).

Sistem pengujian juga dilengkapi dengan *zero air generator* (alat pembangkit udara bebas pencemar) atau tabung *zero air* (udara bebas pencemar) sebagai sumber udara bersih untuk pengujian. Udara tersebut digunakan sebagai kondisi awal pengujian sekaligus sebagai media pengencer untuk menghasilkan variasi konsentrasi gas uji. Gas standar yang mengandung gas pencemar pada konsentrasi tertentu digunakan sebagai sumber gas target selama evaluasi.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Gas calibrator (alat untuk menghasilkan konsentrasi gas uji tertentu melalui pengenceran gas standar) digunakan untuk mengencerkan gas standar berkonsentrasi tinggi sehingga diperoleh konsentrasi uji yang diinginkan. Pada pengujian ozon, gas target dihasilkan menggunakan generator ozon (*ozone generator*). Apabila sistem tidak dilengkapi dengan *gas calibrator*, pengenceran gas masih dapat dilakukan menggunakan *mass flow controller* (MFC), yaitu alat yang mengatur laju aliran massa gas secara presisi.

Untuk keperluan validasi dan evaluasi kinerja sensor, gas analyzer dengan akurasi tinggi turut disertakan dalam sistem pengujian. Instrumen ini berfungsi sebagai instrumen rujukan (*reference instrument*) untuk membandingkan hasil pengukuran LCS-gas.



ket.:)a (Sistem pengujian menggunakan MFC dan *ozone generator*.

)b (Sistem pengujian menggunakan *gas calibrator* dan *zero air generator*.

Gambar 4.2 Skema Sistem Pengujian Laboratorium LCS Gas

Buku ini tidak diperjualbelikan

2) Konfigurasi dan Persiapan Evaluasi

Sebelum pengujian dilakukan, semua instrumen yang digunakan harus melalui proses verifikasi dan kalibrasi sesuai dengan standar yang berlaku. Kalibrasi instrumen rujukan dapat mengacu pada manual pabrikan atau dilakukan melalui konsultasi dengan pihak manufaktur apabila pengguna belum memiliki kompetensi untuk melaksanakannya secara mandiri.

LCS-gas yang diuji sebaiknya berasal dari model dan versi *firmware* (perangkat lunak tertanam) yang sama agar variasi kinerja akibat perbedaan *firmware* dapat diminimalkan. Selain itu, pembaruan *firmware* maupun perubahan parameter kalibrasi tidak dianjurkan untuk dilakukan sebelum maupun selama periode pengujian, karena dapat memengaruhi konsistensi dan keterbandingan hasil pengukuran.

Data pembanding harus berasal dari instrumen rujukan yang digunakan pada sistem pengujian laboratorium, bukan dari stasiun kolokasi atau sumber data eksternal lainnya. Selanjutnya, semua informasi terkait parameter pengukuran, interval waktu pencatatan, metode penyimpanan data, pendekatan koreksi yang digunakan, serta lokasi evaluasi dan format pelaporan hasil harus didokumentasikan secara rinci dan sistematis.

Aspek lain yang perlu diperhatikan ialah waktu pemanasan (*warm-up time*) yang dibutuhkan oleh beberapa jenis sensor untuk mencapai kondisi pengukuran yang stabil. Oleh karena itu, sebelum pengambilan data dimulai, sensor harus diberikan jeda waktu pemanasan yang memadai sesuai dengan spesifikasi yang tercantum dalam lembar data (*datasheet*) yang disediakan oleh produsen.

Dalam pelaksanaan pengujian, diperlukan dua jenis gas, yaitu gas standar dan *zero air*. *Zero air* dapat diperoleh dari udara ambien yang dimurnikan menggunakan *zero air generator* atau dari tabung gas berisi *zero air*. Sementara itu, penggunaan gas standar harus dilakukan pada konsentrasi yang sesuai dengan rentang kerja sensor dan umumnya memerlukan proses pengenceran terlebih dahulu.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Hal ini bertujuan untuk mencegah kerusakan atau penurunan kinerja sensor akibat paparan gas berkonsentrasi tinggi.

Proses pengenceran gas standar dilakukan dengan mengatur laju aliran gas menggunakan MFC atau perangkat *gas calibrator*, yang dikombinasikan dengan aliran *zero air* sehingga konsentrasi gas uji yang dihasilkan sesuai dengan nilai yang diinginkan.

3) Evaluasi Karakteristik Kinerja Sensor

Evaluasi kinerja LCS-gas dilakukan menggunakan beberapa parameter utama, yaitu linieritas respons, waktu respons, batas deteksi minimum (*limit of detection*, LOD), sensitivitas silang, serta pengaruh suhu dan kelembapan. Kriteria tersebut meliputi uji linieritas respons, waktu respons, batas deteksi minimum (*limit of detection* atau LOD), sensitivitas silang, serta pengaruh suhu dan kelembapan. Parameter tersebut memberikan gambaran mengenai karakteristik dan keandalan kinerja sensor pada berbagai kondisi pengujian.

Pengujian linieritas respon bertujuan untuk menilai akurasi sensor dalam merespons perubahan konsentrasi gas secara linier. Pengujian dilakukan pada kondisi peningkatan konsentrasi dari rendah ke tinggi maupun penurunan konsentrasi dari tinggi ke rendah. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan konsistensi respons sensor terhadap variasi konsentrasi gas dalam kondisi lingkungan yang terkendali. Hasil uji linieritas umumnya disajikan dalam bentuk kurva respon sensor terhadap konsentrasi gas, yang selanjutnya dianalisis untuk mengidentifikasi adanya penyimpangan dari hasil kalibrasi awal. Apabila ditemukan perbedaan yang signifikan, parameter kalibrasi dapat diperbarui untuk meningkatkan akurasi pengukuran sensor.

Selanjutnya, pengujian waktu respons dilakukan untuk menentukan kecepatan sensor dalam mendeteksi perubahan konsentrasi gas. Pengujian ini meliputi *lag time*, *rise time* (t_{90}), dan *fall time*. *Lag time* menggambarkan interval waktu yang dibutuhkan sensor untuk mulai merespons perubahan konsentrasi gas dari

Buku ini tidak diperjualbelikan

kondisi awal, misalnya dari *zero air*, hingga mencapai sekitar 80% dari konsentrasi gas target. *Rise time*, yang sering dinyatakan sebagai t_{90}, menunjukkan waktu yang diperlukan sensor untuk mencapai 90–95% dari konsentrasi gas yang diinginkan. Sebaliknya, *fall time* mengukur waktu yang dibutuhkan sensor untuk merespons penurunan konsentrasi gas, yaitu dari sekitar 95% menuju konsentrasi yang mendekati nol atau tingkat konsentrasi rendah lainnya. Parameter ini membantu menentukan kesesuaian sensor untuk berbagai aplikasi pemantauan kualitas udara (Clements et al. 2022).

Pengujian karakteristik lainnya ialah penentuan batas deteksi minimum (LOD) dilakukan dengan memaparkan sensor terhadap *zero air* sebanyak tiga kali berturut-turut. Nilai simpangan baku kemudian dikalikan dengan suatu konstanta, yang umumnya bernilai tiga, untuk memperoleh nilai LOD (Spinelle et al. 2014b).

4) Pengujian Faktor Lingkungan

Pengujian pengaruh suhu dan kelembapan merupakan tahap penting untuk menilai sejauh mana kedua faktor tersebut memengaruhi akurasi pengukuran sensor. Beberapa produsen LCS, seperti Alphasense, telah menyediakan dokumen panduan (*application note*) yang memuat persamaan kompensasi pengaruh suhu terhadap sinyal sensor. Persamaan kompensasi tersebut umumnya dikembangkan berdasarkan kondisi pengujian dan kalibrasi yang digunakan oleh produsen. Oleh karena itu, persamaan tersebut perlu divalidasi kembali sebelum diterapkan pada kondisi lingkungan yang berbeda.

Dalam pelaksanaan pengujian ini, penentuan rentang suhu dan kelembapan merupakan langkah awal yang penting. Hingga saat ini, belum terdapat protokol baku yang secara spesifik mengatur rentang pengujian suhu dan kelembapan untuk LCS. Oleh sebab itu, kondisi pengujian sebaiknya dirancang agar merepresentasikan lingkungan operasional sensor, khususnya untuk aplikasi pemantauan udara luar ruangan. Selama pengujian berlangsung, konsentrasi gas target harus dijaga tetap konstan guna memastikan bahwa perubahan

Buku ini tidak diperjualbelikan

respons sensor semata-mata disebabkan oleh variasi suhu atau kelembapan. Pada pengujian pengaruh suhu, kelembapan di dalam ruang uji harus dikendalikan agar tetap stabil. Sebaliknya, pada pengujian pengaruh kelembapan, suhu harus dijaga konstan untuk meminimalkan pengaruh parameter lingkungan lain terhadap hasil evaluasi kinerja sensor.

Selain pengujian pengaruh kondisi lingkungan, uji sensitivitas silang (*cross-sensitivity test*) dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh gas pencemar non-target terhadap respon sensor. Pengaruh gas non-target ini dapat meningkatkan maupun menurunkan respon sensor, bergantung pada karakteristik sensor dan jenis gas yang diuji. Prosedur pengujian sensitivitas silang diawali dengan identifikasi gas-gas pencemar non-target yang berpotensi memengaruhi respon sensor, di mana informasi terkait umumnya tersedia dalam lembar data (*datasheet*) yang disediakan oleh produsen.

Dalam pengujian ini, sensor pertama-tama dipaparkan dengan *zero air* sebagai kondisi dasar, kemudian dilanjutkan dengan paparan gas non-target pada konsentrasi tertentu. Selama proses pengujian, suhu dan kelembapan di dalam ruang uji dijaga tetap stabil untuk memastikan bahwa perubahan respon sensor hanya disebabkan oleh keberadaan gas non-target. Respon sensor kemudian dianalisis untuk menentukan tingkat sensitivitas silang. Nilai sensitivitas silang yang rendah menunjukkan bahwa gas non-target hanya memberikan pengaruh kecil terhadap hasil pengukuran sehingga sensor tetap mampu mengukur gas target secara akurat.

5) Pengujian Stabilitas Sinyal

Sebagaimana pada LCS-PM, LCS-gas juga perlu dievaluasi terhadap kemungkinan terjadinya pergeseran sinyal (*signal drift*). Prosedur evaluasi yang diterbitkan USEPA dapat dijadikan acuan, di mana sensor diuji dalam kondisi laboratorium terlebih dahulu, kemudian dioperasikan di udara luar selama 60 hari (Duvall et al. 2016). Selanjutnya, sensor diuji kembali di laboratorium menggunakan

Buku ini tidak diperjualbelikan

prosedur yang sama untuk mengidentifikasi adanya pergeseran sinyal selama penggunaan jangka panjang.

Selama evaluasi, pengumpulan data sebaiknya dilakukan pada kondisi tunak dengan durasi minimal tiga jam atau sedikitnya 20 siklus pengukuran, sesuai rekomendasi protokol yang digunakan. Misalnya, jika sensor menghasilkan data per menit sementara instrumen rujukan per jam, data sensor perlu dirata-ratakan untuk memastikan kesesuaian.

2. Kolokasi

Kolokasi (*co-location*) merupakan metode evaluasi kinerja LCS di lapangan dengan menempatkan sensor berdekatan dengan instrumen rujukan. Dalam metode ini, sensor ditempatkan di luar ruangan sehingga terpapar langsung pada udara ambien dan kondisi cuaca yang dinamis. Kolokasi diperlukan karena pengujian laboratorium tidak selalu mampu menggambarkan seluruh sumber penyimpangan atau bias yang dapat muncul pada kondisi lapangan (Castell et al. 2017; Maag et al. 2018; Mead et al. 2013). Prinsip kolokasi ialah menempatkan LCS berdekatan dengan instrumen rujukan yang telah terstandarisasi, seperti Federal Reference Method (FRM) dan Federal Equivalent Method (FEM), sehingga kinerja sensor dapat dibandingkan secara langsung terhadap hasil pengukuran yang telah divalidasi secara ilmiah.

a. Durasi dan Pendekatan Kolokasi

Berdasarkan rekomendasi USEPA dan berbagai kajian, durasi minimum kolokasi adalah 30 hari (Duvall et al. 2021a; Zimmerman 2022). Namun, untuk lebih mewakili kondisi ekstrem yang mungkin ditemui selama periode *kolokasi, European Commission Joint Research Centre* (EC-JRC) merekomendasikan minimal tiga bulan untuk melakukan proses evaluasi di lapangan (Spinelle et al. 2014a).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Dalam pelaksanan kolokasi, dua pendekatan yang disarankan. Pertama, LCS ditempatkan berdampingan dengan instrumen rujukan di stasiun pemantauan kualitas udara (SPKU) yang dikelola oleh instansi berwenang, seperti Kementerian Lingkungan Hidup (KLH), Dinas Lingkungan Hidup (DLH), atau lembaga penelitian dan institusi akademik yang memiliki instrumen terstandarisasi (Rogulski 2020; Spinelle et al. 2015a; Spinelle et al. 2014a). Pendekatan kedua menempatkan LCS pada kendaraan pemantauan yang dilengkapi dengan instrumen rujukan setara SPKU. Sensor dipasang di bagian atap kendaraan, berdekatan dengan saluran masuk udara (Borrego et al. 2018; Borrego et al. 2016).

Keberhasilan evaluasi kolokasi juga ditentukan oleh pemilihan lokasi dan pengaturan teknis pengujian. Lokasi-lokasi seperti kawasan perkotaan, pedesaan, perumahan, industri, dan latar belakang *(background)* memiliki karakteristik iklim, cuaca, serta sumber pencemaran yang unik sehingga memengaruhi hasil pengukuran. Idealnya, evaluasi mencakup representasi dari berbagai jenis lokasi tersebut. Selain itu, instrumen rujukan yang digunakan di stasiun pemantauan kualitas udara (SPKU) atau kendaraan pemantauan harus terkalibrasi dengan baik, dengan riwayat kalibrasi dan pemeliharaan yang terdokumentasi. SPKU yang dipilih harus memenuhi persyaratan penempatan probe sesuai SNI 19-7119.6:2005. Apabila kolokasi tidak dilakukan di SPKU, penempatan instrumen rujukan harus mengikuti persyaratan pengambilan sampel yang tercantum dalam standar tersebut.

b. Prosedur Penempatan dan Pengolahan Data Kolokasi

Prosedur kolokasi meliputi dua tahapan utama, yaitu penempatan sensor di lokasi pengujian dan pengolahan data hasil pengukuran. Kedua tahapan tersebut harus dilakukan secara tepat untuk memastikan hasil evaluasi yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

1) Penempatan Sensor

Agar hasil pengukuran LCS dan instrumen rujukan dapat dibandingkan secara valid, keduanya harus ditempatkan sedekat mungkin sehingga terpapar pada kondisi lingkungan yang sama. Saluran masuk udara (*air inlet*) kedua instrumen sebaiknya berada pada ketinggian yang setara, idealnya di atap stasiun pemantauan kualitas udara (SPKU), dengan jarak sekitar 1–4 meter (Antonio 2018; Mijling et al. 2018; Narayana et al. 2022; Popoola et al. 2016). Contoh tata letak penempatan ditunjukkan pada Gambar 3.8.

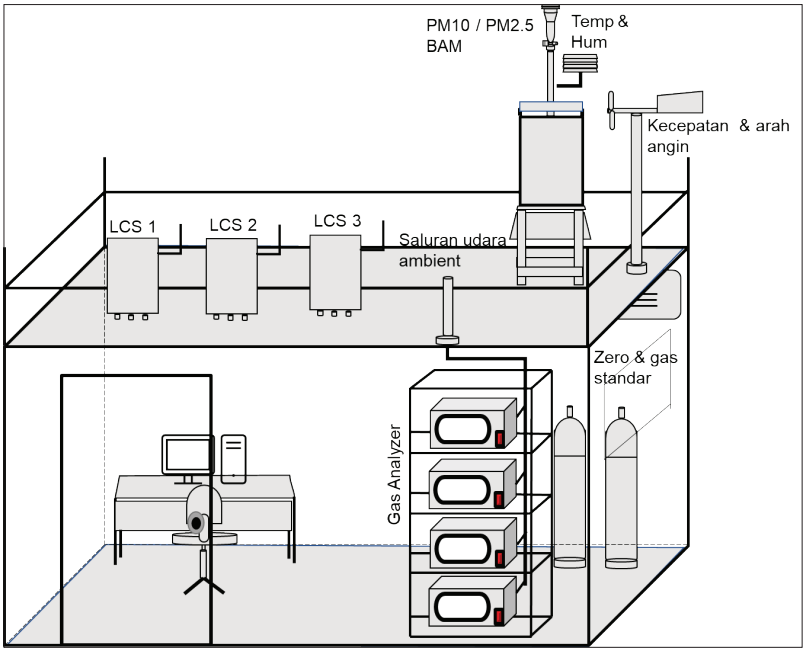
Apabila beberapa LCS dipasang secara bersamaan, jarak antarsensor sebaiknya sekitar satu meter untuk mengurangi kemungkinan interferensi. Pada kolokasi menggunakan kendaraan pemantauan, LCS dipasang di atap kendaraan sedekat mungkin dengan saluran masuk udara instrumen rujukan agar kedua instrumen menerima sampel udara yang serupa (Borrego et al. 2018; Borrego et al. 2016).

2) Pengolahan Data Kolokasi

Setelah proses kolokasi selesai, tahap berikutnya adalah pengolahan data hasil pengukuran. Data yang diperoleh dari LCS dikumpulkan, ditinjau, dan diselaraskan dengan interval pencatatan instrumen rujukan, misalnya setiap 5 menit atau sesuai dengan interval yang digunakan selama kolokasi, sehingga kedua set data dapat dibandingkan secara langsung.

Selanjutnya, dilakukan analisis komparatif antara data LCS dan instrumen rujukan. Hasil analisis ini digunakan sebagai dasar untuk mengembangkan model kalibrasi atau algoritma koreksi yang sesuai sehingga akurasi hasil pengukuran LCS dapat ditingkatkan.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 4.3 Ilustrasi Kolokasi LCS di SPKU

B. Evaluasi Metrik

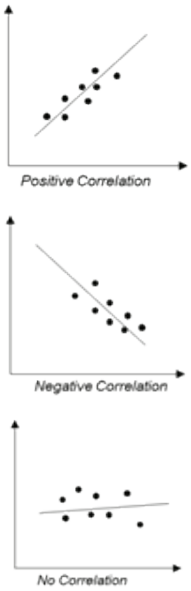
Setelah pengujian berbasis laboratorium maupun kolokasi selesai dilakukan, hasil evaluasi perlu disajikan menggunakan sejumlah metrik kinerja. Metrik yang umum digunakan meliputi dua kelompok, yaitu metrik akurasi dan metrik presisi. Setiap metrik beserta persamaan perhitungannya disajikan pada bagian berikut. Pada semua persamaan dalam bagian ini, simbol x menyatakan hasil pengukuran instrumen rujukan, sedangkan simbol y menyatakan hasil pengukuran LCS.

Buku ini tidak diperjualbelikan

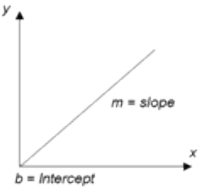
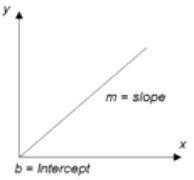
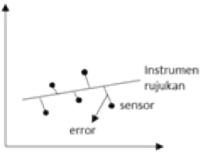
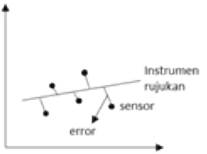
1. Metrik Akurasi

Metrik akurasi berikut dihimpun dari berbagai referensi dan digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian hasil pengukuran LCS terhadap instrumen rujukan (Duvall et al. 2021a; Spinelle et al. 2017; Spinelle et al. 2015a; Zimmerman 2022; Zimmerman et al. 2018). Metrik tersebut meliputi *Coefficient of Determination* (R^2), *Slope*, *Intercept*, *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Mean Bias Error* (MBE). Penjelasan dan persamaan setiap metrik disajikan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Ringkasan Metrik Akurasi

Jenis Metrik	Penjelasan	Persamaan	Ilustrasi
Coefficient of Determination (R^2)	Menunjukkan proporsi variasi data hasil pengukuran LCS yang dapat dijelaskan oleh data instrumen rujukan melalui model regresi linier. Nilai R^2 yang makin mendekati 1 menunjukkan hubungan yang makin kuat..	$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - x_i)^2}{\sum \left(y_i - \bar{y}\right)}$	

Buku ini tidak diperjualbelikan

Jenis Metrik	Penjelasan	Persamaan	Ilustrasi
Slope	Biasa digunakan pada pembuatan model regresi liniar. Koefisien regresi yang menunjukkan perubahan rata-rata nilai hasil pengukuran LCS terhadap setiap perubahan satu satuan pada instrumen rujukan. Nilai slope ideal adalah mendekati 1.	$m = \frac{\sum \left(y_i - \bar{y}\right) x \left(x_i - \bar{x}\right)}{\sum \left(x_i - \bar{x}\right)^2}$	
Intercept	Seperti halnya *slope*, intercept merupakan salah satu parameter regresi linier, di mana garis dari persamaan regresi yang melewati sumbu y	$b = \bar{y} - m\bar{x}$	
RMSE	Mengukur besarnya rata-rata kesalahan hasil pengukuran LCS terhadap instrumen rujukan. Nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan akurasi yang lebih baik.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2}$	
MBE	Mengukur rata-rata selisih antara hasil pengukuran LCS dan instrumen rujukan untuk menunjukkan kecenderungan mengukur lebih tinggi atau lebih rendah daripada nilai rujukan.	$MBE = \bar{y} - \bar{x}$	

2. Metrik Presisi

Metrik presisi digunakan untuk menilai hasil pengukuran yang dihasilkan oleh LCS. Metrik ini menunjukkan seberapa konsisten hasil pengukuran yang diperoleh dari pengukuran berulang pada

Buku ini tidak diperjualbelikan

lingkungan yang sama. Dua konsep yang berkaitan dengan presisi ialah *repeatability* dan *reproducibility* (Rai et al. 2017). *Repeatability* mengacu pada konsistensi hasil pengukuran yang diperoleh dari satu sensor ketika pengukuran diulang pada kondisi yang sama. Sebaliknya, *reproducibility* mengacu pada konsistensi hasil pengukuran yang diperoleh dari beberapa sensor dengan model yang sama pada kondisi pengujian yang sebanding. Terdapat dua metrik yang umum digunakan untuk mengukur prsesisi, yaitu: *Standard Deviation* (simpangan baku) dan *Coefficient of Variation.*

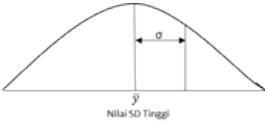
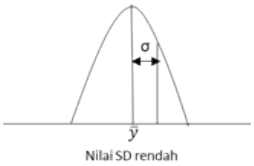
Standard Deviation (SD) atau simpangan baku merupakan ukuran statistik yang digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya. Nilai SD yang kecil menunjukkan bahwa hasil pengukuran cenderung berkumpul di sekitar nilai rata-rata sehingga konsistensi pengukuran lebih tinggi. Sebaliknya, nilai SD yang besar menunjukkan bahwa hasil pengukuran memiliki variasi yang lebih tinggi. Persamaan untuk menghitung SD ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Coefficient of Variation (CV) atau koefisien variasi merupakan ukuran statistik yang menyatakan besarnya variasi relatif hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya. Nilai CV dihitung berdasarkan simpangan baku dan dinyatakan dalam persen (%). Makin kecil nilai CV, makin tinggi presisi hasil pengukuran. Sebaliknya, nilai CV yang besar menunjukkan variasi hasil pengukuran yang lebih tinggi. Persamaan untuk menghitung CV ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Penjelasan dan persamaan dari setiap metrik diperlihatkan di dalam Tabel 4.2

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 4.2 Ringkasan Metrik Presisi

Jenis Metrik	Penjelasan	Persamaan	Ilustrasi
Standard Deviation (SD) atau Simpangan Baku	Mengukur tingkat penyebaran hasil pengukuran terhadap nilai rata-rata. Nilai SD yang kecil menunjukkan hasil pengukuran lebih konsisten.	$SD = \sqrt{\frac{\sum \left(y_i - \bar{y}\right)^2}{N-1}}$	 
Coefficient of variation (CV)	Mengukur variasi relatif hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya. Nilai CV yang kecil menunjukkan presisi yang lebih baik.	$CV = \frac{SD}{\bar{y}} x100$	Tidak ada

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB V
Kalibrasi

Apabila hasil evaluasi LCS, baik melalui pengujian laboratorium maupun kolokasi, menunjukkan bias yang signifikan, perlu dilakukan kalibrasi untuk meningkatkan akurasi hasil pengukuran. Secara umum, kalibrasi LCS dibedakan menjadi dua jenis, yaitu kalibrasi laboratorium dan kalibrasi lapangan.

Kedua jenis kalibrasi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda, antara lain dari aspek lokasi pelaksanaan, kondisi lingkungan, biaya, kebutuhan keahlian, dan keandalan hasil kalibrasi. Ringkasan perbedaan keduanya disajikan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Perbedaan Antara Kalibrasi Laboratorium dan Kalibrasi Lapangan

Perbandiangan	Kalibrasi Laboratorium	Kalibrasi Lapangan
Lokasi	Di laboratorium	Melalui kolokasi dengan SPKU.
Kondisi Lingkungan	Lingkungan pengujian yang terkontrol.	Terpapar langsung dengan kondisi lingkungan di tempat pengambilan sampel
Biaya	Relatif lebih tinggi	Relatif lebih rendah

Buku ini tidak diperjualbelikan

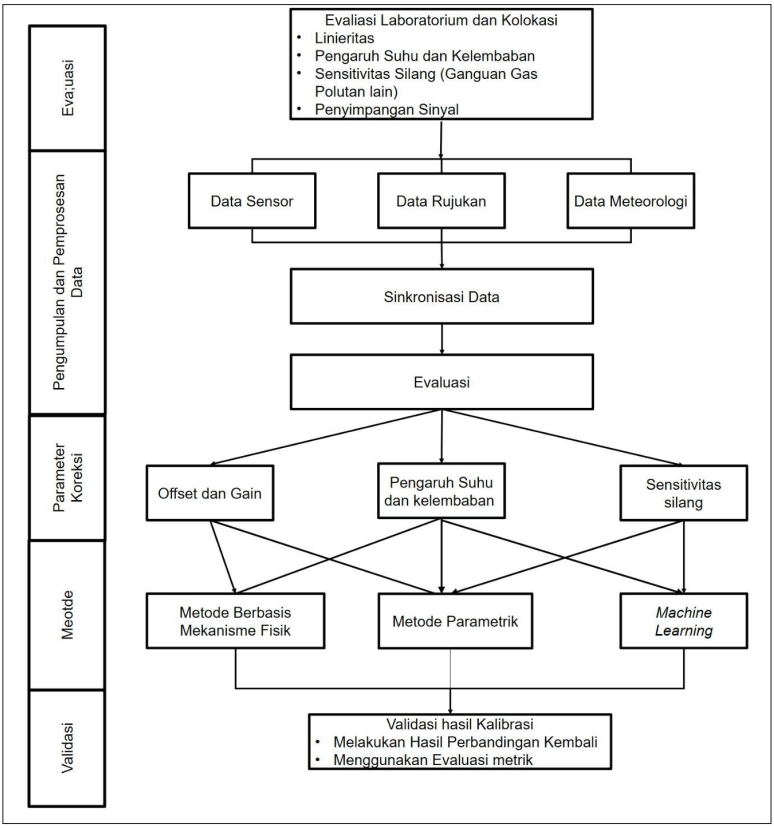
Perbandiangan	Kalibrasi Laboratorium	Kalibrasi Lapangan
Kemudahan penerapan	Memerlukan peralatan dan prosedur yang lebih kompleks.	Lebih mudah diterapkan.
Keahlian yang diperlukan	Memerlukan keahlian dalam pengoperasian instrumen dan pelaksanaan kalibrasi.	Memerlukan keahlian dalam analisis data hasil kolokasi.
Keandalan	Lebih rendah dalam merepresentasikan kondisi lapangan karena kalibrasi dilakukan pada lingkungan yang terkendali.	Lebih baik karena kalibrasi dilakukan langsung pada kondisi lingkungan pengukuran yang dinamis.

A. Metode Kalibrasi

Prosedur kalibrasi LCS berbeda dengan prosedur kalibrasi instrumen rujukan. Kalibrasi LCS umumnya berbasis data sehingga menggunakan data hasil pengukuran sebagai masukan utama. Metode kalibrasi LCS yang paling banyak digunakan dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori (Gambar 5.1), yaitu seperti berikut.

1. Metode berbasis mekanisme fisik.
2. Metode parametrik, seperti regresi linier dan regresi eksponensial, untuk memodelkan hubungan linier maupun nonlinier.
3. Metode nonparametrik, seperti algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*—ML).

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 5.1 Alur Kerja Kalibrasi LCS

Berikut penjelasan singkat mengenai ketiga metode kalibrasi yang paling sering digunakan untuk membangun model kalibrasi pada LCS:

1. Metode Mekanisme Fisik

Metode kalibrasi berbasis mekanisme fisik mengembangkan model berdasarkan prinsip kerja dan karakteristik fisik elemen penyusun sensor. Oleh karena itu, penerapan metode ini memerlukan pemahaman mengenai teori dan mekanisme kerja LCS. Secara

Buku ini tidak diperjualbelikan

teoretis, metode ini mampu menghasilkan model kalibrasi yang lebih baik karena dapat mengakomodasi variasi parameter fisis yang memengaruhi kinerja sensor. Namun, dalam praktiknya, metode ini relatif rumit untuk diterapkan dan memerlukan keahlian khusus sehingga tidak semua pengguna LCS dapat menggunakannya (Zimmerman 2022).

Sebagian besar model kalibrasi berbasis mekanisme fisik dikembangkan melalui pengujian laboratorium maupun kolokasi (Antonio 2018; Crilley et al. 2018; Crilley et al. 2020; Malings et al. 2020). Beberapa contoh yang banyak digunakan ialah pendekatan teori κ-Köhler untuk mengoreksi pengaruh kelembapan pada sensor LCS-PM (Antonio 2018) serta *baseline-temperature correction* untuk mengoreksi pengaruh suhu pada sensor elektrokimia (*electrochemical*—EC) (Popoola et al. 2016).

a. Pendekatan **teori κ-Köhler**

Pendekatan ini pertama kali diusulkan oleh Petters dan Kreidenweis (2007) untuk mengoreksi bias akibat pengaruh kelembapan relatif (*relative humidity*—RH) (Crilley et al. 2018). Teori κ-Köhler menjelaskan hubungan antara kemampuan partikel menyerap air (higroskopisitas), perubahan volumenya, dan nilai higroskopisitas tunggal (κ). Keakuratan metode ini bergantung pada penentuan nilai κ yang tepat sehingga kalibrasi LCS-PM sebaiknya dilakukan secara *in situ* menggunakan instrumen rujukan (Antonio 2018). Hal ini diperlukan karena respon sensor terhadap nilai κ dipengaruhi oleh komposisi partikel udara dan kelembapan relatif (Crilley et al. 2020). Pada lokasi dengan variasi RH yang tinggi, Crilley et al. (2020) merekomendasikan penggunaan teori κ-Köhler pada RH di atas 60%, sedangkan koreksi linier diterapkan pada RH di bawah 60%.

b. Pendekatan Baseline-Temperature Correction

Pendekatan ini digunakan untuk mengompensasi bias akibat pengaruh suhu pada sensor elektrokimia (EC). Metode ini menentukan nilai

Buku ini tidak diperjualbelikan

dasar (*baseline*) konsentrasi setiap 24 jam, kemudian memodelkan hubungannya dengan suhu lingkungan menggunakan model linier atau eksponensial. Model tersebut selanjutnya digunakan untuk mengoreksi data mentah sensor. Proses ini diulangi untuk setiap periode 24 jam sepanjang data pengukuran. Popoola et al. (2016) melaporkan bahwa pendekatan ini mampu meningkatkan kinerja sensor EC untuk pengukuran kuantitatif jangka panjang.

2. Metode Parametrik

Metode parametrik merupakan pendekatan yang paling banyak digunakan untuk mengembangkan model kalibrasi, baik melalui pengujian laboratorium maupun kolokasi (Duvall et al. 2021a; Spinelle et al. 2014a). Metode ini relatif sederhana dan mudah diterapkan. Hubungan antara variabel terikat (*dependent variable*) sebagai parameter target dan satu atau lebih variabel bebas (*independent variable*) sebagai parameter prediktor dimodelkan untuk membangun persamaan kalibrasi.

Secara umum, metode parametrik dikelompokkan menjadi dua kategori. Pertama, analisis regresi linier yang digunakan untuk memodelkan hubungan linier antara parameter. Kedua, analisis regresi nonlinier, seperti regresi eksponensial dan regresi polinomial, yang digunakan untuk memodelkan hubungan nonlinier (Austin 2015; Badura 2019; Castell et al. 2017).

Analisis regresi linier dapat dibedakan berdasarkan jumlah variabel bebas yang digunakan. Beberapa metode yang umum diterapkan dalam kalibrasi LCS meliputi regresi linier sederhana (*univariate linear regression*), regresi linier ortogonal (*orthogonal linear regression*), dan regresi linier berganda (*multiple linear regression*).

Dalam mengembangkan model kalibrasi lapangan menggunakan metode parametrik, terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

a. Ketersediaan Data

Data sebaiknya mencakup berbagai kondisi dan musim agar model mampu merepresentasikan kondisi pengukuran secara memadai. Data yang tidak lengkap sebaiknya dihindari karena dapat memengaruhi validitas model.

b. Kesesuaian Interval Data

Interval data LCS harus disesuaikan dengan interval data instrumen rujukan. Apabila berbeda, data perlu dirata-ratakan sesuai interval pengukuran instrumen rujukan dengan tetap memperhatikan kelengkapan data (*completeness*).

c. Kualitas Data

Data yang mengandung gangguan (*noise*) atau anomali sebaiknya dibersihkan sebelum digunakan dalam pemodelan.

d. Pemilihan Variabel Bebas

Variabel bebas sebaiknya memiliki hubungan yang kuat dengan variabel terikat. Hubungan tersebut dapat dievaluasi menggunakan analisis statistik, misalnya uji-*t* (*t-test*).

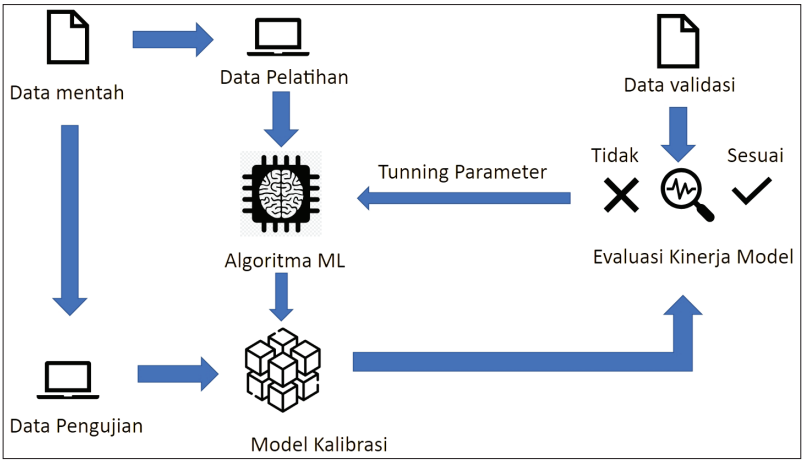
e. Perangkat Lunak

Analisis dan pemodelan dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti Microsoft Excel atau perangkat lunak sumber terbuka (*free and open source software*—FOSS), misalnya R dan Python.

3. Metode Pembelajaran Mesin

Metode pembelajaran mesin (*machine learning*—ML) merupakan pendekatan kalibrasi yang makin banyak digunakan dalam pengembangan model untuk sensor berbiaya rendah (LCS). Metode ini mampu mengenali pola yang kompleks dan mempelajarinya secara otomatis dari data. Dengan kemampuan tersebut, metode ini dapat menghasilkan model kalibrasi dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan konvensional. Tahapan umum pengembangan model kalibrasi berbasis ML disajikan pada Gambar 5.2.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 5.2 Alur Pengembangan Model Kalibrasi Berbasis Pembelajaran Mesin

Sama seperti pendekatan parametrik, pembelajaran mesin menawarkan berbagai jenis algoritma yang dapat digunakan dalam pengembangan model. Beberapa algoritma yang dapat digunakan seperti berikut.

