

Penggunaan Terintegrasi Sensor Berbiaya Rendah untuk Memperkuat Manajemen Kualitas Udara







Ucapan Terima Kasih

Para Penulis dan Kontributor Utama

Meenakshi Kushwaha, ILK Labs, India

Sumi Mehta, Vital Strategies, Amerika Serikat

Pooja Arora, The Energy Research Institute, India

Timothy Dye, TD Environmental Services

Thomas Matte, Vital Strategies, Amerika Serikat

Peninjau Eksternal

Joshua Apte, University of Texas, USA

Solomon Teffera, SolTeff Environmental Consulting, USA

Sachchida Tripathi, IIT Kanpur, India

Para penulis dan kontributor panduan ini berterima kasih kepada pemangku kepentingan dan mitra dari kalangan pemerintah dan masyarakat sipil yang sudah memberikan masukan serta wawasan berharga selama dua hari pertukaran teknis virtual yang diadakan pada Desember 2020. Daftar lengkap peserta tersedia di Lampiran. Interaksi tersebut digunakan untuk meringkai isi kompendium ini.

Publikasi ini dapat terlaksana dengan dukungan finansial dari Bloomberg Philanthropies.

Vital Strategies. Penggunaan Sensor Berbiaya Rendah yang Terintegrasi untuk Memperkuat Manajemen Kualitas Udara. Meenakshi Kushwaha, Sumi Mehta, Pooja Arora, Timothy Dye, Thomas Matte. New York, NY, 2022. Tersedia di: <https://www.vitalstrategies.org/resources/integrated-use-of-low-cost-sensors-to-strengthen-air-quality-management/>

Karya ini tersedia di bawah ketentuan Creative Commons AttributionNonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. Untuk melihat salinan lisensi ini, kunjungi <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> atau kirim surat ke Creative Commons, P.O. Kotak 1866, Mountain View, CA 94042, AS. Konten dalam dokumen ini dapat digunakan secara bebas sesuai dengan lisensi ini asalkan materi tersebut disertai dengan atribusi berikut: "Penggunaan Sensor Berbiaya Rendah Terintegrasi untuk Memperkuat Manajemen Kualitas Udara." New York, NY; 2022. Hak Cipta © Vital Strategies.



Daftar Isi

Latar Belakang dan Ikhtisar	02	Desain jaringan LCS dan penempatan sensor	16
Penerapan Sensor Berbiaya Rendah (LCS) dalam Program Manajemen Kualitas Udara Komprehensif dan Sistem Pemantauan yang Kuat dan Terintegrasi	03	Penempatan	17
Kemungkinan Aplikasi LCS	07	Pemetaan Kualitas Udara	17
Tujuan dan Desain Proyek	08	Identifikasi <i>Hot Spot</i>	17
		Evaluasi	17
		Pertimbangan Lebih Lanjut	17
		Jaminan Kualitas / Kontrol Kualitas	22
Memilih/Menentukan Sensor Udara	09	Pra-instalasi	19
Metrik Kinerja	10	Kalibrasi/"Colocation"	22
Akurasi dan presisi	10	"Colocation" untuk menilai komparabilitas sensor	19
Kolarasi	10	"Colocation" dengan monitor referensi	19
Perbandingan intra-model	11	Pemeliharaan Pascainstalasi	19
Penurunan kinerja	13		
Respon sensor terhadap konsentrasi tinggi	13	Referensi	21
Kelengkapan data	13		
Pengaruh parameter lingkungan	13	Lampiran	
Menilai Kinerja: Evaluasi Laboratorium dan Lapangan	11	A. Pendekatan untuk Mengukur Bias, Akurasi, dan Presisi	22
Faktor lain yang perlu dipertimbangkan selama proses pemilihan sensor udara	13	B. Ringkasan panduan untuk menginformasikan pengembangan dan evaluasi tender	23
Kekuatan	13		
Transmisi data	14		
Kalibrasi	14		
Mempertimbangkan durasi proyek	14		
Memilih Layanan Data	14		
Manajemen dan Akses Data	14		
Tinjauan Data	16		
Dukungan Pelanggan	16		
Harga Model	16		
Logistik	16		
Pertimbangan Biaya Komprehensif	16		





Akronim

API	Application Programming Interface
AQ	Antarmuka pemrograman aplikasi Air Quality Kualitas Udara
AQM	Air Quality Management Manajemen Kualitas Udara
AQSPEC	Air Quality Sensor Performance Evaluation Center Pusat Evaluasi Kinerja Sensor Kualitas Udara
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAM	Beta Attenuated Monitor
CAAQMS	Continuous Ambient Air Quality Monitoring Stations Stasiun Pemantauan Kualitas Udara Ambien Berkelanjutan
CSV	Comma-Separated Values
EPA	Environmental Protection Agency Badan Perlindungan Lingkungan
GBD	Global Burden of Disease Study Studi Beban Penyakit Global
CPCB	Central Pollution Control Board
LCS	Low-Cost Sensor Sensor Berbiaya Rendah
MLR	Multiple Linear Regression
MOEFCC	Ministry of Environment, Forest and Climate Change Kementerian Lingkungan Hidup, Hutan, dan Perubahan Iklim
NOx	Nitrogen Oxides Nitrogen Oksida
QA/QC	Quality Assurance and Quality Control Jaminan Kualitas dan Kontrol Kualitas
PM	Particulate Matter Partikulat
RFP	Request for Proposal Permintaan Proposal
RMSE	Root Mean Square Error
RH	Relative Humidity Kelembapan Relatif
SLR	Simple Linear Regression Regresi Linier Sederhana
SOW	Statement of Work Pernyataan Kerja
UNEP	United Nations Environment Programme Program Lingkungan PBB
WHO	World Health Organization Organisasi Kesehatan Dunia



Latar Belakang dan Ikhtisar

Polusi udara terus menjadi risiko kesehatan lingkungan global yang paling mematikan, menyebabkan hampir 5 juta kematian setiap tahun, terutama dari paparan partikel halus ($PM_{2.5}$). Beban polusi udara terbesar dan meningkat di negara-negara dengan perkembangan ekonomi dan urbanisasi yang pesat, bersama dengan proliferasi emisi dari industri, pembangkit tenaga listrik, dan transportasi bermotor. Di negara-negara dengan regulasi kualitas udara yang terbatas atau nihil, hal ini menyebabkan meningkatnya polusi berbahaya. Yang memperparah tantangan polusi udara di banyak negara ini adalah masih banyaknya sumber polusi pra-industri seperti pembakaran bahan bakar padat rumah tangga, limbah tanaman dan hutan untuk pembukaan lahan serta pembakaran sampah terbuka.

Bagi banyak pemerintah kota di banyak negara berpenghasilan rendah dan menengah, kompleksitas dan biaya untuk memahami dan mengendalikan polusi udara telah menjadi hambatan untuk memulai atau mempertahankan tindakan udara bersih yang efektif. Pendekatan baru dalam manajemen kualitas udara yang menggabungkan solusi konvensional dengan inovasi dalam pemantauan, penilaian, penggunaan data, dan organisasi dapat mempercepat aksi udara bersih, terutama di kota-kota dengan kapasitas teknis yang saat ini terbatas.

Baru-baru ini, sensor berbiaya rendah (LCS) mulai populer sebagai alat untuk mengisi kesenjangan data dalam pemantauan kualitas udara seketika. Pada waktu yang sama, mengingat kebaruan teknologinya, penggunaan LCS secara lebih luas sebagai bahan informasi manajemen kualitas udara dan kebijakan udara bersih membutuhkan pertimbangan yang cermat. Pada Desember 2020, lebih dari 50 pakar internasional dan nasional berkumpul dalam pertukaran teknis virtual untuk berbagi wawasan internasional, praktik terbaik, dan contoh penggunaan sensor untuk lebih mengeksplorasi kemampuan, keterbatasan, spesifikasi teknis, dan bagaimana sensor harus dipilih dan dikerahkan. Di sini, kami mengintegrasikan pembelajaran ini ke dalam kerangka

pemantauan yang lebih luas yang disediakan dalam Mempercepat Kemajuan Kota tentang Udara Bersih: Panduan Inovasi dan Tindakan¹, sebuah buku pedoman untuk pendekatan dan inovasi yang terbukti untuk meningkatkan kualitas udara.

Singkatnya, dokumen ringkasan ini memberikan panduan pragmatis untuk penggunaan sensor berbiaya rendah (LCS) berdasarkan penelitian terapan dan pengalaman lapangan, termasuk mengidentifikasi tujuan dan pertanyaan pemantauan yang mungkin sesuai dengan tujuan LCS, spesifikasi teknis, jaminan kualitas utama/masalah kontrol kualitas (seperti validasi dan keandalan hasil yang tepat, dapat direproduksi, dan konsisten). Salah satu tujuan kuncinya adalah mendukung pemerintah daerah dalam upaya mereka untuk mengembangkan dokumen penawaran untuk mendapatkan serangkaian layanan komprehensif yang diperlukan untuk perencanaan kampanye LCS, pengembangan, penyebaran, analisis, integrasi dengan kualitas udara pelengkap data, dan komunikasi serta manajemen hasil.

Fokus ringkasan ini adalah pada penggunaan LCS untuk pengukuran konsentrasi massa $PM_{2.5}$, polutan yang paling sesuai dengan teknologi LCS saat ini dan indikator terpenting kualitas udara untuk kesehatan masyarakat.

Ringkasan ini akan membahas topik-topik berikut:

- Menggunakan LCS untuk mengumpulkan data yang dapat ditindaklanjuti yang cocok untuk mengisi kesenjangan di jaringan monitor referensi resmi;
- Mengukur dan menghasilkan data yang berguna untuk penempatan monitor referensi secara permanen;
- Mengevaluasi langkah-langkah pengurangan polusi yang ditargetkan secara geografis (misalnya zona bebas kendaraan, adopsi rumah tangga bersih skala lingkungan).