1. *Random Forest* (Liu et al. 2019; Qin et al. 2020; Villanueva 2023; Zimmerman et al. 2018)
2. *Neural Network* (Borrego et al. 2018; Esposito et al. 2018; Esposito et al. 2017; Esposito et al. 2016; Spinelle et al. 2017; Spinelle et al. 2015b; De Vito et al. 2017)
3. *Gradient Boosting Decision Tree*(Johnson et al. 2018; Qin et al. 2020; Villanueva 2023)
4. *Support Vector Machine* (SVM)(Esposito et al. 2017)
5. *Nearest Neighbours Regression*(Hagan et al. 2018; Qin 2020; Villanueva 2023)
6. *Adaptive neuro fuzzy inference system* (ANFIS)(Alhasa et al. 2018)
7. *Gaussian Processes Regressor (GPR)*(Esposito et al. 2017)

Buku ini tidak diperjualbelikan

Setiap algoritma memiliki karakteristik dan keunggulan yang berbeda dalam memodelkan hubungan nonlinier maupun data yang kompleks. Oleh karena itu, pemilihan algoritma perlu disesuaikan dengan tujuan kalibrasi dan karakteristik data yang digunakan.

a. Persiapan Data dan Parameter Model

Dalam pengembangan model kalibrasi berbasis pembelajaran mesin, terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan. Data yang digunakan, baik data mentah LCS, data instrumen rujukan, maupun data meteorologi, harus tersedia dalam jumlah yang memadai dan mewakili kondisi pencemaran di lokasi pengambilan sampel. Selain itu, data perlu dibersihkan dari anomali (*outlier*) sebelum digunakan agar tidak menurunkan kinerja model.

Aspek lain yang perlu diperhatikan ialah konsistensi interval atau resolusi waktu antardata. Data LCS, data instrumen rujukan, dan data pendukung harus memiliki resolusi waktu yang seragam atau disesuaikan terlebih dahulu sebelum proses pelatihan model. Selain itu, parameter yang digunakan sebagai masukan model sebaiknya memiliki hubungan yang kuat dengan variabel target. Parameter yang tidak relevan sebaiknya tidak dimasukkan karena dapat menurunkan kinerja model.

b. Pelatihan, Validasi, dan Penalaan Model

Proses pengembangan model kalibrasi berbasis pembelajaran mesin umumnya melibatkan pembagian data menjadi dua atau tiga kelompok. Kelompok tersebut terdiri atas data pelatihan dan data pengujian, atau data pelatihan, data pengujian, dan data validasi. Pembagian data sebaiknya tidak dilakukan berdasarkan urutan waktu (*sequence*), melainkan secara acak (*random*) atau berdasarkan musim sesuai dengan karakteristik data. Cara ini bertujuan agar model tidak hanya mempelajari pola tertentu, tetapi mampu mengenali variasi data yang lebih beragam (Alhasa et al., 2018).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Dengan cara ini, model dapat memahami semua variasi karakteristik pencemaran yang mungkin terjadi.

Penalaan parameter (*parameter tuning*) merupakan salah satu faktor penting dalam pengembangan model kalibrasi berbasis pembelajaran mesin. Penalaan dilakukan dengan menyesuaikan struktur model, seperti jumlah simpul (*node*), jumlah lapisan (*layer*), jenis *kernel*, dan jumlah iterasi, sesuai dengan algoritma yang digunakan (Esposito et al., 2018). Penalaan yang tepat dapat meningkatkan akurasi dan stabilitas prediksi model. Oleh karena itu, evaluasi kinerja serta eksperimen terhadap berbagai kombinasi parameter menjadi bagian penting dalam pengembangan model berbasis pembelajaran mesin.

4. Perbandingan Metode Kalibrasi

Tabel 5.2 berikut menyajikan ringkasan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing metode kalibrasi yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya.

Tabel 5.2 Ringkasan Kelebihan dan kekurangan Metode Kalibrasi

Aspek	Metode Berbasis Mekanisme Fisik	Metode Parametrik	Metode Pembelajaran Mesin
Kemudahan penerapan	Relatif sulit karena memerlukan pemahaman prinsip kerja sensor.	Relatif mudah diterapkan.	Memerlukan keahlian dalam pengembangan model dan pemrograman.
Kebutuhan data	Relatif sedikit karena berbasis mekanisme fisik sensor.	Memerlukan data kolokasi yang memadai.	Memerlukan data pelatihan yang besar, beragam, dan representatif.
Kebutuhan komputasi	Rendah.	Rendah hingga sedang.	Tinggi karena proses pelatihan model lebih kompleks.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Akurasi	Baik pada kondisi tertentu, tetapi cenderung menurun pada kondisi lapangan yang beragam.	Baik untuk hubungan linier atau hubungan sederhana.	Umumnya paling tinggi karena mampu memodelkan hubungan yang kompleks dan nonlinier.
Fleksibilitas	Rendah karena bergantung pada model fisik sensor.	Sedang; persamaan mudah diperbarui dengan data baru.	Tinggi; mampu menyesuaikan berbagai pola dan karakteristik data.
Keterbatasan utama	Memerlukan pengetahuan mengenai mekanisme kerja sensor dan belum tentu mewakili seluruh kondisi lapangan.	Kinerja sangat bergantung pada kualitas data dan kurang mampu menangani hubungan yang kompleks.	Berpotensi mengalami *overfitting*, memerlukan data yang banyak, dan membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar.

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 5.2, metode pembelajaran mesin memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode lainnya, terutama dalam memodelkan hubungan yang kompleks dan meningkatkan akurasi hasil kalibrasi. Saat ini, metode pembelajaran mesin lebih banyak digunakan dalam pengembangan model kalibrasi berbasis kolokasi, sedangkan analisis regresi umumnya digunakan sebagai pembanding (*benchmark*) (Liang 2021b). Sebaliknya, metode berbasis mekanisme fisik relatif jarang digunakan karena memerlukan pemahaman yang mendalam mengenai prinsip kerja sensor LCS (Zimmerman 2022).

Sebagai contoh, pada sensor PM, diperlukan pemahaman mengenai teori hamburan cahaya (Mie theory) (Hagan dan Kroll 2020), sedangkan pada sensor MOS diperlukan pemahaman mengenai karakteristik fisik lapisan elemen sensor (Maag et al. 2018). Meskipun demikian, tidak ada satu metode kalibrasi yang dapat menyelesaikan seluruh permasalahan pada LCS. Setiap

Buku ini tidak diperjualbelikan

permasalahan memiliki karakteristik yang berbeda sehingga pemilihan metode harus disesuaikan dengan sifat data yang tersedia serta ketersediaan data dari instrumen rujukan (De Vito et al. 2018). Karena setiap permasalahan yang dialami oleh LCS tetentunya memiliki karakteristik tersendiri bergantung pada sifat data yang tersedia, terlebih perlu adanya instrumen rujukan yang dijadikan sebagai target pola konsentrasi pencemaran di kawasan pengambilan sampel (De Vito et al. 2018).

Seiring dengan berkembangnya teknologi komputasi dan makin rendahnya biaya komputasi, metode pembelajaran mesin diperkirakan akan terus berkembang. Perkembangan tersebut menjadikan metode ini sebagai pendekatan yang semakin menjanjikan dalam pengembangan model kalibrasi. Oleh karena itu, berbagai algoritma pembelajaran mesin sebaiknya diuji terlebih dahulu untuk memperoleh model kalibrasi yang paling sesuai sebelum diterapkan secara luas.

Kinerja model kalibrasi tidak hanya ditentukan oleh algoritma yang digunakan, tetapi juga oleh durasi atau periode data yang digunakan untuk pelatihan model. Berdasarkan kajian literatur yang dilakukan oleh Liang (2021b), periode data yang diberikan dapat memengaruhi hasil dari kinerja model kalibrasi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan data dengan periode yang lebih panjang dapat meningkatkan akurasi hasil pengukuran LCS (Alhasa et al. 2018; Borrego et al. 2018; Spinelle et al. 2015b, 2017).

Namun, ditemukan juga bahwa periode pengumpulan data yang lebih dari 180 hari atau setengah tahun akan mengurangi tingkat akurasi dari model kalibrasi (Liang 2021b). Penurunan tersebut diduga disebabkan oleh perubahan kondisi lingkungan serta penuaan sensor (*sensor aging*) yang menyebabkan terjadinya pergeseran sinyal (*signal drift*). Peningkatan bias pada keluaran sensor menyebabkan distribusi data berubah sehingga kinerja model kalibrasi menjadi kurang optimal. Berdasarkan hasil kajian Liang (2021b), periode data yang disarankan untuk pengembangan

Buku ini tidak diperjualbelikan

model kalibrasi adalah lebih dari 30 hingga 60 hari, dengan batas maksimum sekitar 180 hari (Liang 2021b) .

B. Parameter yang Dikoreksi

Parameter yang dikalibrasi pada LCS secara umum dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu (1) *offset* dan *gain*, (2) pengaruh suhu dan kelembapan, serta (3) sensitivitas silang. Bagian ini menjelaskan secara ringkas ketiga parameter tersebut beserta pendekatan kalibrasinya.

1. *Offset* dan *Gain*

Kalibrasi *offset* dan *gain* merupakan langkah krusial dalam mengatasi berbagai permasalahan yang berkaitan dengan kesalahan kalibrasi dan nonlinieritas. Kalibrasi *offset* dan *gain* bertujuan mengurangi kesalahan pengukuran yang disebabkan oleh *offset*, *gain*, maupun ketidaklinieran respon sensor. Secara prinsip, kalibrasi offset dan gain dilakukan melalui perbandingan antara hasil pengukuran dari LCS dan instrumen rujukan. Dalam banyak kasus, hasil perbandingan ini menunjukkan adanya perbedaan signifikan, di mana pengukuran LCS dapat saja lebih tinggi atau lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi yang diukur oleh instrumen rujukan.

Untuk mengurangi perbedaan tersebut, dilakukan penyesuaian terhadap nilai *offset*, *gain*, maupun rentang nilai sensitivitas. Secara umum, proses kalibrasi *offset* dan *gain* dilakukan melalui beberapa tahapan berikut. Pertama, persiapan kalibrasi sebaiknya mengacu pada prosedur evaluasi dan kalibrasi yang dijelaskan pada Bab IV dan V. Kedua, metode parametrik yang umum digunakan meliputi regresi linier untuk hubungan linier serta regresi eksponensial atau *power law* untuk hubungan nonlinier (Castell et al. 2017; Maag et al. 2018).

Selanjutnya, penting untuk melakukan kalibrasi di lapangan setelah menyelesaikan kalibrasi di laboratorium. Berbagai penelitian

Buku ini tidak diperjualbelikan

menunjukkan bahwa model kalibrasi yang dikembangkan di laboratorium sering mengalami penurunan kinerja ketika diterapkan di lapangan. Kondisi tersebut diduga disebabkan oleh parameter kalibrasi yang tidak lagi sesuai dengan kondisi lingkungan sebenarnya (Castell et al. 2017; Zimmerman et al. 2018). (Castell et al. 2017; Zimmerman et al. 2018). Oleh karena itu, kalibrasi lapangan perlu dilakukan untuk memastikan bahwa sensor tetap memberikan hasil pengukuran yang akurat dan andal pada berbagai kondisi operasional.

2. Koreksi Pengaruh Suhu dan Kelembapan

Sebagaimana diuraikan sebelumnya, LCS sering kali mengalami penurunan sensitivitas, yang berdampak langsung pada keakuratan data yang diperoleh. Penurunan ini sering kali disebabkan oleh pengaruh eksternal, khususnya suhu dan kelembapan (Pang et al. 2017; Rai et al. 2017). Sebagai contoh, LCS tipe EC dapat mengalami penurunan sensitivitas hingga 20% ketika kelembapan meningkat dari rentang 15% -- 85% (Pang et al., 2017). Demikian pula, LCS yang digunakan untuk pengukuran partikel halus mengalami pengurangan sensitivitas yang signifikan, akibat sifat higroskopis (*hygroscopicity*) partikel pada kondisi kelembapan yang tinggi (Hagan and Kroll 2020).

Mengingat besarnya pengaruh suhu dan kelembapan terhadap kinerja LCS, kedua parameter tersebut perlu dipertimbangkan dalam pengembangan model kalibrasi. Pengembangan model kalibrasi untuk mengoreksi pengaruh suhu dan kelembapan mengikuti prosedur umum kalibrasi sebagaimana dijelaskan pada Bab IV dan V.

Pada kasus ini, model yang digunakan umumnya berupa regresi multiparameter, seperti *multiple linear regression*, maupun algoritma pembelajaran mesin. Selain metode parametrik dan pembelajaran mesin, pendekatan berbasis mekanisme fisik juga dapat digunakan. Pendekatan ini memanfaatkan pemahaman mengenai prinsip kerja

Buku ini tidak diperjualbelikan

elemen sensor untuk mengoreksi pengaruh suhu dan kelembapan. Pendekatan tersebut dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai faktor-faktor yang memengaruhi akurasi pengukuran.

Setelah kalibrasi laboratorium selesai dilakukan, kalibrasi lapangan tetap diperlukan untuk memastikan bahwa model kalibrasi tetap akurat pada kondisi lingkungan sebenarnya. Hal ini penting mengingat bahwa kondisi lingkungan lapangan dapat berbeda secara signifikan dari laboratorium sehingga kalibrasi lapangan akan memastikan bahwa LCS tetap berfungsi dengan akurat dalam situasi nyata.

3. Sensitivitas Silang

Pada prinsipnya, kalibrasi sensitivitas silang dilakukan untuk mengatasi gangguan dari gas selain gas target yang diukur. Pada umumnya, kalibrasi ini dilakukan pada LCS-gas karena elemen sensornya terkadang peka terhadap beberapa jenis gas pencemar, meskipun dengan tingkat sensitivitas yang berbeda-beda.(Castell et al. 2017; Maag et al. 2018; Masson et al. 2015; Mead et al. 2013; Rai et al. 2017). Selektivitas yang rendah pada sensor MOS juga merupakan salah satu bentuk sensitivitas silang. Sensor jenis ini dapat mengukur beberapa jenis gas pencemar secara bersamaan sehingga gas selain target juga dapat terdeteksi. Oleh karena itu, pengukuran seluruh gas yang menimbulkan sensitivitas silang memungkinkan dilakukan kompensasi terhadap gangguan tersebut.

Dalam pengembangan model kalibrasi untuk mengatasi sensitivitas silang, beberapa aspek penting perlu diperhatikan. Pertama, untuk mengompensasi gangguan akibat gas pencemar lainnya, pendekatan umum yang digunakan ialah penggabungan beberapa sensor dalam satu sistem, yang dikenal sebagai *sensor array*. Pendekatan ini diterapkan pada sensor EC dan MOS. Khusus pada sensor MOS, umumnya, digunakan lebih dari dua sensor dengan karakteristik yang berbeda (Laref 2019).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Selain itu, penting untuk dicatat bahwa tidak semua jenis LCS memerlukan kalibrasi sensitivitas silang. Perlu merujuk pada *data sheet* yang dikeluarkan oleh produsen untuk menentukan kebutuhan kalibrasi. Dalam konteks ini, *multiple linear regression* dan metode pembelajaran mesin (ML) sangat disarankan dalam pengembangan model. Kedua metode tersebut memungkinkan interaksi antarvariabel yang memengaruhi sensitivitas pengukuran untuk dipertimbangkan dalam proses pemodelan. Seperti telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, kalibrasi lapangan tetap perlu dilakukan setelah kalibrasi laboratorium. Kondisi lingkungan di lapangan yang lebih kompleks dan bervariasi dapat memengaruhi kinerja sensor. Dengan mengikuti langkah-langkah ini, diharapkan kalibrasi sensitivitas silang dapat dilakukan secara efektif, sehingga meningkatkan keandalan data pengukuran gas pencemar.

C. Strategi Kalibrasi Berbasis Jaringan

Salah satu kelemahan utama dari LCS adalah rendahnya keandalan data yang dihasilkan(Castell et al. 2017; Moltchanov et al. 2015). Walaupun LCS telah menjalani serangkaian evaluasi dan kalibrasi yang ketat baik yang dilakukan di dalam kondisi laboratorium maupun dengan *kolokasi*, keandalan hasil pengukuran dalam jangka waktu yang panjang masih menjadi pertanyaan. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, LCS mengalami pergeseran sinyal seiring waktu. Hasil kajian menunjukkan bahwa LCS mengalami pergeseran sinyal dari waktu ke waktu setelah penerapan selama satu bulan (Jiao et al. 2016; Mueller et al. 2017). Oleh karena itu, kalibrasi ulang merupakan kebutuhan yang mutlak bagi LCS untuk mempertahankan kinerjanya.

Permasalahan utama dalam kalibrasi, baik *pre-deployment* maupun *post-deployment*, ialah keterbatasan SPKU sehingga jumlah instrumen rujukan yang tersedia untuk memverifikasi hasil pengukuran LCS juga terbatas. Oleh karena itu, dikembangkanlah beberapa strategi kalibrasi di antaranya ialah *blind calibration*,

Buku ini tidak diperjualbelikan

collaborative calibration, dan *transfer calibration*. Strategi-strategi tersebut memanfaatkan keterhubungan antarsensor dalam suatu jaringan sehingga proses kalibrasi tidak selalu bergantung pada keberadaan instrumen rujukan di setiap lokasi

1. Blind Calibration

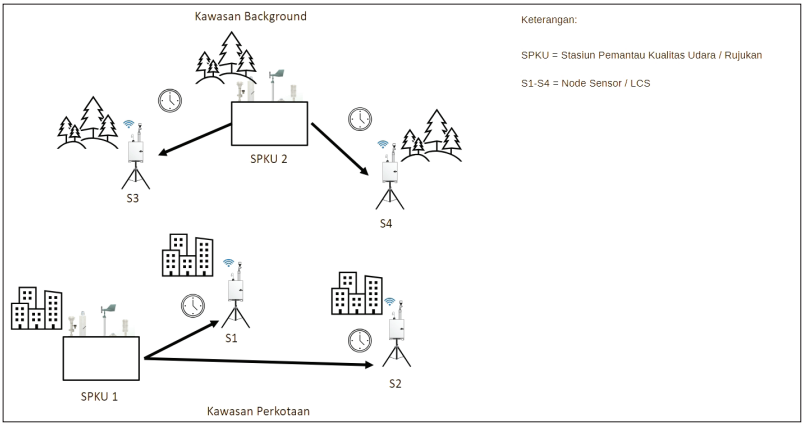
Blind calibration merupakan strategi kalibrasi yang awalnya dikembangkan untuk kalibrasi sensor secara umum (Maag et al. 2018). Strategi ini bekerja dengan memanfaatkan periode atau lokasi ketika beberapa *Low-Cost Sensor* (LCS) dan instrumen rujukan/Stasiun Pemantau Kualitas Udara (SPKU) terpapar pada kondisi lingkungan serta konsentrasi polutan yang sama. Prinsip dasar dari pendekatan ini diilustrasikan pada Gambar 5.3**.**

Gambar 5.3 menjelaskan alur dan mekanisme kerja *blind calibration* pada dua lokasi serta periode waktu yang berbeda. Bagian atas gambar menggambarkan lokasi kawasan nonperkotaan (*background*), sedangkan bagian bawah menunjukkan lokasi kawasan perkotaan. Pada gambar tersebut, label SPKU mewakili instrumen rujukan standar, sementara kode S1 hingga S4 mewakili masing-masing unit LCS yang dipasang di lapangan. Tanda panah mengindikasikan interaksi atau proses kolokasi (penjajaran) antara instrumen rujukan dan LCS untuk menyelaraskan data. Selain itu, indikator jam yang tercantum pada gambar menunjukkan periode waktu spesifik yang dijadwalkan untuk menjalankan proses kalibrasi

Pada awal perkembangannya, strategi *blind calibration* mengasumsikan bahwa ketika LCS dipindahkan ke lokasi pengukuran, wilayah baru tersebut memiliki karakteristik kualitas udara yang serupa dengan lokasi acuan. Namun, asumsi ini tidak selalu tepat karena kondisi pencemaran udara di lapangan sangat dinamis dan mudah berubah. Untuk mengatasi kendala tersebut, para peneliti mengusulkan modifikasi strategi dengan memilih lokasi dan jendela waktu kalibrasi yang lebih spesifik.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Sebagai contoh, beberapa studi mengasumsikan bahwa konsentrasi pencemar memiliki pola *baseline* yang relatif serupa pada malam hingga dini hari (sekitar pukul 01.00–04.00) di kawasan perkotaan, serta pada siang hari di kawasan nonperkotaan. Periode waktu dengan kondisi udara yang cenderung stabil inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk menerapkan strategi *blind calibration* secara lebih akurat dan efisien. (Jiao et al. 2016; Moltchanov et al. 2015; Tsujita et al. 2005).



Gambar 5.3 Ilustrasi Blind Calibration

2. Collaborative Calibration

Collaborative calibration merupakan strategi kalibrasi yang umumnya diterapkan pada jaringan *Low-Cost Sensor* (LCS) bergerak (*mobile LCS*). Strategi ini dikembangkan dari konsep *blind calibration* dengan mempertemukan dua atau lebih LCS bergerak dengan Stasiun Pemantau Kualitas Udara (SPKU) pada ruang dan waktu yang sama, sehingga seluruh perangkat terpapar oleh kondisi lingkungan dan konsentrasi polutan yang identik (Saukh et al. 2015). Pertemuan antara LCS bergerak dan SPKU ini dikenal dengan istilah *Sensor Rendezvous*. Berdasarkan mekanisme transfer parameternya, strategi

Buku ini tidak diperjualbelikan

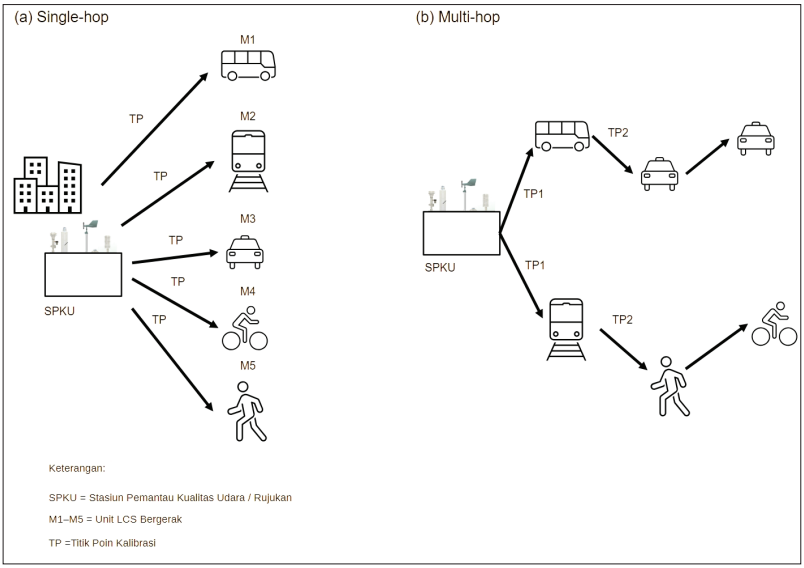
collaborative calibration terbagi menjadi dua pendekatan utama, yaitu *single-hop* dan *multi-hop*.

Pada dasarnya, baik pendekatan *single-hop* maupun *multi-hop* mengusung prinsip dasar yang sama, yaitu mempertemukan LCS bergerak dan SPKU untuk melakukan pengukuran pada kondisi lingkungan yang identik. Proses ini memanfaatkan algoritma khusus yang tertanam pada perangkat LCS guna mengompensasi bias hasil perbandingan antara sensor dan instrumen rujukan SPKU, baik secara langsung maupun tidak langsung (Vajs et al. 2023).

Lebih lanjut, unit LCS bergerak yang telah terkalibrasi dapat difungsikan sebagai rujukan sekunder untuk mengalibrasi ulang LCS bergerak lainnya secara berantai, yang kemudian membentuk mekanisme *multi-hop* (Saukh et al. 2015). Kendati demikian, penerapan strategi ini memerlukan kecermatan terhadap risiko akumulasi bias. Hal ini dikarenakan setiap tahapan *multi-hop* berpotensi menambahkan bias baru yang dapat menurunkan tingkat akurasi kalibrasi pada tahap-tahap berikutnya (Hasenfratz et al. 2014; Mueller et al. 2016; Saukh et al. 2015).

Perbedaan alur dan mekanisme dari kedua pendekatan tersebut diilustrasikan secara lebih jelas pada Gambar 5.4. Pada pendekatan *single-hop* (Gambar 5.4a), instrumen rujukan SPKU melakukan kalibrasi secara langsung kepada sejumlah unit LCS bergerak melalui satu jalur Titik Point (TP) . Unit LCS bergerak tersebut disimbolkan dengan label M1 hingga M5, yang mencerminkan keberagaman moda mobilitas di lapangan, mulai dari bus, kereta, mobil, sepeda motor, hingga pejalan kaki. Sementara itu, pada pendekatan *multi-hop* (Gambar 5.4b), kalibrasi berlangsung secara bertahap. SPKU terlebih dahulu mengkalibrasi sensor bergerak pada tahap pertama (TP1), kemudian sensor yang telah terkalibrasi tersebut meneruskan nilai acuannya untuk mengkalibrasi sensor bergerak lainnya pada tahap kedua (TP2) dan seterusnya.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 5.4 Ilustrasi *Collaborative Calibration*

3. Transfer Calibration

Transfer calibration adalah strategi kalibrasi yang mengusung konsep perpindahan parameter kalibrasi dari sensor sumber ke sensor target. merujuk pada unit LCS yang telah dikalibrasi sebelumnya dengan Stasiun Pemantau Kualitas Udara (SPKU), sedangkan target adalah LCS yang akan dikalibrasi. Strategi ini umumnya diterapkan pada LCS berbasis *Metal Oxide* (MOX) yang dirangkai menjadi *sensor array*, atau dikenal dengan istilah *electronic nose* (*e-nose*) untuk mendeteksi gas berbau berbahaya di lingkungan industri (Bruins et al. 2013; Yan dan Zhang 2016). Meskipun sebagian besar diimplementasikan pada *e-nose*, strategi *transfer calibration* pada dasarnya juga dapat diaplikasikan pada jenis LCS lainnya. .

Secara konseptual, *transfer calibration* melibatkan dua tahapan pengkalibrasian utama. Tahap pertama diawali dengan mengkalibrasi LCS sumber terhadap instrumen rujukan SPKU menggunakan

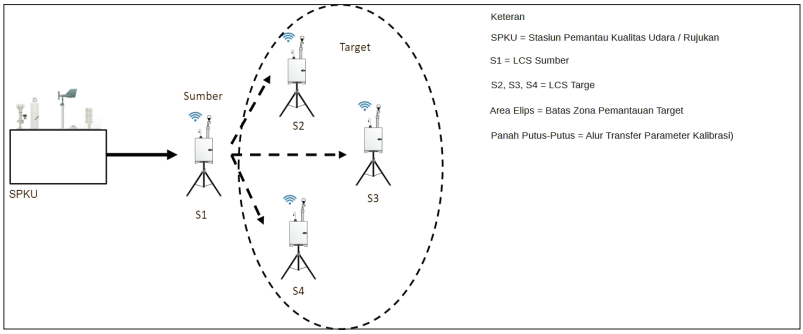
Buku ini tidak diperjualbelikan

metode analitis seperti analisis regresi maupun algoritma *Machine Learning* (ML). Selanjutnya, parameter kalibrasi yang diperoleh dari LCS sumber tersebut ditransfer ke LCS target, dengan asumsi dasar bahwa parameter tersebut juga berlaku pada LCS target.(Fonollosa et al. 2016).

Alur kerja dan mekanisme transfer parameter ini diilustrasikan secara rinci pada Gambar 5.5. Pada gambar tersebut, proses dimulai ketika LCS sumber (S1) dikalibrasi secara langsung terhadap instrumen rujukan SPKU, yang ditandai oleh garis panah tegas. Setelah terkalibrasi, sensor S1 bertindak sebagai acuan lokal yang meneruskan nilai atau parameter koreksi ke sekelompok LCS target (S2, S3, dan S4). Tanda panah putus-putus mengindikasikan alur pendistribusian parameter kalibrasi dari sensor sumber ke masing-masing sensor target tersebut. Sementara itu, area berbentuk elips garis putus-putus menggambarkan batas cakupan zona atau jaringan pemantauan target tempat sensor-sensor tujuan tersebut ditempatkan secara bersamaan.

Meskipun *transfer calibration* mampu menyederhanakan proses kalibrasi karena meminimalkan ketergantungan pada keberadaan stasiun rujukan di setiap lokasi, strategi ini masih menghadapi beberapa tantangan teknis. Salah satu tantangan utamanya adalah penerapan *transfer calibration* yang sejauh ini umumnya masih dilakukan dalam kondisi laboratorium yang terkontrol, sehingga pengujian langsung di lapangan masih terbatas dan perlu dikembangkan lebih lanjut (Maag et al. 2018). Di samping itu, penting untuk memastikan bahwa setiap unit sensor memiliki karakteristik fisik dan respon yang identik guna menjaga konsistensi serta akurasi hasil kalibrasi. (Smith et al. 2019). Tantangan lainnya berkaitan dengan variasi pola distribusi pencemaran udara di setiap kawasan yang relatif berbeda. Oleh karena itu, diperlukan adanya kesamaan pola distribusi pencemaran antara lokasi LCS sumber dan LCS target agar perbedaan karakteristik lingkungan lokal tidak memengaruhi atau merusak akurasi kalibrasi saat diterapkan di lapangan (Maag et al. 2018).

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 5.5 Ilustrasi *Transfer Calibration*

Buku ini tidak diperjualbelikan

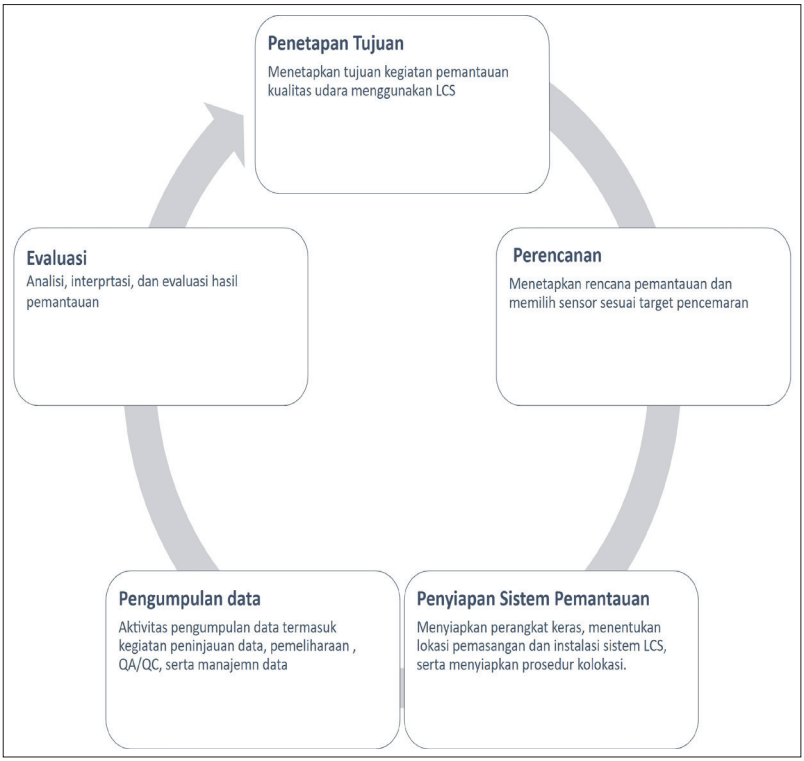
Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB VI

Panduan Teknis Implementasi LCS

Penerapan *low-cost sensor* (LCS) sebagai alat pemantauan kualitas udara memerlukan perencanaan dan pelaksanaan yang sistematis. Pengguna perlu memperhatikan serangkaian kegiatan agar LCS dapat dimanfaatkan secara efektif, mulai dari perencanaan awal hingga evaluasi hasil pengukuran. Proses tersebut mencakup pemilihan sensor, penempatan perangkat, penyiapan sistem pemantauan, manajemen data, serta interpretasi dan komunikasi hasil. Gambar 6.1 menunjukkan alur pengembangan dan implementasi sistem LCS, mulai dari penetapan tujuan penggunaan hingga analisis hasil pemantauan. Alur tersebut menjadi kerangka pembahasan pada Bab VI dan Bab VII. Bab VI membahas aspek teknis dan operasional, sedangkan Bab VII berfokus pada pengelolaan data serta evaluasi dan pemanfaatannya.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 6.1 Alur Implementasi Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis LCS

A. Tujuan Dasar Penggunaan Aplikasi LCS

Penetapan tujuan dasar kegiatan pemantauan kualitas udara perlu dilakukan sejak awal sebagai tahap penting dalam penggunaan LCS. Langkah ini membantu memastikan bahwa penggunaan LCS sesuai kebutuhan dan tujuan pemantauan. Berdasarkan panduan dalam buku *The Enhanced Air Sensors Guidebook* yang diterbitkan oleh USEPA (Clements et al. 2022), penentuan tujuan dapat dimulai dengan merumuskan pertanyaan awal yang diajukan oleh pengguna LCS, seperti berikut.

Buku ini tidak diperjualbelikan

1. Bagaimana kondisi kualitas udara di sekitar Anda?
2. Pencemaran apa saja yang telah melebihi batas konsentrasi di kawasan anda?
3. Data-data pencemaran apa saja yang Anda miliki?
4. Mengapa Anda perlu mendapatkan data pengukuran pencemaran yang baru?
5. Pengukuran yang dilakukan apakah bersifat jangka panjang atau pendek?

Pertanyaan-pertanyaan tersebut akan membantu pengguna dalam menetapkan tujuan penggunaan LCS. Contoh tujuan dasar yang dapat dikemukakan antara lain seperti berikut.

1. Pemantauan bersifat stasioner atau bergerak.
2. Pengukuran dilakukan di dalam atau di luar ruangan.
3. Pemantauan dilakukan pada kawasan atau paparan individu.

Semua tujuan dasar tersebut akan menentukan jenis LCS yang paling sesuai dengan aplikasi yang diinginkan.

Berdasarkan tujuan yang telah ditetapkan, aplikasi LCS umumnya dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu (1) penerapan untuk *stasioner* (tetap) dan (2) penerapan bergerak *(mobile)* (Narayana et al. 2022). Kedua kategori ini dapat diterapkan pada lokasi tertentu, baik untuk pengukuran di luar ruangan maupun di dalam ruangan. Pada penerapan *stasioner*, LCS ditempatkan pada lokasi yang untuk periode pengukuran jangka pendek atau jangka panjang. Contoh penerapan *stasioner* meliputi pemantauan emisi industri, pemantauan kualitas udara perkotaan, pemantauan di kawasan bangunan, dan kajian *source apportionment* (Castell et al. 2013; Fattoruso 2020; Hagan et al. 2018; Mead et al. 2013; Popoola et al. 2018; Schneider et al. 2017; Soms 2021).

Sebaliknya, penerapan bergerak (*mobile*) digunakan untuk pemantauan yang dilakukan sambil bergerak, misalnya menggunakan kendaraan atau kendaraan tanpa awak (*Unmanned Aerial Vehicle*—UAV/*drone*). Pemantauan dilakukan mengikuti rute

Buku ini tidak diperjualbelikan

yang telah ditentukan. Pemantauan emisi kendaraan, pemetaan pencemaran udara menggunakan kendaraan, paparan individu, dan kajian profil stratifikasi vertikal pencemaran udara merupakan contoh dari aplikasi pemantauan bergerak (Hasenfratz et al. 2014; Hedworth et al. 2021; Mueller et al. 2016; Piedrahita et al. 2014; Suriano et al. 2020). Penetapan tujuan dan jenis aplikasi sejak awal akan mempermudah tahap selanjutnya, seperti pemilihan jenis LCS, penyiapan logistik, penyusunan prosedur kalibrasi, pengumpulan data, dan kegiatan teknis lainnya.

B. Penetapan Perencanaan

Setelah menetapkan tujuan dasar, langkah selanjutnya ialah menyusun perencanaan yang terperinci terkait prosedur pengukuran.Perencanaan ini menjadi pedoman dalam pelaksanaan pemantauan kualitas udara berbasis LCS. Perencanaan tersebut mencakup penentuan parameter pencemaran yang akan diukur, penyusunan peta jalan (*roadmap*), pemilihan dan pemasangan jaringan LCS, pemrosesan serta validasi data, serta berbagai aspek teknis lain yang mendukung akurasi dan keandalan data.