- Mengidentifikasi titik panas (hot spot) dan pemantauan fasilitas garis pagar (fence line) untuk mengidentifikasi potensi pelanggaran dan dampak lokal dari sumber polusi episodik (misalnya pembuangan limbah padat, lokasi industri), dan mengatasi situasi darurat (misalnya kebakaran struktural dan/atau kebakaran hutan);

T: Mengapa mengukur dan mengendalikan partikel halus ($PM_{2.5}$) menjadi prioritas?

J: Ini adalah polutan yang paling berbahaya bagi kesehatan. $PM_{2.5}$ adalah indikator campuran polusi yang menyebabkan penyakit dan kematian paling serius di India dan global. Selain terbukti menjadi penyebab penyakit serius dan kematian akibat penyakit kardiovaskular dan pernapasan, kanker, dan diabetes, yang termasuk dalam perkiraan beban penyakit global, $PM_{2.5}$ juga berdampak pada hasil kelahiran dan kesehatan anak, yang berpotensi mengganggu kesejahteraan dan produktivitas sepanjang rentang hidup.

- Memahami keterbatasan penting dari LCS saat ini, termasuk: membedakan sumber PM lokal dari polusi latar belakang regional yang tinggi, ketidakmampuan untuk mengukur komposisi PM untuk pembagian sumber dan ketidakmampuan untuk mengukur polutan gas yang penting untuk manajemen kualitas udara (AQM);
- Panduan sebagai bahan informasi lingkup pekerjaan tender atau vendor untuk layanan LCS termasuk tujuan, perencanaan, alokasi spasial dan pemilihan lokasi, pemilihan perangkat, kalibrasi, penyebaran, pemeliharaan, akuisisi data, transfer, jaminan kualitas dan kontrol kualitas, dan analisis;
- Praktik terbaik untuk membuat data dapat diakses dan bermakna bagi berbagai pemangku kepentingan teknis dan non-teknis, yang diperlukan untuk meningkatkan akuntabilitas dan dukungan untuk tindakan udara bersih.

Alat keputusan dan *template* sederhana akan disediakan untuk membantu membentuk pengembangan RFP dan memandu evaluasi aplikasi yang diterima.

Penerapan Sensor Berbiaya Rendah (LCS) dalam Program Manajemen Kualitas Udara Komprehensif dan Sistem Pemantauan yang Kuat dan Terintegrasi.

Pemantauan polusi udara, termasuk sensor berbiaya rendah dan metode inovatif lainnya, hanyalah salah satu aspek dari manajemen kualitas udara. Selain data pemantauan, perkiraan emisi polutan dari sumber utama harus digunakan untuk menginformasikan rencana aksi udara bersih untuk mengurangi emisi berbahaya.

Kombinasi pendekatan pemantauan dapat menjadi sumber informasi program manajemen kualitas udara yang kuat, mendukung kebutuhan manajemen kualitas udara lokal, regional dan nasional, dan menyediakan data untuk penelitian juga informasi publik³. Ada berbagai teknologi untuk memantau kualitas udara dari darat dan dari satelit di luar angkasa. Di lapangan, yang paling akurat adalah instrumen tingkat referensi yang menghasilkan data berkualitas tinggi. Namun, alat-alat ini jauh lebih mahal dan sulit dioperasikan. Sementara itu, LCS menawarkan janji pemantauan yang lebih murah, walaupun akurasi sangat bervariasi tergantung pada teknologi penginderaan dan polutan. Penginderaan jauh dengan satelit telah menjadi sumber penting informasi kualitas udara global⁴, terutama di lokasi tanpa pemantauan darat. Pendekatan ini juga dapat mengisi kesenjangan data di area dengan pemantauan lapangan yang ekstensif⁴⁻⁷. Ketika dikombinasikan dengan model transportasi kimia dan pengukuran permukaan yang tersedia untuk menghubungkan pengukuran kolom atmosfer dengan konsentrasi permukaan, perkiraan berbasis satelit untuk $PM_{2.5}$ dan beberapa polutan gas tersedia pada berbagai resolusi spasial (1-10 km) bila dikombinasikan dengan model transportasi kimia dan pengukuran permukaan, tetapi cara ini tidak akan memberikan penyelesaian waktu yang tinggi secara lokal dan pengukuran skala lingkungan sekitar.

Untuk negara-negara dengan kota yang cukup besar yang tidak memiliki monitor permukaan kelas referensi, tidak memiliki satu teknologi pun yang dapat menyediakan pemantauan yang komprehensif. Alih-alih, kombinasi teknologi, termasuk LCS, dapat memberikan solusi hemat biaya untuk menetapkan pemantauan kualitas udara dan meningkatkannya secara bertahap dan berkelanjutan yang mengarah ke sistem terintegrasi (Gambar 2).



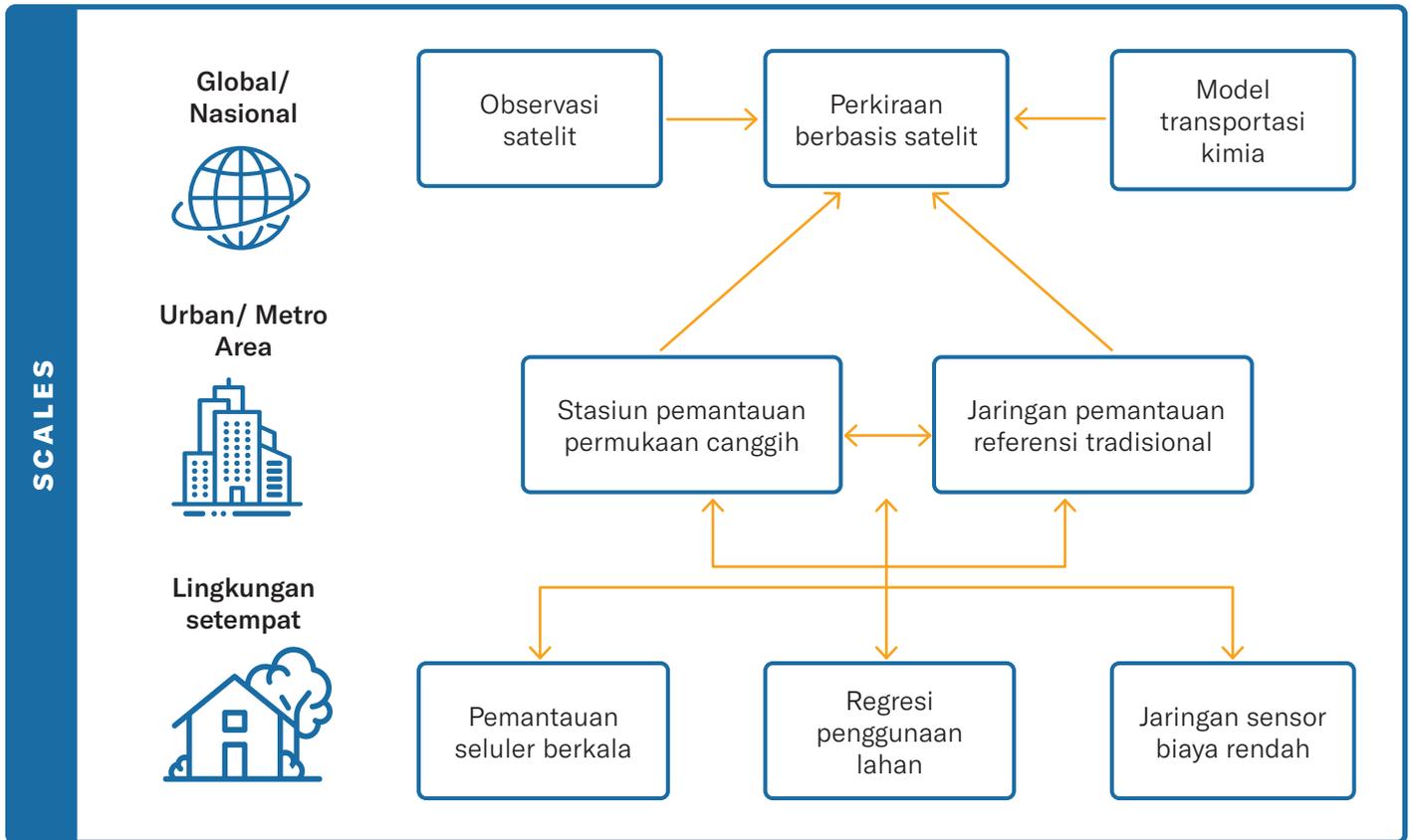
TINGKAT DATA DAN KAPASITAS SAAT INI	Tingkat	Data Tersedia
	<p>1</p> <p><u>Terbatas atau Tidak Ada.</u></p> <p>Tidak ada pemantauan PM2.5 referensi resmi berkelanjutan di tempat</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">M E N I N G K A T N Y A K E R A P A T A N J A R I N G A N D A N A L A T P E M A N T A U A N</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perkiraan berbasis satelit. • Referensi pemantauan PM2.5 tidak resmi. • Regresi penggunaan lahan, sensor berbiaya rendah, atau studi pemantauan seluler.
	<p>2</p> <p><u>Pemantauan dasar untuk mendukung tindakan awal.</u></p> <p>Setidaknya satu monitor PM2.5 referensi resmi di tempat dengan pengumpulan dan penggunaan data yang sedang berlangsung (minimal untuk informasi publik)</p>	<p><u>Fase 1+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Satu atau lebih monitor PM2.5 referensi tetap.
	<p>3</p> <p><u>Pemantauan komprehensif untuk tindakan berkelanjutan.</u></p> <p>Jaringan beberapa referensi pemantauan PM2.5 dengan setidaknya satu stasiun pemantauan lanjutan yang mengumpulkan sampel PM2.5 untuk komposisi kimia dan untuk mengukur polutan gas. Data telah digunakan dalam pengembangan kebijakan.</p>	<p><u>Fase 2+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Stasiun pemantauan partikel permukaan canggih. • Satu atau lebih stasiun pemantauan referensi untuk polutan gas.
	<p>4</p> <p><u>Sistem terintegrasi yang canggih.</u></p> <p>Pemantauan fase 3 ditambah pemantauan resolusi spasial tinggi secara berkala.</p>	<p><u>Fase 3+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Model regresi penggunaan lahan berkala atau kampanye pemantauan seluler. • Jaringan sensor berbiaya rendah