1. Pemilihan Sensor

Pemilihan LCS yang tepat sangat penting untuk memastikan hasil pengukuran yang akurat dan relevan dalam berbagai aplikasi pemantauan. Dalam menentukan pilihan sensor, terdapat beberapa faktor yang perlu diperhatikan guna memperoleh perangkat yang sesuai dengan kebutuhan dan lingkungan pemantauan. Pertama, sensor perlu dipilih berdasarkan jenis polutan yang akan diukur karena setiap sensor memiliki sensitivitas terhadap polutan tertentu. Selain itu, karakteristik sensor, seperti rentang pengukuran, batas deteksi, keakurasian, dan waktu respons, perlu dipertimbangkan untuk memastikan konsistensi hasil pengukuran. Hasil evaluasi kinerja sensor juga perlu dipertimbangkan. Terakhir, spesifikasi pendukung perlu dipertimbangkan karena turut menentukan

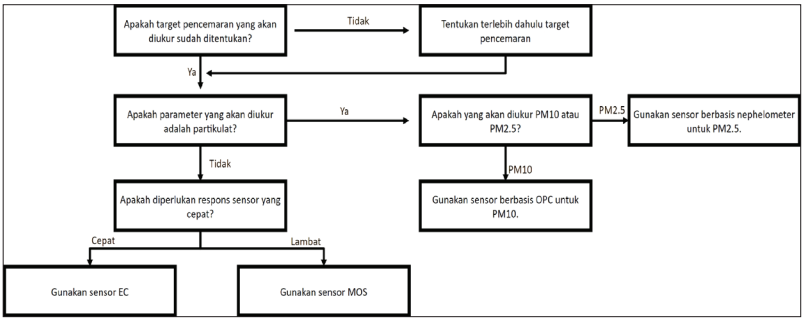
Buku ini tidak diperjualbelikan

efektivitas sensor dalam memenuhi kebutuhan operasional pemantauan kualitas udara.

a. Jenis Polutan

Pemilihan jenis sensor merupakan langkah krusial yang dilakukan berdasarkan tujuan pemantauan yang ingin dicapai oleh pengguna. Pemahaman terhadap kebutuhan spesifik dari sistem pemantauan akan membantu pengguna dalam memilih sensor yang paling sesuai. Seperti telah dijelaskan pada Bab III, sensor kualitas udara berbiaya rendah (LCS) umumnya terbagi menjadi dua kategori berdasarkan jenis polutan yang diukur, yaitu sensor gas dan sensor partikulat (PM). Kedua kategori tersebut memiliki peran yang berbeda dalam memperoleh data sesuai dengan jenis polutan yang dipantau.

Pengguna perlu memahami bahwa setiap jenis LCS memiliki prinsip kerja yang berbeda. Perbedaan tersebut bergantung pada teori kerja dan elemen penyusun setiap sensor sehingga memengaruhi sensitivitas dan spesifikasinya terhadap jenis polutan tertentu. Gambar 6.2 menyajikan diagram alur yang membantu pengguna memilih LCS sesuai dengan jenis polutan yang akan diukur. Diagram tersebut dapat menjadi panduan awal dalam menentukan kategori sensor yang sesuai untuk aplikasi pemantauan kualitas udara.



Gambar 6.*2* Diagram Alur Pemilihan LCS Berdasarkan Target Pengukuran yang Telah Ditetapkan

Buku ini tidak diperjualbelikan

b. Karakteristik Sensor

Karakteristik sensor merupakan salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan LCS. Pemahaman terhadap karakteristik ini sangat diperlukan untuk memastikan kesesuaian sensor dengan kebutuhan pemantauan yang akan dilakukan. Tabel 3.2 pada Bab III dapat dijadikan rujukan untuk memahami berbagai karakteristik utama yang ada pada LCS. Berikut ini dijelaskan secara singkat beberapa karakteristik utama yang perlu diperhatikan dalam memilih LCS.

1) Rentang Pengukuran dan Limit of Detection (LOD)

Rentang pengukuran menunjukkan kemampuan LCS mengukur konsentrasi gas atau partikel udara dalam batas tertentu. Sebagaimana disajikan dalam Tabel 3.2, rentang pengukuran terdiri atas level konsentrasi terendah dan level konsentrasi tertinggi. Pengguna sebaiknya memperhatikan aspek ini karena berkaitan dengan pemenuhan kebutuhan pengukuran. LCS yang dipilih sebaiknya mampu mendeteksi konsentrasi yang umum ditemukan di udara ambien. Dengan demikian, hasil pengukuran dapat memenuhi tujuan pemantauan. Rentang pengukuran dapat diketahui melalui lembar data (*datasheet*) yang disediakan oleh produsen. Selain itu, penting bagi pengguna untuk memperhatikan batas deteksi atau LOD dari sebuah LCS. LOD menentukan kemampuan alat dalam mendeteksi konsentrasi terendah yang mungkin dijumpai di lokasi pengambilan sampel. Informasi mengenai LOD dapat diperoleh dengan menanyakan spesifikasi ini kepada produsen atau melalui evaluasi kinerja agar LCS yang dipilih memenuhi kebutuhan pengukuran.

2) Keakuratan

Hasil pengukuran akan bermakna dan dapat ditindaklanjuti apabila data yang dihasilkan memiliki tingkat keakuratan yang baik. Keakuratan menunjukkan kemampuan LCS menghasilkan data yang sesuai dengan hasil pengukuran instrumen rujukan. Dalam evaluasi kinerja LCS, keakuratan umumnya ditinjau berdasarkan presisi dan

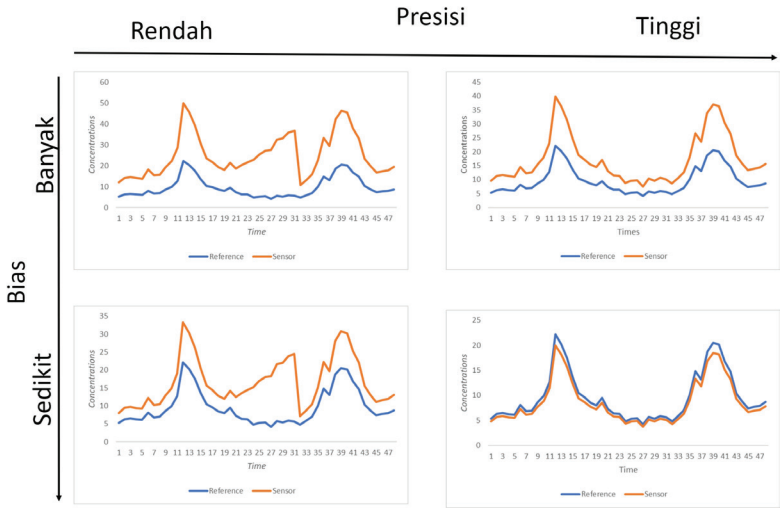
Buku ini tidak diperjualbelikan

bias. Menurut USEPA (Clements et al. 2022), presisi menunjukkan kemampuan LCS menghasilkan hasil pengukuran yang konsisten pada kondisi yang sama, misalnya pada konsentrasi dan kondisi meteorologi yang sama. Sebaliknya, bias mengacu pada kesalahan atau galat yang terjadi selama proses pengukuran. Sebagai contoh, hasil pengukuran LCS dapat lebih tinggi atau lebih rendah daripada konsentrasi yang sebenarnya.

Gambar 6.3 mengilustrasikan contoh keakuratan, presisi, dan bias data hasil pengukuran LCS ketika dibandingkan dengan instrumen rujukan. Panel kiri atas pada Gambar 6.3 memperlihatkan keakurasian data konsentrasi O_3 pada kondisi bias banyak dengan presisi yang rendah, sedangkan untuk panel kanan atas memperlihatkan kondisi bias banyak dengan kondisi presisi yang tinggi. Untuk kondisi ideal yang di dapat didalam sebuah pengukuran adalah yang diperlihatkan pada panel kanan bawah dari Gambar 6.3 dimana hasil pengukuran konsentrasi O_3 memiliki kondisi bias sedikit dan presisi yang tinggi.

Pengguna disarankan memeriksa akurasi, presisi, dan bias LCS melalui spesifikasi yang disediakan oleh produsen. Evaluasi kinerja secara mandiri juga perlu dilakukan apabila memungkinkan. Evaluasi dapat dilakukan melalui pengujian di laboratorium atau kolokasi. Kegiatan ini bertujuan memastikan keandalan alat pada kondisi penggunaan yang spesifik. Hasilnya dapat digunakan sebagai dasar untuk menilai kesesuaian kinerja LCS di lokasi pengukuran.

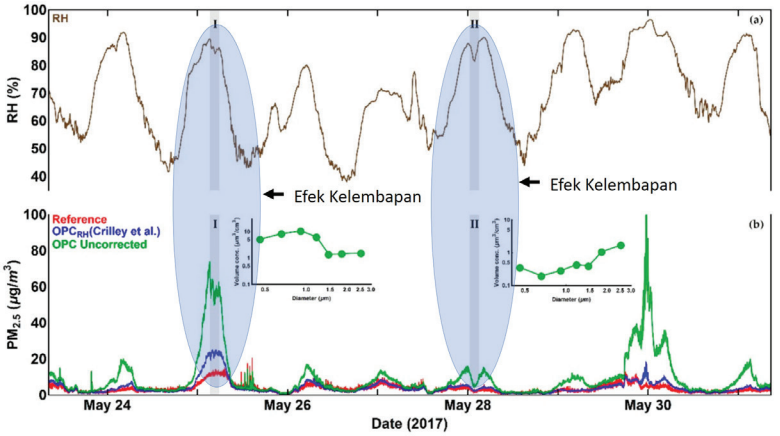
Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 6.3 Contoh Ilustrasi Akurasi, Presisi dan Bias dari Sebuah LCS Ketika Mengukur Konsentrasi O_3

Akurasi LCS tidak selalu tetap, tetapi dapat menurun seiring dengan penurunan kinerja sensor. Faktor lingkungan, seperti perubahan suhu dan kelembapan, serta proses penuaan pada komponen LCS, merupakan penyebab utama penurunan kinerja ini. Sensitivitas silang terhadap polutan lain juga dapat memengaruhi hasil pengukuran dengan meningkatkan bias dan menurunkan presisi, sehingga akurasi pengukuran ikut menurun. Oleh karena itu, pemeliharaan dan kalibrasi berkala serta koreksi data sangat penting untuk menjaga akurasi LCS. Gambar 6.4 menunjukkan contoh bagaimana kelembapan dapat memengaruhi pengukuran partikel udara.

Buku ini tidak diperjualbelikan

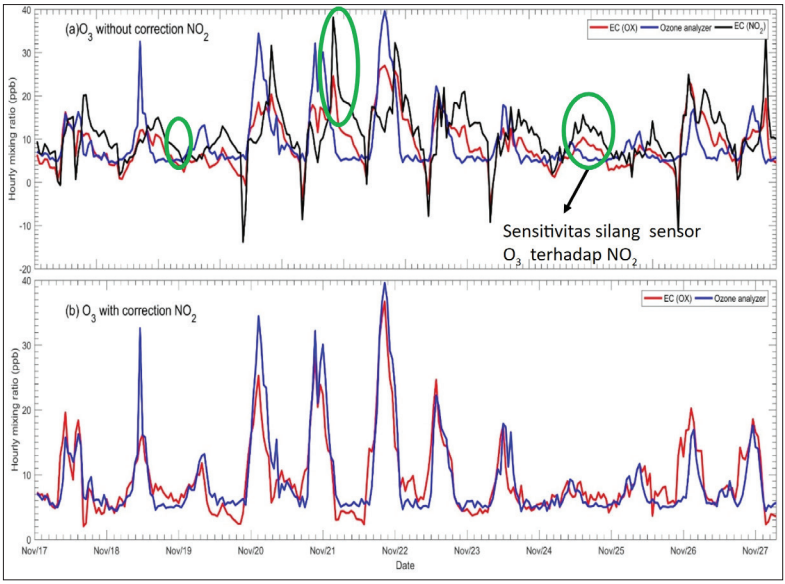


Sumber: Antonio (2018)

Gambar 6.4 Contoh pengaruh kelembapan terhadap akurasi pengukuran PM menggunakan LCS.

Pada periode dengan kelembapan relatif (RH) yang tinggi, hasil pengukuran LCS tanpa koreksi (garis hijau) menyimpang jauh dari instrumen rujukan, sedangkan hasil setelah koreksi menjadi lebih mendekati nilai rujukan. Selain faktor lingkungan, sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) juga merupakan faktor yang dapat menurunkan akurasi LCS. Seperti dijelaskan pada Bab III, LCS gas sering kali mendeteksi lebih dari satu jenis polutan karena memiliki selektivitas yang rendah (*low selectivity*). Akibatnya, konsentrasi yang terukur belum tentu merupakan konsentrasi aktual dari polutan target. Pengguna disarankan memeriksa informasi sensitivitas silang pada spesifikasi teknis atau mengonfirmasikannya kepada produsen agar memahami sejauh mana hasil pengukuran dapat dipengaruhi oleh keberadaan polutan lain. Gambar 6.5 menunjukkan contoh sensitivitas silang pada sensor LCS ketika mengukur konsentrasi O_3.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: (Alhasa 2020)

Gambar 6.5 Contoh Ilustrasi Sensitivitas Silang Pada LCS Gas Sensor Ketika Mengukur Konsentrasi O_3

Di sisi lain, data yang dihasilkan LCS sering kali mengalami fluktuasi acak (*noisy*), yaitu perubahan nilai yang terjadi secara cepat dari satu titik data ke titik berikutnya. Kondisi ini dapat terjadi akibat gangguan kelistrikan pada rangkaian elektronik sehingga sinyal keluaran sensor menjadi tidak stabil. Salah satu cara untuk mengurangi *noise* pada data ialah menggunakan metode perataan (*moving average*). Sebagai contoh, apabila data direkam setiap 1 menit, hasil pengukuran dapat dirata-ratakan setiap 30 titik data untuk memperoleh nilai rata-rata 30 menit. Demikian pula, rata-rata 60 titik data menghasilkan nilai rata-rata selama 1 jam.

3) Response Time

Faktor lain yang memengaruhi pemilihan LCS ialah waktu respons (*response time*). Pada prinsipnya, waktu respons menunjukkan seberapa cepat LCS mendeteksi perubahan konsentrasi pencemar.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Nilainya bergantung pada elemen sensor dan prinsip kerjanya. Informasi mengenai waktu respons dapat diperoleh dari produsen atau melalui *datasheet* sensor. Pengguna juga dapat mengevaluasi waktu respons LCS untuk mengetahui nilai aktualnya. Prosedur evaluasi waktu respons dijelaskan pada Bab IV.

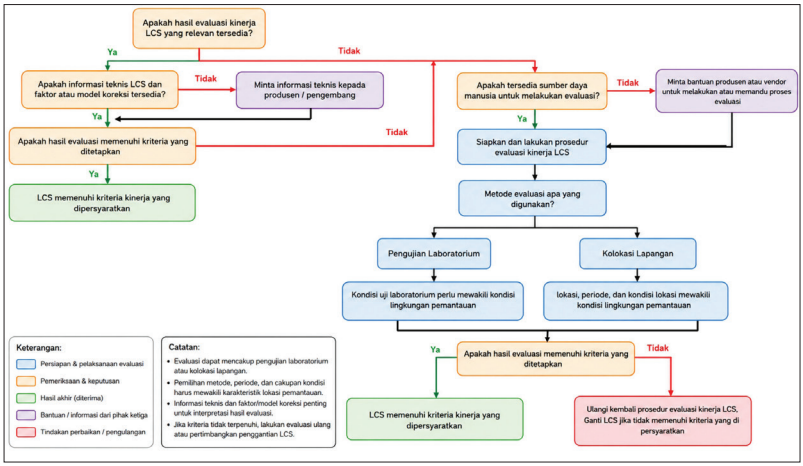
4) Kinerja Sensor

Faktor berikutnya yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan LCS ialah hasil evaluasi kinerja sensor. Gambar 6.6 menunjukkan alur evaluasi kinerja LCS yang dapat digunakan sebagai panduan dalam memilih sensor yang sesuai.Tahap awal dimulai dengan memeriksa apakah hasil evaluasi kinerja LCS telah tersedia. Apabila hasil evaluasi tersedia, langkah berikutnya ialah menilai kesesuaian prosedur evaluasi dengan kriteria yang diperlukan. Selain itu, perlu dipastikan bahwa informasi mengenai parameter pengoperasian yang relevan, seperti karakteristik lingkungan dan metode pengambilan sampel, tersedia secara memadai. Apabila prosedur atau informasi yang tersedia belum memadai, pengguna dapat meminta informasi tambahan kepada produsen atau penyedia sensor.

Selanjutnya, hasil tersebut ditelaah kembali untuk menentukan kesesuaiannya dengan persyaratan pemantauan. Jika hasil pengujian awal tidak memenuhi kriteria yang diinginkan, metode evaluasi tambahan, seperti prosedur *co-location*, dapat diterapkan untuk membandingkan hasil antara LCS dan instrumen rujukan. Setelah prosedur tambahan dilakukan, kinerja LCS dianalisis kembali untuk memastikan kesesuaiannya.

Apabila hasilnya memenuhi persyaratan, LCS tersebut dapat dinyatakan sesuai untuk kegiatan pemantauan. Namun, jika kinerja yang diharapkan tidak terpenuhi, opsi untuk mengganti sensor dengan LCS lain yang lebih sesuai dapat dipertimbangkan. Pendekatan ini membantu pengguna memperoleh informasi yang memadai mengenai kinerja sensor sehingga dapat memilih LCS yang paling sesuai dengan tujuan pemantauan kualitas udara.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 6.*6* Alur Diagram Pemilihan LCS Berdasarkan Evaluasi Kinerja

c. Kelengkapan Pendukung

Dalam memilih sistem pemantauan kualitas udara berbasis LCS, kelengkapan pendukung berperan penting untuk memastikan sistem bekerja secara optimal. Sistem LCS dirancang untuk memudahkan pemantauan polusi udara. Perangkat ini dapat digunakan oleh berbagai kalangan, termasuk masyarakat umum, untuk mendukung upaya peningkatan kualitas udara. Agar pemantauan dapat dilakukan dengan mudah dan menghasilkan data yang akurat, pengguna perlu mempertimbangkan beberapa aspek pendukung. Aspek tersebut meliputi kemudahan penggunaan, ketersediaan sumber daya listrik, dan akses terhadap data hasil pemantauan. Di antaranya ialah kemudahan pemasangan dan pemantauan kinerja sistem, ketersediaan sumber daya listrik, serta akses yang fleksibel terhadap data hasil pemantauan.

Selain itu, daya tahan perangkat terhadap berbagai kondisi lingkungan dan kualitas *enclosure* yang melindungi komponen LCS juga perlu dipertimbangkan. Biaya operasional, seperti biaya kalibrasi dan penyimpanan data, juga harus diperhitungkan. Pengguna perlu

Buku ini tidak diperjualbelikan

memahami kelengkapan pendukung sistem LCS. Pemahaman tersebut membantu pengguna memilih dan mengoperasikan sistem yang andal sesuai dengan kebutuhan pemantauan kualitas udara. Bagian berikut menjelaskan lebih rinci aspek-aspek tersebut, meliputi kemudahan penggunaan, sumber daya listrik, akses data, dan biaya operasional.

1) Mudah digunakan

Sistem LCS dikembangkan untuk memantau kualitas udara dengan melibatkan partisipasi masyarakat yang lebih luas. Pendekatan ini memungkinkan masyarakat berpartisipasi dalam mengukur dan memahami kondisi kualitas udara di lingkungannya. Agar LCS dapat digunakan secara optimal oleh berbagai kalangan, kemudahan penggunaan perlu menjadi perhatian. Aspek ini meliputi kemudahan instalasi, pemantauan data, dan ketersediaan indikator kinerja perangkat. Kemudahan penggunaan ini bertujuan agar pengguna dapat mengoperasikan perangkat secara efektif tanpa memerlukan bantuan teknis yang rumit.

Kemudahan dalam pemasangan menjadi salah satu faktor penting dalam memilih sistem LCS yang tepat. Sistem ini harus dapat dipasang dengan mudah di lapangan, bahkan oleh pengguna yang mungkin tidak memiliki latar belakang teknis. Instalasi yang sederhana memungkinkan pengguna memasang perangkat di berbagai lokasi untuk pemantauan kualitas udara. Contohnya, kawasan padat lalu lintas, kawasan industri, atau daerah permukiman. Sistem yang mudah dipasang memberikan fleksibilitas dalam penempatan perangkat dan meningkatkan efisiensi pengoperasian. Dengan demikian, data yang diperoleh dapat mencakup area yang lebih luas dan beragam.

Selain itu, kemampuan untuk memeriksa rekaman data secara langsung juga menjadi pertimbangan utama. Sistem LCS harus memungkinkan pengguna memastikan bahwa data kualitas udara yang diukur tetap terekam dan tersimpan dengan baik. Fitur ini sangat penting karena data yang dikumpulkan harus berkesinambungan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Kontinuitas data diperlukan untuk menganalisis tren kualitas udara dalam jangka panjang. Kemudahan akses terhadap data membantu pengguna memantau kualitas udara secara berkelanjutan. Informasi tersebut juga dapat menjadi dasar dalam mengambil tindakan yang diperlukan serta mendukung upaya peningkatan kualitas lingkungan hidup.

Aspek lain yang tidak kalah penting ialah keberadaan indikator kinerja pada sistem LCS. Indikator ini berfungsi sebagai tanda bahwa perangkat tetap beroperasi sebagaimana mestinya dan tidak mengalami kegagalan fungsi. Indikator ini sangat penting, terutama dalam kegiatan pemantauan mandiri oleh masyarakat. Dengan adanya tanda yang jelas, pengguna dapat segera mengetahui apabila terjadi gangguan pada perangkat dan melakukan tindakan perbaikan lebih awal. Indikator kinerja akan meningkatkan keandalan sistem LCS. Dengan demikian, masyarakat dapat berpartisipasi secara aktif dan berkesinambungan dalam pemantauan kualitas udara.

2) Sumber Daya Listrik

Ketersediaan sumber daya listrik merupakan salah satu faktor penting dalam pemilihan dan pengoperasian sistem LCS. Tidak semua perangkat mendukung beragam pilihan sumber daya listrik. Keterbatasan pilihan sumber daya dapat memengaruhi fleksibilitas dan keberlanjutan operasional perangkat. Dampaknya akan lebih terasa ketika perangkat dipasang di lokasi yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik konvensional. Oleh karena itu, pemilihan sumber daya listrik perlu disesuaikan dengan rencana penggunaan LCS sejak awal. Pertimbangan tersebut mencakup jenis lingkungan tempat perangkat dipasang serta kebutuhan pemantauan jangka panjang.

Panel surya memanfaatkan energi matahari sebagai sumber daya listrik. Teknologi ini banyak digunakan di wilayah dengan intensitas sinar matahari yang tinggi. Panel surya yang dipadukan dengan baterai memungkinkan perangkat beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik utama. Baterai menyimpan energi listrik saat kondisi cuaca cerah sehingga perangkat tetap dapat

Buku ini tidak diperjualbelikan

beroperasi pada malam hari atau ketika cuaca mendung. Dengan demikian, panel surya menawarkan fleksibilitas yang tinggi dalam pengoperasian perangkat. Teknologi ini sangat sesuai untuk lokasi terpencil atau yang jauh dari jaringan listrik konvensional.

Sebagai alternatif, baterai dapat digunakan sebagai sumber daya listrik yang praktis. Pilihan ini terutama sesuai untuk pengoperasian perangkat dalam jangka waktu terbatas atau di lokasi yang membutuhkan mobilitas tinggi. Meskipun durasi pengoperasiannya terbatas tanpa pengisian ulang, baterai portabel memungkinkan perangkat dipindahkan dengan mudah dari satu lokasi ke lokasi lain. Perangkat juga tidak bergantung pada jaringan listrik. Namun, pilihan ini kurang sesuai untuk pemantauan jangka panjang karena masa pengoperasian baterai terbatas sehingga perlu sering diganti atau diisi ulang..

Selain itu, pasokan listrik dari PLN dapat menjadi pilihan yang stabil. Opsi ini terutama sesuai untuk instalasi permanen di daerah perkotaan atau lokasi yang memiliki akses mudah ke jaringan listrik. Jaringan listrik utama menyediakan pasokan daya yang andal sehingga perangkat LCS dapat beroperasi secara berkesinambungan selama periode pemantauan. Namun, penggunaannya memerlukan infrastruktur yang memadai dan dapat menambah biaya instalasi serta pemeliharaan.

Secara keseluruhan, pemilihan sumber daya listrik yang tepat bagi sistem LCS perlu mempertimbangkan faktor lokasi, kebutuhan durasi pemantauan, serta keterbatasan infrastruktur. Pemilihan sumber daya listrik yang sesuai akan mendukung keberlanjutan pengoperasian LCS serta menghasilkan data pemantauan kualitas udara yang akurat dan berkesinambungan.

3) Akses dan Pengolahan Data

Hal penting lainnya yang perlu diperhatikan ialah cara mengakses data hasil pengukuran. Data yang dihasilkan sistem LCS umumnya terbagi menjadi dua kategori, yaitu data mentah (*raw data*) dan data akhir (*final data*). Kedua data tersebut biasanya disimpan secara

Buku ini tidak diperjualbelikan

internal di dalam sebuah media penyimpanan. Produsen umumnya menyediakan beberapa opsi bagi pengguna untuk mengakses data dari sistem LCS. Berikut beberapa opsi yang diberikan untuk mengakses data.

a. Pengunduhan manual data dilakukan dengan memindahkan data dari sistem LCS ke media penyimpanan fisik, seperti flash disk, hard disk, atau langsung ke perangkat komputer.
b. Pengunduhan data secara remote dapat dilakukan menggunakan fasilitas *Application Programming Interface* (API) untuk kemudian disimpan pada media penyimpanan, seperti server, cloud, atau komputer.
c. Data juga dapat ditransmisikan secara langsung ke media penyimpanan, seperti server atau *cloud*, melalui jaringan komunikasi yang didukung sistem LCS, misalnya jaringan seluler, Wi-Fi, atau LoRaWAN.
d. Setelah data berhasil diakses, pengguna perlu memahami format data yang diperoleh, cara menganalisisnya, serta cara memvisualisasikannya.

Selanjutnya, pengguna juga perlu memperhatikan pengolahan data yang dilakukan di dalam sistem LCS. Pada dasarnya, produsen mengonversi sinyal yang terekam menjadi nilai konsentrasi menggunakan persamaan atau model matematis. Pengguna sangat disarankan memahami proses konversi tersebut. Hal ini penting karena produsen umumnya tidak mempublikasikan persamaan atau model matematis yang digunakan dalam proses konversi.

4) Daya Tahan

Dalam menggunakan LCS sebagai alat pemantauan kualitas udara, pengguna perlu memerhatikan daya tahan sistem yang akan digunakan. Sistem LCS harus mampu beroperasi secara terus-menerus dalam berbagai kondisi lingkungan. Perangkat juga harus tahan terhadap perubahan cuaca, seperti panas, dingin, angin, dan kelembapan, serta tetap berfungsi dengan baik. Selain itu, sistem

Buku ini tidak diperjualbelikan

LCS harus tahan terhadap guncangan atau benturan selama proses pengiriman maupun pemindahan. Ketahanan ini penting untuk melindungi komponen elektronik yang umumnya rentan terhadap guncangan.

Untuk pemantauan kualitas udara di luar ruangan, disarankan memilih sistem LCS yang memang dirancang untuk penggunaan luar ruangan. Spesifikasi ini dapat diperiksa pada *datasheet* atau dikonfirmasikan langsung dengan produsen, terutama terkait ketahanan *enclosure* untuk penggunaan di luar ruangan.

5) *Enclosure*

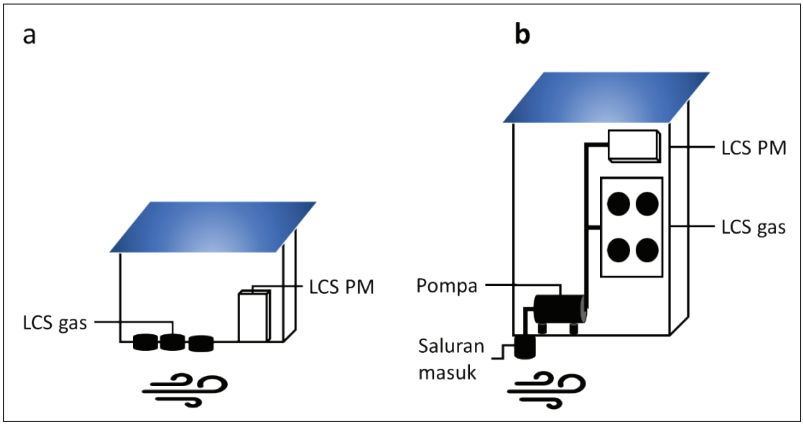
Enclosure merupakan wadah yang menampung semua komponen pendukung sistem LCS, seperti *data logger,* sistem manajemen daya, sistem komunikasi, dan sensor. *Enclosure* harus memiliki ketahanan yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan. Pada umumnya, *enclosure* dibuat dari plastik atau *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dan dilengkapi pelindung (*shield*) untuk melindungi perangkat dari pengaruh cuaca (Yatkin et al. 2022).

Selain itu, perlu dipastikan bahwa aliran udara dari luar dapat mencapai sensor di dalam *enclosure*. Posisi sensor di dalam *enclosure* dapat memengaruhi hasil pembacaan sensor. Hingga saat ini, belum ada protokol baku mengenai penempatan sensor di dalam *enclosure*. Namun, para peneliti menekankan bahwa sensor harus terpapar udara luar, bukan udara yang terperangkap di dalam *enclosure* maupun di dalam ruangan. Gambar 6.7 memperlihatkan contoh peletakan sensor di dalam enclosure. Berdasarkan Gambar 6.7, jika sensor ditempatkan di bagian tengah enclosure, diperlukan pompa untuk mengalirkan udara luar ke dalam *enclosure*. Tanpa pompa, sensor cenderung mengukur udara yang berada di dalam *enclosure*, bukan udara ambien di luar *enclosure*.

Pada Gambar 6.7a, sensor diposisikan di bagian bawah enclosure yang telah diberi lubang sehingga sensor dapat terpapar langsung oleh udara dari lingkungan luar. Sebaliknya, pada Gambar 6.7(b), sensor ditempatkan di bagian tengah *enclosure*. Oleh karena

Buku ini tidak diperjualbelikan

itu, diperlukan pompa atau kipas untuk mengalirkan udara luar ke sensor agar pengukuran tetap merepresentasikan kondisi udara ambien.



Gambar 6.7 Ilustrasi peletakan sensor di dalam enclosure: (a) bagian bawah; (b) di bagian tengah *enclosure*.

6) Biaya

Meskipun LCS dikenal sebagai solusi pemantauan kualitas udara yang lebih ekonomis, pengguna tetap perlu mempersiapkan beberapa komponen biaya yang menyertai penerapannya. Selain itu, fitur tambahan seperti konektivitas real-time, daya tahan perangkat, dan tingkat akurasi sensor juga memengaruhi harga.

Selain biaya pengadaan, terdapat beberapa biaya operasional yang penting diperhitungkan agar kinerja LCS tetap optimal. Proses kalibrasi, misalnya, merupakan bagian penting dalam menjaga akurasi data yang dihasilkan. Apabila pengguna tidak memiliki instrumen rujukan, biaya pembelian, penyewaan, atau akses terhadap instrumen tersebut perlu dipertimbangkan. Hal ini penting agar kalibrasi dapat dilakukan sesuai dengan standar yang berlaku. Biaya pemeliharaan dan penggantian suku cadang juga menjadi faktor penting. Perawatan berkala diperlukan untuk menjaga kinerja sistem LCS yang digunakan dalam jangka waktu lama.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Di samping itu, manajemen data menjadi aspek krusial. Pengguna perlu menyiapkan tempat penyimpanan data dan memastikan akses yang mudah ke data historis untuk analisis lebih lanjut. Pada tahap akhir, data yang dihasilkan LCS perlu dianalisis secara cermat. Kualitas pemantauan sangat bergantung pada kemampuan dalam menginterpretasikan data tersebut. Biaya analisis data, baik untuk perangkat lunak maupun tenaga yang mengelolanya, juga perlu dipertimbangkan. Analisis yang baik akan meningkatkan validitas hasil pemantauan dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat.

2. Survei Lokasi

Tahap perencanaan berikutnya ialah melakukan survei lokasi untuk menentukan penempatan LCS. Tujuan utama survei lokasi ialah mengetahui kondisi lapangan. Kondisi tersebut meliputi ketersediaan sumber daya listrik, fasilitas pemasangan, serta aspek keamanan dan keselamatan. Survei ini penting untuk memastikan bahwa lokasi yang dipilih dapat mendukung pengoperasian LCS secara optimal. Apabila menggunakan panel surya sebagai sumber daya listrik, penempatannya perlu direncanakan dengan baik. Hal ini penting agar kapasitas pengisian daya tetap mencukupi, bahkan ketika intensitas sinar matahari rendah. Pemanfaatan tenaga surya meningkatkan fleksibilitas dalam menentukan lokasi perangkat pengukuran. Dengan demikian, perangkat dapat dipasang di lokasi yang tidak terjangkau jaringan listrik konvensional.

Aspek penting lainnya dari survei lokasi ialah pemahaman awal mengenai karakteristik area penempatan perangkat LCS. Pemahaman ini memungkinkan penempatan sensor sesuai dengan tujuan pengukuran yang spesifik. Jika pengukuran bertujuan memantau karakteristik sumber polusi udara yang telah teridentifikasi, perangkat LCS ditempatkan pada lintasan arah angin. Lokasi tersebut dipilih agar udara yang berasal dari sumber pencemaran dapat terukur. Sebaliknya, apabila tujuan pengukuran ialah menilai

Buku ini tidak diperjualbelikan

paparan pencemaran terhadap populasi, lokasi penempatan perangkat ditentukan berdasarkan karakteristik sosial dan ekonomi wilayah. Lokasi tersebut, misalnya kawasan permukiman padat, area perkantoran, atau kawasan dengan tingkat sosial-ekonomi tinggi. Perangkat juga dapat ditempatkan di lokasi yang digunakan oleh kelompok rentan, seperti sekolah, taman bermain, dan panti lansia. Selain itu, perangkat dapat ditempatkan di ruang publik yang ramai, seperti taman kota. Penempatan tersebut bertujuan memperoleh data yang lebih representatif mengenai paparan pencemaran pada berbagai kelompok masyarakat (Clements et al. 2022).

Apabila tujuan penempatan LCS ialah memahami karakteristik pencemaran udara suatu kawasan secara menyeluruh, perangkat perlu ditempatkan pada beberapa lokasi. Lokasi tersebut harus mewakili karakteristik wilayah yang dipantau. Lokasi tersebut dapat mencakup kawasan industri, permukiman, area komersial, kawasan lalu lintas, dan area latar (*background*) yang bebas dari sumber pencemaran langsung. Survei lokasi juga bertujuan untuk memastikan ketersediaan data pendukung yang krusial bagi analisis dan proses kalibrasi sistem LCS. Data pendukung ini meliputi lokasi SPKU sebagai instrumen rujukan untuk validasi hasil pengukuran. Data meteorologi, seperti arah dan kecepatan angin, suhu, serta kelembapan udara, juga diperlukan karena memengaruhi distribusi polutan. Selain itu, data tambahan—seperti data penggunaan lahan dan pola aktivitas di sekitar lokasi—juga memainkan peran penting dalam meningkatkan akurasi analisis. Ketersediaan data pendukung tersebut akan meningkatkan kualitas proses kalibrasi dan interpretasi hasil pengukuran LCS. Dengan demikian, karakteristik kualitas udara di lokasi pemantauan dapat dipahami secara lebih komprehensif dan akurat.

C. Penyiapan Kegiatan Pemantauan

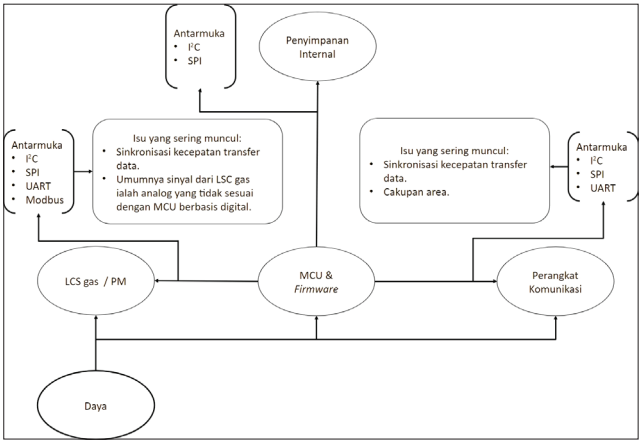
Setelah tahap perencanaan selesai, langkah berikutnya ialah menyiapkan kegiatan pemantauan. Tahap ini meliputi penyiapan

Buku ini tidak diperjualbelikan

perangkat keras, penentuan lokasi pemasangan dan instalasi sistem LCS, serta penyusunan prosedur kolokasi untuk kalibrasi lapangan.

1. Perangkat Keras Sistem LCS

Secara umum, pengguna LCS dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori, yaitu pengembang sistem LCS dan pengguna sistem LCS. Pengguna dalam kategori pertama umumnya berasal dari kalangan akademisi atau peneliti. Mereka merancang sistem LCS dari awal serta mengembangkan dan mengintegrasikan komponen pendukung secara mandiri. Sistem LCS yang digunakan oleh kelompok ini sering kali belum terintegrasi secara penuh dan dirancang untuk keperluan penelitian atau inovasi tertentu. Sebaliknya, pengguna dalam kategori kedua hanya menerapkan sistem LCS yang sudah terintegrasi dengan sistem pendukungnya. Kelompok pengguna ini biasanya terdiri atas komunitas, organisasi, atau agensi yang memiliki perhatian khusus terhadap pemantauan kualitas udara dan cenderung menggunakan perangkat yang siap pakai. Pada bagian ini, akan dijelaskan mengenai desain sistem LCS yang umum digunakan saat ini. Gambar 6.8 menunjukkan struktur dasar perangkat keras sistem LCS yang terdiri atas lima komponen utama.



Gambar 6.8 Struktur Perangkat Keras LCS

Buku ini tidak diperjualbelikan

a. Integrasi Perangkat LCS dengan MCU

LCS tidak dapat berfungsi secara mandiri tanpa dukungan perangkat tambahan yang memungkinkan data dapat diakses dan diolah dengan benar. Oleh karena itu, integrasi antara LCS dan *Microcontroller Unit* (MCU) menjadi komponen penting dalam sistem pemantauan kualitas udara berbasis LCS. Proses integrasi ini diperlukan untuk mengonversi sinyal mentah yang dihasilkan oleh LCS menjadi data terukur dalam satuan konsentrasi, seperti ppb *(parts per billion)* atau ppm *(parts per million),* yang dapat langsung digunakan untuk analisis polutan. Tanpa konversi ini, sinyal keluaran LCS hanya berupa tegangan atau arus yang tidak memiliki arti dalam konteks pemantauan polusi udara.

Agar proses konversi dan komunikasi data antara LCS dan MCU berjalan dengan lancar, diperlukan perangkat antarmuka yang menghubungkan kedua perangkat ini. Produsen LCS umumnya melengkapi perangkatnya dengan antarmuka komunikasi standar, seperti *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Inter-Integrated Circuit* (I^2C), atau *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* (UART). Antarmuka ini memungkinkan transmisi data yang andal dan efisien antara LCS dan MCU. Data kemudian diproses dan disimpan dalam format yang dapat diakses oleh pengguna. (Alphasense Ltd 2019; Kirešová et al. 2023; Nova Fitness Co Ltd 2015; PLANTOWER 2016).

Namun, beberapa sensor gas maupun sensor lain, seperti sensor meteorologi, menghasilkan sinyal analog yang tidak dapat langsung diproses oleh MCU. Hal ini terjadi karena sebagian besar MCU menerima masukan berupa sinyal digital. Ketidaksesuaian jenis sinyal dapat menyebabkan data tidak dapat diproses dengan benar oleh MCU. Oleh karena itu, sensor yang menghasilkan sinyal analog umumnya memerlukan proses konversi menjadi sinyal digital sebelum dihubungkan ke MCU.

Proses konversi tersebut dilakukan menggunakan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) (Alhasa et al. 2018; Zimmerman et al.

Buku ini tidak diperjualbelikan

2018). Aspek lain yang perlu diperhatikan ialah kesesuaian protokol komunikasi antara LCS dan MCU. Parameter yang harus disesuaikan meliputi *baud rate*, panjang data (*data bits*), dan *stop bits*, khususnya pada komunikasi serial. Sinkronisasi parameter tersebut penting dilakukan karena ketidaksesuaian protokol komunikasi dapat menyebabkan kegagalan komunikasi maupun proses transfer data.

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi, berbagai papan rangkaian telah dikembangkan untuk mengintegrasikan MCU dengan perangkat lain. Perkembangan ini mempermudah proses integrasi dan meningkatkan kompatibilitas antara MCU dan LCS. Tabel 6.1 memperlihatkan daftar papan rangkaian yang banyak digunakan untuk pengembangkan sistem LCS sebagai perangkat pemantauan kualitas udara.

Tabel 6.1 Daftar Papan Rangkaian yang Umum Digunakan di Sistem LCS

Nama Papan	Konektivitas	Platform Pengembangan	Voltase yang Dibutuhkan	Sumber
ESP8266 & ESP32	Wi-Fi, *Bluetooth*	Arduino, MicroPython	3,3 V	Lai et al. 2019; Tagle 2020
Arduino	-	Arduino	5 V dan 3,3 V	Austin 2015; Barcelo-Ordinas et al. 2019; Kirešová et al. 2023; Lee et al. 2020
Raspberry Pi	Wi-Fi, Bluetooth	Python, Raspbian	5V	Alhasa et al., 2018; Crilley et al., 2018; H Hagan et al., 2018; Lai et al., 2019
ARM cortex	-	Arduino, micropython	3,3V	Alvear-Puertas et al. 2022; Arroyo et al. 2021; Camprodon et al. 2019

Buku ini tidak diperjualbelikan

b. Integrasi Perangkat MCU dengan Penyimpanan Data

Media penyimpanan merupakan salah satu komponen penting di dalam sistem LCS. Media penyimpanan berfungsi menyimpan data dan informasi hasil pengukuran LCS. Selain data hasil pengukuran, media penyimpanan juga menyimpan konfigurasi *firmware* sistem LCS. Umumnya, terdapat dua jenis media penyimpanan yang digunakan dalam sistem LCS, yaitu *microSD* dan *serial EEPROM* (Alhasa et al. 2018; Camprodon et al. 2019). Keduanya dapat digunakan untuk menyimpan data hasil pengukuran maupun konfigurasi *firmware* sistem LCS. Perbedaan keduanya terutama terletak pada kapasitas penyimpanan, kecepatan, antarmuka komunikasi, kebutuhan pin I/O, dan tegangan operasi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Perbandingan Media Penyimpanan Lokal

	MicroSD Card	Serial EEPROM
Kapasitas	2 GB–32 GB	128 bit – 2 Mbit
Kecepatan	2–10 MB/s	125–256 KB/s
Antarmuka	SDMMC, SPI	SPI, I^2C
Jumlah pin I/O	3–7 (SDMMC), 4 (SPI)	4 (SPI), 2 (I^2C)
Tegangan I/O	2,7–3,6 V	1,8–5,5 V
Gambar		

c. Integrasi Perangkat MCU dengan Perangkat Komunikasi

Pada era Industri 4.0, pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi makin penting, terutama untuk mendukung akses data secara jarak jauh. Oleh karena itu, sistem LCS perlu dilengkapi dengan fitur komunikasi untuk mendukung kebutuhan tersebut.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Beberapa jaringan komunikasi yang umum digunakan dalam pengembangan sistem LCS antara lain GSM, Wi-Fi, dan LAN. Jaringan tersebut mendukung pengiriman data dari perangkat LCS ke media penyimpanan, seperti server atau pusat data.

GSM merupakan salah satu jaringan komunikasi yang banyak digunakan karena memiliki cakupan yang lebih luas daripada WiFi dan LAN. Selain itu, jaringan GSM dapat langsung digunakan karena fasilitas infrastrukturnya telah disediakan oleh penyedia jasa telekomunikasi. Seiring dengan perkembangan teknologi IoT, berbagai alternatif jaringan juga dikembangkan khusus untuk pengiriman data berukuran kecil dengan konsumsi daya yang rendah.

Salah satu contohnya ialah *Low Power Radio* (LoRa) (Johnston et al. 2019). Teknologi ini dirancang untuk mengirimkan data berukuran kecil ke *gateway*, kemudian diteruskan ke pusat data. LoRa menawarkan konsumsi daya yang rendah, jangkauan komunikasi yang jauh, dan tingkat keamanan yang baik. Teknologi ini berpotensi mendukung efisiensi manajemen daya dan komunikasi jarak jauh pada sistem LCS. Selain LoRa, tersedia pula teknologi komunikasi yang dikembangkan untuk mendukung pengiriman data berukuran kecil dengan konsumsi daya rendah.

Teknologi jaringan komunikasi tersebut meliputi NB-IoT dan LTE-M. Teknologi ini sesuai untuk diterapkan pada sistem pemantauan kualitas udara berbasis LCS karena mendukung pengoperasian dengan konsumsi daya yang rendah. Dalam hal ini, pengguna dapat mengadopsi teknologi komunikasi yang telah dijelaskan di atas ke dalam perangkat sistem LCS berdasarkan aplikasi yang telah ditetapkan. Tabel 6.3 menyajikan berbagai jaringan komunikasi yang dapat diadopsi oleh perangkat sistem LCS.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 6.3 Jaringan Komunikasi yang Dapat Diadopsi pada Sistem LCS

Jenis Komunikasi	Kecepatan Data	Jangkauan	Frekuensi Operasi	Jenis Konsumsi Daya	Keuntungan	Kelemahan
GSM/4G LTE	kbps hingga Mbps	35 km (2G) 3-6 km (4G LTE)*	900/1800 MHz (2G) 800/900/ 1800/2100/ 2300 MHz (4G LTE)	Tinggi	Cakupan wilayah yang luas Infrastruktur sudah tersedia	Kecepatan bergantung pada kualitas jaringan. Kualitas komunikasi dipengaruhi oleh kestabilan jaringan. Memerlukan *power* yang cukup besar.
WiFi (802.11)	10 Mbps –100 Mbps	150 m	2,4/5 GHz	Tinggi	Kecepatan data tinggi	Jangkauan terbatas Rentan terhadap interferensi.
LoRa	0,3 – 50 kbps	10–20 km	169 MHz, 433 MHz, 868 MHz dan 915 MHz	Sangat Rendah	Daya rendah Jangkauan jauh Tingkat keamanan yang tinggi	Kecepatan data yang rendah Data transmisi terbatas Infrastruktur yang masih terbatas
NB-IoT & LTE-M	128 kbps 1 Mbps	< 10 km	Band 1 2.100 MHz, Band 3 1.800 MHz, Band 5 800 MHz, Band 8 900 MHz Band 31 450 MHz Band 40 2.300 MHz.	Rendah	Jangkauan jauh Daya rendah Biaya lebih murah daripada GSM/LTE Lebih aman	Kecepatan data yang rendah Data transmisi terbatas Infrastruktur yang masih terbatas

'* Nilai bersifat perkiraan dan bergantung pada kondisi jaringan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

d. Manajemen Sumber Daya

Manajemen sumber daya merupakan aspek kritis dalam perangkat sistem Low-Cost Sensor (LCS) yang berfungsi memantau lingkungan. Setiap perangkat dalam sistem LCS memiliki kebutuhan daya yang berbeda-beda sesuai dengan fungsi dan lama pengoperasiannya. Oleh karena itu, diperlukan konverter dan regulator tegangan untuk menyesuaikan tegangan dengan kebutuhan masing-masing perangkat (Camprodon et al. 2019). Konverter tersebut memastikan distribusi daya yang stabil dan optimal ke semua perangkat elektronik dalam sistem. Dengan demikian, sistem dapat beroperasi secara andal pada berbagai kondisi.

Pada tahap perencanaan, penting untuk memperhitungkan kebutuhan daya setiap perangkat LCS berdasarkan aplikasi pengukuran yang akan diterapkan. Selanjutnya, pengguna dapat memilih metode suplai daya yang paling sesuai, seperti adaptor listrik, baterai, atau tenaga surya. Pemilihan ini harus mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk lokasi pemasangan, durasi pengoperasian, dan kondisi lingkungan tempat perangkat ditempatkan.

Misalnya, adaptor listrik cocok untuk pengoperasian perangkat di lokasi tetap dengan akses mudah ke sumber daya listrik. Di sisi lain, baterai memberikan fleksibilitas penempatan yang lebih tinggi dan sangat sesuai untuk perangkat yang digunakan dalam aplikasi pemantauan bergerak. Namun, penggunaan baterai memiliki keterbatasan, yaitu kapasitas daya yang terbatas dan durasi pengoperasian yang relatif singkat tanpa pengisian ulang. Apabila kapasitas baterai habis, sistem LCS akan berhenti beroperasi sehingga proses pemantauan dapat terputus.

Untuk mengatasi keterbatasan daya pada sistem yang menggunakan baterai, pendekatan *energy harvesting* menjadi salah satu solusi. Pendekatan ini dapat memperpanjang umur operasional perangkat. *Energy harvesting* adalah teknik memanfaatkan energi dari lingkungan sekitar, seperti panas, getaran, atau sinar matahari. Energi tersebut kemudian dikonversi menjadi sumber daya tambahan

Buku ini tidak diperjualbelikan

untuk mengisi ulang baterai secara berkelanjutan (Stojčev et al. 2009). Kombinasi baterai dan *energy harvesting* memungkinkan perangkat LCS bekerja lebih lama tanpa gangguan, bahkan di area dengan akses terbatas terhadap suplai listrik langsung. Selain memperpanjang waktu operasi, *energy harvesting* juga mendukung efisiensi energi. Perangkat dapat beroperasi lebih lama sekaligus mengurangi frekuensi penggantian atau pengisian ulang baterai secara manual.

Penggunaan konverter dan regulator tegangan yang efektif, pemilihan suplai daya yang tepat, serta penerapan teknologi *energy harvesting* berperan penting dalam memastikan kelangsungan operasi sistem LCS. Upaya ini juga memungkinkan sistem LCS beradaptasi dengan berbagai kebutuhan aplikasi dan kondisi lingkungan yang bervariasi, sehingga meningkatkan efektivitas pemantauan dan efisiensi penggunaan sumber daya

e. Pemrograman Firmware

Firmware merupakan komponen penting yang perlu ada di sistem LCS. Tanpa adanya *firmware* yang disematkan ke dalam sistem pengontrol dalam hal ini MCU, sistem LCS tidak dapat beroperasi. *Firmware* bertugas mengatur, mengendalikan, dan menyinkronkan seluruh proses dalam sistem LCS. Secara umum, firmware sistem LCS terdiri atas lima fungsi utama. Fungsi tersebut meliputi

1) sinkronisasi dan konfigurasi seluruh komponen sistem,
2) pengumpulan data hasil pengukuran,
3) pemrosesan data,
4) penyimpanan dan transmisi data ke media penyimpanan, serta
5) pencatatan kejadian apabila terjadi kesalahan pada sistem.

Gambar 6.9 menunjukkan contoh struktur *firmware* yang umum digunakan dalam sistem LCS. Struktur ini mengilustrasikan beberapa modul penting yang bekerja secara terintegrasi untuk menjalankan fungsi pemantauan dan pengolahan data dalam sistem

Buku ini tidak diperjualbelikan

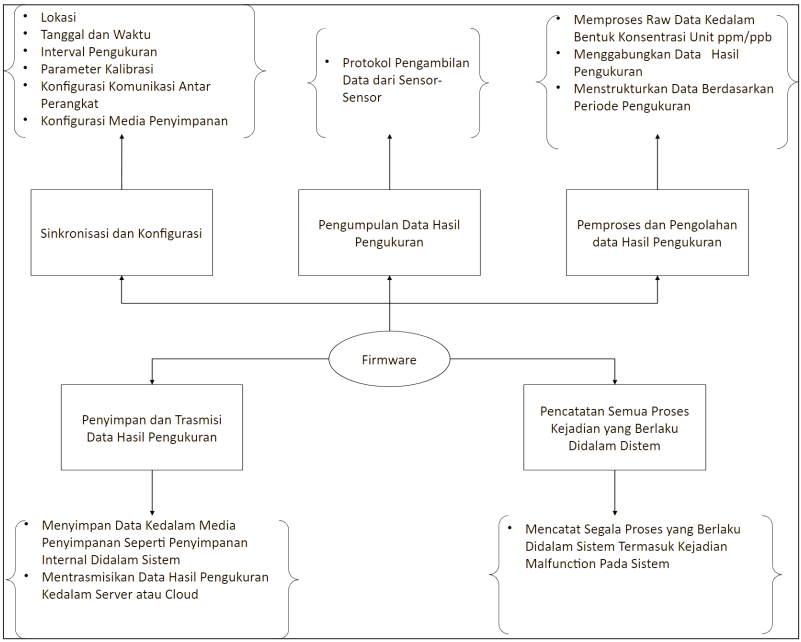
LCS. *Firmware* ini biasanya dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman tingkat tinggi, seperti C, C#, dan Python. Bahasa-bahasa tersebut mendukung fleksibilitas dan efisiensi dalam pengembangan serta pemeliharaan perangkat lunak sistem.

Pada struktur *firmware*, modul utama terdiri atas beberapa komponen, termasuk modul kontrol utama, modul antarmuka perangkat, modul pengolahan data, dan modul komunikasi. Modul kontrol utama berfungsi sebagai pusat pengendali yang mengkordinasikan aktivitas semua komponen sistem. Modul antarmuka perangkat menghubungkan sistem LCS dengan berbagai sensor dan aktuator. Modul ini memastikan data dari sensor diterima secara akurat dan diteruskan ke modul pengolahan data. Modul pengolahan data bertugas mengolah informasi yang diterima dari sensor. Modul ini menyaring dan mengekstraksi data yang relevan sebelum mengirimkannya ke modul komunikasi atau modul penyimpanan. Selain itu, struktur firmware juga mencakup modul komunikasi. Modul ini berperan mengirimkan data dari sistem LCS ke perangkat lain, seperti server atau aplikasi *cloud*, untuk penyimpanan dan analisis lebih lanjut. Modul komunikasi ini dapat mendukung berbagai protokol, termasuk Wi-Fi, Bluetooth, atau LoRa, tergantung pada kebutuhan dan desain sistem LCS.

Struktur modular pada *firmware* memungkinkan pengembangan sistem yang lebih fleksibel dan mudah diperbarui. Jika terjadi kesalahan atau gangguan fungsi pada sistem, pembaruan *firmware* dapat dilakukan secara berkala dengan versi terbaru yang telah diperbaiki dan ditingkatkan. Hal ini sangat penting dalam sistem pemantauan seperti LCS. Sistem tersebut memerlukan pembaruan untuk mengatasi potensi masalah, meningkatkan kompatibilitas perangkat, serta mengoptimalkan kinerja. Pembaruan *firmware* yang terjadwal memungkinkan sistem LCS terus beroperasi dengan tingkat keandalan yang tinggi. Pembaruan ini juga mendukung penyesuaian terhadap perkembangan kebutuhan pengguna dan teknologi.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Secara keseluruhan, struktur *firmware* dalam gambar 6.9 menunjukkan pentingnya pengelolaan modular pada perangkat lunak sistem LCS. Struktur modular memudahkan penyesuaian dan pembaruan sehingga mendukung akurasi, stabilitas, serta kelangsungan operasi pada sistem pemantauan lingkungan maupun aplikasi lainnya.



Gambar 6.9 Contoh Struktur *Firmware*

2. Pembangunan Pusat Data

Pembangunan pusat data (*data center*) diperlukan untuk mengimplementasikan sistem basis data yang mendukung penyimpanan dan pengelolaan data hasil pengukuran LCS. Pusat data tersebut dioperasikan pada komputer server yang dikonfigurasi sesuai kebutuhan sistem. Pusat data ini tidak hanya berfungsi sebagai tempat

Buku ini tidak diperjualbelikan

penyimpanan, tetapi juga sebagai pusat kendali untuk memastikan keandalan dan akurasi hasil pemantauan. Keamanan dan integritas data menjadi landasan utama dalam pembangunan pusat data. Oleh karena itu, data pemantauan harus dijamin bebas dari gangguan, manipulasi, maupun kehilangan informasi.

Pada komputer server, sistem basis data yang dirancang untuk perekaman data pemantauan dan penelusuran kembali perlu diinstal dan dikonfigurasi dengan tepat. Data dapat diakses melalui aplikasi web yang dikembangkan sesuai kebutuhan pengguna. Aplikasi tersebut dapat menyajikan data hasil pemantauan dan analisis secara real time maupun berkala. Aplikasi web ini memungkinkan pengguna melihat, mengunduh, dan menganalisis data kapan saja. Kemudahan tersebut mendukung pengambilan keputusan berbasis data secara cepat dan akurat.

Untuk mengurangi biaya investasi dan operasional, server pengelolaan data dapat dibangun menggunakan perangkat lunak sumber terbuka (*open-source software*), seperti MySQL, PostgreSQL, atau MongoDB. Penggunaan perangkat lunak tersebut meningkatkan fleksibilitas sekaligus mengurangi biaya lisensi. Pemilihan sistem basis data disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, baik yang berbasis relasional (MySQL, PostgreSQL) maupun NoSQL (MongoDB). Pendekatan ini dapat menjadi alternatif yang ekonomis bagi institusi yang memiliki kemampuan mengelola server sendiri.

Dengan perangkat lunak sumber terbuka, pusat data dapat dirancang dan dikelola secara mandiri. Pendekatan ini memberikan kendali penuh atas infrastruktur dan data yang tersimpan. Selain itu, penggunaan perangkat lunak sumber terbuka memungkinkan kustomisasi sesuai dengan kebutuhan spesifik. Perangkat lunak tersebut juga didukung oleh komunitas yang luas sehingga memudahkan pemeliharaan dan pengembangan sistem.

Secara keseluruhan, pembangunan pusat data dengan konfigurasi server yang optimal dan sistem basis data berbasis sumber terbuka merupakan solusi yang ekonomis, fleksibel, dan aman. Pendekatan

Buku ini tidak diperjualbelikan

ini mendukung pengelolaan data pada sistem pemantauan LCS. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penyimpanan dan akses data, tetapi juga mendukung pengembangan infrastruktur pemantauan yang lebih mandiri dan andal dalam jangka panjang.

3. Penempatan dan Instalasi LCS

Penempatan dan instalasi LCS harus mengacu pada tujuan serta perencanaan yang telah ditetapkan, khususnya hasil survei lokasi yang telah dilakukan. Berikut poin-poin yang perlu diperhatikan oleh pengguna ketika melakukan proses penempatan dan instalasi LCS:

a. Izin penempatan sistem LCS harus diperoleh dari pemilik atau pihak yang berwenang mengelola lokasi, bangunan, atau tiang yang akan digunakan.
b. Lokasi yang telah dipilih harus mewakili tujuan dan rencana pemantauan yang akan dilakukan.
c. Ketersediaan sumber daya listrik harus dipastikan, baik dari adaptor maupun jaringan listrik PLN.
d. Cakupan wilayah komunikasi yang mendukung sistem harus dipastikan, yang dapat berupa teknologi WiFi, GSM/4G LTE, LoRa, atau NB-IoT/LTE-M (rujukan lebih lanjut mengenai alternatif jaringan komunikasi terdapat pada Tabel 6.3).
e. Keselamatan dan keamanan sistem LCS dari kemungkinan kerusakan atau pencurian perlu diprioritaskan. Disarankan menggunakan enclosure atau kotak pelindung yang tidak menarik perhatian publik.
f. Penempatan sistem LCS sebaiknya di ruang terbuka dan tidak ditempatkan terlalu dekat dengan sumber emisi apabila tujuan pengukuran ialah memperoleh kualitas udara ambien yang representatif.

Buku ini tidak diperjualbelikan

g. Sistem LCS sebaiknya tidak ditempatkan di area bertegangan tinggi untuk menghindari gangguan elektromagnetik (*electromagnetic interference*—EMI).

h. Inlet sensor harus diposisikan pada ketinggian minimal 1,5 hingga 2 meter dari permukaan tanah.

i. Dokumentasi yang meliputi pencatatan nomor seri atau nomor identifikasi sistem LCS, tanggal pemasangan, posisi lokasi pemasangan sensor, kondisi lingkungan sekitar, dan tanggal pemeliharaan (seperti kolokasi atau kalibrasi) harus dibuat. Dokumentasi ini memudahkan proses penelusuran riwayat sensor dan interpretasi data hasil pengukuran.

Pengguna dapat merujuk pada dokumen alternatif yang diterbitkan oleh lembaga, seperti USEPA. Lembaga tersebut telah menetapkan kriteria penempatan untuk pemantauan kualitas udara ambien di luar ruangan. Pedoman tersebut dapat dijadikan rujukan oleh pengguna dalam hal penempatan sensor (US-EPA 2023b). Selain itu, pengguna juga dapat merujuk pada dokumen yang diterbitkan oleh South Coast Air Quality Management District melalui AQ-SPEC Program. Dokumen tersebut memuat panduan mengenai penempatan dan instalasi sistem LCS.

Setelah lokasi penempatan LCS ditetapkan, langkah berikutnya ialah menjalin kerja sama dengan pihak yang berwenang untuk memperoleh perizinan. Perizinan tersebut, misalnya, mencakup penggunaan tiang lampu atau akses ke jaringan listrik PLN. Selain itu, pengguna juga dapat melibatkan sukarelawan yang membantu proses pemantauan kualitas udara selama sistem LCS beroperasi.

4. Kolokasi Sebelum dan Setelah Pemasangan

Setiap perangkat pemantauan kualitas udara memerlukan pemeliharaan rutin atau berkala. Tujuannya ialah memastikan perangkat tetap berfungsi dengan baik serta menghasilkan data yang presisi dan akurat. Oleh karena itu, perlu melakukan kegiatan terjadwal untuk mengkalibrasi perangkat tersebut dengan mengujinya meng-

Buku ini tidak diperjualbelikan

gunakan standar konsentrasi yang diketahui. Hasil kalibrasi tersebut digunakan untuk menyetel ulang parameter-parameter yang diperlukan agar hasil pengukuran sesuai dengan konsentrasi yang diberikan. Prosedur ini perlu dilakukan berulang-ulang agar data yang dihasilkan oleh perangkat tetap akurat.

Sistem LCS juga memerlukan pemeliharaan secara berkala. Meskipun belum tersedia protokol baku untuk evaluasi kinerjanya, kegiatan kolokasi tetap perlu dilakukan guna memastikan kualitas data yang dihasilkan. Namun, metode kalibrasi yang diterapkan kepada LCS tidak sama seperti yang diterapkan kepada instrumen rujukan. Oleh karena itu, prosedur kolokasi dilakukan sebagai alternatif terhadap prosedur tersebut. Satu atau beberapa LCS ditempatkan di dekat instrumen rujukan. Hasil pengukurannya kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran instrumen rujukan. Kolokasi juga digunakan untuk memverifikasi hasil evaluasi dan kalibrasi laboratorium. Penjelasan lebih rinci mengenai prosedur tersebut terdapat pada Bab IV dan Bab V.

Tidak seperti instrumen rujukan, penyetelan parameter kalibrasi pada sistem LCS tidak dilakukan secara langsung pada perangkat. Sebaliknya, sistem LCS mengandalkan *raw data* untuk melakukan penyesuaian kalibrasi. Penyesuaian tersebut diharapkan dapat meningkatkan akurasi hasil pengukuran. Penyesuaian ini bukan merupakan manipulasi data, melainkan koreksi data menggunakan metode yang dijelaskan pada Bab V. Koreksi data dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak, seperti Microsoft Excel, R programming atau MATLAB.

Kegiatan kolokasi pada LCS memiliki sejumlah manfaat penting dalam meningkatkan kualitas data. Kolokasi memungkinkan identifikasi bias antara sensor LCS dan instrumen rujukan. Bias merupakan perbedaan hasil pengukuran antara kedua instrumen tersebut. Setelah diidentifikasi, bias tersebut dapat dikoreksi untuk meningkatkan akurasi hasil pengukuran. Selain itu, kolokasi memungkinkan pemantauan terhadap pergeseran sinyal atau pembacaan yang terjadi selama periode pengukuran. Kolokasi juga

Buku ini tidak diperjualbelikan

memungkinkan pengoreksian terhadap pergeseran tersebut. Dengan demikian, perubahan yang mengganggu konsistensi data dapat segera diperbaiki. Terakhir, kolokasi bermanfaat untuk menentukan tingkat akurasi data yang dihasilkan oleh LCS. Berdasarkan hasil kolokasi, metode pengoreksian yang tepat dapat diterapkan untuk meningkatkan akurasi pengukuran. Dengan demikian, hasil pengukuran LCS menjadi lebih mendekati hasil pengukuran instrumen rujukan.

Sebagai informasi, USEPA telah mengembangkan perangkat analisis data berbasis Microsoft Excel yang disebut *Macro Analysis Tools* (US-EPA 2023a). Perangkat tersebut dapat digunakan untuk menganalisis data hasil kolokasi. Prosedur kolokasi telah dibahas pada Bab IV dan Bab V, sedangkan berbagai metode koreksi data dijelaskan pada bagian kalibrasi. Pembaca dapat merujuk pada bab-bab tersebut untuk memperoleh penjelasan yang lebih rinci.

D. Pengumpulan Data

Setelah tujuan pengukuran ditetapkan, perencanaan disusun, dan sistem LCS disiapkan dengan baik, tahap berikutnya ialah pengumpulan data. Pengumpulan data tidak hanya mencakup pengoperasian sistem LCS dan pengambilan data hasil pengukuran, tetapi juga melibatkan beberapa kegiatan pendukung. Kegiatan tersebut meliputi pemeriksaan konektivitas jaringan, pemeliharaan, *quality assurance/quality control* (QA/QC), serta manajemen dan pelaporan data. Sistem LCS sebaiknya dikonfigurasi agar mengirimkan data ke pusat data yang dikelola di Indonesia.

1. Konektivitas Jaringan

Aspek penting yang harus dipersiapkan oleh pengguna dalam proses pengumpulan data ialah tersedianya konektivitas jaringan yang memadai. Untuk memungkinkan pengumpulan data secara otomatis, sistem LCS perlu dilengkapi dengan modem yang terhubung dengan jaringan komunikasi. Pengguna harus memastikan bahwa modem

Buku ini tidak diperjualbelikan

yang digunakan kompatibel dan dapat terhubung dengan jaringan di area pengambilan sampel.

Kendala yang sering dihadapi, terutama pada modem seluler, ialah kualitas jaringan yang rendah. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh keterbatasan cakupan layanan penyedia jaringan maupun akses kartu SIM ke jaringan komunikasi lokal. Jika sistem LCS menggunakan kartu SIM, pengguna perlu memastikan bahwa penyedia kartu tersebut memiliki kerja sama dengan operator jaringan di lokasi pengukuran.

Untuk memastikan cakupan jaringan komunikasi menjangkau kawasan pengambilan sampel, pengguna dapat memanfaatkan aplikasi web atau aplikasi pada *smartphone*. Aplikasi tersebut menyediakan peta cakupan dari setiap penyedia layanan komunikasi. Berikut beberapa contoh aplikasi yang tersenarai di dalam Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Daftar Aplikasi untuk Memeriksa Cakupan Jaringan Komunikasi

No	Platform/ Alat	Deskripsi	Tautan
1	OpenSignal	Aplikasi untuk memetakan kualitas jaringan dan cakupan sinyal yang tersedia pada platform Android dan iOS.	https://www.opensignal.com/networks
2	nPerf	Aplikasi pemetaan sinyal dari Prancis yang menyediakan informasi kualitas jaringan di berbagai lokasi, termasuk di Indonesia	https://www.nperf.com/en/map/ID/-/-./signal/
3	GSMA	Peta cakupan jaringan yang disediakan GSMA untuk menampilkan area layanan operator secara global.	https://www.gsma.com/coverage/

Buku ini tidak diperjualbelikan

4	GSMA IoT	Peta cakupan NB-IoT dan LTE-M yang menunjukkan penyebaran jaringan IoT oleh operator.	https://www.gsma.com/iot/deployment-map/

2. Pemeliharaan Sistem LCS

Pemeliharaan sistem LCS diperlukan untuk memastikan sistem berfungsi dengan baik dan menghasilkan data yang andal. Pemeliharaan dilakukan secara berkala, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Berikut beberapa poin kegiatan pemeliharaan yang dapat dilakukan oleh pengguna.

a. Pembersihan permukaan atau saluran udara dilakukan secara terjadwal untuk mencegah penumpukan debu maupun terbentuknya sarang serangga.

b. Pergantian Filter atau sensor diganti sesuai umur pakainya. .

c. Sensor diganti apabila sudah tidak berfungsi atau masa pemakaiannya telah habis.

d. Baterai diganti jika diperlukan guna mencegah kehilangan daya yang dapat mengganggu kinerja sistem.

e. Pembersihan permukaan panel surya dari debu dan kotoran dilakukan untuk menjaga efisiensi penyerapan energi matahari.

f. Kolokasi secara terjadwal dilaksanakan untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan memenuhi standar kualitas.

g. Peninjauan data dilakukan secara rutin guna mengidentifikasi pola yang tidak sesuai, pergeseran nilai dasar (*baseline*) data, penurunan kinerja sensor, atau malfungsi fitur dalam sistem LCS, seperti pengiriman data.

h. Kunjungan terjadwal ke lokasi penempatan sistem LCS dilakukan untuk memastikan bahwa tidak ada perubahan kondisi lingkungan yang dapat mengganggu kinerja LCS, misalnya akibat pertumbuhan pohon, perubahan struktur bangunan, atau adanya sumber polutan lokal yang baru.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pemeliharaan rutin terhadap peralatan sistem LCS sangat penting untuk menjaga kualitas dan konsistensi data yang dikumpulkan. Melalui pemeliharaan berkala, kesalahan dalam pengumpulan data dapat diminimalkan, sehingga hasil pemantauan menjadi lebih akurat dan andal. Selain itu, pemeliharaan yang baik juga membantu memperpanjang usia operasional sistem LCS, mengurangi frekuensi kerusakan, dan menurunkan biaya perbaikan. Dengan menjaga sistem dalam kondisi optimal, pengguna dapat memastikan bahwa LCS tetap berfungsi sesuai standar dan mampu memberikan data yang lebih mendekati hasil pengukuran instrumen rujukan.

3. Jaminan Kualitas dan Pengendalian Mutu

Selain proses kalibrasi, jaminan kualitas (*Quality Assurance* - QA) dan pengendalian mutu (*Quality Control* – QC) merupakan komponen penting yang perlu dipertimbangkan di dalam melakukan pengukuran konsentrasi pencemaran di udara. Aktivitas tersebut dilakukan untuk memastikan data yang dihasilkan dapat digunakan dan diandalkan. QA dan QC sering kali dianggap serupa karena keduanya bertujuan menjaga kualitas data. Namun, kedua konsep tersebut memiliki fungsi yang berbeda. Perbedaannya terletak pada bentuk kegiatannya, yaitu QA berfokus pada proses, sedangkan QC berorientasi pada pemeriksaan hasil akhir untuk memastikan kualitas yang diharapkan telah tercapai (Campbell et al. 2013).

Dalam konteks pemantauan kualitas udara, QA merupakan serangkaian aktivitas dan protokol yang bertujuan mencegah atau meminimalkan ketidakakuratan data yang dihasilkan oleh sistem LCS. Tujuan QA ialah memastikan bahwa sistem LCS berfungsi dengan baik dan menghasilkan data yang berkualitas. Adapun QC merupakan aktivitas yang dilakukan setelah data dihasilkan untuk menguji apakah data tersebut memenuhi standar yang telah ditetapkan. Dengan kata lain bahwa QA ialah kegiatan proaktif atau pencegahan untuk menghindari masalah, sedangkan QC ialah kegiatan untuk mengidentifikasi dan menandai data yang dianggap

Buku ini tidak diperjualbelikan

bermasalah setelah data tersebut dihasilkan. Data yang tidak memenuhi standar mutu atau tidak diketahui kualitasnya berpotensi menimbulkan kesalahan interpretasi dan pengambilan keputusan (Snyder et al. 2013).

a. Quality Assurance (QA)

QA merupakan suatu aktivitas yang bertujuan untuk memastikan data hasil pengukuran dari sistem peralatan LCS berguna dan dapat digunakan. Idealnya, data hasil pengukuran yang dihasilkan oleh sistem LCS ialah mendekati hasil pengukuran instrumen rujukan. Oleh karena itu, diperlukan pelaksanaan QA melalui penetapan tujuan, perencanaan, dan persiapan yang matang. Selain itu, terdapat beberapa kegiatan lain yang terkait dengan QA, antara lain sebagai berikut.