Gambar 1. Aplikasi Jaringan Sensor Berbiaya Rendah berdasarkan Tingkat Data dan Kapasitas Saat Ini

Pertanyaan Prioritas

- **LCS** apakah kualitas udara berbahaya bagi kesehatan di daerah perkotaan/metro?
 - Mengapa penting untuk memiliki pemantauan resmi yang dapat diandalkan?
 - **LCS** di mana sebaiknya monitor referensi awal ditempatkan?
-
- Berapa tingkat dan tren dasar PM2.5 saat aksi udara bersih diluncurkan?
 - **LCS** Di mana sebaiknya monitor grade referensi ditempatkan?
 - Apakah kualitas udara lokal sesuai dengan standar lokal?
 - Kapan episode polusi udara jangka pendek terjadi?
 - **LCS** Apa yang kita ketahui tentang pola lokal dalam kualitas udara dan/atau paparan polusi udara?
-
- Apa sumber penting polusi udara di daerah perkotaan/metro?
 - Apakah tindakan pengendalian meningkatkan kualitas udara di daerah perkotaan/metro?
 - **LCS** Di mana seharusnya monitor tingkat referensi tambahan ditempatkan?
 - **LCS** Apakah sumber lokal (misalnya pembakaran sampah, penggunaan energi biomassa) memengaruhi tingkat PM2.5 di sekitar?
 - **LCS** Adakah paparan titik panas?
-
- **LCS** Apa saja titik panas dan sumber polusi lingkungan lokal?
 - Apakah tindakan pengendalian meningkatkan kualitas udara lokal-lingkungan?
 - **LCS** Apakah langkah-langkah pengendalian polusi udara yang berfokus secara geografis meningkatkan kualitas udara lingkungan?

LCS = Mungkin dapat diatasi dengan pengaplikasian jaringan LCS



Gambar 2. Sistem Pemantauan Kualitas Udara Terintegrasi

Kampanye dan jaringan LCS dapat masuk ke dalam sistem pemantauan kualitas udara yang lebih luas menggunakan data terintegrasi dari metode penginderaan satelit jarak jauh, monitor permukaan tradisional dan canggih, juga pemantauan berkala dengan satu atau lebih pendekatan resolusi spasial tinggi, regresi penggunaan lahan, pemantauan seluler atau kampanye dan jaringan LCS. Sistem tersebut dapat menilai variasi polusi udara pada resolusi spasial dan temporal yang berbeda, menginformasikan penempatan monitor referensi tambahan dan menggabungkan inovasi baru dari waktu ke waktu. Biaya pemasangan dan pengoperasian sistem seperti itu akan sangat bervariasi tergantung pada keadaan wilayah lokal, tetapi sistem hibrida kemungkinan akan jauh lebih murah daripada jaringan regulasi konvensional dengan banyak monitor referensi⁸. Perlu dicatat bahwa sistem hibrida sedemikian, selain menggabungkan teknologi pemantauan yang berbeda, juga dapat mengintegrasikan data yang kredibel dari pemantauan yang dilakukan oleh berbagai organisasi pemerintah dan entitas non-pemerintah.

-Pengaplikasian LCS yang Memungkinkan

Bagian sebelumnya memberikan gambaran tentang bagaimana LCS dapat melengkapi metode pemantauan dan inovatif lainnya sebagai bagian dari sistem pemantauan yang komprehensif. Di sini kami mempertimbangkan aplikasi LCS yang berbeda, tergantung pada tingkat pemantauan saat ini dan pertanyaan kunci yang harus dijawab (Gambar 1). Penerapan pragmatis LCS harus dimulai dengan penilaian data dan kualitas pemantauan kualitas udara saat ini di kota atau di tempat lain di mana LCS sedang dipertimbangkan, dengan menentukan pertanyaan-pertanyaan kunci yang relevan tentang kualitas udara untuk menginformasikan atau mengevaluasi keputusan. Selain itu, setiap pemantauan dan data yang kredibel dan tersedia tentang tingkat polusi harus diinventarisasi untuk membantu menilai bagaimana data LCS dapat dimuat dan diintegrasikan dengan data pemantauan udara lainnya.

Misalnya, di kota-kota dengan kapasitas pemantauan

terbatas atau tidak ada sama sekali, jaringan LCS dapat digunakan untuk mencari kebenaran atau memverifikasi bahwa tingkat $PM_{2.5}$ yang diperkirakan dari metode penginderaan jauh berbasis satelit menunjukkan pelampauan substansial dari standar berbasis kesehatan di seluruh kota dan wilayah sekitarnya. Jaringan mungkin juga menyediakan data awal yang dapat ditindaklanjuti sebagai bahan informasi pembangunan sistem pemantauan terpadu dari pendekatan pelengkap, seperti dengan pelingkupan lokasi untuk pemantauan referensi awal atau tambahan referensi permanen. Di kota-kota dengan setidaknya beberapa monitor referensi yang mapan, LCS menawarkan cara untuk melengkapi pemantauan yang ada, mengisi kesenjangan spasial dalam jaringan pemantauan, mengidentifikasi titik panas, dan mengukur efektivitas tindakan udara bersih yang ditargetkan secara geografis. Potensi penerapan LCS bergantung pada tingkat data dan kapasitas saat ini di kota serta kesenjangan data utama dan pertanyaan tentang kualitas udara. Lihat Gambar 1.

Tujuan dan Desain Proyek

Ringkasan ini berfokus pada empat aplikasi praktis:

Ringkasan ini berfokus pada empat aplikasi praktis LCS untuk menginformasikan manajemen kualitas udara. Aplikasi ini meliputi:

1. **PENDUDUKAN** Mengkarakterisasi pola spasial tingkat $PM_{2.5}$ dengan tidak adanya monitor tingkat referensi untuk menginformasikan penempatan monitor tingkat referensi awal atau monitor tambahan untuk mengisi celah di jaringan yang jarang.
2. **PEMETAAN KUALITAS UDARA** Mengkarakterisasi gradien paparan spasial dan temporal di seluruh kota untuk mengevaluasi data dan prakiraan emisi, memberikan perkiraan paparan untuk studi kesehatan, dan menginformasikan perluasan jaringan pemantau tingkat referensi yang ada.
3. **MENGIDENTIFIKASI TITIK PANAS** Mengidentifikasi area dengan konsentrasi kualitas udara yang lebih tinggi karena kedekatannya dengan sumber, untuk memprioritaskan tindakan lokal atau untuk meningkatkan kesadaran publik tentang sumber-sumber tertentu.

4. **EVALUASI** Menilai dampak dari tindakan yang ditargetkan secara geografis yang diambil untuk mengendalikan sumber-sumber tertentu dan/atau mengurangi paparan polusi pada populasi yang tinggal dekat dengan sumber-sumber tertentu.

Pertanyaan Praktis yang Harus Dipertimbangkan Sebelum Merencanakan Proyek Pemantauan LCS.

- Bagaimana status dan kapasitas pemantauan polusi udara referensi resmi saat ini (Gambar 1)?
- Dengan tersedianya data resmi dan tidak resmi tentang tingkat polusi udara, apa kesenjangan data utama dan pertanyaan tentang tingkat polusi udara yang dapat dijawab oleh LCS?
- Apa keterbatasan perangkat LCS yang tersedia saat ini serta kelebihan dan kekurangannya dibandingkan dengan pendekatan pemantauan lainnya? Apakah LCS sesuai dengan tujuan untuk menjawab pertanyaan?
- Data pendukung apa (misalnya tentang sumber $PM_{2.5}$, emisi dan distribusi spasialnya) yang tersedia atau perlu dikumpulkan untuk membantu merencanakan proyek LCS dan menambah nilai pada data LCS untuk menginformasikan atau mengevaluasi pengendalian polusi udara?

Pengaplikasian jaringan sensor LCS, dan pertanyaan prioritas yang harus dijawab, bergantung pada tingkat data dan kapasitas saat ini untuk manajemen kualitas udara (Gambar 1).

Keempat aplikasi mengasumsikan bahwa data dari LCS akan digunakan bersama dengan pendekatan manajemen kualitas udara konvensional, bersama dengan metodologi dan pendekatan pengukuran inovatif lainnya, termasuk regresi penggunaan lahan dan penginderaan jauh.

- LCS tidak boleh diandalkan untuk melacak tren jangka panjang secara andal di tingkat $PM_{2.5}$ skala perkotaan. Hal itu harus dilakukan

Keterbatasan Sensor Berbiaya Rendah

Kesadaran akan keterbatasan LCS dapat membantu memastikan bahwa batasan tersebut hanya digunakan jika sesuai dengan tujuan, dan menghindari masalah kualitas data dan jebakan lainnya, dengan mengikuti panduan di bagian selanjutnya dari ringkasan ini.

- Akurasi dan presisi sensor menjadi keterbatasan utama. Salah satu langkah penting dalam mengurangi masalah kualitas data adalah memilih perangkat yang berkinerja baik saat diuji oleh program pengujian dan evaluasi yang ditetapkan seperti yang dijelaskan dalam ringkasan ini.
- Selain LCS untuk massa $PM_{2.5}$, LCS saat ini belum terbukti berkinerja baik dalam mengukur beberapa polutan utama untuk manajemen kualitas udara, termasuk komposisi partikel, NO_x , SO_x dan ozon. Metode lain, seperti sampler PM berbasis filter berbiaya lebih rendah dan sampler polutan gas pasif, tersedia.
- Meskipun biaya unit sensor yang rendah menarik, biaya personel dan sumber daya lainnya untuk penyebaran, pemeliharaan, kalibrasi, dan penggantian perangkat bersama dengan manajemen dan pemeliharaan jaringan data harus dipertimbangkan.
- Akhirnya, jaringan LCS dapat menghasilkan data yang tampak mengkhawatirkan tetapi tidak dapat ditindaklanjuti. Misalnya, lonjakan pendek (detik hingga menit) di tingkat yang diukur oleh satu sensor dapat menunjukkan sensor yang tidak berfungsi atau peningkatan sementara polusi udara yang sangat terlokalisasi. Yang terakhir memiliki sedikit relevansi untuk manajemen kualitas udara atau kesehatan masyarakat, kecuali jika hal itu mempengaruhi populasi yang besar atau terjadi secara teratur. Kedua jenis lonjakan tersebut dapat mengalihkan perhatian personel dan sumber daya kualitas udara pemerintah yang terbatas dari upaya untuk mengendalikan sumber polusi penting yang teridentifikasi.

dengan menetapkan setidaknya satu atau lebih situs pemantauan tingkat referensi yang dapat memberikan data yang konsisten dari waktu ke waktu.

- LCS tidak boleh diandalkan untuk melacak tren jangka panjang secara andal di tingkat $PM_{2.5}$ skala perkotaan. Hal itu harus dilakukan dengan menetapkan setidaknya satu atau lebih situs pemantauan tingkat referensi yang dapat memberikan data yang konsisten dari waktu ke waktu.

Memutuskan metrik yang memadai untuk kinerja sensor tergantung pada aplikasi yang dimaksudkan. Pengukuran kualitatif atau indikatif dapat berguna di lokasi tunggal atau untuk tujuan pendidikan. Misalnya, berusaha memahami perubahan umum dalam polusi udara di sekolah atau pusat komunitas mungkin tidak memerlukan kualitas data tingkat tertinggi. Namun, kualitas data yang lebih tinggi akan dibutuhkan saat membandingkan data sensor dengan sensor lain atau sensor standar.

Memilih/Menentukan Sensor Udara

Kinerja sensor udara meliputi ukuran akurasi, presisi dan keandalan perangkat. Kinerja dapat bervariasi secara signifikan dari satu faktor ke pabrikan lainnya karena beberapa kondisi (misalnya, kondisi cuaca, tingkat polusi). Untuk membantu pengguna dan pembeli memilih sensor udara, organisasi mengembangkan evaluasi dan protokol pengujian untuk menentukan sensor udara mana yang terbaik. Organisasi-organisasi ini termasuk lembaga pemerintah, lembaga akademik, dan asosiasi yang telah mengembangkan cara untuk menguji sensor udara dengan metode independen yang kredibel. Bagian ini memberikan gambaran umum tentang evaluasi, sumber daya, dan kriteria lain untuk mengidentifikasi sensor udara mana yang terbaik untuk pengaplikasian Anda. Standar dan kelompok pengujian baru-baru ini mengembangkan metode pengujian. Metode sensor udara biasanya mencakup evaluasi sensor baik dalam pengaturan di laboratorium dan lapangan. Evaluasi laboratorium menguji sensor udara bersama instrumen referensi di ruang pemantauan yang mengontrol semua pengujian parameter—suhu, kelembapan, dan konsentrasi polutan. Evaluasi

laboratorium tidak dapat sepenuhnya mensimulasikan kondisi yang sebenarnya seperti evaluasi lapangan. Sementara evaluasi berbasis laboratorium memungkinkan kita untuk mencari tahu kinerja alat secara sistematis, beragam kondisi di dunia nyata menantang untuk disimulasikan dalam lingkungan yang tidak terkendali. Pengujian lapangan memberi pengguna kesempatan untuk menguji sensor dan menentukan kinerja perangkat secara keseluruhan. Pengujian lapangan dilakukan dengan menempatkan beberapa (setidaknya tiga) sensor udara dengan instrumen tingkat referensi.

Metrik Kinerja

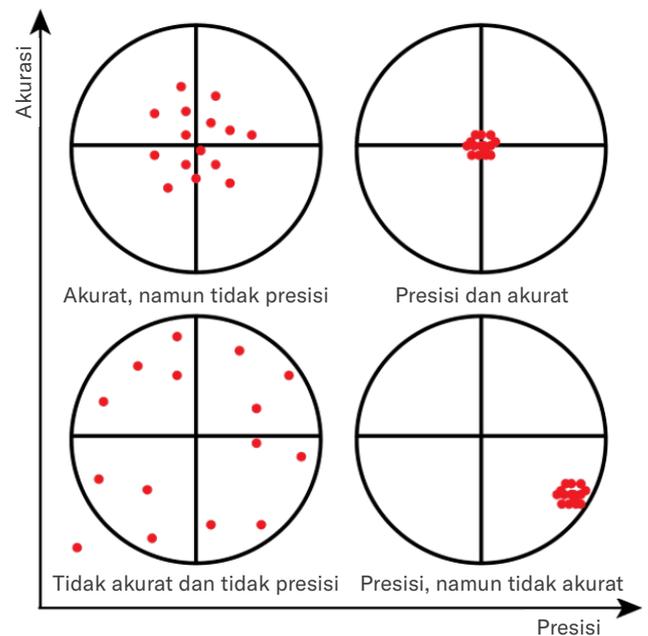
Metrik kinerja adalah parameter yang digunakan untuk menggambarkan seberapa baik kinerja sensor udara relatif terhadap standar (biasanya instrumen referensi). Banyak metrik yang dapat membantu Anda memahami kinerja sensor udara dan sensor yang terbaik untuk aplikasi Anda. Metrik secara singkat diringkas di bawah dan pada Gambar 4, dan umumnya berlaku untuk polutan partikel dan gas.

Akurasi dan presisi

Akurasi dan presisi bersama-sama mengacu pada kemampuan sensor untuk mengukur nilai yang benar dengan akurat setiap saat (Gambar 3). Presisi mengacu pada pengukuran hal yang sama setiap waktu dan secara konsisten. Akurasi mengacu pada apakah sensor mengukur nilai yang benar. Misalnya, jika instrumen tingkat referensi mengukur $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan tiga sensor udara *colocated* mengukur $40, 40,5, 42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, perangkat uji presisi (nilainya berdekatan) tetapi tidak akurat (nilainya tidak akurat atau berbeda dari instrumen tingkat referensi). Lihat Lampiran tentang metrik tertentu untuk menentukan presisi dan bias.

Korelasi

Korelasi mengukur bagaimana data sensor udara berhubungan dengan data dari instrumen referensi, yang dapat dinilai untuk pengukuran dari waktu ke waktu atau ruang. Korelasi temporal mengukur seberapa banyak pengukuran dari monitor yang berbeda bervariasi dari waktu ke waktu. Korelasi spasial mengukur seberapa banyak pasangan pengukuran, seperti rata-rata mingguan, di beberapa lokasi, bervariasi bersama-sama. Korelasi yang tinggi ($>0,80$) menunjukkan bahwa sensor



Gambar 3: Data sampel yang menggambarkan tingkat akurasi vs presisi yang berbeda. Sumber gambar: <https://wp.stolaf.edu/it/gis-precision-accuracy/>

mendeteksi tren yang serupa dengan data referensi. Namun, pengukuran sensor dapat memiliki R^2 yang tinggi, tetapi berbeda secara signifikan dari pengukuran referensi karena bias (misalnya, R^2 sebesar 0,99 dan secara signifikan melebihi atau meremehkan konsentrasi sebenarnya).

Menilai Kinerja: Evaluasi Laboratorium dan Lapangan

Evaluasi Berbasis-Laboratorium

Validasi berbasis laboratorium membantu kinerja sensor udara secara sistematis di bawah kisaran kondisi suhu dan kelembapan. Evaluasi biasanya dilakukan di ruang pemantauan yang dapat mengontrol, memelihara, dan menyatukan semua parameter uji—suhu, kelembapan relatif, konsentrasi aerosol. Sementara evaluasi laboratorium sangat membantu dalam menentukan sensor di bawah kondisi tertentu yang diatur, hal ini tidak dapat sepenuhnya mensimulasikan kondisi aktual seperti evaluasi lapangan. Perbedaan antara kondisi lapangan dan laboratorium mungkin disebabkan oleh faktor-faktor seperti perubahan kondisi cuaca, dan perbedaan sifat polutan.

Evaluasi Berbasis-Lapangan

Sementara evaluasi berbasis laboratorium memungkinkan kita untuk menyelidiki kinerja perangkat secara sistematis, kondisi dunia nyata sulit untuk disimulasikan dalam lingkungan yang terkendali. Pengujian lapangan menunjukkan bagaimana kinerja perangkat dalam kondisi dunia nyata. Hasil pengujian lapangan, termasuk kolokasi dengan monitor tingkat referensi, harus ditinjau ketika merencanakan proyek LCS. Evaluasi lapangan harus dilakukan di bawah kondisi serupa dengan yang diharapkan, dengan kinerja dibandingkan dengan perangkat tingkat referensi. Stasiun pemantauan papan kontrol polusi yang didirikan dengan perangkat PM2.5 tingkat referensi dapat digunakan sebagai lokasi kolokasi untuk evaluasi lapangan.