1) Perangkat keras pada sistem LCS harus dipastikan berfungsi dengan baik, dengan suplai daya yang memadai untuk menghindari kemungkinan kehilangan data.
2) Pemasangan sistem LCS dilakukan sesuai dengan kriteria penempatan yang telah ditetapkan. Penjelasan lebih lanjut mengenai kriteria penempatan dapat ditemukan. pada bagian sebelumnya dalam pada bab ini.
3) Untuk memastikan data yang dihasilkan memiliki kegunaan dan akurasi tinggi, diperlukan perencanaan pemeliharaan dan kalibrasi yang terjadwal.
4) Sistem notifikasi otomatis, melalui pesan singkat atau email, perlu disiapkan untuk mendeteksi malfungsi sistem LCS.Lokasi penempatan sensor harus dijamin berada dalam jangkauan jaringan komunikasi, guna meminimalkan kegagalan pengiriman data ke pusat data.
5) *Logbook* disusun untuk mencatat setiap kegiatan pemeliharaan, kalibrasi, dan penggunaan paket internet.
6) Peninjauan data secara berkala dilakukan untuk mengidentifikasi permasalahan sistem, meminimalkan kehilangan data

Buku ini tidak diperjualbelikan

akibat kegagalan pengiriman, serta memantau pola perubahan konsentrasi pencemar dari waktu ke waktu.

b. Quality Control (QC)

Quality Control (QC) merupakan kegiatan untuk memastikan sistem LCS tetap berfungsi dengan baik. Selain itu, QC bertujuan menjaga agar data yang dihasilkan tetap berada dalam rentang kinerja kalibrasi yang dapat diterima. QC membantu pengguna menentukan waktu yang tepat untuk melakukan pemeliharaan atau kalibrasi ulang ketika sensor mulai menunjukkan bias pengukuran. QC juga merupakan bentuk evaluasi kinerja sistem LCS untuk menilai konsistensi hasil pengukuran serta kualitas data yang dihasilkan, terutama dari aspek presisi dan akurasi.

Menurut WMO (2021), kegiatan QC dapat dijadikan acuan untuk memperkirakan masa pakai sistem LCS. Masa pakai LCS dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tempat sensor dipasang. Misalnya, lingkungan dengan konsentrasi partikulat yang tinggi dapat mempercepat penumpukan debu pada sensor PM. Sebaliknya, kelembapan yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menurunkan sensitivitas sensor gas elektrokimia.

Berikut beberapa pendekatan QC yang dapat diadopsi oleh pengguna berdasarkan berbagai studi.

1) Penting untuk memastikan bahwa unit/satuan konsentrasi yang digunakan selama pengukuran berlangsung sudah sesuai dengan perencanaan. Sering kali, pengguna kurang memerhatikan aspek ini. Umumnya, dua unit yang digunakan untuk menentukan konsentrasi gas pencemaran ialah ppb dan ppm. Pada spesifikasi yang diberikan oleh pabrikan, konsentrasi gas pencemar di udara ambien umumnya dinyatakan dalam satuan ppb. Namun, dalam pelaporan hasil pengukuran, konsentrasi tersebut sering dinyatakan dalam satuan massa (μg/m^3) sehingga perlu dikonversi terlebih dahulu.

Buku ini tidak diperjualbelikan

2) Aspek waktu dan zona waktu pada pencatatan data pengukuran juga perlu diperhatikan. Ketidaksesuaian waktu atau zona waktu dengan lokasi penempatan sensor dapat menimbulkan masalah. Kondisi ini terutama memengaruhi proses perbandingan dengan instrumen lain pada tahap validasi data.
3) Tinjauan data secara berkala memberikan wawasan mengenai tren hasil pengukuran dari waktu ke waktu. Kegiatan ini memungkinkan pengguna untuk mendeteksi apakah data yang dihasilkan menunjukkan pola yang tidak sesuai, seperti nilai pencilan (*outlier*) atau anomali. Dengan demikian, potensi kehilangan data akibat kegagalan dalam pengiriman dapat diminimalisir. Peninjauan data secara berkala disertai penyusunan indikator sederhana untuk memantau kualitas data akan sangat membantu pengguna, sebagaimana dicontohkan pada Tabel 6.5

Tabel 6.5 Pengecekan Umum Terkait dengan Peninjauan Data Berkala

Gejala yang diamati	Apa yang harus diperhatikan	Penyebab
Nilai rendah	Hasil pengukuran menunjukkan nilai nol atau nilai negatif (di bawah *baseline*) dalam periode yang cukup lama.	Jika periode berulang atau membentuk pola pada waktu tertentu kemungkinan LCS mengalami gangguan akibat faktor meteorologi (misalnya suhu dan kelembapan. Jika nilai negatif atau nol terus menerus kemungkinan LCS mengalami kegagalan fungsi
Kehilangan data	Terlihat ada kesenjangan data pada periode tertentu atau sama sekali tidak ada data	Kehilangan catu daya Kegagalan mengirim data akibat terputus dari jaringan komunikasi internet Sistem LCS mengalami kegagalan fungsi

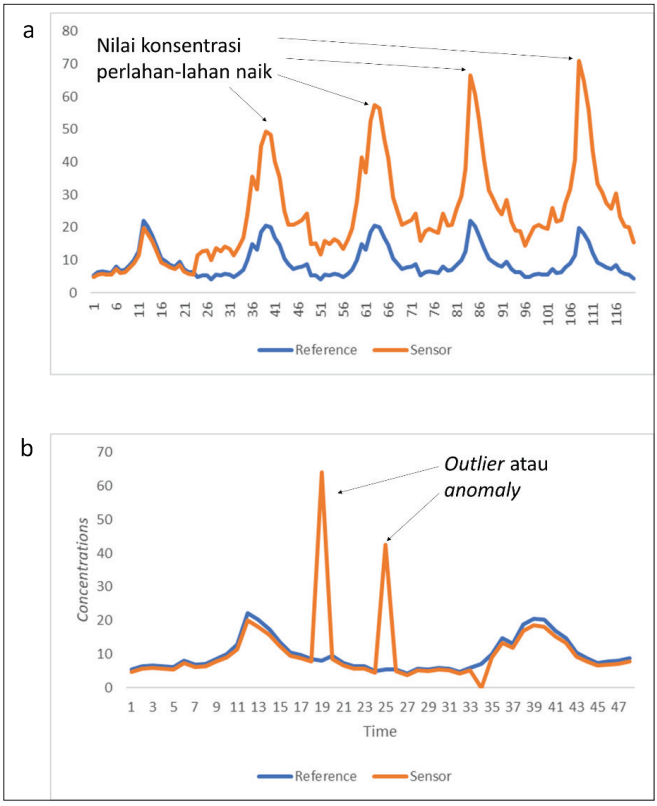
Buku ini tidak diperjualbelikan

Gejala yang diamati	Apa yang harus diperhatikan	Penyebab
Tertahan pada nilai yang sama	Data tetap berada pada nilai yang sama dalam waktu yang lama.	Kemungkinan sistem LCS mengalami kegagalan fungsi
Perbandingan antar-sensor	Membandingkan data antar sensor yang terdekat pada periode waktu tertentu.	Terkadang di dalam satu jaringan terdapat sistem LCS yang menghasilkan nilai konsentrasi yang lebih tinggi atau lebih rendah dibandingkan sensor lainnya, perlu diperiksa kondisi lingkungan sekitar apakah ada sumber emisi yang menyebabkan nilai konsentrasi lebih tinggi. Namun, jika tidak ada sumber emisi ada kemungkinan sistem LCS tersebut mengalami penurunan kinerja atau mengalami kegagalan fungsi
Anomali dan *drift*	Terlihat data yang diukur terlalu tinggi dan muncul hanya ketika waktu tertentu dengan periode yang sering terjadi Terlihat data secara bertahap naik atau turun secara terus-menerus dan cenderung tidak mengikuti pola yang seharusnya	Perilaku ini kemungkinan muncul setiap kali sistem LCS dinyalakan untuk waktu pertama kali sehingga ada kemungkinan sistem LCS memerlukan waktu *warm-up* hingga pembacaan stabil. Kemungkinan terjadi gangguan faktor meteorologi dan sensitivitas silang yang menyebabkan hasil pengukuran lebih tinggi Kemungkinan akibat dari proses penuaan komponen LCS akibat dari kondisi lingkungan yang terlalu ekstrem.

Gambar 6.10 (a) memperlihatkan contoh *drift* pada data, yaitu kondisi ketika hasil pengukuran sensor secara

Buku ini tidak diperjualbelikan

bertahap naik sehingga nilai konsentrasi cenderung meningkat dibandingkan pola yang seharusnya. Sementara itu, Gambar 6.10 (b) memperlihatkan contoh *outlier* (anomali), yaitu lonjakan nilai konsentrasi yang terjadi secara tiba-tiba pada waktu tertentu dan tidak mengikuti pola pengukuran normal.



Gambar 6.10 Contoh (a) *drift* dan (b) *outlier* pada data hasil pengukuran LCS.

4) Pemeriksaan kepadatan data (*data completeness*) dilakukan untuk memastikan bahwa data hasil pengukuran terkumpul secara terus-menerus selama satu periode pengamatan, tanpa kehilangan data akibat gangguan sistem. Kepadatan data digunakan sebagai dasar untuk menghitung nilai rata-rata yang

Buku ini tidak diperjualbelikan

mewakili suatu periode pengamatan. Menurut rekomendasi dari USEPA target kepadatan data yang dikirim melalui jaringan komunikasi harus > 75% (Duvall et al. 2021a). Sebagai contoh, untuk memperoleh nilai rata-rata 1 jam dengan interval pencatatan setiap 5 menit, diperlukan sedikitnya 9 data yang valid. Permasalahan umum yang sering dihadapi terkait dengan kepadatan data ialah kehilangan data akibat dari buruknya sinyal jaringan komunikasi yang digunakan untuk proses transmisi data. Oleh karena itu, penting dilakukan perencanaan dan survei lokasi untuk mengetahui kondisi kualitas jaringan komunikasi di lokasi penempatan sensor.

5) Pendekatan selanjutnya ialah pengecekan data hasil pengukuran yang dihasilkan oleh LCS dengan SPKU yang terdekat (Müller et al. 2017). Pendekatan ini hanya sesuai apabila karakteristik lingkungan kedua lokasi relatif serupa. Pengertian terdekat di sini ialah bukan prosedur kolokasi seperti yang dilakukan di dalam kegiatan QA, melainkan hanya melihat perbandingan tren data. Namun, perlu diperhatikan bahwa pendekatan ini mungkin memiliki keterbatasan yang disebabkan pengukuran yang dilakukan tidak di lokasi yang sama sehingga ada kemungkinan variasi konsentrasi yang terjadi akibat dari sumber atau perjalan pencemar dari suatu kawasan. Selain itu, terbatasnya ketersediaan atau izin penggunaan data pembanding dari SPKU merupakan masalah yang akan dihadapi oleh pengguna ketika ingin menggunakan pendekatan ini.

6) Selanjutnya, pengguna dapat melakukan aktivitas QC dengan menggunakan bantuan pengetahuan dasar mengenai reaksi kimia atmosfer di kawasan pengambilan sampel dengan mengintegrasikan beberapa SPKU (Kim et al. 2016). Sebagai contoh, diketahui bahwa reaksi pembentukan ozon berlangsung dengan bantuan sinar matahari dan keberadaan gas pencemar NO, sehingga secara logika pada malam hari (sekitar pukul 00.00–03.00) konsentrasi ozon akan turun drastis dan mendekati nol (Kim et al. 2016). Dengan asumsi seperti ini, pengguna dapat

Buku ini tidak diperjualbelikan

melakukan pengecekan data hasil pengukuran pada periode tersebut.

7) Pengguna sebaiknya memahami tren / kecenderungan data setiap dari parameter pencemaran yang diukur. Setiap parameter pencemaran memiliki karakteristik dan tren/ kecenderungan masing-masing bergantung kepada kondisi harian dan musiman. Selain itu, pengguna juga perlu tau rentang nilai pencemaran (maksimum dan minimum) yang biasa ada di kawasan pengambilan sample. Sangat disarankan untuk data hasil pengukuran dilakukan peninjauan dan dilihat tren / kecenderungan yang diberikan oleh LCS. Pendekatan tersebut dapat membantu penggunan di dalam penentuan apakah data yang dihasilkan masih dapat diterima atau tidak.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB VII

Pengelolaan Data dan Evaluasi Sistem LCS

Setelah sistem LCS dipasang dan mulai mengumpulkan data, langkah penting berikutnya ialah mengelola data serta mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh. Pengelolaan data mencakup proses pengumpulan, penyimpanan, pengolahan, dan penyajian data agar dapat dimanfaatkan secara efektif. Evaluasi diperlukan untuk memastikan bahwa informasi yang dihasilkan sensor mencerminkan kondisi kualitas udara di lokasi pemantauan. Bab ini membahas secara ringkas dan terstruktur pengelolaan data pada sistem LCS, termasuk pemanfaatan sistem pendukung seperti server dan basis data. Selain itu, bab ini menjelaskan cara menganalisis dan menyampaikan hasil pemantauan kepada pihak terkait.

A. Manajeman Data dan Visualisasi

Jaringan pengukuran kualitas udara berbasis LCS menghasilkan data dalam jumlah yang cukup besar. Oleh karena itu, pengelolaan melalui sistem manajemen data menjadi penting agar informasi dapat diakses, ditinjau, dan dimanfaatkan secara efek. Umumnya, sistem manajemen data terdiri atas prosedur pengelolaan data dan sistem basis data (*database*). Sistem ini berfungsi untuk memperoleh, memproses, menyimpan, dan mendistribusikan data. Sistem ini juga

Buku ini tidak diperjualbelikan

membantu pengguna dalam pemrosesan data dan pelaksanaan QC, seperti peninjauan data. Selain itu, sistem ini mengelola data yang direkam serta menyediakan cadangan data untuk mengantisipasi kehilangan. Sistem ini juga berfungsi untuk memvisualisasikan dan mendistribusikan data sesuai kebutuhan.

1. Sistem Server

Pengelolaan data memerlukan sistem server pada pusat data. Sistem server dapat dikembangkan menggunakan komputer server dengan prosesor, seperti Xeon, Itanium, atau Core i-series dari Intel; Epyc Rome dari AMD; serta SPARC dari Sun Solaris. Spesifikasi komputer server perlu direncanakan dengan mempertimbangkan jumlah sistem LCS yang akan terhubung. Kapasitas memori dan media penyimpanan perlu ditentukan berdasarkan perkiraan volume data yang akan dikelola dalam sistem basis data.

Pemilihan spesifikasi komputer server yang tepat akan menghasilkan kecepatan akses dan pengolahan data yang optimal. Sistem operasi server sebaiknya menggunakan sistem operasi jaringan, seperti MS Windows Server atau Unix (Linux/BSD maupun Solaris OS). Sistem operasi komputer pribadi, seperti MS Windows Professional atau Linux, juga dapat digunakan. Namun, instansi atau lembaga pemerintah yang bertanggung jawab atas pengelolaan data tidak disarankan menggunakan sistem server publik milik pihak ketiga. Hal ini terutama berlaku untuk server yang berlokasi di luar negeri. Pembatasan tersebut berkaitan dengan aspek keamanan dan integritas data nasional (Menteri Komunikasi dan Informatika 2021).

2. Sistem Manajemen Basis Data (SMD)

Setiap jaringan sistem LCS sebaiknya dilengkapi dengan sistem manajemen basis data (SMD). Sistem ini berfungsi mengelola data hasil pengukuran. SMD mempermudah penggunaan data hasil pengukuran. Sistem ini juga membantu mengidentifikasi kesalahan

Buku ini tidak diperjualbelikan

perangkat sejak dini. Selain itu, SMD memudahkan pengoperasian dan pengelolaan jaringan sistem LCS secara bersamaan. Berdasarkan praktik di lapangan, terdapat tiga jenis SMD yang digunakan pada sistem LCS, yaitu sebagai berikut.

a. Satu paket dengan pembelian sistem LCS. Umumnya, SMD disediakan dan dikelola oleh penyedia. Pengguna hanya perlu berlangganan setiap tahun. Keuntungan SMD jenis ini ialah pengguna tidak perlu mengelola data karena semua proses dilakukan oleh penyedia. Namun, pengguna hanya dapat memanfaatkan fitur yang disediakan oleh penyedia dan umumnya tidak dapat melakukan kustomisasi. Selain itu, data yang tersimpan berpotensi bersifat terbuka (*open access*). Kondisi ini dapat menimbulkan persoalan keamanan dan integritas data nasional, terutama bagi instansi atau lembaga pemerintah (Menteri Komunikasi dan Informatika 2021).

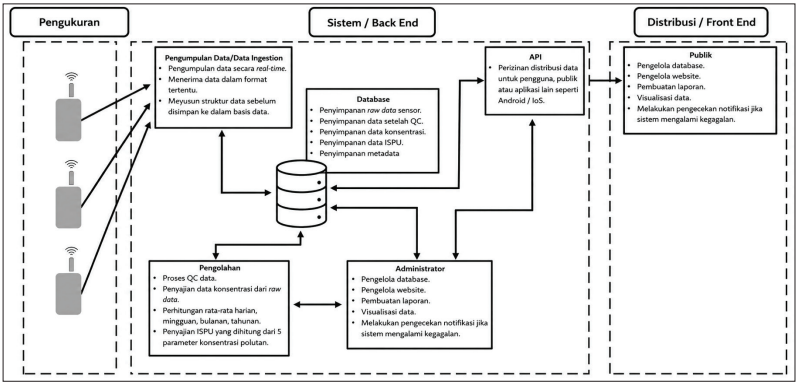
b. Menggunakan layanan pihak ketiga yang menyediakan fasilitas penyimpanan *cloud* untuk data sensor seperti ThingSpeak, Amazon, Microsoft azure, dan lain-lain. Keuntungannya, keamanan data umumnya lebih terjamin. Pengguna juga dapat menentukan apakah data akan bersifat terbuka atau tertutup. Keterbatasannya, pengguna tetap memerlukan keterampilan untuk membangun dan mengelola SMD. Selain itu, fitur yang tersedia bergantung pada paket layanan yang dipilih. Bagi instansi atau lembaga pemerintah, penggunaan layanan cloud pihak ketiga juga perlu memerhatikan aspek keamanan dan integritas data nasional.

c. Membuat SMD dengan menggunakan perangkat lunak *Free Open-Source Software* (FOSS). Umumnya, SMD jenis ini dibuat sendiri oleh pengguna sesuai dengan keperluan dan fiturnya dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna. Pengguna juga dapat menentukan apakah data akan bersifat terbuka atau tertutup. Dengan demikian, pengguna dapat memilih data yang akan dibagikan. Namun, pengguna memerlukan biaya dan upaya yang lebih besar untuk membangun sistem keamanan

Buku ini tidak diperjualbelikan

data serta melakukan pemeliharaan. Pengguna juga harus memiliki keterampilan yang memadai untuk membangun dan mengelola sistem manajemen data berbasis FOSS.

Gambar 7.1 memperlihatkan komponen penting yang ada di dalam sebuah manajemen data.



Gambar 7.1 Komponen dan Fungsi Utama dari Sistem Manajemen Data (SMD)

Fungsi setiap komponen dalam SMD dijelaskan pada bagian berikutnya.

a. Komponen Pengukuran

Komponen pengukuran merupakan bagian dasar dalam SMD karena menyediakan data yang akan dikelola oleh sistem. Pengukuran dapat dilakukan dengan menggunakan instrumen kualitas udara, baik instrumen rujukan maupun LCS. Umumnya, sistem pengukuran telah dilengkapi dengan program yang mendukung pengiriman data melalui protokol HTTP atau MQTT.

"HTTP (Hypertext Transfer Protocol) merupakan protokol pada lapisan aplikasi (application layer) yang digunakan untuk mentransmisikan data melalui jaringan internet. Dalam arsitektur sistem pemantauan, HTTP berperan sebagai protokol komunikasi yang menghubungkan node LCS dengan server untuk melakukan

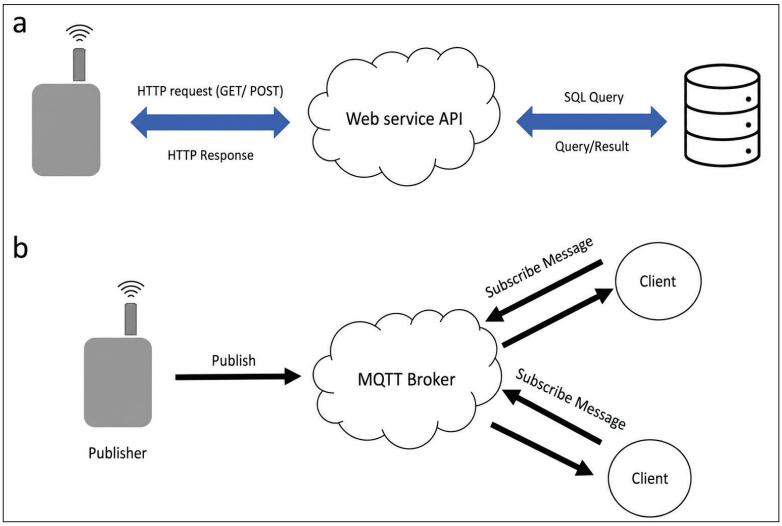
Buku ini tidak diperjualbelikan

pertukaran data berbasis model *request-response*. Data telemetri dari LCS dapat dikirimkan dalam bentuk berkas (seperti .txt atau .csv), maupun sebagai muatan variabel terstruktur (seperti format JSON). Pengiriman data ini dapat dilakukan secara individual per variabel atau secara kolektif (bulk) pada interval waktu tertentu sesuai dengan skema pengambilan sampel sensor."

Dalam protokol HTTP, metode yang umum digunakan ialah HTTP GET dan HTTP POST. Kedua metode tersebut digunakan untuk meminta atau mengirimkan data antara klien dan web server maupun layanan *cloud*. Keberhasilan komunikasi melalui HTTP ditunjukkan oleh kode respons (*response code*) berupa tiga digit angka. Rincian kode tersebut dapat dilihat pada IANA (2022). Keberhasilan komunikasi melalui HTTP ditunjukkan oleh kode respons (*response code*) berupa tiga digit angka. Rincian kode tersebut dapat dilihat pada IANA (2022).

Sementara itu, MQTT *(Message Queuing Telemetry Transport)* memiliki fungsi yang mirip dengan HTTP sebagai protokol pengiriman data, tetapi dirancang secara khusus untuk pertukaran data ringan (l*ightweight*) dengan konsumsi daya dan bandwidth yang minim. Oleh karena itu, MQTT banyak digunakan pada komunikasi antarmesin (machine-to-machine/M2M) seperti sensor cerdas (smart sensor) dan perangkat IoT yang memiliki keterbatasan sumber daya (resource-constrained). Secara konseptual, MQTT menggunakan model komunikasi publish/subscribe yang bersifat asinkron. Model ini memisahkan pengirim (publisher) dan penerima (subscriber) melalui perantara yang disebut broker. Publisher mengirimkan pesan (message) ke broker, kemudian broker memfilter dan meneruskan pesan tersebut kepada subscriber berdasarkan topik (topic) yang dilanggan. Gambar 7.2 menunjukkan perbandingan konsep kerja HTTP dan MQTT.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Gambar 7.2 Diagram Blok (A) Protokol HTTP dan (B) Protokol MQTT

b. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dapat dilakukan oleh SMD maupun oleh sistem LCS yang mengirimkan data ke SMD. Umumnya, SMD dilengkapi dengan perangkat lunak untuk menerima atau mengambil data hasil pengukuran dari sistem LCS. Perangkat lunak tersebut umumnya telah dikonfigurasi untuk menerima format data tertentu. Oleh karena itu, sistem LCS harus menyesuaikan format data sebelum proses pengiriman dilakukan.

Jika data diterima dalam bentuk berkas, SMD akan menerima file berformat *.txt* atau *.csv*. Sebaliknya, jika data dikirim sebagai variabel, format yang digunakan umumnya ialah JSON atau XML. Pengguna perlu memperhatikan format data yang digunakan karena berpengaruh terhadap kapasitas penyimpanan, proses pengolahan data, dan visualisasi data.

Buku ini tidak diperjualbelikan

c. Sistem Basis Data

Setelah data dikumpulkan, diformat, dan terstruktur dengan baik, data tersebut perlu disimpan dalam media penyimpanan yang aman dan terorganisir di dalam sebuah basis data (*database*). Basis data yang dirancang harus mampu menyimpan data dalam berbagai format, seperti .csv dan .txt, serta mendukung penyimpanan data dalam bentuk basis data relasional. Penyimpanan data dalam basis data memudahkan penelusuran dan pengelolaan metadata sehingga mendukung aksesibilitas dan integritas data dalam jangka panjang. Jika pengguna berencana membangun basis data secara mandiri, baik dengan dukungan pihak ketiga maupun menggunakan perangkat lunak sumber terbuka (*free and open-source software* [FOSS]), terdapat beberapa faktor penting yang perlu dipertimbangkan. Faktor-faktor tersebut perlu diperhatikan agar sistem yang dikembangkan sesuai dengan kebutuhan dan dapat dioperasikan secara optimal.

Pertama, waktu tanggap (*response time*) merupakan salah satu indikator penting dalam pengelolaan basis data. Indikator ini menunjukkan seberapa cepat basis data menanggapi permintaan pengguna, termasuk waktu yang dibutuhkan untuk mengakses data yang tersimpan. Makin singkat waktu tanggap, semakin efisien sistem dalam melayani kebutuhan pengguna. Kedua, kapasitas pengguna simultan (*concurrent users*) merupakan faktor yang perlu diperhatikan. Kapasitas ini menunjukkan jumlah maksimum pengguna yang dapat mengakses data secara bersamaan tanpa menurunkan kinerja sistem. Selanjutnya, keamanan data (*data security*) merupakan faktor penting lainnya, melibatkan upaya untuk melindungi basis data dari akses yang tidak sah dan menjaga kerahasiaan informasi.

Basis data juga harus dilengkapi dengan fasilitas pencadangan (*backup*) dan pemulihan (*restore*) data. Fasilitas ini memastikan tersedianya salinan data yang dapat digunakan apabila terjadi kehilangan atau kerusakan sistem. Di samping itu, alat pemulihan (*recovery tools*) juga sangat penting. Alat ini digunakan untuk memulihkan kerusakan data atau metadata yang sering kali

Buku ini tidak diperjualbelikan

disebabkan oleh gangguan eksternal, seperti pemadaman listrik. Contoh alat pemulihan pada *database Firebird* meliputi GFIX, *Data Pump*, dan *IB Surgeon*. Faktor lain yang tidak kalah penting adalah kapasitas penyimpanan (*storage capacity*). Basis data harus memiliki ruang penyimpanan yang memadai agar dapat menyimpan data dalam jumlah besar secara efisien.

Jumlah transaksi yang dapat diproses basis data per menit juga perlu diperhatikan karena menunjukkan kemampuan sistem dalam menangani beban kerja. Basis data juga perlu dilengkapi dengan alat pemantauan (*monitoring tools*). Alat ini membantu administrator memantau aktivitas pengguna, kinerja basis data, aktivitas SQL, serta penggunaan memori dan sumber daya lainnya. Dengan demikian, potensi masalah dapat dideteksi lebih dini. Terakhir, dukungan terhadap berbagai platform (*multi-platform*) juga perlu dipertimbangkan. Dukungan ini memungkinkan basis data dijalankan pada berbagai sistem operasi, seperti Microsoft Windows, Linux, macOS, dan OpenSolaris. Dengan demikian, basis data lebih fleksibel untuk diterapkan dan diintegrasikan di berbagai lingkungan.

Dalam sebuah *database* terdapat istilah Tabel. Tabel merupakan entitas yang menyimpan informasi mengenai parameter data. Setiap Tabel yang ada di dalam sebuah *database* memiliki hubungan satu sama lain yang disebut dengan relasi. Sebagai contoh, basis data dapat dirancang dengan sedikitnya lima tabel yang mewakili setiap entitas. Tabel-tabel tersebut mencakup stasiun pemantauan, data mentah sensor gas, data mentah PM, data konsentrasi, dan data meteorologi. Setiap entitas tersebut memiliki beberapa atribut informasi seperti yang dijelaskan di dalam Tabel 7.1 – 7.5 pada bagian kolom Atribut/ FieldData.

Untuk membangun relasi antartabel, digunakan kombinasi kunci berupa *Primary Key* pada tabel induk dan ***F**oreign Key* pada tabel anak. Pada umumnya, *primary key* merupakan atribut yang memiliki nilai unik untuk mengidentifikasi setiap baris data secara spesifik sehingga mencegah terjadinya duplikasi. Pada kasus contoh

Buku ini tidak diperjualbelikan

yang diperlihatkan pada Tabel 7.1, atribut IDNode bertindak sebagai *Primary Key* karena bersifat unik dan menjadi identitas tunggal bagi setiap node stasiun sistem LCS.

Sementara itu, pada tabel data hasil pengukuran (Tabel 7.2 hingga Tabel 7.5), atribut IDNode bertindak sebagai *Foreign Key* yang merujuk ke Tabel 7.1. Karena di contoh kasus ini satu node mengirimkan data secara berkala, penentuan kunci utama pada tabel pengukuran menggunakan *Composite Primary Key*—yaitu kombinasi dari dua atribut yaitu IDNode dan Waktu. Penggunaan kunci komposit ini menjamin keunikan setiap baris data hasil pengukuran dari waktu ke waktu. Hubungan antartabel tersebut ditunjukkan pada Gambar 7.3. Adanya relasi antartabel ini memudahkan proses kueri, integrasi, dan visualisasi data dari berbagai parameter sesuai kebutuhan."

Tabel 7.1 Struktur Tabel Data Node LCS

No.	Atribut/Field Data	Tipe Data	Keterangan
1	IDNode*	char(15)	Nomor identifikasi node LCS
2	NamaKawasan	varchar(100)	Nama kawasan
3	JenisKawasan	varchar(100)	Jenis kawasan lokasi
4	AlamatStasiun	varchar(250)	Alamat lengkap lokasi stasiun
5	Tipe	varchar(30)	Tipe node LCS
6	Koordinat	varchar(30)	Koordinat lokasi node LCS
7	KontakPerson	varchar(50)	Nama kontak person penanggung jawab stasiun
8	NoTelepon	varchar(20)	Nomor Telepon/HP *data logger uni*t
9	Foto	varchar(100)	*Filepath* foto lokasi node LCS
11	WaktuUpdate	datetime	Tanggal dan jam *update* data terakhir

Keterangan : * *Primary Key*

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 7.2 Struktur Tabel Data Mentah Sensor Gas

No.	Atribut/ Field Data	tipe data	Keterangan
1	IDNode*	char(15)	Nomor identifikasi node LCS
2	Waktu*	timestamp	Tanggal dan jam perekaman
3	O_3_WE	varchar(10)	Sinyal Working Electrode (mv) dari sensor *ozone*
4	O_3_AE	varchar(10)	Sinyal Auxiliary Electrode (mv) dari sensor *ozone*
5	CO_WE	varchar(10)	Sinyal Working Electrode (mv) dari sensor *Carbon monoxide*
6	CO_AE	varchar(10)	Sinyal Auxiliary Electrode (mv) dari sensor Carbon monoxide
7	NO_2_WE	varchar(10)	Sinyal Working Electrode (mv) dari sensor *Nitrogen dioxide*
8	NO_2_AE	varchar(10)	Sinyal Auxiliary Electrode (mv) dari sensor *Nitrogen dioxide*
9	SO_2_WE	varchar(10)	Sinyal Working Electrode (mv) dari sensor *Sulphure dioxide*
11	SO_2_AE	varchar(10)	Sinyal Auxiliary Electrode (mv) dari sensor *Sulphure dioxide*

Keterangan : * *Composite Primary Key (IDNode + Waktu), dengan IDNode juga berfungsi sebagai Foreign Key yang merujuk ke Tabel 7.1*

Tabel 7.3 Struktur Tabel Data Mentah Sensor PM

No.	Atribut/Field Data	Tipe Data	Keterangan
1	IDNode*	char(15)	Nomor identifikasi node LCS
2	Waktu*	timestamp	Tanggal dan jam perekaman
3	Bin1_PM	varchar(10)	Bin size 1 OPC-N2 dari LCS-PM
4	Bin2_PM	varchar(10)	Bin size 2 OPC-N2 dari LCS-PM
5	Bin3_PM	varchar(10)	Bin size 3 OPC- N2 dari LCS-PM
6	Bin4_PM	varchar(10)	Bin size 4 OPC-N2 dari LCS-PM

Buku ini tidak diperjualbelikan

7	Bin5_PM	varchar(10)	Bin size 5 OPC-N2 dari LCS-PM
8	Bin6_PM	varchar(10)	Bin size 6 OPC-N2 dari LCS-PM
9	Bin7_PM	varchar(10)	Bin size 7 OPC-N2 dari LCS-PM
10	Bin8_PM	varchar(10)	Bin size 8 OPC-N2 dari LCS-PM
11	Bin9_PM	varchar(10)	Bin size 9 OPC-N2 dari LCS-PM
12	Bin10_PM	varchar(10)	Bin size 10 OPC-N2 dari LCS-PM
13	Bin11_PM	varchar(10)	Bin size 11 OPC-N2 dari LCS-PM
14	Bin12_PM	varchar(10)	Bin size 12 OPC-N2 dari LCS-PM
15	Bin13_PM	varchar(10)	Bin size 13 OPC-N2 dari LCS-PM
16	Bin14_PM	varchar(10)	Bin size 14 OPC-N2 dari LCS-PM
17	Bin15_PM	varchar(10)	Bin size 15 OPC-N2 dari LCS-PM
18	Bin16_PM	varchar(10)	Bin size 16 OPC-N2 dari LCS-PM

Keterangan : * Composite Primary Key (IDNode + Waktu), dengan IDNode juga berfungsi sebagai Foreign Key yang merujuk ke Tabel 7.1

Tabel 7.4 Struktur Tabel Data Hasil Pengukuran Meteorologi

No.	Atribut/Field Data	Tipe Data	Keterangan
1	IDNode*	char(15)	Nomor identifikasi node LCS
2	Waktu*	timestamp	Tanggal dan jam pemantauan
3	T	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter Suhu
4	RH	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter Kelembapan
5	WS	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter Kecepatan angin
6	WD	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter Arah angin

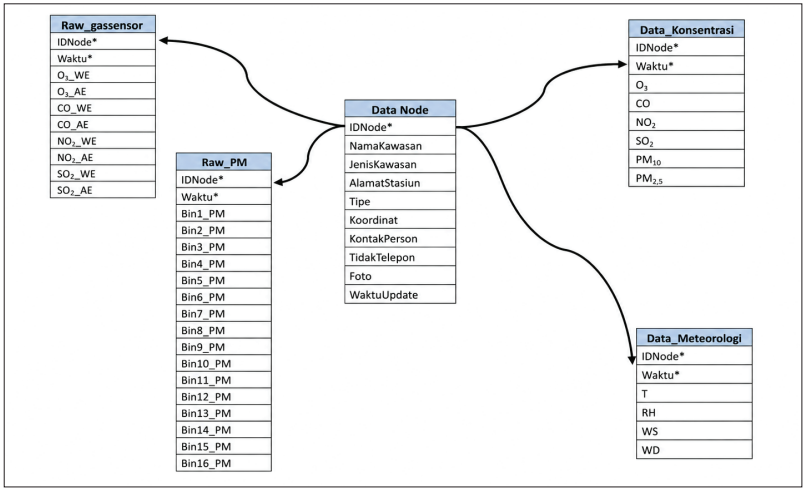
Keterangan : * Composite Primary Key (IDNode + Waktu), dengan IDNode juga berfungsi sebagai Foreign Key yang merujuk ke Tabel 7.1

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 7.5 Struktur Tabel Data Konsentrasi Hasil Pengukuran

No.	Atribut/Field Data	Tipe Data	Keterangan
1	IDNode*	char(15)	Nomor identifikasi node LCS
2	Waktu*	timestamp	Tanggal dan jam pemantauan
3	O_3	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter O_3
4	CO	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter CO
5	NO_2	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter NO_2
6	SO_2	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter SO_2
7	PM_{10}	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter PM_{10}
8	$PM_{2.5}$	varchar(10)	Hasil pengukuran parameter $PM_{2.5}$

Keterangan : * Composite Primary Key (IDNode + Waktu), dengan IDNode juga berfungsi sebagai Foreign Key yang merujuk ke Tabel 7.1



Gambar 7.3 Relasi Antartabel pada Basis Data Sistem LCS

Buku ini tidak diperjualbelikan

d. Pemrosesan Data

Setelah dikumpulkan dan disimpan dalam media penyimpanan, data perlu diproses serta melalui proses pengendalian mutu (*quality control* [QC]). Setelah itu, data dapat dimanfaatkan, misalnya untuk pelaporan. Pemrosesan data umumnya meliputi pengoreksian data mentah menggunakan algoritma yang dijelaskan pada Bab V. Selanjutnya, data diolah untuk menghasilkan nilai rata-rata per jam, harian, mingguan, bulanan, dan tahunan.