Sumber Daya Utama tentang Evaluasi Sensor Udara

- U.S. EPA – Performance Targets: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols>
- Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQSPEC): <http://www.aqmd.gov/aq-spec>
- Air Parif: <http://www.airlab.solutions/en>

Metrik lain yang berguna untuk perbandingan tersebut adalah Normalized Root Mean Squared Error atau Normalized RMSE. Nilai yang lebih rendah dari metrik ini menunjukkan kesepakatan yang lebih baik dengan instrumen kelas referensi. Lihat lampiran tentang cara menghitung nilai R^2 dan RMSE.

Perbandingan Intramodel

Saat menggunakan beberapa perangkat sensor udara untuk suatu proyek, penting untuk memastikan bahwa pembacaan dari perangkat yang berbeda akan sesuai satu sama lain. Untuk memastikan hal ini, perbandingan intramodel menggunakan setidaknya tiga perangkat dengan merek, model, dan versi perangkat tegar (*firmware*) yang sama untuk pengujian yang direkomendasikan.

Pendekatan Inovatif untuk Pengaturan Sumber Daya Rendah

Untuk lokasi penempatan yang tidak memiliki akses listrik dan koneksi Wi-Fi yang andal, sensor udara dengan baterai internal dan modul seluler lebih sesuai. Atau, beberapa kelompok penelitian menggunakan kombinasi paket baterai portabel bersama dengan modul Wi-Fi bersama dengan sensor udara. Meskipun konfigurasi ini memungkinkan fleksibilitas penerapan dalam pengaturan sumber daya rendah, karena bagian tambahan tidak akan menjadi pengaturan plug and-play dan memerlukan waktu tambahan untuk pemantauan dan pemecahan masalah. Pertimbangan lain termasuk biaya tambahan untuk pembelian dan pemeliharaan paket baterai sekaligus modul Wi-Fi.

Pertanyaan kunci untuk Pemilihan LCS

Aplikasi



YA



Apakah LCS memenuhi kriteria kebutuhan Anda untuk aplikasi terencana seperti mengukur polutan tertentu?

Performa



YA



Apakah LCS sudah tersertifikasi, teruji, atau terevaluasi oleh organisasi yang kredibel?

TIDAK

Pilihlah LCS yang berbeda

Evaluasi lapangan



YA



Apakah LCS sudah diuji di wilayahmu dengan polusi dan cuaca tertentu

TIDAK

Apakah uji lapangan bisa dilakukan di wilayah Anda?

TIDAK

Pilihlah LCS yang berbeda

Dukungan



YA



Apakah LCS memenuhi syarat untuk aplikasi Anda (kendali, komunikasi, dukungan, dan lainnya)?

TIDAK

Pilihlah LCS yang berbeda



PERTIMBANGKANLAH UNTUK MENGGUNAKAN LCS

Gambar 4: Pertanyaan kunci untuk memilih LCS

Penurunan Kinerja

Kinerja (atau penyimpangan) sensor udara dapat menurun seiring waktu karena berbagai alasan. Contohnya, bagian mekanis yang tidak berfungsi, pengendapan partikel pada unit penginderaan internal, atau faktor lingkungan lainnya. Penyimpangan instrumen mungkin dapat menjadi positif atau negatif dan membuat kita salah menyimpulkan bahwa konsentrasi menurun atau meningkat dengan proyek jangka panjang, yang berlangsung lebih dari enam bulan. Pabrikan harus menyediakan masa pakai sensor yang diharapkan dan metode untuk mendeteksi dan memperbaiki penyimpangan sensor udara.

Respon Sensor terhadap Konsentrasi Tinggi

Mengingat bahwa kondisi ambien di area yang sangat tercemar dapat melebihi urutan besarnya atau lebih tingkat tipikal di mana LCS telah dievaluasi, penting untuk menentukan respons sensor di bawah konsentrasi polutan ekstrem. Perhatikan bahwa kinerja yang sangat baik di wilayah dengan konsentrasi yang lebih rendah mungkin tidak diterjemahkan ke wilayah lain.

Kelengkapan Data

Kelengkapan data menunjukkan keandalan sensor udara Anda, artinya apakah jaringan sensor beroperasi secara konsisten dan menghasilkan kumpulan data lengkap yang diperlukan untuk menarik kesimpulan tentang keadaan kualitas udara. Variasi konsentrasi polutan musiman yang diharapkan tidak akan dapat diandalkan jika sensor tidak bertahan setidaknya satu tahun. Selain itu, sensor cadangan yang sudah teruji dalam tes kolokasi harus dikesampingkan untuk perbandingan yang lebih baik.

Pengaruh Parameter Lingkungan

Penting untuk memastikan apakah perangkat merekam data suhu dan kelembapan. Jika tidak, buatlah rencana untuk merekam data kelembapan dan suhu secara terpisah, atau akses data ini dari stasiun meteorologi terdekat. (Di antara banyak model LCS, kelembapan dan suhu adalah parameter yang memengaruhi kinerja dan dengan demikian penting untuk mencatat nilai-nilai ini.)

Faktor Kalibrasi Dapat Berubah Sesuai Waktu dan Ruang

Kalibrasi benar-benar dapat menjadi target bergerak untuk sebagian besar LCS yang mengukur $PM_{2.5}$. Mengingat bahwa LCS beroperasi pada prinsip hamburan optik, perubahan sifat optik dari partikel yang berdampak pada respons LCS. Sifat-sifat ini (seperti distribusi ukuran, kelembapan-respons, dll) sering berubah di daerah perkotaan dan dengan musim yang berbeda. Maka, faktor kalibrasi dapat berbeda tidak hanya dengan lokasi tetapi juga dengan waktu. Misalnya, kalibrasi dari satu wilayah mungkin tidak berlaku di wilayah lain, dan kalibrasi dilakukan di musim panas mungkin tidak akan bertahan di musim hujan atau musim dingin. Untuk mengatasi masalah ini, disarankan untuk memelihara satu LCS yang ditempatkan dengan monitor referensi, misalnya *Beta Attenuated Monitor* (BAM) di dalam area studi umum.

Faktor Lain yang Perlu Dipertimbangkan Selama Proses Pemilihan Sensor Udara

Banyak faktor lain yang penting untuk memilih sensor udara untuk memenuhi tujuan dan sasaran yang ditargetkan. Beberapa faktor ini dapat secara signifikan mempengaruhi kinerja sensor udara, sedangkan faktor lainnya dapat mempengaruhi biaya awal dan berkelanjutan dari sensor udara. Misalnya, catu daya yang tidak stabil dapat menghasilkan kumpulan data dan analisis batas yang tidak lengkap.

Daya

Hal ini merupakan pertimbangan penting ketika merancang jaringan untuk kota-kota yang sering mengalami pemadaman listrik atau tantangan untuk mendapatkan daya. Gangguan pada catu daya menyebabkan buruknya kualitas data yang dihasilkan. Ada beberapa opsi untuk memberi daya pada LCS, termasuk daya listrik, surya, dan daya baterai. Catu daya cadangan dapat meningkatkan keandalan. Anda bisa menggunakan tenaga solar dan pastikan lokasi Anda memiliki cukup sinar matahari.

Durasi Proyek yang Diharapkan	Pertimbangan Utama
Jangka pendek	Kinerja, kemudahan instalasi, pemeliharaan
Jangka menengah (sampai dengan satu tahun)	Kalibrasi berulang, penyimpangan sensor, suku cadang dan penggantian
Jangka panjang (lebih dari 1 tahun)	Masa penyimpanan, perpanjangan garansi

Tabel 1: Pertimbangan utama untuk pemilihan LCS bergantung pada durasi proyek.

Pertanyaan kunci sebagai bahan informasi pemilihan perangkat, lokasi situs dan implementasi studi

- Apa tujuan dan sasaran proyek utama?
- Bagaimana tingkat kapasitas manajemen kualitas udara saat ini?
- Data apa yang saat ini tersedia untuk menginformasikan desain studi dan menjawab pertanyaan kunci?
- Apakah ada linimasa yang diusulkan untuk mencapai hasil?
- Bagaimana data akan dianalisis dan divisualisasikan?

Transmisi Data

Biasanya, data dari sensor udara ditransmisikan ke awan penyimpanan (cloud) secara seketika. Transmisi ini membutuhkan jaringan Wi-Fi atau modul seluler (kartu SIM) pada sensor. Sebagai cadangan, data dapat disimpan di memori internal (misalnya, kartu memori digital) yang dapat diakses secara fisik. Terkadang jaringan Wi-Fi bisa tidak stabil atau memerlukan protokol keamanan tambahan yang dapat mengurangi keandalan sensor udara. Oleh karena itu, modul seluler mungkin memerlukan biaya bulanan yang perlu dipertimbangkan.

Kalibrasi

Sensor udara akan memerlukan kalibrasi dan koreksi berkala terhadap data. Respons sensor dapat berubah

sesuai dengan musim, sifat polutan, dan usia sensor. Disarankan agar sensor udara dikalibrasi di lokasi sebelum dipasang dan secara berkala setelahnya. Lihat bagian kalibrasi untuk detail lebih lanjut. Tanyakan kepada produsen LCS tentang protokol, frekuensi, dan biaya tambahan untuk menjaga sensor kalibrasi.

Mempertimbangkan durasi proyek

Berapa lama Anda berencana untuk memantau dengan LCS dapat memengaruhi beberapa fitur dan fungsi yang Anda pilih untuk sensor Anda. Proyek jangka pendek beberapa bulan dan yang tidak berlangsung lebih dari satu musim mungkin tidak memerlukan logistik penempatan yang ekstensif atau upaya kalibrasi ulang. Untuk proyek jangka panjang, terutama setelah satu tahun, umur simpan sensor udara dan jaminan terkait menjadi penting. Mengingat bahwa, biasanya, sensor udara bertahan selama sekitar satu atau dua tahun, Anda perlu merencanakan penggantian dan pemeliharaan tambahan. Biaya lain yang perlu dipertimbangkan bertambah seiring waktu—kalibrasi ulang untuk menentukan biaya pemeliharaan musiman, penyimpangan sensor, jaringan dan manajemen data, dan lain-lain. (Tabel 1).

Memilih Layanan Data

Sensor udara menghasilkan banyak data yang harus dikelola, dikontrol kualitasnya, dan dapat diakses untuk keberhasilan proyek Anda. Sangat penting untuk memahami layanan data apa yang disediakan (atau tidak disediakan) oleh perusahaan sensor udara. Sebagai alternatif, otoritas pengatur lokal atau regional dapat mempertimbangkan untuk melakukan beberapa layanan ini sesuai dengan pengalaman dan alat yang diperlukan.

Manajemen dan Akses Data

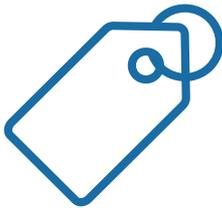
Produsen harus memberikan perincian tentang di mana data disimpan dan bagaimana data tersebut dapat diakses. Sistem berbasis cloud sangat ideal dan dapat memfasilitasi penyimpanan, sekaligus pelacakan juga menjamin kualitas data.

Beberapa pertanyaan yang perlu dipertimbangkan meliputi:

- Apakah data tersedia untuk umum atau dilindungi kata sandi?

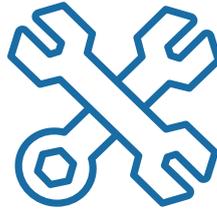
Biaya-biaya Kunci sebagai Pertimbangan dalam Memilih LCS

Harga beli



Biaya awal peralatan pemantauan

Pemeliharaan



Pasokan, suku cadang, biaya jasa dan kirim untuk perbaikan

Infrastruktur



Struktur dan infrastruktur pendukung untuk instalasi, keamanan

Sewa Properti



Jika berlaku, sewa properti untuk lokasi instalasi

Utilitas



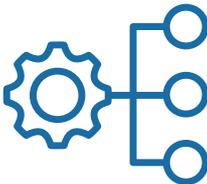
Tenaga listrik dan komunikasi nirkabel yang andal

Personel



Biaya personel untuk penempatan, kalibrasi, dan pemeliharaan

Manajemen data



Peralatan, biaya, dan personel manajemen data

Gambar 5: Biaya-biaya kunci sebagai pertimbangan dalam memilih LCS

-
- Apakah pengguna memiliki akses ke data mentah?
 - Siapa yang memiliki data?
 - Berapa lama data akan disimpan setelah penelitian?
 - Apakah ada biaya tambahan untuk aplikasi/situs web seluler?
 - Apakah ada batasan berapa banyak orang yang dapat mengakses situs web/aplikasi?

Tinjauan Data

Penting untuk memutuskan siapa yang akan bertanggung jawab untuk meninjau data dan menangani setiap masalah yang diidentifikasi. Jika layanan ini dapat tersedia, vendor harus menjelaskan proses dan frekuensi peninjauan data harian untuk mengidentifikasi masalah lebih awal, tentu saja sekaligus memperbaiki, dan membantu menciptakan kumpulan data yang lengkap dan berkualitas tinggi.

Dukungan Pelanggan

Anda mungkin memerlukan bantuan tambahan dari vendor untuk memasang, mengoperasikan, dan menggunakan sensor udara, jadi pertimbangkan pertanyaan berikut: Berapa lama dukungan pelanggan bertahan? Dukungan apa yang disertakan dengan garansi? Dukungan apa yang tidak termasuk? Apakah vendor memiliki dukungan di kota Anda atau wilayah terdekat?

Model Harga

Ada dua jenis model harga di pasaran: 1) membeli sensor udara langsung atau 2) dengan paket berlangganan atau penyewaan sensor. Saat membeli perangkat keras, biaya tambahan harus dipertimbangkan, misalnya: aksesoris terkait, suku cadang, layanan dan pengiriman untuk perbaikan dan pemeliharaan, biaya operasi berkelanjutan, biaya akses data, dan sebagainya. Anda dapat meminta perhitungan pembiayaan dari vendor untuk tahun pertama layanan. Model berlangganan biasanya mencakup perangkat keras dan layanan. Biaya langganan tahunan dapat termasuk pemeliharaan, perbaikan/penggantian, akses data, QA/QC data, dan lainnya. Banyaknya layanan spesifik akan bergantung pada pabrikan.

Logistik

Proyek LCS dengan beberapa sensor yang ditempatkan di lokasi yang berbeda sering kali menuntut fleksibilitas dan kemampuan triase untuk memanfaatkan sumber daya yang tersedia sebaik mungkin. Di luar tahap persiapan, ada beberapa tugas kecil yang dapat menghabiskan waktu dan sumber daya. Waktu tempuh dari satu lokasi ke lokasi lain untuk memecahkan masalah persiapan alat/perbaikan/penggantian bisa memakan waktu lama. Oleh karena itu, akan membantu jika memiliki manajer proyek lapangan yang terampil yang dapat memprioritaskan dan merencanakan pemeliharaan jaringan dengan cara paling efisien.

Pertimbangan Biaya yang Komprehensif

Meskipun biaya unit perangkat sensor yang rendah mungkin menarik, biaya personel dan sumber daya lainnya untuk penyebaran, pemeliharaan, kalibrasi, dan penggantian perangkat bersama dengan manajemen dan pemeliharaan jaringan data¹¹ dapat mengimbangi sebagian besar atau semua penghematan yang diharapkan dari pembelian instrumen. Pertimbangan biaya utama (Gambar 5) meliputi:

- Harga beli alat pemantau;
- Persediaan, suku cadang, servis dan pengiriman untuk perbaikan dan pemeliharaan;
- Bahan habis pakai, pengiriman, analisis laboratorium untuk sampel berbasis-filter;
- Struktur, infrastruktur pendukung, keamanan;
- Sewa properti, jika berlaku;
- Utilitas, termasuk tenaga listrik dan komunikasi nirkabel yang andal;
- Biaya personel untuk penempatan, kalibrasi, dan pemeliharaan; dan
- Peralatan, biaya, dan personel pengelolaan data.
- Desain jaringan LCS dan penempatan sensor.

Desain Jaringan LCS dan Penempatan Sensor

Penyebaran jaringan sensor berbiaya rendah pertamanya membutuhkan perancangan jaringan dan pemilihan lokasi untuk instalasi sensor. Perencanaan yang signifikan dilakukan dalam pembuatan jaringan untuk menentukan lokasi situs umum, menentukan jumlah sensor yang Anda perlukan, dan memilih layanan logistik pemasangan sensor. Semua tugas ini dapat dilakukan oleh otoritas pengatur, konsultan, atau dalam beberapa kasus, oleh vendor yang mungkin

menyediakan layanan ini. Permintaan proposal harus menjelaskan secara spesifik layanan mana saja yang dibutuhkan dan proposal yang diajukan harus menyatakan dengan jelas siapa yang akan memberikan layanan tersebut.

Merancang jaringan sensor dapat menjadi hal menantang karena pilihan lokasi dan jumlah sensor yang digunakan bergantung pada aplikasi, cakupan geografis, anggaran, dan banyak lagi. Beberapa pertimbangan penting saat merancang jaringan dijelaskan di bawah ini, berdasarkan pengaplikasian yang dimaksudkan:

Pendudukan

Sensor udara dapat dipasang di banyak lokasi untuk memantau gradien kualitas udara (yaitu, perbedaan kualitas udara di suatu wilayah). Durasi pemantauan akan tergantung pada tujuan pemantauan referensi tetapi dapat berkisar dari jangka pendek atau jangka panjang (di musim yang berbeda).

Pemetaan Kualitas Udara

Lokasi pemasangan sensor untuk pemetaan kualitas udara suatu kota dapat dilakukan di lokasi yang berbeda di seluruh kota untuk menangkap gradien konsentrasi polutan yang mengarah ke paparan populasi yang sesuai. Lokasi yang sesuai akan berada di dekat sumber seperti industri, jalan/persimpangan lalu lintas yang padat, atau seperti daerah yang masih asli atau lokasi pedesaan. Lokasi tertentu yang mungkin akan terdampak oleh peristiwa episodik seperti pembakaran limbah tanaman juga dapat dipilih berdasarkan pengaplikasian ini.

Identifikasi Titik Panas

Untuk identifikasi titik panas, perangkat sensor udara harus dipasang di lokasi yang dekat dengan sumbernya, seperti di dekat persimpangan lalu lintas tinggi, klaster industri, pembakaran biomassa terbuka, atau pembangkit listrik di mana konsentrasinya berpotensi tinggi.