Hasil pengolahan tersebut kemudian diringkas dalam statistik, seperti nilai minimum, maksimum, dan kelengkapan data. Selain itu, pemrosesan data juga mencakup perhitungan ISPU untuk penyampaian informasi kualitas udara kepada masyarakat. Tahap ini juga dapat digunakan untuk keperluan lain, seperti pemetaan hasil pengukuran dan berbagai bentuk visualisasi data. Pada tahap ini, pengendalian mutu (*quality control* [QC]) berperan penting. QC digunakan untuk mengevaluasi kelengkapan data, mengidentifikasi anomali atau nilai ekstrem (*outlier*), serta menentukan waktu yang tepat untuk pemeliharaan dan kalibrasi.

e. Distribusi Data

Salah satu fungsi lain yang disediakan oleh SMD ialah mengambil dan mendistribusikan data. Distribusi data dapat dilakukan dengan berbagai metode, dari cara sederhana hingga menggunakan *Application Programming Interface* (API). API merupakan sekumpulan aturan yang memungkinkan suatu aplikasi berkomunikasi dengan aplikasi lain tanpa harus mengetahui proses yang berlangsung di dalamnya. Melalui API, SMD dapat berkomunikasi dengan aplikasi atau perangkat lunak yang berada di lokasi lain (*remote*). API menyediakan fungsi untuk mengambil data, mengajukan permintaan akses, memperbarui atau menghapus data, serta mengonversi format data.

API juga berfungsi membatasi data yang dapat diakses oleh aplikasi atau situs web publik. Melalui API, pengguna dapat

Buku ini tidak diperjualbelikan

mengakses data dengan lebih mudah dan menganalisisnya secara otomatis menggunakan perangkat lunak, seperti R. API juga memungkinkan hasil analisis ditampilkan pada situs web (Feenstra et al. 2020).

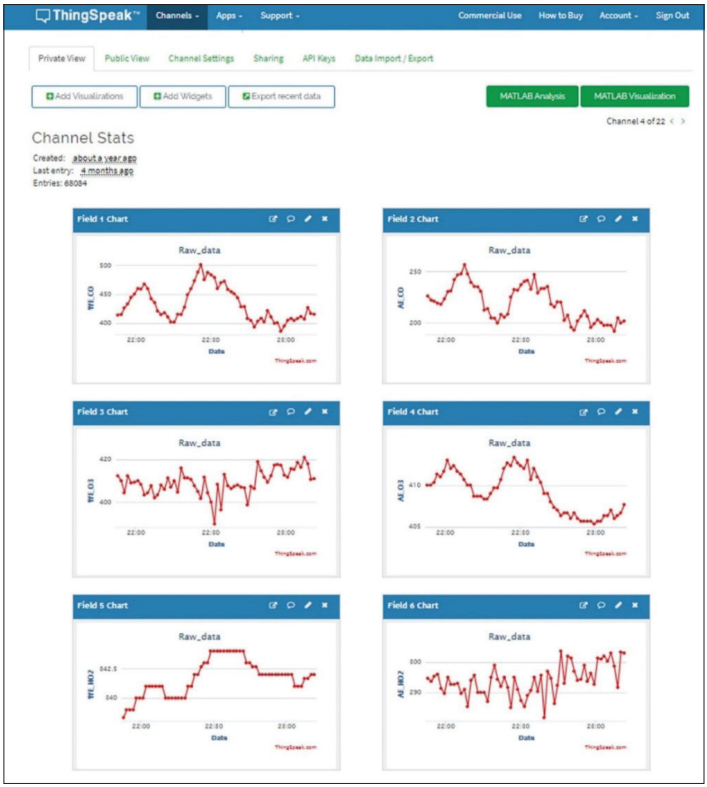
SMD juga perlu dilengkapi dengan berbagai fitur pendukung. Fitur tersebut meliputi keamanan data, pencadangan (*backup*) data, serta dokumentasi perubahan *firmware* atau parameter. Selain itu, SMD perlu menyediakan notifikasi melalui email apabila terjadi kegagalan pengoperasian sistem LCS. Pengguna perlu mempertimbangkan kebutuhan serta perencanaan ketika membangun SMD sendiri atau menggunakan layanan pihak ketiga. Makin banyak jaringan node LCS yang dipasang, makin besar kebutuhan kapasitas dan pengelolaan SMD. Oleh karena itu, biaya pengadaan dan pemeliharaan SMD juga perlu diperhitungkan.

3. Visualisasi

Data hasil pengukuran yang telah diproses dan melalui pemeriksaan QC perlu divisualisasikan agar lebih mudah dipahami dan dianalisis. Visualisasi dapat disajikan dalam berbagai bentuk, seperti grafik, tabel, teks, atau diagram. Media visualisasi tersebut umumnya dikenal sebagai *Graphical User Interface* (GUI) atau *dashboard*.

Bagi pengguna yang menggunakan sistem LCS dari penyedia tertentu atau memanfaatkan SMD pihak ketiga, fasilitas GUI dan *dashboard* umumnya telah tersedia. Contohnya ialah ThingSpeak, Microsoft Azure, dan Amazon Web Services (AWS). Melalui fasilitas tersebut, data hasil pengukuran dapat ditampilkan secara langsung. Namun, penggunaan layanan tersebut memiliki keterbatasan. GUI dan *dashboard* yang disediakan umumnya hanya dapat dikustomisasi dalam batas fitur yang tersedia dari penyedia layanan, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.4.

Buku ini tidak diperjualbelikan

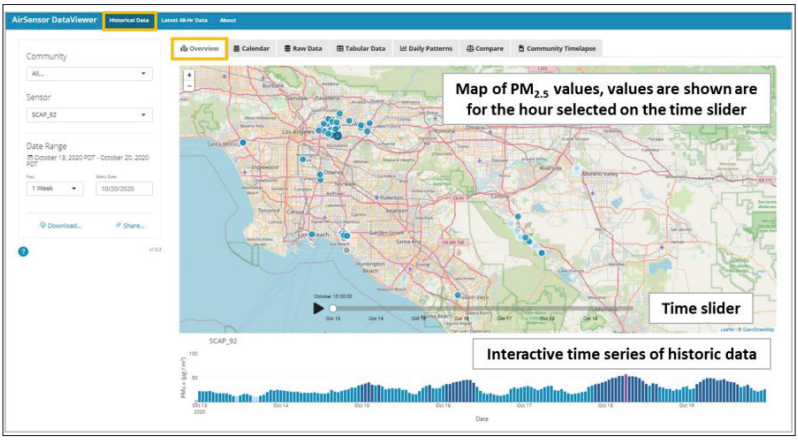


Sumber: Dokumentasi ThingSpeak

Gambar 7.4 Contoh Tampilan *Dashboard* Visualisasi Data Menggunakan ThingSpeak

Pengguna juga dapat membangun GUI atau *dashboard* sesuai dengan kebutuhannya dengan memanfaatkan aplikasi atau perangkat lunak berbasis *free and open-source software* (FOSS) (Feenstra et al. 2020). R dan Python merupakan contoh FOSS yang dapat digunakan untuk melakukan analisis data sekaligus memvisualisasikan hasil pengukuran. Kedua perangkat lunak tersebut juga dapat diintegrasikan ke dalam aplikasi web sehingga tampilan visualisasi menjadi lebih interaktif, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.5.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: AQ-SPEC [NO_PRINTED_FORM].

Gambar 7.5 Contoh Aplikasi Web *AirSensor DataViewer* Berbasis R

Selain itu, terdapat sejumlah perangkat lunak yang dapat digunakan untuk membangun aplikasi GUI atau dashboard pada aplikasi web. Untuk pengembangan aplikasi, beberapa bahasa pemrograman yang umum digunakan meliputi HTML, PHP, dan JavaScript. Bahasa-bahasa tersebut memungkinkan pembuatan antarmuka yang dinamis dan interaktif. Pengembangan aplikasi web juga memerlukan perangkat pendukung, seperti *framework*, CSS, dan Bootstrap, untuk mempermudah pengaturan tampilan serta meningkatkan responsivitas aplikasi.

Dalam pengelolaan basis data, MySQL banyak digunakan sebagai sistem manajemen basis data yang mendukung penyimpanan dan pengelolaan data berbasis SQL. Basis data tersebut dapat diakses melalui *web server*, seperti Apache, Nginx, atau Lighttpd, untuk mendukung aplikasi web. Untuk memudahkan pengelolaan basis data, banyak digunakan aplikasi administrasi berbasis web, seperti PhpMyAdmin. Aplikasi ini memungkinkan administrator melakukan konfigurasi, pemantauan, dan pemeliharaan basis data.

Untuk keperluan pelaporan, data dapat diekspor ke dalam format PDF dan CSV sehingga mudah dibagikan maupun

Buku ini tidak diperjualbelikan

diarsipkan. Untuk visualisasi data spasial, layanan pemetaan, seperti Google Maps, Mapbox, dan Mappls, menyediakan API. API tersebut memungkinkan integrasi data geografis ke dalam aplikasi web.API tersebut memungkinkan pengguna menampilkan dan memanfaatkan data spasial secara interaktif.

B. Evaluasi

Evaluasi merupakan tahap akhir dari serangkaian kegiatan yang dilakukan ketika menggunakan sistem LCS sebagai alat pemantauan kualitas udara. Evaluasi berkaitan dengan proses interpretasi, analisis, dan validasi data. Hasil evaluasi tersebut menjadi dasar untuk menjawab tujuan pemantauan kualitas udara menggunakan sistem LCS. Selain menjawab tujuan pemantauan, hasil interpretasi dan analisis data juga dapat digunakan untuk menginformasikan kondisi kualitas udara di lokasi penempatan jaringan LCS. Penyampaian informasi tersebut harus didukung oleh data yang akurat dan presisi. Bagian ini membahas secara ringkas interpretasi dan analisis data serta penyampaian hasil pengukuran kepada masyarakat.

1. Interpretasi Data

Interpretasi dan analisis data memerlukan pemahaman yang memadai agar hasilnya akurat dan bermakna. Interpretasi data biasanya dapat dilakukan dengan mengidentifikasi pola yang terbentuk dari data pengukuran. Sebagai contoh, hasil pengukuran konsentrasi gas ozon menunjukkan peningkatan yang signifikan mulai pukul 10.00 pagi. Konsentrasi tersebut mencapai puncak pada pukul 14.00, kemudian menurun secara bertahap pada sore hari. Interpretasi tersebut diperoleh melalui proses analisis yang mencakup pemrosesan dan visualisasi data sehingga pola yang terbentuk dapat dijelaskan secara ilmiah.

Menurut panduan yang diadaptasi dari *The Enhanced Air Sensor Guidebook* (Clements et al. 2022), terdapat beberapa langkah untuk menghasilkan interpretasi data yang andal. Langkah pertama

Buku ini tidak diperjualbelikan

ialah melakukan pembersihan data dengan memeriksa adanya nilai yang tidak wajar, seperti nilai negatif atau nilai ekstrem (*outlier*). Nilai tersebut umumnya muncul akibat gangguan sensor atau kegagalan perangkat sehingga perlu dihapus dari *dataset*. Selain itu, satuan konsentrasi dan zona waktu pada data pengukuran juga perlu diperiksa agar sesuai dengan standar yang digunakan. Langkah berikutnya ialah mendokumentasikan setiap perubahan atau penyesuaian data yang dilakukan selama proses pembersihan. Dokumentasi ini penting untuk melacak jumlah data yang valid dan dapat digunakan dalam analisis lebih lanjut. Dokumentasi tersebut penting untuk melacak jumlah data yang valid dan layak dianalisis. Selain itu, analisis akan lebih komprehensif apabila didukung oleh data tambahan, seperti data meteorologi, lalu lintas, kepadatan penduduk, dan informasi emisi. Data tersebut membantu memperkaya interpretasi hasil pengukuran LCS.

Data yang telah dibersihkan dapat dikelompokkan dan dirata-ratakan untuk mengidentifikasi tren. Analisis dapat dilakukan berdasarkan periode waktu, seperti harian, bulanan, atau tahunan, maupun kondisi tertentu, seperti musim atau kejadian khusus. Sebagai contoh, analisis sumber $PM_{2,5}$ dilakukan dengan mengaitkan konsentrasi $PM_{2,5}$ dengan data kecepatan dan arah angin. Pendekatan tersebut memungkinkan asal polutan diperkirakan dengan lebih baik.

Langkah terakhir yang tidak kalah penting ialah membandingkan data pengukuran dari LCS dengan data rujukan. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi dan memvalidasi keakuratan data hasil pengukuran. Melalui tahapan tersebut, interpretasi data menjadi lebih akurat dan dapat diandalkan sebagai dasar pengambilan keputusan maupun penelitian lanjutan. Dengan demikian, analisis data tidak hanya membantu memahami pola polusi dan karakteristik lingkungan, tetapi juga mendukung penyusunan keputusan berbasis data.

Buku ini tidak diperjualbelikan

2. Visualisasi Data

Dalam studi kualitas udara, visualisasi data berperan penting untuk mempermudah interpretasi dan analisis hasil pengukuran. Melalui visualisasi, pola dan tren data dapat dipahami dengan lebih mudah. Visualisasi dapat disajikan dalam berbagai jenis plot yang masing-masing memiliki fungsi untuk menampilkan informasi tertentu dari data pengukuran. Berikut beberapa jenis plot yang umum digunakan dalam studi kualitas udara:

Plot deret waktu (*time series plot*) digunakan untuk memvisualisasikan perubahan hasil pengukuran berdasarkan waktu. Plot ini membantu pengguna mengidentifikasi tren jangka panjang maupun variasi jangka pendek pada konsentrasi polutan atau parameter lingkungan lainnya. Plot deret waktu dapat digunakan dengan berbagai rentang waktu. Rentang waktu tersebut dapat ditetapkan berdasarkan jumlah data yang terkumpul atau periode tertentu, misalnya harian, mingguan, atau bulanan.

Scatter plot atau plot sebar digunakan untuk menunjukkan hubungan antara dua variabel. Visualisasi ini membantu mengidentifikasi ada atau tidaknya korelasi antara kedua variabel tersebut. Visualisasi ini penting untuk memahami apakah ada hubungan atau pengaruh antara dua variabel, misalnya antara konsentrasi polutan dengan suhu udara atau kelembapan. *Scatter plot* juga dapat digunakan untuk mengenali pola hubungan linier maupun nonlinier sebagai dasar analisis lebih lanjut.

Calendar plot digunakan untuk menampilkan pola data berdasarkan interval waktu tertentu, seperti harian, mingguan, bulanan, atau tahunan. Visualisasi ini memudahkan identifikasi waktu terjadinya konsentrasi polutan yang tinggi maupun rendah sehingga pola musiman atau pola periodik lainnya dapat diamati. Misalnya, pengguna dapat melihat apakah terdapat konsentrasi polutan yang lebih tinggi pada musim tertentu atau pada hari-hari tertentu dalam seminggu.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Mapping plot digunakan untuk menunjukkan distribusi spasial data pengukuran di wilayah tertentu. Visualisasi ini membantu mengidentifikasi wilayah dengan konsentrasi polutan yang tinggi maupun rendah. Visualisasi ini juga mendukung analisis spasial lanjutan, misalnya untuk menilai dampak sumber emisi lokal terhadap kualitas udara di sekitarnya.

Wind rose plot digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan sumber polusi berdasarkan arah dan kecepatan angin. Dengan memanfaatkan data arah dan kecepatan angin, visualisasi ini menunjukkan arah asal polutan serta frekuensi kemunculannya dari setiap arah. *Wind Rose Plot* sangat berguna dalam studi tentang sumber pencemaran udara. Informasi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan dalam perencanaan kebijakan mitigasi untuk mengendalikan polusi berdasarkan arah sumbernya.

Pemilihan jenis visualisasi yang tepat akan membantu proses interpretasi dan analisis data kualitas udara.

3. Komunikasi Hasil

Dalam menyampaikan hasil pemantauan kualitas udara berbasis LCS, pengguna perlu memperhatikan beberapa aspek. Informasi yang disampaikan harus jelas dan mudah dipahami. Dengan demikian, hasil pemantauan dapat dimanfaatkan oleh masyarakat, komunitas, pemerintah, regulator, industri, dan pemangku kepentingan lainnya. Karena hasil pemantauan LCS bersifat indikatif, penyampaian informasi perlu dilakukan secara cermat agar data tetap akurat, kredibel, dan tidak menimbulkan kesalahpahaman. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan antara lain sebagai berikut.

Hal pertama yang perlu disampaikan ialah tujuan kegiatan pemantauan. Pengguna juga perlu menjelaskan batasan penggunaan sistem LCS, terutama yang berkaitan dengan kualitas data dan pemanfaatannya dalam pengambilan kebijakan. Dibandingkan instrumen rujukan, sistem LCS memiliki keterbatasan dalam ketelitian dan akurasi sehingga hasil pengukurannya bersifat

Buku ini tidak diperjualbelikan

indikatif, bukan absolut. Oleh karena itu, pengguna perlu menyertakan *disclaimer*. Keterangan tersebut menjelaskan bahwa data hanya bersifat indikatif mengenai tren kualitas udara dan tidak dimaksudkan sebagai dasar penyusunan kebijakan atau regulasi.

Selain itu, perlu dijelaskan tahapan pemantauan yang telah dilakukan. Informasi tersebut mencakup hasil evaluasi kinerja sistem LCS melalui uji laboratorium maupun kolokasi, proses kalibrasi sensor, penentuan lokasi pemantauan, serta kajian lingkungan di sekitar lokasi. Penjelasan ini membantu memberikan gambaran yang utuh mengenai pelaksanaan kegiatan pemantauan. Keterangan mengenai zona waktu yang digunakan dalam pengumpulan data serta proses penjaminan mutu dan pengendalian mutu (QA/QC) juga perlu disampaikan. Informasi tersebut membantu pembaca memahami prosedur pemantauan secara menyeluruh.

Agar hasil pengukuran lebih mudah dipahami, visualisasi data perlu disajikan dengan cara yang sederhana. Penggunaan grafik, diagram, atau tabel yang mudah dibaca akan membantu berbagai kalangan memahami tren dan kondisi kualitas udara. Visualisasi yang tepat memungkinkan masyarakat dan pemangku kepentingan lainnya memahami kondisi kualitas udara tanpa memerlukan pengetahuan teknis yang mendalam. Komunikasi hasil yang baik akan membantu berbagai pemangku kepentingan memahami kondisi dan tren kualitas udara secara tepat.

C. Studi Kasus dan Praktik Penerapan LCS di Negara Lain

Berbagai negara telah memanfaatkan teknologi LCS sebagai pelengkap sistem pemantauan kualitas udara konvensional. Studi-studi ini memberikan contoh konkret bagaimana LCS dapat meningkatkan cakupan spasial pemantauan, keterlibatan publik, serta ketanggapan terhadap kondisi pencemaran tertentu. Pengalaman internasional ini dapat menjadi bahan acuan dalam mengembangkan strategi pemanfaatan LCS di Indonesia. Acuan tersebut terutama relevan bagi

Buku ini tidak diperjualbelikan

wilayah yang memiliki keterbatasan infrastruktur dan sumber daya. Berikut ini disajikan ringkasan beberapa studi dari berbagai negara yang telah menerapkan LCS sebagai pelengkap sistem pemantauan kualitas udara konvensional.

1. Implementasi LCS di Nairobi, Kenya

Pembangunan jalan Missing Link #12 (ML#12) di Nairobi, Kenya, melintasi kawasan permukiman padat penduduk Kibera. Kondisi tersebut menimbulkan kekhawatiran terhadap meningkatnya paparan polusi udara akibat aktivitas konstruksi dan lalu lintas. Sebagai respons, institusi setempat bekerja sama dengan peneliti dari Universitas Birmingham, Inggris, untuk melakukan studi pemantauan berbasis LCS. Studi ini bertujuan menyusun data dasar (*baseline*) kualitas udara sekaligus mendukung keterlibatan masyarakat dalam pengelolaan risiko lingkungan (Manshur et al. 2023). Pendekatan tersebut menggabungkan pengukuran partikel udara dengan metode *citizen science*, yaitu pelibatan masyarakat dalam pengumpulan dan interpretasi data.

Secara teknis, sensor yang digunakan ialah AlphaSense OPC-N2, sebuah sensor optik berbiaya rendah yang mampu mengukur PM_1, $PM_{2.5}$, dan PM_{10}. Sebelum dipasang, sensor terlebih dahulu dikalibrasi secara *side-by-side* dengan instrumen rujukan berbasis metode gravimetri. Berdasarkan hasil kalibrasi, diperoleh faktor koreksi $PM_{2.5}$ sebesar 1,8 ± 0,40. Faktor koreksi digunakan untuk memastikan keakurasian dan kesesuaian data terhadap nilai massa yang relevan secara kesehatan. Sebelum dipasang, sensor terlebih dahulu dikalibrasi secara *side-by-side* dengan instrumen rujukan berbasis metode gravimetri. Selama pemantauan, sensor menggunakan *power bank* sebagai sumber daya karena keterbatasan pasokan listrik di wilayah tersebut.

Hasil pengukuran menunjukkan median konsentrasi $PM_{2.5}$ sebesar 23,1 µg/m³ dan PM_{10} sebesar 43,0 µg/m³, dengan nilai maksimum masing-masing mencapai 404,5 µg/m³ dan 1.053,8 µg/

Buku ini tidak diperjualbelikan

m^3. Pola temporal menunjukkan peningkatan paparan pada waktu makan siang dan malam. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh signifikan dari aktivitas memasak rumah tangga yang menggunakan bahan bakar padat. Selain itu, konsentrasi PM_{10} yang tinggi pada siang hari dikaitkan dengan resuspensi debu akibat konstruksi jalan yang belum sepenuhnya beraspal.

Setelah pengukuran selesai dilakukan, lokakarya bersama warga dilakukan untuk membahas dan mengintepretasikan data serta merumuskan strategi mitigasi. Kegiatan ini menghasilkan sejumlah tindakan praktis. Tindakan tersebut meliputi peningkatan ventilasi saat memasak, penggunaan bahan bakar yang lebih bersih, serta pembersihan lantai dengan membasahi permukaannya untuk mengurangi debu. Selain itu, survei terhadap 452 rumah tangga menunjukkan bahwa mayoritas warga merasakan penurunan kualitas udara sejak dimulainya pembangunan. Tingkat kekhawatiran tertinggi ditemukan pada warga yang tinggal paling dekat dengan jalan. Temuan tersebut konsisten dengan hasil pemantauan kualitas udara.

Kalibrasi yang memadai dan keterlibatan komunitas, LCS dapat menghasilkan data yang kredibel untuk mendukung advokasi berbasis bukti di wilayah rentan. Pendekatan ini memperkuat kapasitas teknis dalam pemantauan lingkungan. Partisipasi masyarakat dalam pengambilan keputusan terkait pembangunan dan kesehatan lingkungan pun semakin meningkat.

2. Implementasi LCS di Accra, Ghana

McFarlane et al. (2021) mendemonstrasikan penerapan sistem pemantauan kualitas udara berbasis LCS di Accra, Ghana. Studi tersebut dilakukan sebagai respons terhadap keterbatasan infrastruktur pemantauan konvensional di kawasan perkotaan Afrika. Kawasan tersebut berpenduduk padat dan memiliki tingkat pencemaran udara yang tinggi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja berbagai sensor PM pada kondisi lokal serta

Buku ini tidak diperjualbelikan

mengembangkan metode koreksi berbasis data. Selain itu, penelitian ini juga mengimplementasikan jaringan pemantauan jangka panjang untuk mengurangi kesenjangan spasial dan temporal data $PM_{2.5}$. Empat jenis sensor, yaitu Clarity Node-S, PurpleAir PA-II-SD, QuantAQ Modulair, dan Sensirion SPS30, diuji secara *side-by-side* dengan instrumen rujukan BAM-1022. Pengujian dilakukan pada dua periode pemantauan, yaitu musim kering dan musim hujan. Hasil awal menunjukkan bahwa semua sensor memiliki korelasi yang tinggi terhadap instrumen rujukan pada kondisi kelembapan rendah ($R^2 > 0{,}9$). Namun, akurasinya menurun pada kondisi kelembapan tinggi akibat *positive bias*.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, peneliti mengembangkan dan membandingkan empat model koreksi data. Empat model koreksi data yang dibandingkan ialah *Multiple Linear Regression* (MLR), *Random Forest* (RF), *Gaussian Mixture Regression* (GMR), dan *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost). Keempat model tersebut dilatih menggunakan variabel lingkungan, seperti suhu dan kelembapan relatif. Selanjutnya, kinerjanya dievaluasi menggunakan nilai R^2, MAE, dan RMSE. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model berbasis pembelajaran mesin, terutama XGBoost dan Random Forest, memberikan kinerja terbaik. Kinerja tersebut ditunjukkan oleh nilai MAE kurang dari 5 $\mu g/m^3$, bahkan pada kondisi kelembapan yang tinggi.

Setelah model kalibrasi dikembangkan, sensor PurpleAir digunakan dalam jaringan pemantauan jangka panjang di lima lokasi di Accra selama lebih dari dua tahun (2020–2022). Sensor merekam data $PM_{2.5}$ setiap 10 menit secara kontinu. Hasil perekaman tersebut membentuk *dataset* spasial-temporal berkualitas tinggi. Analisis *dataset* menunjukkan pola musiman yang konsisten, dengan konsentrasi tertinggi terjadi pada musim kering akibat kombinasi emisi lokal dan kondisi meteorologis. Sensor juga mampu mendeteksi episode pencemaran, seperti kebakaran lokal dan fluktuasi lalu lintas, yang sering kali tidak terdeteksi oleh stasiun pemantauan tetap. Studi ini menunjukkan bahwa integrasi LCS yang telah dikalibrasi

Buku ini tidak diperjualbelikan

secara lokal dengan metode kalibrasi berbasis pembelajaran mesin dapat menjadi kerangka kerja teknis dan praktis. Kerangka kerja tersebut dapat digunakan untuk memperluas sistem pemantauan kualitas udara di kota-kota dengan sumber daya terbatas. Data yang dihasilkan mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti. Data tersebut juga menjadi dasar bagi advokasi publik, pengendalian pencemaran, dan pengembangan sistem peringatan dini terhadap paparan polusi udara.

3. Implementasi LCS di Lome, Togo

Dalam upaya memperluas cakupan data kualitas udara di Afrika Barat, Raheja et al. (2022) mengembangkan dan mengoperasikan jaringan LCS untuk memantau $PM_{2.5}$ di Kota Lomé, Togo. Studi ini dilakukan sebagai respons terhadap keterbatasan data kualitas udara di kawasan tersebut. Keterbatasan sistem pemantauan konvensional menjadi dasar penerapan LCS sekaligus pengembangan metode kalibrasi berbasis kolokasi jangka pendek dengan instrumen rujukan BAM-1020. Metode kalibrasi tersebut dikembangkan untuk menghasilkan data $PM_{2.5}$ beresolusi tinggi yang andal serta mendukung sistem pemantauan jangka panjang yang hemat biaya dan berkelanjutan.

Sebanyak tujuh sensor PurpleAir dipasang di lokasi strategis di Lomé, meliputi kawasan permukiman, pusat kota, dan pelabuhan. Semua sensor beroperasi secara kontinu selama 13–23 bulan (2021–2023). Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan statistik: regresi linier dan regresi kuadratik, berdasarkan data kolokasi selama satu bulan. Hasil validasi menunjukkan bahwa model regresi kuadratik memberikan kinerja terbaik. Kinerja tersebut ditunjukkan oleh nilai R^2 sebesar 0,92 dan kesalahan rata-rata absolut (MAE) di bawah 5 $\mu g/m^3$. Model koreksi ini kemudian diterapkan untuk semua data jangka panjang dari jaringan sensor.

Analisis data mengungkapkan bahwa konsentrasi $PM_{2.5}$ di Lomé secara konsisten melampaui ambang batas tahunan WHO (5 $\mu g/m^3$),

Buku ini tidak diperjualbelikan

dengan median bulanan berkisar antara 18 hingga 47 μg/m³. Variasi musiman terlihat jelas. Konsentrasi $PM_{2.5}$ mencapai puncaknya pada musim kering (Desember–Februari) akibat meningkatnya transportasi debu dari Sahara (*harmattan*) dan menurunnya curah hujan. Pola harian juga teridentifikasi, menunjukkan peningkatan konsentrasi pada pagi dan malam hari, berkorelasi dengan aktivitas transportasi dan pembakaran domestik.

Studi ini menunjukkan bahwa jaringan LCS yang dikalibrasi secara lokal dapat menyediakan data kualitas udara yang representatif dan berkelanjutan. Temuan ini memperlihatkan bahwa pendekatan tersebut dapat diterapkan di kota-kota yang sebelumnya belum memiliki sistem pemantauan kualitas udara. Keberhasilan implementasi di Lomé menunjukkan bahwa pendekatan ini berpotensi diterapkan di kota-kota lain yang memiliki keterbatasan sistem pemantauan konvensional. Penerapannya dapat mendukung penelitian, advokasi kesehatan masyarakat, maupun penyusunan kebijakan lingkungan berbasis bukti.

4. Implementasi LCS di California, Amerika Serikat

Salah satu contoh penerapan LCS di negara maju ditunjukkan melalui studi Ahangar et al. (2022) di California, Amerika Serikat. Penelitian tersebut menerapkan LCS untuk mendeteksi dan mengarakterisasi paparan asap kebakaran hutan (*wildfire smoke*) secara *real-time*. Penerapan ini dilakukan di beberapa wilayah Amerika Serikat bagian barat. Sistem ini dikembangkan sebagai respons terhadap meningkatnya frekuensi dan intensitas kebakaran hutan yang menyebabkan lonjakan konsentrasi $PM_{2.5}$ dalam waktu singkat. Kejadian tersebut sulit dipantau hanya dengan jaringan stasiun konvensional karena cakupan spasialnya terbatas. Sistem ini mengintegrasikan data $PM_{2.5}$ dari sensor PurpleAir, citra kamera *time-lapse*, dan laporan masyarakat (*crowd-sourced smoke observations*). Integrasi data tersebut memungkinkan pengembangan sistem pemantauan yang tanggap dan berbiaya rendah.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Sensor PurpleAir PA-II digunakan untuk mengukur konsentrasi $PM_{2.5}$ setiap dua menit, kemudian mengirimkan data secara daring ke platform terbuka. Sebelum dipasang, sensor dikalibrasi secara empiris melalui kolokasi dengan instrumen rujukan di beberapa lokasi. Dua model koreksi yang digunakan yaitu linier dan logaritmik. Kedua model tersebut digunakan untuk meningkatkan akurasi terutama pada konsentrasi tinggi. Selain data $PM_{2.5}$, sistem juga memanfaatkan citra dari kamera luar ruangan (*outdoor webcams*). Kamera ini mengambil gambar secara berkala sehingga keberadaan asap dapat diamati secara visual. Laporan masyarakat mengenai keberadaan asap juga dikumpulkan melalui platform daring *SmokeSense*. Data tersebut kemudian divalidasi dan dibandingkan dengan hasil pengukuran sensor serta informasi dari media sosial.

Hasil integrasi ketiga sumber data menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kejadian polusi akibat asap kebakaran secara lebih cepat dibandingkan metode pemantauan konvensional. Sistem juga mampu mengarakterisasi kejadian tersebut secara lebih rinci. Korelasi antara peningkatan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan visibilitas pada citra kamera mendukung validitas sensor berbiaya rendah dalam mendeteksi kejadian ekstrem. Selain itu, laporan masyarakat membantu memperkuat interpretasi data ketika sensor atau kamera tidak tersedia di lokasi tertentu. Studi kasus kebakaran besar pada tahun 2018 dan 2020 menunjukkan bahwa sistem ini mampu menyediakan informasi dalam waktu nyaris *real-time*. Informasi tersebut menjadi dasar bagi sistem peringatan dini serta upaya perlindungan kesehatan masyarakat, terutama bagi kelompok rentan.

Kesuksesan pendekatan ini terletak pada integrasi multi-sumber data yang berbasis teknologi terjangkau dan partisipasi publik. Sistem ini menawarkan biaya yang relatif rendah, cakupan yang luas, dan respons yang cepat. Keunggulan tersebut menjadikannya pelengkap yang efektif bagi jaringan pemantauan kualitas udara nasional, terutama pada situasi darurat kebakaran hutan. Studi ini menunjukkan bahwa sensor berbiaya rendah dapat dimanfaatkan

Buku ini tidak diperjualbelikan

secara optimal untuk pemantauan berbasis kejadian (*event-based monitoring*). Pemanfaatan tersebut memerlukan model koreksi yang tepat serta mekanisme validasi visual dan partisipasi masyarakat. Pendekatan tersebut menjadi makin relevan di era perubahan iklim.

5. Implementasi LCS di sepanjang *Greater London*, Inggris

Peters et al. (2022) mengevaluasi penerapan jaringan LCS untuk mengukur salah satu gas pencemar, yaitu nitrogen dioksida (NO_2), di wilayah Greater London, Inggris. Studi ini menekankan analisis ketidakpastian data serta implikasinya terhadap pemahaman pola pencemaran udara perkotaan. Sensor elektrokimia yang terpasang pada unit AQMesh ditempatkan secara padat di berbagai tipe lokasi. Penempatannya mencakup kawasan tepi jalan, area dengan lalu lintas tinggi, kawasan permukiman, dan lingkungan sekolah. Penempatan tersebut bertujuan melengkapi jaringan pemantauan rujukan London Air Quality Network (LAQN) yang memiliki keterbatasan resolusi spasial.

Sebanyak 100 unit sensor AQMesh digunakan untuk mengukur NO_2 secara kontinu. Sebagian sensor kemudian dikolokasikan dengan stasiun referensi LAQN untuk mengevaluasi kinerja dan bias sensor. Penelitian ini menggunakan tiga metode kalibrasi, yaitu *side-by-side* (kolokasi langsung dengan instrumen rujukan), *transfer calibration*, dan *network calibration*. Pada metode *transfer calibration*, beberapa unit AQMesh yang dipilih sebagai sensor kandidat dikolokasikan kembali dengan instrumen rujukan setiap 2–4 bulan. Hasil analisis menunjukkan bahwa tren temporal NO_2 yang diukur sensor sejalan dengan instrumen rujukan. Meskipun demikian, variasi bias dan ketidakpastian masih cukup besar antarlokasi maupun antarsensor. Ketidakpastian tersebut dipengaruhi oleh faktor lingkungan, karakteristik lokasi, serta keterbatasan intrinsik sensor elektrokimia, seperti gangguan akibat ozon (O_3). Studi ini menekankan bahwa hasil perbandingan sensor–referensi hanya valid dalam konteks

Buku ini tidak diperjualbelikan

teknologi sensor dan kondisi lingkungan tertentu. Dengan demikian, generalisasi hasil harus dilakukan secara hati-hati..