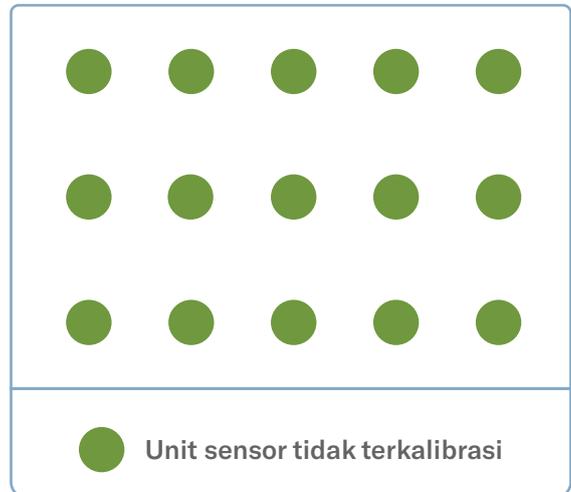
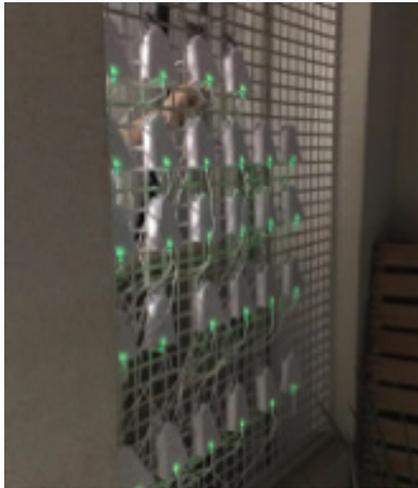
Evaluasi

Untuk mengevaluasi dampak intervensi kebijakan untuk membatasi polusi udara di lokasi geografis tertentu, lokasi pemasangan harus dekat dengan sumber yang teridentifikasi di mana ada dampak yang diantisipasi pada populasi manusia.

Pertimbangan Lebih Lanjut

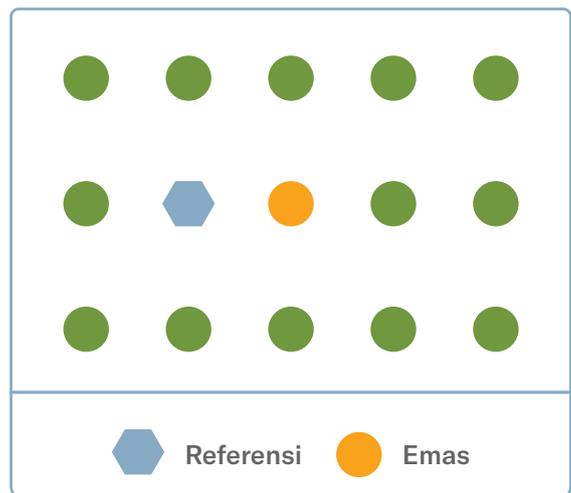
Lokasi dan jumlah sensor yang dipasang juga harus mempertimbangkan pertimbangan berikut¹²:

- **Kebutuhan sensor cadangan:** Anggaran untuk beberapa sensor cadangan untuk menggantikan sensor udara yang gagal selama penelitian.
- **Kondisi meteorologi:** Kondisi cuaca dan angin mempengaruhi konsentrasi dan distribusi polusi, jadi Anda mungkin ingin menempatkan lokasi di atas dan di bawah angin untuk memantau polusi yang mengalir masuk dan keluar dari suatu area.
- **Kolokasi sensor:** Rencanakan untuk mengoperasikan sensor udara secara permanen di sebelah stasiun referensi untuk terus memantau kinerja sensor.
- **Akses:** Penting untuk memiliki akses ke lokasi untuk menyediakan pemeliharaan, penggantian, dan kegiatan lain selama penelitian. Perjanjian akses resmi yang mencantumkan syarat dan prosedur untuk mengakses situs mungkin diperlukan.
- **Daya:** Sensor udara mungkin perlu dicolokkan, mungkin memiliki panel surya, atau menawarkan kedua opsi. Jika daya diperlukan, pastikan bahwa akan ada akses ke daya yang andal. Jika solar digunakan, pastikan ada paparan sinar matahari yang cukup (yaitu, panel surya tidak terhalang oleh bangunan atau struktur lainnya).
- **Keamanan:** Sensor dan peralatan udara dapat dirusak dan dicuri. Cari lokasi yang aman di atas kepala, jauh dari jangkauan tangan, di tempat yang tidak mencolok, atau di belakang gerbang atau pagar yang terkunci.
- **Ketinggian sensor:** Cobalah untuk menempatkan sensor udara sekitar 1-2 meter di atas tanah atau atap. Hindari area yang dekat dengan sumber polusi lokal (misalnya, cerobong asap, ventilasi memasak) atau polusi tenggelam (misalnya, pohon). Tempatkan sensor untuk memungkinkan aliran udara yang tidak terbatas ke sensor untuk memberikan pengukuran yang representatif.



Gambar 6: contoh colocation sensor untuk membandingkan hasil uji LCS

Kolokasi	Proses perbandingan berdampingan dengan instrumen kelas referensi. Sensor udara dan monitor referensi terletak bersebelahan.
Kalibrasi	Proses penyesuaian data sensor udara harus mengacu pada standar referensi. Sensor udara dikalibrasi oleh pabrikan (kalibrasi pabrik) dan juga di lapangan (dengan menempatkan dengan monitor referensi) sebelum kampanye pengukuran. Dikarenakan respons sensor dapat berubah tergantung musim, kalibrasi berulang diperlukan untuk proyek jangka menengah hingga panjang. Metode yang digunakan untuk melakukan kalibrasi 'jarak jauh' atau 'awan penyimpanan' harus dilakukan dengan hati-hati. Lihat Gambar A1 di Lampiran untuk mempelajari lebih lanjut.
Perbaikan data	Proses penyesuaian data untuk faktor lain yang dapat memengaruhi respons sensor udara—misalnya, suhu, kelembapan, dll.



Gambar 7: Pengkalibrasian sensor udara dengan cara kolokasi monitor referensi

Tabel 2: Definisi istilah yang umum digunakan dalam konteks jaminan kualitas/kontrol kualitas sensor berbiaya rendah: “*colocation*”, kalibrasi, dan koreksi data

Jaminan Kualitas/Kontrol Kualitas

Bagian ini menjelaskan beberapa jaminan kualitas utama/pendekatan kontrol kualitas untuk menjaga kualitas di seluruh proyek.

Pra-instalasi

Kalibrasi/Kolokasi

Sensor udara perlu dikalibrasi untuk menyediakan data berkualitas tinggi. Beberapa pabrikan mungkin menyediakan faktor kalibrasi atau mungkin menyediakan layanan kalibrasi setelah sensor dipasang. Meskipun sensor udara dapat dikalibrasi saat dipasang, sensor tersebut harus dikalibrasi ulang secara berkala sebelum, selama, dan setelah penelitian.

Kalibrasi ditentukan menggunakan data yang dikumpulkan selama kolokasi. Kolokasi adalah perbandingan sensor udara berdampingan dengan standar atau referensi yang diketahui. Menentukan kalibrasi adalah bidang penelitian aktif untuk institusi akademik dan produsen yang sedang mengembangkan metode baru. Ada beberapa rekomendasi penting terkait kalibrasi: 1) Pahami metode yang digunakan untuk mengkalibrasi data sensor, 2) Tentukan seberapa sering sensor udara perlu dikalibrasi dan siapa yang akan mengkalibrasinya, dan 3) Pastikan data mentah dan yang dikalibrasi diarsipkan. Penting untuk membuat kalibrasi LCS formal atau panduan perbandingan secara kolokasi sehingga semua personel mengikuti prosedur yang sama. Rincian lebih lanjut tentang formulasi yang digunakan untuk memperkirakan faktor kalibrasi dibahas dalam Lampiran.

Kolokasi untuk Menilai Keterbandingan Sensor

Semua unit sensor yang akan dipasang perlu melalui tahap kolokasi dan pengujian untuk menentukan adanya variasi dalam pengukuran di antara unit-unit

yang berbeda (juga disebut variabilitas intramodel). Kolokasi ini sebaiknya dilakukan di lapangan di mana sensor dapat berada di lokasi yang dekat dengan satu sama lain, sehingga udara yang menjadi sampel memiliki konsentrasi polutan yang serupa sebagaimana digambarkan dalam Gambar 7. Metode ini teramat penting ketika mempertimbangkan gradien spasial (contohnya identifikasi titik panas dan pemetaan kualitas udara). Kolokasi seperti ini umumnya dilaksanakan selama beberapa hari hingga beberapa pekan. Penting pula untuk mengevaluasi kinerja di bawah jangkauan polusi dan kondisi udara yang diharapkan ketika kolokasi dilaksanakan.

Kolokasi dengan Monitor Referensi

Setelah sensor dievaluasi untuk variabilitas intramodel, setidaknya satu sensor harus dikalibrasi di lapangan melalui kolokasi sensor yang berdekatan dengan monitor referensi untuk memastikan bahwa sampel udara memiliki konsentrasi polutan yang serupa, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6. Kalibrasi ini membantu menentukan akurasi dalam kaitannya dengan keakuratan referensi yang diketahui dan bukti bahwa referensi tersebut berfungsi seperti yang diklaim. "Colocation" dengan monitor referensi harus dilakukan untuk semua sensor selama beberapa minggu pada awal penelitian (jika memungkinkan). Di akhir penelitian, semua sensor harus melalui proses kolokasi kembali di situs referensi. Sebagai alternatif, ada metode lain untuk kalibrasi yang digunakan oleh para peneliti, seperti metode sensor "emas" di mana sensor dikalibrasi, atau "emas" digunakan untuk mengkalibrasi sensor lain di lapangan.