Melalui pendekatan statistik terhadap ketidakpastian pengukuran, penelitian ini menunjukkan bahwa jaringan LCS mampu menangkap gradien spasial NO_2 yang relevan untuk mendukung kebijakan. Perbedaan konsentrasi NO_2 antara lokasi tepi jalan dan latar belakang perkotaan menjadi salah satu contohnya. Namun, tanpa pengelolaan ketidakpastian yang eksplisit, interpretasi data beresolusi tinggi berpotensi menyesatkan pengambilan keputusan. Oleh karena itu, studi ini menekankan pentingnya perancangan jaringan LCS yang cermat. Kinerja sensor perlu dipantau secara berkala selama kampanye pengukuran. Selain itu, klasifikasi lokasi juga harus dilakukan secara tepat. Hal ini penting karena ketidakpastian pengukuran LCS dapat bervariasi bergantung pada lokasi penempatan sensor.

6. Simpulan: Pembelajaran Kunci dan Implikasi Strategis

Lima studi kasus di atas menunjukkan bahwa teknologi LCS mempunyai potensi besar dalam memperluas sistem pemantauan kualitas udara. Teknologi ini terutama bermanfaat di wilayah yang sebelumnya belum terjangkau oleh stasiun pemantauan kualitas udara konvensional. LCS telah diterapkan di berbagai wilayah. Mulai dari kawasan permukiman padat di Nairobi hingga kota metropolitan seperti London, teknologi ini mampu menyediakan informasi spasial dan temporal yang lebih rinci. Kemampuan tersebut mendukung pemantauan kualitas udara pada berbagai karakteristik wilayah. LCS juga mendukung pemantauan pada kondisi khusus, seperti kebakaran hutan atau pembangunan infrastruktur.

Dari sisi teknis, keberhasilan implementasi LCS ditentukan oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi kalibrasi lokal dan penggunaan model koreksi, baik statistik maupun berbasis pembelajaran mesin. Selain itu, validasi juga perlu mempertimbangkan suhu, kelembapan, dan lokasi penempatan sensor. Studi di

Buku ini tidak diperjualbelikan

Ghana dan Togo menunjukkan bahwa penerapan pembelajaran mesin dan desain kolokasi yang tepat dapat meningkatkan akurasi sensor. Peningkatan tersebut membuat kinerja sensor mendekati instrumen rujukan, bahkan pada kondisi iklim tropis yang kompleks.

Namun, aspek teknis bukan satu-satunya kunci keberhasilan. Studi di Kenya dan Amerika Serikat menunjukkan pentingnya keterlibatan masyarakat melalui pendekatan partisipatif. Melalui pendekatan tersebut, LCS tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai alat pemberdayaan masyarakat. Pelibatan tersebut membantu menjembatani kesenjangan antara pengetahuan ilmiah dan pengambilan keputusan di tingkat lokal. Sementara itu, studi di Inggris menegaskan pentingnya pengelolaan ketidakpastian data. Pengelolaan tersebut menjadi makin penting ketika LCS digunakan dalam jaringan berskala besar yang mendukung kebijakan transportasi dan kesehatan.

Pelajaran yang dapat diambil untuk konteks Indonesia mencakup tiga dimensi utama. Pertama, kapasitas teknis, meliputi pelatihan kalibrasi dan pengolahan data. Kedua, kerangka kelembagaan, guna memastikan integrasi data LCS ke dalam sistem nasional. Ketiga, penguatan kolaborasi multipihak, antara pemerintah, akademisi, masyarakat, dan swasta. Penerapan prinsip-prinsip tersebut memberikan peluang bagi Indonesia untuk membangun sistem pemantauan kualitas udara yang lebih inklusif, adaptif, dan berbasis bukti. Dalam konteks tersebut, LCS tidak hanya berfungsi sebagai perangkat pengukur. Teknologi ini juga menjadi bagian dari strategi nasional untuk mengurangi dampak kesehatan dan sosial akibat pencemaran udara.

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAB VIII
PENUTUP

Pemanfaatan teknologi sensor biaya rendah (LCS) untuk pemantauan kualitas udara telah memainkan peran penting. Teknologi ini membuka akses yang lebih luas terhadap informasi kualitas udara. Teknologi ini memungkinkan berbagai pemangku kepentingan, mulai dari peneliti, pemerintah, hingga masyarakat, berpartisipasi dalam pemantauan kualitas udara secara langsung. Dengan biaya yang relatif terjangkau dan kemudahan penggunaannya, LCS mendorong partisipasi yang lebih luas dalam pengumpulan dan analisis data kualitas udara. Sebelumnya, kegiatan tersebut umumnya bergantung pada instrumen pemantauan konvensional yang lebih mahal dan kompleks.

Namun, penggunaan LCS untuk pemantauan kualitas udara menghadapi tantangan akurasi dan presisi data. Keakuratan pengukuran LCS dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti suhu, kelembapan, dan sensitivitas silang terhadap polutan lain. Akurasi data LCS sering kali lebih rendah dibandingkan instrumen pemantauan konvensional atau rujukan. Oleh karena itu, data LCS memerlukan kalibrasi dan penyesuaian secara berkala agar kualitasnya tetap terjaga.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, kalibrasi melalui kolokasi dengan instrumen rujukan sangat disarankan agar data LCS memenuhi standar akurasi yang dipersyaratkan. Selain itu,

Buku ini tidak diperjualbelikan

metode pembelajaran mesin dapat digunakan untuk mengoreksi data dengan mengenali pola gangguan yang dipengaruhi oleh variabel lingkungan. Pemeliharaan rutin, seperti pembersihan sensor dan kalibrasi ulang, perlu dilakukan secara berkala. Langkah ini bertujuan menjaga kualitas data serta memastikan keandalan LCS dalam mendukung kebijakan pengelolaan kualitas udara.

Ke depannya, teknologi LCS memiliki peluang besar untuk terus berkembang seiring dengan kemajuan di bidang elektronika, kecerdasan buatan (*artificial intelligence* - AI), dan IoT. Integrasi LCS dengan kecerdasan buatan, khususnya pembelajaran mesin, serta IoT membuka peluang pengembangan kemampuan perangkat. Selain mendeteksi dan melaporkan kualitas udara, perangkat juga mampu mengenali pola serta memprediksi tren pencemaran. Pendekatan ini berpotensi meningkatkan akurasi hasil pemantauan. Selain itu, penggabungan data dari berbagai sumber dapat meningkatkan keakuratan prediksi. Data yang digabungkan mencakup data satelit, stasiun pemantauan darat (*ground station*), dan informasi meteorologi. Selain itu, integrasi dengan kendaraan udara nirawak (*Unmanned Aerial Vehicle*—UAV) memungkinkan pemantauan wilayah yang sulit dijangkau serta pengukuran konsentrasi polutan pada berbagai ketinggian. Dengan demikian, LCS dapat dimanfaatkan secara lebih efektif dalam pengelolaan kualitas udara. Teknologi ini juga memberikan dasar yang lebih kuat bagi perumusan kebijakan udara bersih.

Untuk mendukung kebijakan penggunaan LCS, diperlukan kolaborasi yang erat antara pemerintah, akademisi, sektor swasta, dan masyarakat. Kolaborasi tersebut mencakup penyusunan regulasi mengenai penggunaan, instalasi, kalibrasi, dan pemeliharaan LCS. Selain itu, kolaborasi juga diperlukan dalam pengumpulan, pengelolaan, dan penyampaian data secara transparan kepada publik. Dengan regulasi dan panduan yang komprehensif, pemanfaatan LCS dapat dilakukan secara lebih efektif dan kredibel. Selain itu, data *real-time* yang dihasilkan dapat mendukung respons cepat terhadap pencemaran udara.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Lebih jauh lagi, kolaborasi ini berpotensi mendorong inovasi dalam teknologi LCS melalui riset bersama dan pembiayaan kolektif. Upaya tersebut dapat meningkatkan performa dan akurasi LCS. Dukungan dari berbagai pihak memastikan data yang dihasilkan LCS dapat diterima sebagai bukti ilmiah yang sahih. Dukungan tersebut juga memperkuat peran LCS dalam sistem pemantauan kualitas udara yang berkelanjutan. Pada akhirnya, berbagai upaya tersebut diharapkan dapat mendukung terwujudnya lingkungan yang lebih bersih dan sehat serta meningkatkan kualitas hidup masyarakat.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Pustaka

Abera, A. (2020). *Air pollution measurements and land-use regression in urban sub-Saharan Africa using low-cost sensors—Possibilities and pitfalls. Atmosphere, 11*, 1357. https://doi.org/10.3390/atmos11121357

Ahangar, F. E., Cobian-Iñiguez, J., & Cisneros, R. (2022). Combining regulatory instruments and low-cost sensors to quantify the effects of 2020 California wildfires on $PM_{2.5}$ in San Joaquin Valley. *Fire, 5*, 64. https://doi.org/10.3390/fire5030064

Alfano, B. (2020). A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives. In Sensors (Switzerland) (Vol. 20, Issue 23, pp. 1–56). https://doi.org/10.3390/s20236819

Alhasa, K. M. (2020). *Development of air quality sensor for measurement and calibration of selected air pollutants using machine learning technique.* [Disertasi tidak diterbitkan] Universitas Kebangsaan Malaysia.

Alhasa, K. M., Nadzir, M. S. M., Olalekan, P., Latif, M. T., Yusup, Y., Faruque, M. R. I., Ahamad, F., Hamid, H. H. A., Aiyub, K., Ali, S. H. M., Khan, M. F., Samah, A. A., Yusuff, I., Othman, M., Hassim, T. M. F. T., & Ezani, N. E. (2018). Calibration model of a low-cost air quality sensor using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Sensors, 18*, 4380. https://doi.org/10.3390/s18124380

Alphasense Ltd. (n.d.). *OPC-N3 particle monitor*. https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/03/OPC-N3.pdf

Buku ini tidak diperjualbelikan

Alvear-Puertas, V. E., Burbano-Prado, Y. A., Rosero-Montalvo, P. D., Tözün, P., Marcillo, F., & Hernandez, W. (2022). Smart and portable air-quality monitoring IoT low-cost devices in Ibarra City, Ecuador. *Sensors, 22*, 7015. https://doi.org/10.3390/s22187015

ANTARA FOTO. (2020, May 19). *Foto kolase perbandingan suasana gedung bertingkat tersamar kabut polusi udara sebelum adanya pandemi COVID-19 (kiri) dan saat pandemi COVID-19 di Jakarta* [Photograph]. https://www.antaranews.com/foto/1502356/begini-penampakan-kualitas-udara-jakarta-sebelum-dan-saat-pandemi-covid-19

Di Antonio, A. (2018). Developing a relative humidity correction for low-cost sensors measuring ambient particulate matter. *Sensors, 18*, 2790. https://doi.org/10.3390/s18092790

AQ-SPEC. (n.d.). *Sensor siting and installation guide (Version 1.0).* http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/aq-spec-sensor-siting-and-installation-guide_v1-0-(english).pdf

AQ-SPEC. (n.d.). *Low-cost sensor data analysis guide*. http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/star-grant/air-quality-sensor-data-analysis-guide.pdf?sfvrsn=6

AQ-SPEC. (n.d.). *User guide for the AirSensor DataViewer*. https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/research-projects/airsensor-dataviewer-user-guide.pdf?sfvrsn=8

Arroyo, P., Gómez-Suárez, J., Suárez, J. I., & Lozano, J. (2021). Low-cost air quality measurement system based on electrochemical and PM sensors with cloud connection. *Sensors, 21*, 6228. https://doi.org/10.3390/s21186228

Austin, E. (2015). Laboratory evaluation of the Shinyei PPD42NS low-cost particulate matter sensor. *PLOS ONE, 10*, e0137789. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137789

Buku ini tidak diperjualbelikan

Badura, M. (2019). Regression methods in the calibration of low-cost sensors for ambient particulate matter measurements. *SN Applied Sciences, 1*, 622. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0630-1

Bai, L., Wang, J., Ma, X., & Lu, H. (2018). Air pollution forecasts: An overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 15*, 780. https://doi.org/10.3390/ijerph15040780

Barcelo-Ordinas, J. M., Ferrer-Cid, P., Garcia-Vidal, J., Ripoll, A., & Viana, M. (2019). Distributed multi-scale calibration of low-cost ozone sensors in wireless sensor networks. *Sensors, 19*, 2503. https://doi.org/10.3390/s19112503

Baron, R., & Saffell, J. (2017). Amperometric gas sensors as a low-cost emerging technology platform for air quality monitoring applications: A review. *ACS Sensors, 2*(11), 1553–1566. https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00620

Bílek, J., Maršolek, P., Bílek, O., & Buček, P. (2022). Field test of mini photoionization detector-based sensors—Monitoring of volatile organic pollutants in ambient air. *Environments, 9*, 49. https://doi.org/10.3390/environments9040049

Bochenkov, V. E., & Sergeev, G. B. (2010). Sensitivity, selectivity, and stability of gas-sensitive metal-oxide nanostructures. In A. Umar & Y.-B. Hahn (Eds.), *Metal oxide nanostructures and their applications* (pp. 31–52). American Scientific Publisher (2010)

Borrego, C., Costa, A. M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., Sioumis, T., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Smith, P., André, N., Gérard, P., Francis, L. A., Castell, N., Schneider, P., Viana, M., & Minguillón, M. C. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment, 147*, 246–263. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050

Borrego, C., Ginja, J., Coutinho, M., Ribeiro, C., Karatzas, K., Sioumis, T., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Salvato, M., Smith, P., André, N., Gérard, P.,

Buku ini tidak diperjualbelikan

Francis, L. A., Castell, N., Schneider, P., Viana, M., Minguillón, M. C., Reimringer, W., Otjes, R. P., von Sicard, O., Pohle, R., Elen, B., Suriano, D., Pfister, V., Prato, M., Dipinto, S., & Penza, M. (2018). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise—Part II. *Atmospheric Environment, 193*, 127–142. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.028

van den Bossche, M., Rose, N. T., & De Wekker, S. F. J. (2017). Potential of a low-cost gas sensor for atmospheric methane monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical, 238*, 501–509. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.092

Bruins, M., Gerritsen, J. W., van De Sande, W. W. J., van Belkum, A., & Bos, A. (2013). Enabling a transferable calibration model for metal-oxide type electronic noses. *Sensors and Actuators B: Chemical, 188*, 1187–1195. https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.08.006

Campbell, J. L., Rustad, L. E., Porter, J. H., Taylor, J. R., Dereszynski, E. W., Shanley, J. B., Gries, C., Henshaw, D. L., Martin, M. E., Sheldon, W. M., & Boose, E. R. (2013). Quantity is nothing without quality: Automated QA/QC for streaming environmental sensor data. *BioScience, 63*(7), 574–585. https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.7.10

Camprodon, G., González, Ó., Barberán, V., Pérez, M., Smári, V., de Heras, M. Á., & Bizzotto, A. (2019). Smart Citizen Kit and Station: An open environmental monitoring system for citizen participation and scientific experimentation. *HardwareX, 6*, e00070. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00070

Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International, 99*, 293–302. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007

Buku ini tidak diperjualbelikan

Castell, N., Viana, M., Minguillón, M. C., Guerreiro, C., & Querol, X. (2013). *Real-world application of new sensor technologies for air quality monitoring*. European Topic Centre on Air Pollution and Climate Change Mitigation. http://acm.eionet.europa.eu/reports/ETCACM_TP_2013_16_new_AQ_SensorTechn

Cheong, K. H., Ngiam, N. J., Morgan, G. G., Pek, P. P., Tan, B. Y.-Q., Lai, J. W., Koh, J. M., Ong, M. E. H., & Ho, A. F. W. (2019). Acute health impacts of the Southeast Asian transboundary haze problem: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 16*, 3286. https://doi.org/10.3390/ijerph16183286

Chuwah, C., van Noije, T., van Vuuren, D. P., Stehfest, E., & Hazeleger, W. (2015). Global impacts of surface ozone changes on crop yields and land use. *Atmospheric Environment, 106*, 11–23. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.062

Clements, A., Duvall, R., Greene, D., & Dye, T. (2022). *The enhanced air sensor guidebook*. (Report No. EPA/600/R-22/213). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Center for Environmental Measurement and Modeling. https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/how-use-air-sensors-air-sensor-guidebook

Crilley, L. R., Shaw, M., Pound, R., Kramer, L. J., Price, R., Young, S., Lewis, A. C., & Pope, F. D. (2018). Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. Atmospheric Measurement Techniques, 11, 709–720. https://doi.org/10.5194/amt-11-709-2018

Crilley, L. R., Singh, A., Kramer, L. J., Shaw, M. D., Alam, M. S., Apte, J. S., Bloss, W. J., Hildebrandt Ruiz, L., Fu, P., Fu, W., Gani, S., Gatari, M., Ilyinskaya, E., Lewis, A. C., Ng'ang'a, D., Sun, Y., Whitty, R. C. W., Yue, S., Young, S., & Pope, F. D. (2020). Effect of aerosol composition on the performance of low-cost optical particle counter correction factors. *Atmospheric Measurement Techniques, 13*, 1181–1193.https://doi.org/10.5194/amt-13-1181-2020

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daly, A., & Zannetti, P. (2007). *An introduction to air pollution: Definitions, classifications, and history*. In P. Zannetti, D. Al-Ajmi, & S. Al-Rashied (Eds.), Ambient air pollution (pp. 1–14). The Arab School for Science and Technology; The EnviroComp Institute.

Dey, A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering: B, 229*, 206–217.https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036

Dinh, T. V., Choi, I. Y., Son, Y. S., & Kim, J. C. (2016). *A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction*. In Sensors and Actuators, B: Chemical (Vol. 231, pp. 529–538). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040

Duvall, R. M., Clements, A. L., Hagler, G., Kamal, A., Kilaru, V., Goodman, L., Frederick, S., Barkjohn, K. K., VonWald, I., Greene, D., & Dye, T. (2021). *Performance testing protocols, metrics, and target values for fine particulate matter air sensors: Use in ambient, outdoor, fixed-site, non-regulatory supplemental and informational monitoring applications* (EPA/600/R-20/280). U.S. Environmental Protection Agency.

Duvall, R. M., Clements, A. L., Hagler, G., Kamal, A., Kilaru, V., Goodman, L., Frederick, S., Barkjohn, K. K., VonWald, I., Greene, D., & Dye, T. (2021). *Performance testing protocols, metrics, and target values for ozone air sensors: Use in ambient, outdoor, fixed-site, non-regulatory supplemental and informational monitoring applications* (Report No. EPA/600/R-20/279).. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1012RA8.TXT

Duvall, R. M., Long, R. W., Beaver, M. R., Kronmiller, K. G., Wheeler, M. L., & Szykman, J. J. (2016). Performance evaluation and community application of low-cost sensors for ozone and nitrogen dioxide. *Sensors, 16*, 1698. https://doi.org/10.3390/s16101698

Buku ini tidak diperjualbelikan

Esposito, E., De Vito, S., Salvato, M., Bright, V., Jones, R. L., & Popoola, O. (2016). Dynamic neural network architectures for on-field stochastic calibration of indicative low-cost air quality sensing systems. *Sensors and Actuators B: Chemical, 231*, 701–713. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.038

Esposito, E., De Vito, S., Salvato, M., Fattoruso, G., & Bright, V. (2018). Stochastic comparison of machine learning approaches to calibration of mobile air quality monitors. In B. Andò, F. Baldini, C. Di Natale, G. Marrazza, & P. Siciliano (Eds.), *Sensors* (Vol. 431, pp. 301–308). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55077-0_38 [1]

Esposito, E., De Vito, S., Salvato, M., Fattoruso, G., & Di Francia, G. (2017). Computational intelligence for smart air quality monitors calibration. In O. Gervasi, B. Murgante, S. Misra, G. Borruso, C. M. Torre, A. M. A. C. Rocha, D. Taniar, B. O. Apduhan, E. Stankova, & A. Cuzzocrea (Eds.), Computational science and its applications – ICCSA 2017 (Vol. 10406, pp. 427–442). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62398-6_31

Fattoruso, G. (2020). Site suitability analysis for low-cost sensor networks for urban spatially dense air pollution monitoring. *Atmosphere, 11*, 1215. https://doi.org/10.3390/atmos11111215

Feenstra, B., Collier-Oxandale, A., Papapostolou, V., Cocker, D., & Polidori, A. (2020). The AirSensor open-source R package and DataViewer web application for interpreting community data collected by low-cost sensor networks. *Environmental Modelling & Software, 134*, 104832. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104832

Fonollosa, J., Fernández, L., Gutiérrez-Gálvez, A., Huerta, R., & Marco, S. (2016). Calibration transfer and drift counteraction in chemical sensor arrays using direct standardization. *Sensors and Actuators B: Chemical, 236*, 1044–1053. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.05.089

Buku ini tidak diperjualbelikan

Gilliam, J. H., & Hall, E. S. (2016). *Reference and equivalent methods used to measure National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) criteria air pollutants* (Vol. I). (Report No. EPA/600/R-16/139). U.S. Environmental Protection Agency

Giordano, M. R. (2021). From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors. *Journal of Aerosol Science, 158*, 105833. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105833

Hagan, D. H., Isaacman-VanWertz, G., Franklin, J. P., Wallace, L. M. M., Kocar, B. D., Heald, C. L., & Kroll, J. H. (2018). Calibration and assessment of electrochemical air quality sensors by co-location with regulatory-grade instruments. *Atmospheric Measurement Techniques, 11*, 315–328.https://doi.org/10.5194/amt-11-315-2018

Hagan, D. H., & Kroll, J. H. (2020). Assessing the accuracy of low-cost optical particle sensors using a physics-based approach. *Atmospheric Measurement Techniques, 13*, 6343–6355. https://doi.org/10.5194/amt-13-6343-2020

Hapidin, D. A. (2020). Development of a new personal air filter test system using a low-cost particulate matter (PM) sensor. *Aerosol Science and Technology, 54*(2), 203–216.https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1678734

Hasenfratz, D., Saukh, O., Walser, C., Hueglin, C., Fierz, M., Arn, T., Beutel, J., & Thiele, L. (2014). Deriving high-resolution urban air pollution maps using mobile sensor nodes. *Pervasive and Mobile Computing*. https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.11.008

Hedworth, H. A., Sayahi, T., Kelly, K. E., & Saad, T. (2021). The effectiveness of drones in measuring particulate matter. *Journal of Aerosol Science, 152*, 105702. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105702

Buku ini tidak diperjualbelikan

Internet Assigned Numbers Authority. (n.d.). *Hypertext Transfer Protocol (HTTP) status code registry*. https://www.iana.org/assignments/http-status-codes/http-status-codes.xhtml

Isaac, N. A., Pikaar, I., & Biskos, G. (2022). *Metal oxide semiconducting nanomaterials for air quality gas sensors: operating principles, performance, and synthesis techniques*. Microchimica Acta (Vol. 189, Issue 5). Springer. https://doi.org/10.1007/s00604-022-05254-0

Jia, X., Roels, J., Baets, R., & Roelkens, G. (2019). On-chip non-dispersive infrared CO_2 sensor based on an integrating cylinder. *Sensors, 19*, 4260. https://doi.org/10.3390/s19194260

Jiao, W., Hagler, G., Williams, R., Sharpe, R., Brown, R., Garver, D., Judge, R., Caudill, M., Rickard, J., Davis, M., Weinstock, L., Zimmer-Dauphinee, S., & Buckley, K. (2016). Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: Evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States. *Atmospheric Measurement Techniques, 9*, 5281–5292.https://doi.org/10.5194/amt-9-5281-2016

Johnson, N. E., Bonczak, B., & Kontokosta, C. E. (2018). Using a gradient boosting model to improve the performance of low-cost aerosol monitors in a dense, heterogeneous urban environment. *Atmospheric Environment, 184*, 9–16. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.019

Johnston, S. J., Basford, P. J., Bulot, F. M. J., Apetroaie-Cristea, M., Easton, N. H. C., Davenport, C., Foster, G. L., Loxham, M., Morris, A. K. R., & Cox, S. J. (2019). City-scale particulate matter monitoring using LoRaWAN-based air quality IoT devices. *Sensors, 19*, 209.https://doi.org/10.3390/s19010209

Karagulian, F., Barbiere, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere, 10*, 506.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Kelly, F. J., & Fussell, J. C. (2015). Air pollution and public health: Emerging hazards and improved understanding of risk. *Environmental Geochemistry and Health, 37*(4), 631–649. https://doi.org/10.1007/s10653-015-9720-1

Kim, J., Shusterman, A. A., Teige, V. E., Turner, A. J., Newman, C., & Cohen, R. C. (2016). The Berkeley Atmospheric CO_2 Observation Network: Initial evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics, 16*, 13449–13463. https://doi.org/10.5194/acp-16-13449-2016

Kim, J. Y., Kang, S. W., Shin, T. Z., Yang, M. K., & Lee, K. S. (2006). Design of a smart gas sensor system for room air cleaner of automobile: Thick-film metal oxide semiconductor gas sensor. In *Proceedings of the International Forum on Strategic Technology 2006* (pp. 72–75). IEEE.

Kirešová, S., Guzan, M., & Sobota, B. (2023). Using low-cost sensors for measuring and monitoring particulate matter with a focus on fine and ultrafine particles. *Atmosphere, 14*, 324.https://doi.org/10.3390/atmos14020324

Kirschbaum, M. U. F. (2014). Climate-change impact potentials as an alternative to global warming potentials. *Environmental Research Letters, 9*, 034014. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034014

Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International, 75*, 199–205. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019

Kumar, R., Popli, R., Chauhan, R., Kansal, I., Garg, A., Rani, P., & Singh, D. (2023). A comprehensive review on small satellites: Services and applications. In *Artificial intelligence and machine learning in satellite data processing and services* (Vol. 970, pp. 109–116). Springer Cham. doi.org

Kurt, O. K., Zhang, J., & Pinkerton, K. E. (2016). Pulmonary health effects of air pollution. *Current Opinion in Pulmonary*

Buku ini tidak diperjualbelikan

Medicine, 22(2), 138–143. https://doi.org/10.1097/MCP.0000000000000248.

Lai, X., Yang, T., Wang, Z., & Chen, P. (2019). IoT implementation of Kalman filter to improve accuracy of air quality monitoring and prediction. *Applied Sciences, 9*, 1831. https://doi.org/10.3390/app9091831

Laref, R. (2019). Field evaluation of low cost sensors array for air pollution monitoring. In *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* (Vol. 2, pp. 849–853). IEEE. https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924320

Latif, M. T., Othman, M., Idris, N., Juneng, L., Abdullah, A. M., Hamzah, W. P., Khan, M. F., Nik Sulaiman, N. M., Jewaratnam, J., Aghamohammadi, N., Sahani, M., Xiang, C. J., Ahamad, F., Amil, N., Darus, M., Varkkey, H., Tangang, F., & Jaafar, A. B. (2018). Impact of regional haze towards air quality in Malaysia: A review. *Atmospheric Environment, 177*, 28–44.https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.002

Lee, H., Kang, J., Kim, S., Im, Y., Yoo, S., & Lee, D. (2020). Long-term evaluation and calibration of low-cost particulate matter (PM) sensor. *Sensors, 20*, 3617. https://doi.org/10.3390/s20133617

Li, J. (2020). Evaluation of nine low-cost sensor-based particulate matter monitors. *Aerosol and Air Quality Research, 20*, 254–270. https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.12.0485

Liang, C. J. (2021). Assessment and improvement of two low-cost particulate matter sensor systems by using spatial interpolation data from air quality monitoring stations. *Atmosphere, 12*, 300. https://doi.org/10.3390/atmos12030300

Liang, L. (2021b). Calibrating low-cost sensors for ambient air monitoring: Techniques, trends, and challenges. *Environmental Research, 197*, 111163. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111163

Buku ini tidak diperjualbelikan

Liu, H. Y., Schneider, P., Haugen, R., & Vogt, M. (2019). Performance assessment of a low-cost $PM_{2.5}$ sensor for a near four-month period in Oslo, Norway. *Atmosphere, 10*, 41. https://doi.org/10.3390/atmos10020041

Lu, Y., Giuliano, G., & Habre, R. (2021). Estimating hourly $PM_{2.5}$ concentrations at the neighborhood scale using a low-cost air sensor network: A Los Angeles case study. *Environmental Research, 195*, 110653. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110653

Maag, B., Zhou, Z., & Thiele, L. (2018). A survey on sensor calibration in air pollution monitoring deployments. *IEEE Internet of Things Journal, 5*(6), 4857–4870. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2853660

Malings, C., Tanzer, R., Hauryliuk, A., Saha, P. K., Robinson, A. L., Presto, A. A., & Subramanian, R. (2020). Fine particle mass monitoring with low-cost sensors: Corrections and long-term performance evaluation. *Aerosol Science and Technology, 54*(2), 160–174. https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1623863

Manshur, T., Luiu, C., Avis, W. R., Bukachi, V., Gatari, M., Mulligan, J., Ng'an'ga, D., Radcliffe, J., Singh, A., Waiguru, E., Wandera, A., & Pope, F. D. (2023). A citizen science approach for air quality monitoring in a Kenyan informal development. *City and Environment Interactions, 19*, 100105. https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100105

Martin, C. R., Zeng, N., Karion, A., Dickerson, R. R., Ren, X., Turpie, B. N., & Weber, K. J. (2017). Evaluation and enhancement of a low-cost NDIR CO_2 sensor. *Atmospheric Measurement Techniques, 10*, 4881–4895. https://doi.org/10.5194/amt-2016-396

Masson, N., Piedrahita, R., & Hannigan, M. (2015). Approach for quantification of metal oxide type semiconductor gas sensors used for ambient air quality monitoring. *Sensors and*

Buku ini tidak diperjualbelikan

Actuators B: Chemical, 208, 339–345. https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.11.032

McFarlane, C., Raheja, G., Malings, C., Appoh, E. K. E., Hughes, A. F., & Westervelt, D. M. (2021). Application of Gaussian mixture regression for the correction of low-cost $PM_{2.5}$ monitoring data in Accra, Ghana. *ACS Earth and Space Chemistry, 5*(9), 2268–2279. https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00217

Mead, M. I., Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J. J., McLeod, M. W., Hodgson, T. F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J. R., & Jones, R. L. (2013). The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment, 70*, 186–203. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060

Menteri Komunikasi dan Informatika. (2021). *Surat Edaran Menteri Komunikasi dan Informatika Nomor 3 Tahun 2021 tentang Pedoman Penggunaan Layanan Komputasi Awan Pihak Ketiga Bagi Kementerian/Lembaga Tahun Anggaran 2021*.

Mijling, B., Jiang, Q., de Jonge, D., & Bocconi, S. (2018). Field calibration of electrochemical NO_2 sensors in a citizen science context. *Atmospheric Measurement Techniques, 11*, 1297–1312. https://doi.org/10.5194/amt-11-1297-2018

Moltchanov, S., Levy, I., Etzion, Y., Lerner, U., Broday, D. M., & Fishbain, B. (2015). On the feasibility of measuring urban air pollution by wireless distributed sensor networks. *Science of the Total Environment, 502*, 537–547. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.059

Mueller, M., Meyer, J., & Hueglin, C. (2017). *Design of an ozone and nitrogen dioxide sensor unit and its long-term operation within a sensor network in the city of Zurich*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(10), 3783–3799. https://doi.org/10.5194/amt-10-3783-2017

Buku ini tidak diperjualbelikan

Mueller, M. D., Hasenfratz, D., Saukh, O., Fierz, M., & Hueglin, C. (2016). Statistical modelling of particle number concentration in Zurich at high spatio-temporal resolution utilizing data from a mobile sensor network. *Atmospheric Environment, 126*, 171–181. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.033

Müller, M., Graf, P., & Hüglin, C. (2017, April 23–28). *Measuring NO, NO_2, CO_2, and O_3 with low-cost sensors* [Conference presentation abstract]. EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria

Narayana, M. V., Jalihal, D., & Nagendra, S. M. S. (2022). Establishing a sustainable low-cost air quality monitoring setup: A survey of the state of the art. *Sensors, 22*, 394. https://doi.org/10.3390/s22010394

Nguyen, P. D. M. (2021). Using low-cost sensors to assess fine particulate matter infiltration ($PM_{2.5}$) during a wildfire smoke episode at a large inpatient healthcare facility. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*, 9811. https://doi.org/10.3390/ijerph18189811

Nova Fitness Co., Ltd. (n.d.). *Laser $PM_{2.5}$ sensor specification: Product model SDS011 (Version 1.3).* https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf

Pang, X., Shaw, M. D., Gillot, S., & Lewis, A. C. (2018). The impacts of water vapour and co-pollutants on the performance of electrochemical gas sensors used for air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical, 266*, 674–684. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.144

Pang, X., Shaw, M. D., Lewis, A. C., Carpenter, L. J., & Batchellier, T. (2017). Electrochemical ozone sensors: A miniaturised alternative for ozone measurements in laboratory experiments and air-quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical, 240*, 829–837. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.020

Papapostolou, V., Zhang, H., Feenstra, B. J., & Polidori, A. (2017). Development of an environmental chamber for evaluating the

Buku ini tidak diperjualbelikan

performance of low-cost air quality sensors under controlled conditions. *Atmospheric Environment, 171*, 82–90. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.003

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021*. LN.2021/No.32, TLN No.6634.

Peters, D. R., Popoola, O. A. M., Jones, R. L., Martin, N. A., Mills, J., Fonseca, E. R., Stidworthy, A., Forsyth, E., Carruthers, D., Dupuy-Todd, M., Douglas, F., Moore, K., Shah, R. U., Padilla, L. E., & Alvarez, R. A. (2022). Evaluating uncertainty in sensor networks for urban air pollution insights. *Atmospheric Measurement Techniques, 15*, 321–338. https://doi.org/10.5194/amt-15-321-2022

Petters, M. D., & Kreidenweis, S. M. (2007). A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmospheric Chemistry and Physics, 7*, 1961–1971. https://doi.org/10.5194/acp-7-1961-2007

Piedrahita, R., Xiang, Y., Masson, N., Ortega, J., Collier, A., Jiang, Y., Li, K., Dick, R. P., Lv, Q., Hannigan, M., & Shang, L. (2014). The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques, 7*, 3325–3336. https://doi.org/10.5194/amt-7-3325-2014

Plantower. (n.d.). *Digital universal particle concentration sensor PMS5003 series data manual*. https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf?sfvrsn=2

Polidori, A., Papapostolou, V., Feenstra, B., & Zhang, H. (2017). *Field evaluation of low-cost air quality sensors: Field setup and testing protocol*. South Coast Air Quality Management District. https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-field-testing-protocol.pdf

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pope, F. D., Dennis-Smither, B. J., Griffiths, P. T., Clegg, S. L., & Cox, R. A. (2010). Studies of single aerosol particles containing malonic acid, glutaric acid, and their mixtures with sodium chloride. I. Hygroscopic growth. *The Journal of Physical Chemistry A, 114 (16), 5335–5341.* https://doi.org/10.1021/jp100059k

Popoola, O. A. M., Carruthers, D., Lad, C., Bright, V., Mead, M. I., Saffell, J., & Jones, R. L. (2018). Use of networks of low-cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. *Atmospheric Environment, 194*, 58–70. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.030

Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Mead, M. I., & Jones, R. L. (2016). Development of a baseline-temperature correction methodology for electrochemical sensors and its implications for long-term stability. *Atmospheric Environment*, 147, 330–343. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.024

Prakash, J., Agrawal, S. B., & Agrawal, M. (2023). Global trends of acidity in rainfall and its impact on plants and soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 398–419. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01051-z

Qin, X., Hou, L., Gao, J., & Si, S. (2020). The evaluation and optimization of calibration methods for low-cost particulate matter sensors: Inter-comparison between fixed and mobile methods. *Science of the Total Environment, 715.* https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136791

Raheja, G., Nimo, J., Appoh, E. K. E., Essien, B., Sunu, M., Nyante, J., Amegah, M., Quansah, R. E., Penn, S. L., Giordano, M. R., Zheng, Z., Jack, D., Chillrud, S., Amegah, K., Subramanian, R., Pinder, R., Appah-Sampong, E., Tetteh, E. N., Borketey, M. A., Hughes, A. F., & Westervelt, D. M. (2023). Low-cost sensor performance intercomparison, correction factor development, and 2+ years of ambient $PM_{2.5}$ monitoring in Accra, Ghana. *Environmental Science & Technology, 57(29), 10708–10720.* https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09264

Buku ini tidak diperjualbelikan

Raheja, G., Sabi, K., Sonla, H., Gbedjangni, E. K., McFarlane, C. M., Hodoli, C. G., & Westervelt, D. M. (2022). A network of field-calibrated low-cost sensor measurements of $PM_{2.5}$ in Lomé, Togo, over one to two years. *ACS Earth and Space Chemistry, 6*, 1011–1021. https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00391

Rai, A. C., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A. N., Di Sabatino, S., Ratti, C., Yasar, A., & Rickerby, D. (2017). End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of the Total Environment, 607–608*, 691–705. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.266

Rogulski, M. (2020). Investigation of low-cost and optical particulate matter sensors for ambient monitoring. *Atmosphere, 11*, 1040. https://doi.org/10.3390/atmos11101040

Russell, H. S., Frederickson, L. B., Kwiatkowski, S., Emygdio, A. P. M., Kumar, P., Schmidt, J. A., Hertel, O., & Johnson, M. S. (2022). Enhanced Ambient Sensing Environment—A New Method for Calibrating Low-Cost Gas Sensors. *Sensors*, 22(19), 7238. https://doi.org/10.3390/s22197238

Sadighi, K., Coffey, E., Polidori, A., Feenstra, B., Lv, Q., Henze, D. K., & Hannigan, M. (2018). Intra-urban spatial variability of surface ozone in Riverside, CA: Viability and validation of low-cost sensors. *Atmospheric Measurement Techniques, 11*, 1777–1792. https://doi.org/10.5194/amt-11-1777-2018

Saukh, O., Hasenfratz, D., & Thiele, L. (2015). Reducing multi-hop calibration errors in large-scale mobile sensor networks. In *Proceedings of the 14th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2015)* (pp. 274–285). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/2737095.2737113

Sayahi, T. (2019). Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution, 255*(Part1). 113131. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113131

Buku ini tidak diperjualbelikan

Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F. R., Lahoz, W. A., & Bartonova, A. (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment International, 106*, 234–247. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.005

Simonds, M., Xiao, H., & Levine, S. (1994). Optical remote sensing for air pollutants: A review. *American Industrial Hygiene Association Journal, 55*(10),953-65. doi: 10.1080/15428119491018466

Smith, K. R., Edwards, P. M., Ivatt, P. D., Lee, J. D., Squires, F., Dai, C., Peltier, R. E., Evans, M. J., Sun, Y., & Lewis, A. C. (2019). An improved low-power measurement of ambient NO_2 and O_3 combining electrochemical sensor clusters and machine learning. *Atmospheric Measurement Techniques, 12*, 1325–1336. https://doi.org/10.5194/amt-12-1325-2019

Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., Shelow, D., Hindin, D. A., Kilaru, V. J., & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology, 47*, 11369–11377. https://doi.org/dx.doi.org/10.1021/es4022602

Soms, J., & Soms, H. (2021). Application of low-cost optical PM sensor for monitoring of particulate matter air pollution in the urban environment: A case study in Esplanāde housing estate, Daugavpils city. Environment. Technology. Resources. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 1, 223–229. https://doi.org/10.17770/etr2021vol1.6595

Spinelle, L., Gerboles, M., & Aleixandre, M. (2014a). *Report of laboratory and in-situ validation of micro-sensor for monitoring ambient air-Ozone micro-sensors, αSense, model B4 O3 sensors (EUR 26394 EN). Publications Office of the European Union.*

Spinelle, L., Gerboles, M., & Aleixandre, M. (2015a). Performance evaluation of amperometric sensors for the monitoring of O_3

Buku ini tidak diperjualbelikan

and NO_2 in ambient air at ppb level. *Procedia Engineering, 120*, 480–483. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.676

Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2014b). Calibration of a cluster of low-cost sensors for the measurement of air pollution in ambient air. In 2014 IEEE SENSORS (pp. 21–24). https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6984922

Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2015b). Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide. *Sensors and Actuators B: Chemical, 215*, 249–257. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.03.031

Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2015). Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part B: Ozone and nitrogen dioxide. *Sensors and Actuators B: Chemical,* 238: *215*, 249–257. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036

Stojčev, M.K., Kosanović, M.R., Golubović, L.R.: Power management and energy harvesting techniques for wireless sensor nodes. In: *2009 9th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable, and Broadcasting Services*. pp. 65–72. IEEE (2009)

Sun, C., Yan, X., Sun, J., Pang Jianxin, Zhao, W., Lin, X. (2022). Unraveling the effect of O_2, NO_2 and SO_2 impurities on the stress corrosion behavior of X65 steel in water-saturated supercritical CO_2 streams. *Corrosion Science*. 209,110729 . https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110729I

Suriano, D., Prato, M., Pfister, V., Cassano, G., Camporeale, G., Dipinto, S., & Penza, M. (2015). Stationary and Mobile Low Cost Gas Sensor Systems for Air Quality Monitoring Applications. *Association for Sensor Measurement*, 55–58. https://doi.org/10.5162/4EuNetAir2015/15

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tagle, M. (2020). Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*. 192,171. https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4

Teri, M., Müller, T., Gasteiger, J., Valentini, S., Horvath, H., Vecchi, R., Bauer, P., Walser, A., Weinzierl, B. (2021). Impact of particle size, refractive index, and shape on the determination of the particle scattering coefficient-an optical closure study evaluating different nephelometer angular truncation and illumination corrections. *Atmospheric Measurement Techniques*. 15 (10), 3161–3187. https://doi.org/10.5194/amt-2021-369

Tsujita, W., Yoshino, A., Ishida, H., Moriizumi, T. (2005). Gas sensor network for air-pollution monitoring. *Sensors and Actuators.* B. 110, 304–311 https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.02.008

U.S. Environmental Protection Agency. (2011). *Reference and equivalent method applications guidelines for applicants: Guidelines for applicants.* U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.).*Air Sensor Collocation Macro Analysis Tool*,. https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-collocation-macro-analysis-tool

U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.).*A Guide to Siting and Installing Air Sensors*.https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/guide-siting-and-installing-air-sensors

Vajs, I., Drajic, D., Cica, Z. (2023). Data-Driven Machine Learning Calibration Propagation in A Hybrid Sensor Network for Air Quality Monitoring. *Sensors*. 23.). https://doi.org/10.3390/s23052815

Villanueva, E. (2023). Smart Multi-Sensor Calibration of Low-Cost Particulate Matter Monitors. *Sensors*. 23(7),3776. https://doi.org/10.3390/s23073776

De Vito, S., Esposito, E., Salvato, M., Formisano, F. (2017). Calibrating chemical multisensory devices for real world

Buku ini tidak diperjualbelikan

applications: An in- depth comparison of quantitative Machine Learning approaches. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.07.155

De Vito, S., Esposito, E., Salvato, M., Popoola, O., Formisano, F., Jones, R., Di Francia, G. (2018). Calibrating chemical multisensory devices for real world applications: An in-depth comparison of quantitative machine learning approaches. *Sensors and Actuators B Chemical.* 255, 1191–1210 https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.07.155

Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., Gao, R. (2010). Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors. *Sensors.* 10, 2088–2106 https://doi.org/10.3390/s100302088

Wang, Y. (2015). Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement. *Aerosol Science and Technology*. 49, 1063–1077 https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1100710

Wei, P., Ning, Z., Ye, S., Sun, L., Yang, F., Wong, K.C., Westerdahl, D., Louie, P.K.K. (2018). Impact Analysis of Temperature and Humidity Conditions on Electrochemical Sensor Response. *Sensors*. 18, https://doi.org/10.3390/s18020059

Wei, X., Chang, N. Bin, Bai, K., Gao, W. (2018). Satellite remote sensing of aerosol optical depth: advances, challenges, and perspectives. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 50, 1640–1725 (2020). https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1665944

World Health Organization. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.* Geneva.

World Health Organization. (2021). *WHO air quality guidline Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.* Geneva.

WHO. (2024, October 24). Ambient (outdoor) air pollution. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health?

Buku ini tidak diperjualbelikan

Williams, R., Duvall, R., Kilaru, V., Hagler, G., Hassinger, L., Benedict, K., Rice, J., Kaufman, A., Judge, R., Pierce, G., Allen, G., Bergin, M., Cohen, R.C., Fransioli, P., Gerboles, M., Habre, R., Hannigan, M., Jack, D., Louie, P., Martin, N.A., Penza, M., Polidori, A., Subramanian, R., Ray, K., Schauer, J., Seto, E., Thurston, G., Turner, J., Wexler, A.S., Ning, Z. (2019). Deliberating performance targets workshop: Potential paths for emerging $PM_{2.5}$ and O_3 air sensor progress. *Atmospheric Environment X, 2.* https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100031

World Meteorological Organization. (2018).*Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications*. WMO publications, Geneva (2018)

World Meteorological Organization. (2021).*An update on low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition.* Chairperson, Publications Board, Geneva.

Xing, Y.F., Xu, Y.H., Shi, M.H., Lian, Y.X. (2016). The impact of $PM_{2.5}$ on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*,8, E69–E74 (2016). https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19

Yan, K., Zhang, D. (2016). Calibration transfer and drift compensation of e-noses via coupled task learning. *Sensors and Actuators B: Chemical*,225, 288–297 https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.11.058

Yatkin, S., Gerboles, M., Borowiak, A., & Signorini, M. (2022). Guidance on low-cost air quality sensor deployment for non-experts based on the AirSensEUR experience, EUR 31274 EN. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2760/180094

Zaidan, M.A., Hossein Motlagh, N., Fung, P.L., Lu, D., Timonen, H., Kuula, J., Niemi, J. V., Tarkoma, S., Petaja, T., Kulmala, M., Hussein, T. (2020). intelligent calibration and virtual sensing for integrated low-cost air quality sensors. *IEEE Sensors Journal, 20*,, 13638–13652 https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3010316

Buku ini tidak diperjualbelikan

Zamora, M.L. (2019). Field and Laboratory Evaluations of the Low-Cost Plantower Particulate Matter Sensor. *Environmental Science & Technology, 53*,, 838–849 https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05174

Zimmerman, N. (2022). Tutorial: Guidelines for implementing low-cost sensor networks for aerosol monitoring. *Journal of Aerosol Science,* 159159, https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105872

Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., Robinson, A. L., & Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. ATMOSPHERIC MEASUREMENT TECHNIQUES, 11(1), 291–313. https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Glosarium

akurasi	:	tingkat kedekatan hasil pengukuran yang dihasilkan sensor dengan hasil pengukuran sebenarnya yang diperoleh dari instrumen rujukan.
amperometric	:	prinsip pengoperasian sensor yang mendeteksi konsentrasi polutan melalui pengukuran arus listrik yang dihasilkan oleh reaksi oksidasi-reduksi (redoks).
analog	:	sinyal atau data yang bersifat kontinu dan dapat berubah secara bertahap dalam suatu rentang nilai. Pada sensor, sinyal analog merepresentasikan perubahan besaran fisik, seperti konsentrasi polutan, dalam bentuk tegangan atau arus yang bervariasi.
analog to digital converter (ADC)	:	komponen elektronik yang mengubah sinyal analog, seperti tegangan kontinu dari sensor, menjadi sinyal digital yang dapat diproses oleh sistem computer, mikrokontroler, atau mikroprosesor.

Buku ini tidak diperjualbelikan

anomali	:	penyimpangan data dari pola atau nilai yang diharapkan, sering kali menunjukkan adanya kesalahan pengukuran, gangguan lingkungan, atau masalah perangkat.
application programming interface (API)	:	sekumpulan definisi, aturan, dan protokol yang memungkinkan berbagai perangkat lunak atau sistem untuk berkomunikasi dan bertukar data. API memungkinkan aplikasi atau perangkat lain untuk mengakses data, mengirim permintaan informasi, atau mengintegrasikan data ke dalam platform lain secara otomatis.
auxiliary electrode		elektrode tambahan yang disematkan ke dalam sensor EC (Electrochemical sensor) untuk mendeteksi perubahan suhu. Elektrode ini membantu untuk mengoreksi pengaruh suhu terhadap *working electrode*.
baku mutu udara	:	standar ambang batas konsentrasi polutan di udara yang ditetapkan oleh pemerintah untuk melindungi kesehatan dan lingkungan. Baku mutu ini menjadi acuan dalam menilai apakah kualitas udara berada dalam kondisi aman atau tidak.
baseline	:	nilai dasar atau acuan yang ditetapkan untuk mengetahui perubahan konsentrasi terhadap kondisinormal.
bias	:	penyimpangan sistematis hasil pengukuran sebenarnya.

Buku ini tidak diperjualbelikan

bin	:	kategori atau rentang ukuran yang digunakan untuk mengelompokkan partikel berdasarkan ukurannya. Istilah ini digunakan pada sensor partikel berbasis optik.
chamber	:	ruang tertutup yang digunakan untuk kalibrasi atau pengujian sensor.
counter electrode (CE)	:	elektrode yang berfungsi untuk menyeimbangkan reaksi redoks pada *working electrode* sehingga pengukuran tetap stabil.
data logger	:	perangkat yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, dan mentransmisikan data secara otomatis dengan interval waktu tertentu.
data processing (pemrosesan data)	:	proses mengolah data mentah menjadi sebuah informasi. yang berguna. Proses ini meliputi pembersihan, kalibrasi, dan analisis data.
detektor	:	komponen yang berfungsi mendeteksi keberadaan polutan, kemudian mengubahnya menjadi sinyal berupa tegangan atau arus.
drift	:	pergeseran bertahap pada hasil pengukuran sensor dari waktu ke waktu yang menyebabkan penurunan akurasi sensor.
dynamic boundaries	:	rentang sensitivitas sensor terhadap konsentrasi polutan yang akan diukur.
elemen sensor	:	bagian sensor yang merespons kehadiran polutan, seperti logam oksida pada sensor MOS atau cairan elektrolit pada sensor EC, kemudian mengubahnya menjadi sinyal listrik berupa tegangan atau arus.

Buku ini tidak diperjualbelikan

evaluasi	:	proses menguji akurasi, presisi, stabilitas, dan respons sensor terhadap kondisi lingkungan untuk memastikan data yang dihasilkan andal dan valid.
firmware	:	perangkat lunak yang tertanam dalam perangkat keras sensor untuk mengendalikan operasional dasar, mengelola data, dan melakukan pengukuran.
gain	:	faktor pengali yang digunakan untuk mengatur respons yang dikeluarkan oleh sensor agar sesuai atau mendekati nilai konsentrasi rujukan.
gateway	:	perangkat atau sistem yang berfungsi antara sensor dan jaringan utama di dalam mentransmisikan data ke pusat data.
indikatif	:	sifat atau kemampuan sensor dalam memberikan gambaran umum mengenai kondisi kualitas udara di Lokasi pengambilan sampel. Data yang dihasilkan bersifat indikatif dan tidak seakurat data yang diperoleh dari instrumen rujukan..
kalibrasi	:	proses menyetel pembacaan sensor agar sesuai atau mendekati nilai acuan atau standar yang lebih akurat.
kolokasi (*co-location*)	:	kegiatan menempatkan sensor berdekatan dengan instrumen rujukan agar keduanya terpapar konsentrasi polutan dan kondisi lingkungan yang sama. Dengan cara ini, data dari sensor berbiaya rendah dapat dikalibrasi atau divalidasi agar lebih akurat dan selaras dengan hasil pengukuran instrumen rujukan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

light-scattering	:	metode yang digunakan pada sensor berbiaya murah untuk mengukur konsentrasi partikel. Prinsip kerjanya ialah menembakkan cahaya ke dalam ruang pengukuran yang berisi partikel. Partikel yang terkena cahaya akan menghamburkan cahaya, kemudian intensitas cahaya akan diukur dan dikonversikan ke dalam *mass concentration.*
machine learning	:	cabang kecerdasan buatan yang mengembangkan algoritma sehingga system dapat belajar dari data historis tanpa diprogram secara eksplisit.
ofset *(offset)*	:	nilai tetap yang ditambahkan atau dikurangi dari hasil pengukuran sensor untuk mengoreksi kesalahan pengukuran sehingga hasilnya mendekati nilai acuan.
presisi	:	tingkat konsistensi hasil pengukuran ketika pengukuran diulan pada kondisi yang sama.
redoks	:	reaksi kimia oksidasi–reduksi yang melibatkan perpindahan elektron antara dua zat. Reaksi ini menjadi dasar kerja sensor elektrokimia (EC) dalam mendeteksi konsentrasi gas polutan.
sensitivitas silang (*cross-sensitivity*)	:	respons sensor terhadap gas atau zat selain target utama pengukuran yang dapat memengaruhi hasi pengukuran dan menurunkan akurasinya. Fenomena ini umumnya terjadi pada sensor gas berbasis semikonduktor dan elektrokimia.

Buku ini tidak diperjualbelikan

sinyal digital *(digital signal*)	sinyal dalam format biner yang dapat dibaca oleh komputer, mikrokontroler, atau mikroprosesor.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tentang Penulis



Dr. Kemal Maulana Alhasa, S.T., M.Sc. lahir di Jakarta pada 03 Februari 1989. Penulis menyelesaikan program magister pada tahun 2015 dan program doktor pada tahun 2020 di Institut Perubahan Iklim, Universitas Kebangsaan Malaysia. Selama menempuh pendidikan magister dan doktor, penulis aktif sebagai Grant Research Assistant dalam berbagai penelitian yang berkaitan dengan pengembangan instrumen dan model pembelajaran mesin (*machine learning*) di bidang atmosfer dan kualitas udara. Salah satu penelitian yang diikuti penulis ialah pengembangan model untuk menentukan kadar uap air di atmosfer kawasan tropis dan Antarktika. Penulis juga terlibat dalam pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor berbiaya rendah. Karier profesional penulis diawali sebagai Head of Engineering di perusahaan rintisan Innosense Technology Sdn. Bhd., Malaysia, pada tahun 2019. Pada tahun 2023, penulis bergabung sebagai aparatur sipil negara di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Saat ini penulis bertugas di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, BRIN. Pada tahun 2021, penulis juga menjadi dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Multimedia Nusantara (UMN). Selama berkarier sebagai peneliti, penulis telah menghasilkan sejumlah publikasi ilmiah pada jurnal internasasional bereputasi yang terindeks Scopus dan Web of Science, serta menulis satu buku

Buku ini tidak diperjualbelikan

yang diterbitkan oleh Springer. Untuk informasi lebih lanjut penulis dapat dihubungi melalui email di **kema003@brin.go.id.**



Heru Dwi Wahyono, B.Eng., M.Kom. lahir di Malang, Jawa Timur, pada 2 Juni 1970. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana di Universitas Miyazaki, , Jepang pada Program Studi Ilmu Informatika dan lulus pada tahun 1995. Pendidikan magister ditempuh di Universitas Indonesia Program Studi Ilmu Komputer, lulus pada tahun 2012. Karier penulis diawali sebagai calon pegawai negeri sipil (CPNS) di Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) melalui program beasiswa luar negeri STMDP-II. Setelah menyelesaikan pendidikan sarjana, penulis aktif sebagai peneliti di BPPT dengan fokus pada penerapan teknologi informasi dan komputer untuk pengelolaan lingkungan. Sejak tahun 2005, penulis mengembangkan teknologi telemetri *online monitoring* untuk pemantauan kualitas lingkungan. Pada tahun 2012, penulis menerima penghargaan Satya Lencana Pembangunan dari Presiden R.I. Saat ini, penulis bergabung di Pusat Riset Teknologi Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Sejak tahun 2019, penulis menjadi anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) dan aktif mengoordinasikan kegiatan penelitian internal serta kerja sama riset dengan berbagai mitra di dalam dan luar negeri di bidang teknologi *online monitoring* kualitas lingkungan. Sejak tahun 2013, penulis juga aktif sebagai narasumber pada berbagai pelatihan dan seminar mengenai penguatan sistem peringatan dini pencemaran lingkungan perairan melalui teknologi *online monitoring* pada 15 DAS prioritas dan 15 danau prioritas. Untuk informasi lebih lanjut atau berdiskusi mengenai penelitian dan proyek-proyek yang ditekuni, penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik di heru009@brin.go.id.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Drs. Satmoko Yudo, M.Eng. ahirk di Bandung, Jawa Barat pada 01 November 1958. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, pada Program Studi Matematika dan lulus . pada tahun 1984. Pendidikan magister ditempuh di Yamanashi University, Jepang pada Faculty of Engineering, School of Electrical Engineering and Computer Science, dan lulus pada tahun 1995. Penulis memulai karier sebagai pegawai negeri sipil (PNS) di Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) pada tahun 1987. Sejak integrasi BPPT ke Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), penulis bertugas di Pusat Riset Teknologi Lingkungan dan Teknologi Bersih, Organisasi Riset Energi dan Manufaktur. Penulis juga pernah menjadi tenaga pengajar di Universitas Bina Nusantara dengan bidang sistem basis data. Saat ini, penulis aktif sebagai peneliti pada bidang ilmu komputer. Penulis juga aktif menulis karya tulis ilmiah pada jurnal nasional dan internasional serta menjadi pembicara pada seminar nasional maupun internasional. Penulis juga merupakan anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) dan aktif mengoordinasikan kegiatan penelitian internal serta kerja sama riset dengan berbagai mitra di dalam dan luar negeri di bidang teknologi pemantauan kualitas lingkungan.Untuk informasi lebih lanjut atau menjalin kolaborasi penelitian, penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik di satm001@brin.go.id.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Irwan Kustianto merupakan perekayasa di Pusat Riset Teknologi Manufaktur Peralatan dengan pengalaman yang berpengalaman dalam bidang pengembangan teknologi pengolahan air dan pemantauan kualitas lingkungan. Lahir di Jakarta pada 15 April 1988, ia menyelesaikan pendidikan sarjanadalam bidang Teknik Elektro dari Universitas Indonesia pada tahun 2011. Selanjutnya, dia menempuh pendidikan magister pada Program Studi Elektronika dan Sistem Tertanam Cerdas di universitas yang sama, yang lulus pada tahun 2024. Sejak 2020, Irwan berkiprah sebagai perekayasa dan telah berkontribusi dalam berbagai proyek inovatif, termasuk antara lain pengembangan sistem monitoring kualitas air untuk area terpencil dan teknologi pemantauan lingkungan perkotaan. Dia juga aktif mempublikasikan karya ilmiah pada berbagai jurnal bereputasi dan telah memperoleh hak cipta atas perangkat lunak sistem kontrol dan akuisisi data untuk unit pengolah air siap minum (Arsinum) Lite 4.0. Untuk berdiskusi dan kerja sama riset, penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik di irwa015@brin.go.id.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Indeks

aerosol; 36
algoritma; 59, 66, 71, 72, 73, 75, 77, 82, 84, 145, 195
ambang; 157, 192
ambang batas; 157, 192
amperometric; 29, 184, 191
analog; 108, 191
anomali; 70, 72, 127, 129, 145, 192
asma; 8, 11, 12
atmosfer; 10, 12, 50, 130, 197
auxiliary electrode; 29, 192
baku mutu; 5, 7, 14, 19, 192
baud rate; 109
Bin; 36, 37, 142, 143, 187
Blind Calibration; 80, 81
chamber; 31, 34, 36, 46, 47, 48, 51, 180, 183, 193
Coefficient of Determination; 61
Coefficient of Variation; 63
Collaborative Calibration; 81, 83
Counter Electrode; 29
dampak; 3, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 19, 152, 162
dashboard; 146, 147, 148
data; xi, xii, xiii, xiv, xv, xvi, 2, 3, 4, 5, 7, 13, 14, 15, 16, 18, 26, 40, 45, 49, 50, 51, 53, 56, 57, 58, 59, 61, 66, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 77, 79, 80, 87, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 168, 170, 173, 174, 176, 177, 179, 180, 181, 188, 191, 192, 193, 194, 195, 199, 200
database; 133, 139, 140
detektor; 16, 31, 34, 193
digital; 108, 191, 196
Dynamic Boundaries; 41

EEPROM; 110

Buku ini tidak diperjualbelikan

ekologi; 8
ekonomi; 1, 11, 19, 106
Electrochemical; 27, 29, 43, 180, 187
electronic nose; 83
elektronika; 17, 164
emisi; 1, 10, 41, 89, 90, 118, 128, 150, 152, 156
evaluasi; xi, xvi, 4, 5, 13, 15, 40, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 60, 65, 73, 76, 79, 87, 90, 92, 97, 120, 126, 149, 153, 156, 194

Federal Reference Methods; 14
filter; 31, 44, 174, 177
firmware; 48, 49, 53, 110, 114, 115, 116, 146, 194
fotosintesis; 13

gain; 76, 194
gas; 2, 9, 12, 13, 17, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 39, 42, 43, 47, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 78, 79, 83, 91, 92, 95, 108, 126, 140, 149, 160, 169, 170, 172, 175, 176, 178, 180, 187, 195
gateway; 111, 194
Graphical User Interface; 146

iklim; 8, 9, 11, 50, 58, 160, 162
Indeks Standar Pencemaran Udara; 21
indikatif; 5, 17, 34, 152, 153, 194
infeksi; 12
informasi; xi, xv, 14, 21, 49, 53, 56, 95, 97, 110, 115, 117, 121, 122, 133, 139, 140, 145, 149, 150, 151, 152, 159, 161, 163, 164, 192, 193, 198, 199
instrumen; 2, 13, 15, 17, 36, 39, 41, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 66, 68, 70, 72, 75, 76, 79, 80, 82, 83, 84, 92, 93, 95, 97, 104, 106, 120, 121, 124, 125, 127, 136, 152, 154, 156, 157, 159, 160, 162, 163, 191, 194, 197
intensitas cahaya; 31, 36, 195
Intercept; 61, 62
Internet of Things; 2, 110, 178
interpretasi; xv, 4, 7, 47, 87, 106, 119, 125, 149, 150, 151, 152, 154, 159, 161
ionisasi; 33, 34
iritasi; 12

jantung; 8, 12
jaringan; 12, 13, 26, 40, 80, 81, 84, 90, 100, 101, 102, 105, 111, 112, 118, 119, 121, 122, 123, 125, 127, 128, 130, 134, 135, 136, 146, 149, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 194

kalibrasi; xi, xvi, 3, 4, 5, 15, 26, 29, 37, 40, 41, 48, 49, 53, 54,

Buku ini tidak diperjualbelikan

55, 58, 59, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 90, 94, 98, 104, 106, 107, 119, 120, 121, 124, 125, 126, 145, 153, 154, 156, 157, 160, 161, 162, 163, 164, 193, 194
kanker; 1, 12
kardiovaskular; 1, 11, 12
keakurasian; 3, 90, 93, 154
kebijakan; xii, xiii, xv, xvi, 3, 15, 21, 45, 152, 153, 158, 161, 162, 164
kelembaban; 3, 30, 37, 42
kesehatan; xiii, xiv, 1, 3, 7, 8, 9, 11, 14, 19, 21, 23, 154, 155, 158, 159, 162, 192
keterbatasan; xiii, 2, 3, 4, 18, 25, 26, 38, 40, 42, 79, 101, 113, 122, 130, 137, 146, 152, 154, 155, 157, 158, 160
kimia; 10, 12, 130, 195
kinerja; xi, xv, xvi, 3, 4, 14, 15, 31, 36, 38, 40, 42, 45, 46, 47, 48, 50, 52, 53, 54, 56, 57, 60, 68, 69, 72, 73, 75, 77, 79, 90, 92, 93, 94, 97, 98, 99, 100, 104, 115, 123, 126, 128, 133, 139, 140, 153, 155, 156, 157, 160, 162
kolokasi; 5, 45, 46, 49, 53, 57, 58, 59, 60, 65, 66, 68, 69, 73, 74, 79, 80, 93, 107, 119, 120, 121, 130, 153, 157, 159, 160, 162, 163, 194
komersial; 3, 35, 36, 106
komunikasi; 5, 87, 102, 103, 108, 109, 110, 111, 112, 115, 118, 121, 122, 125, 127, 130, 136, 137
konduktivitas; 27
konsentrasi; 2, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 26, 27, 29, 30, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 69, 75, 76, 80, 81, 89, 92, 93, 95, 96, 102, 108, 120, 124, 126, 128, 129, 130, 140, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 164, 191, 192, 193, 194, 195
korosi; 8, 13
kualitas udara; xi, xii, xiii, xiv, xv, xvi, 1, 2, 3, 4, 7, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 25, 40, 45, 55, 58, 59, 80, 87, 88, 89, 90, 91, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 111, 118, 119, 124, 133, 136, 145, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 157, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 192, 194, 197

Laboratorium; 46, 48, 52, 65
light-scattering; 195

Buku ini tidak diperjualbelikan

lingkungan; xi, xiii, xiv, xv, xvi, 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 18, 19, 26, 28, 30, 32, 40, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 54, 55, 56, 59, 65, 66, 69, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 90, 94, 95, 97, 98, 100, 102, 103, 113, 114, 116, 119, 123, 126, 128, 130, 140, 150, 151, 153, 154, 155, 156, 158, 160, 161, 164, 165, 192, 194, 198, 199, 200
Low Selectivity; 42

manajemen; 87, 103, 105, 111, 121, 133, 134, 136, 148
manusia; xi, xiii, 1, 7, 8, 9, 11, 19, 21, 23
masa pakai; 18, 126
Mean Bias Error; 61
mekanisme fisik; 66, 67, 68, 73, 74, 77
mengendalikan; 19, 114, 152, 194
meteorologi; 3, 40, 72, 93, 106, 108, 127, 128, 140, 150, 164
metode; xiii, 2, 7, 13, 14, 15, 16, 18, 26, 34, 35, 36, 46, 49, 53, 57, 67, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 84, 96, 97, 113, 120, 121, 137, 145, 154, 156, 157, 159, 160, 164, 195
metode alternatif; 14, 15
Metode parametrik; 66, 69
model; 14, 37, 48, 53, 59, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 102, 137, 156, 157, 159, 160, 161, 167, 170, 175, 180, 184, 189, 197
molekul; 31, 33
multi-hop; 82, 183

nekrosis; 13
Nephelometers; 35
nitrogen dioksida; 10, 12, 160
noisy; 96
Non-Dispersive Infrared; 27, 31

offset; 40, 76, 195
Optical Particle Counters; 35
optik; 2, 4, 31, 34, 154, 193
Ozone; 46, 184, 185

paradigma; 25
parametrik; 66, 69, 71, 76, 77
particle mass concentration; 36
partikel halus; 1, 77
pelatihan; 72, 73, 75, 162, 198
pemanasan awal; 28
pemanasan global; 8
pembelajaran mesin; 3, 66, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 77, 79, 156, 157, 161, 162, 164, 197
pemeliharaan; 4, 15, 18, 19, 26, 48, 58, 94, 101, 104, 115, 117, 119, 120, 121, 123, 124, 125, 126, 136, 145, 146, 148, 164

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pencemaran; 1, 8, 9, 10, 11, 21, 43, 89
pencemaran udara; xiii, xvi, 1, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 19, 21, 27, 80, 84, 90, 106, 152, 155, 160, 162, 164
pengolahan; xvi, 58, 59, 102, 114, 115, 133, 134, 138, 145, 162, 200
pengoperasian; 16, 18, 19, 31, 33, 66, 97, 99, 100, 101, 105, 111, 113, 121, 135, 146, 191
pengujian; xi, xvi, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 63, 65, 68, 69, 72, 84, 93, 97, 193
pengukuran; xiii, xiv, xvi, 4, 7, 13, 14, 16, 20, 23, 28, 29, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 47, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 69, 70, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 87, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 101, 104, 105, 106, 110, 113, 114, 116, 118, 119, 120, 121, 122, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 133, 134, 136, 138, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 159, 161, 163, 164, 191, 192, 193, 194, 195
penyakit; 1, 8, 11, 12, 13
penyimpanan; 18, 26, 49, 53, 98, 102, 105, 110, 111, 114, 115, 116, 117, 118, 133, 134, 135, 138, 139, 140, 145, 148
peringatan dini; 21, 157, 159, 198
perkotaan; xiii, 58, 80, 81, 89, 101, 155, 160, 161, 200
post-deployment; 79

Quality Assurance; 124, 125
Quality Control; 124, 126

real-time; 2, 16, 104, 158, 159, 164, 184
redoks; 29, 191, 193, 195
Reference Electrode; 29
repeatability; 38, 63
reproducibility; 38, 63
resistansi; 27
respon; 30, 33, 37, 39, 42
responsif; 50
Root Mean Square Error; 61

selektivitas; 42, 47, 95
sensitivitas; xi, 3, 18, 26, 28, 29, 30, 32, 37, 38, 42, 43, 44, 47, 51, 54, 56, 76, 77, 78, 79, 90, 91, 95, 126, 128, 163, 193, 195
Sensitivitas; 33, 38, 39, 43, 78, 94, 96
sensitivitas silang; xi, 3, 28, 30, 42, 43, 44, 54, 56, 76, 78, 79, 95, 128, 163, 195

Buku ini tidak diperjualbelikan

sensor; xi, xiii, xiv, xv, xvi, 2, 3, 4, 5, 7, 13, 14, 17, 18, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 63, 67, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 87, 90, 91, 92, 94, 95, 96, 97, 103, 104, 105, 108, 115, 119, 120, 123, 125, 126, 127, 128, 130, 133, 135, 137, 140, 142, 150, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 188, 189, 191, 192, 193, 194, 195, 197
sensor berbiaya murah; 195
Sensor Rendezvous; 81
server; 26, 102, 111, 115, 116, 117, 133, 134, 136, 137, 148
Signal Drift; 42
sinyal; 18, 27, 40, 42, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 75, 79, 96, 102, 108, 120, 122, 130, 191, 193, 196
sistem pemantauan kualitas udara; xiii, 2, 25, 40, 45, 98, 108, 111, 153, 154, 155, 157, 158, 161, 162, 165, 197
sistem pernapasan; 1
Slope; 61, 62
source apportionment; 89
spesifikasi; 3, 53, 90, 92, 93, 95, 126, 134
Standard Deviation; 39, 63, 64
suhu; 3, 27, 28, 30, 32, 38, 40, 42, 47, 48, 49, 50, 51, 54, 55, 56, 68, 69, 76, 77, 78, 94, 106, 127, 151, 156, 161, 163, 192
survey; 178, 180
Systematic Error; 41

tanaman; 9, 13
teknologi; xi, xiii, xv, xvi, 2, 3, 4, 7, 17, 25, 27, 28, 31, 32, 35, 36, 47, 51, 75, 109, 110, 111, 114, 115, 118, 153, 159, 161, 163, 164, 165, 198, 199, 200
terkontaminasi; 8, 9
Transfer Calibration; 83, 85
transmisi; 18, 26, 108, 112, 114, 130
transportasi; 1, 158, 162

udara; xi, xii, xiii, xiv, xv, xvi, 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 34, 40, 42, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 68, 80, 81, 84, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 111, 118, 119, 123, 124, 126, 133, 136, 145, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 157, 158,

Buku ini tidak diperjualbelikan

159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 168, 192, 194, 197
ultraviolet; 15, 32
urbanisasi; 1

validasi; 14, 51, 52, 72, 90, 106, 127, 149, 157, 160, 161
variabel; 49, 69, 70, 72, 137, 138, 151, 156, 164
Visualisasi; 133, 146, 147, 151, 152, 153

web; 117, 122, 137, 145, 146, 147, 148, 149, 173
WHO; 1, 8, 10, 11, 12, 157, 187
Working Electrode; 29, 142

Buku ini tidak diperjualbelikan

Low-cost sensor (LCS) merupakan teknologi sensor berbiaya relatif rendah yang memungkinkan pemantauan kualitas udara dilakukan secara lebih luas, fleksibel, dan mudah diterapkan. Kehadirannya membuka peluang bagi pemerintah, peneliti, praktisi, hingga masyarakat untuk memperoleh informasi kualitas udara secara lebih dekat dengan lingkungan tempat tinggal. Namun, biaya rendah dan kemudahan penggunaan tidak sertamerta menjamin
kualitas data. Akurasi, presisi, pengaruh kondisi lingkungan, sensitivitas silang, kalibrasi, serta pengelolaan data menjadi tantangan penting dalam pemanfaatan LCS.

Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Low-Cost Sensor menyajikan panduan terpadu mengenai pemanfaatan LCS, mulai dari pemahaman kualitas udara dan teknologi sensor, evaluasi kinerja, kalibrasi, hingga implementasi teknis serta pengelolaan dan evaluasi data. Dengan pendekatan aplikatif, buku ini membantu pembaca memahami LCS bukan sekadar sebagai perangkat sensor, melainkan sebagai bagian dari sistem pemantauan yang memerlukan pengujian dan pengelolaan data secara berkelanjutan. Buku ini bermanfaat bagi peneliti, praktisi, mahasiswa, pemangku kebijakan, dan masyarakat yang ingin memahami serta menerapkan LCS untuk menghasilkan data kualitas udara yang lebih andal.

Buku ini tidak diperjualbelikan

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.1287

ISBN 978-634-7933-40-9