Pemeliharaan Pascainstalasi

Kalibrasi: Setelah kriteria keterbandingan dan akurasi telah ditetapkan dalam tahap prapemasangan, sensor yang telah dipasang dapat dikalibrasi secara berkala (setiap pekan atau bulan) dengan melakukan kolokasi

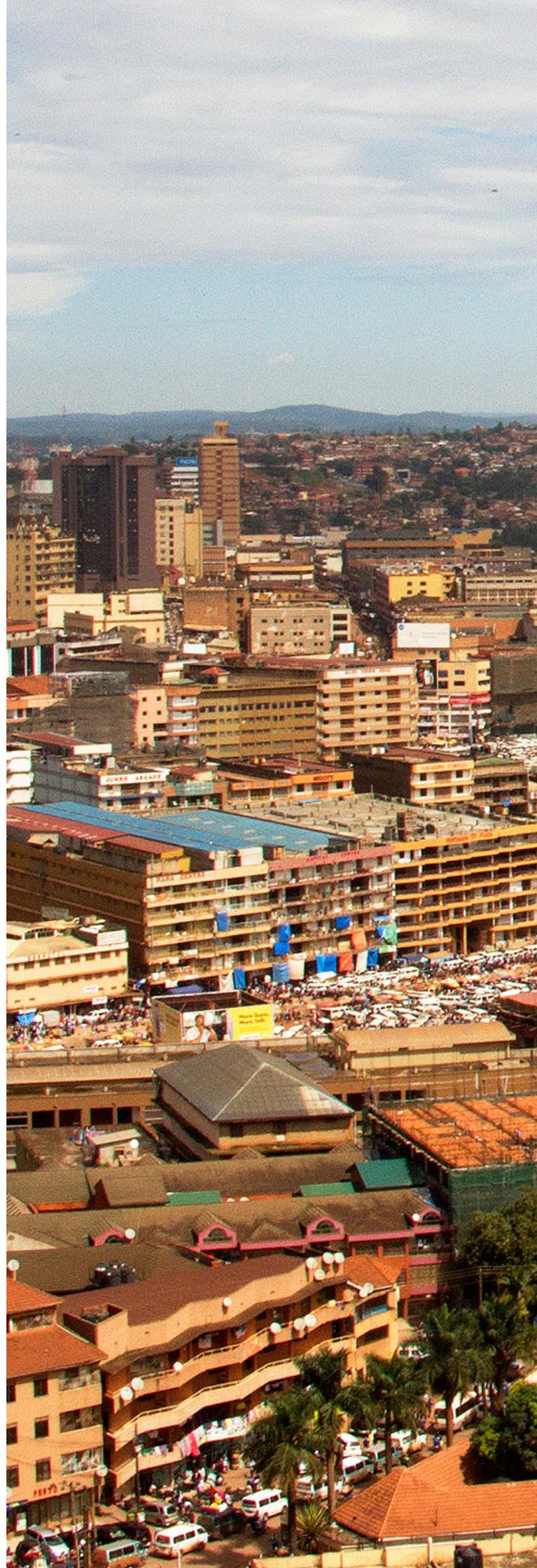
“sensor emas” dengan keseluruhan sensor di lapangan. Hal ini disebut “kalibrasi transfer.” Alternatifnya, setiap sensor yang telah dipasang dapat dibawa kembali ke lokasi referensi dan dikalibrasi secara bergiliran.

Akurasi: Data yang dihasilkan dari sensor juga perlu untuk ditinjau secara berkala. Setiap anomali perlu didokumentasikan dan dikoreksi dari waktu ke waktu untuk: menghindari kerepotan yang dibuat saat menangani data yang banyak. Untuk metode estimasi akurasi, bias dan presisi, lihat Lampiran.

Validasi Data: Validasi data merupakan langkah penting sebelum menganalisis data untuk mendapatkan kesimpulan yang pasti. Hal ini membutuhkan interpretasi visual dari data mentah untuk mengidentifikasi pola yang tidak biasa, pengecualian, penyimpangan dan keterlambatan dalam respon sensor. Validasi data harus dilakukan secepat mungkin, setiap hari atau setiap minggu. Skema validasi harus ditentukan untuk penilaian cepat kualitas data. Ini sangat penting untuk kota-kota yang tidak memiliki data historis untuk perbandingan.

Beberapa tugas khusus lainnya untuk pemeliharaan meliputi:

- Memastikan penempatan yang tepat dari perangkat sensor udara;
- Pembersihan perangkat;
- Mengganti bahan habis pakai seperti, baterai, dan aksesori lainnya (jika ada);
- Mengganti sensor yang menghasilkan data yang salah atau yang telah digunakan lebih dari masa pakainya;
- Melacak hambatan fisik seperti pohon dan bangunan yang mungkin timbul saat pemantauan berlangsung;
- Membuat (selama instalasi), memelihara dan memvalidasi protokol sehingga catatan tindakan disimpan dan metodologi sistematis diikuti.



Referensi

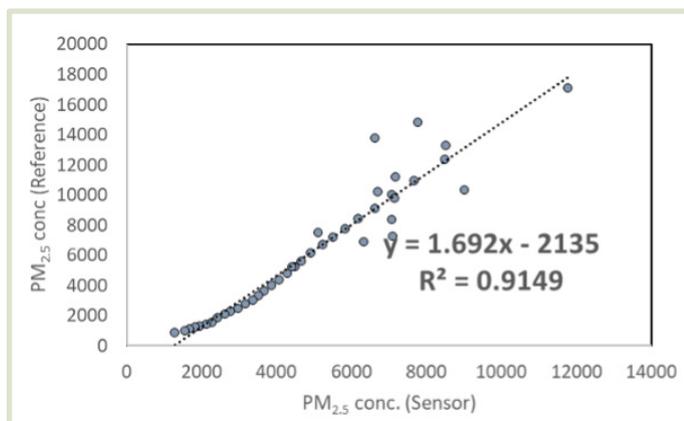
1. Vital Strategies 2020, Accelerating City Progress on Clean Air, Technical Guide. Viewed 19th August 2021, <https://www.vitalstrategies.org/resources/accelerating-city-progress-on-clean-air-innovation-and-action-guide/>
2. Martin RV, Brauer M, van Donkelaar A, Shaddick G, Narain U, Dey S. No one knows which city has the highest concentration of fine particulate matter. *Atmospheric Environ X*. 2019 Jun 24;100040.
3. GBD Compare | IHME Viz Hub [Internet]. [cited 2018 Jun 27]. Available from: <http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare>
4. World Health Organization. Global Urban Ambient Air Pollution Database (update 2016) [Internet]. WHO. 2016 [cited 2016 Oct 21]. Available from: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/
5. WHO | Air quality guidelines - global update 2005 [Internet]. WHO. [cited 2016 Sep 14]. Available from: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/
6. United Nations Environment Program (UNEP). Actions on Air Quality: Policies & Programmes for improving Air Quality Around the World [Internet]. 2015 [cited 2019 Sep 10]. Available from: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17203/AQ_GlobalReport_Summary.pdf?sequence=1&isAllowed=y
7. Chow JC, Watson JG, Feldman HJ, Nolen JE, Wallerstein B, Hidy GM, et al. Will the Circle Be Unbroken: A History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards. *J Air Waste Manag Assoc*. 2007 Oct;57(10):1151–63.
8. Brauer, M., Guttikunda, S.K., Nishad, K.A., Dey, S., Tripathi, S.N., Weagle, C. and Martin, R.V., 2019. Examination of monitoring approaches for ambient air pollution: A case study for India. *Atmospheric Environment*, 216, p.116940.
9. Duvall, R., A. Clements, G. Hagler, A. Kamal, Vasu Kilaru, L. Goodman, S. Frederick, K. Johnson Barkjohn, I. VonWald, D. Greene, AND T. Dye. 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. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-20/280, 2021.
10. ASTM WK64899, New Practice for Performance Evaluation of Ambient Air Quality Sensors and Other Sensor-Based Instruments, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, <https://www.astm.org>
11. Bachmann J. Managing Air Quality: Lessons from the American Experience. Collaborative Clean Air Policy Centre. 2019 Available from: <https://ccapc.org.in/policy-briefs/2019/us-experience-bachmann:14>.
12. EPA (2021). A Guide to Siting and Installing Air Sensors. Available at: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/guide-siting-and-installing-air-sensors> (Accessed: 7th September, 2021)

Lampiran:

A. Pendekatan untuk Mengukur Bias, Akurasi, dan Presisi

Kurva Kalibrasi

Kurva Kalibrasi dapat dihasilkan dengan menggunakan data dari kolokasi sensor dengan monitor referensi. Analisis Regresi Linier Sederhana (SLR), seperti yang disajikan pada Gambar A1 menggunakan pembacaan data mentah untuk durasi pemantauan yang persis sama, dapat digunakan untuk mengembangkan faktor kalibrasi. Faktor kalibrasi yang diturunkan dari persamaan matematika selanjutnya dapat digunakan untuk mengoreksi data sensor. Untuk kalibrasi yang lebih kuat, Regresi Linier Berganda (MLR) memungkinkan dimasukkannya faktor lain yang dapat memengaruhi polutan pengukuran konsentrasi, seperti kelembapan dan suhu. Perhatikan bahwa faktor kalibrasi dapat berubah dengan kondisi lingkungan dan memerlukan kalibrasi berulang.



Persamaan Kalibrasi

$$y = 1.692x - 2135$$

Di mana 'y' adalah konsentrasi referensi, 'x' konsentrasi sensor dan '1,692' deviasi dalam data **R2** adalah koefisien determinasi yang menunjukkan kedekatan dengan potongan lereng.

Gambar A1 Ilustrasi kurva kalibrasi untuk data yang dikumpulkan melalui kolokasi sensor dan monitor referensi.

Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE adalah ukuran akurasi model kalibrasi yang dapat dihitung menggunakan prediksi dan referensi konsentrasi.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (p_i - y_i)^2}{n}}$$

Di mana p_i adalah nilai prediksi individu, y_i adalah nilai referensi individu, dan n adalah jumlah titik data dalam model.

Bias

Bias dalam data sensor menghasilkan konsentrasi yang tidak mewakili konsentrasi sebenarnya. Ini adalah kesalahan sistematis dalam pengukuran yang menghasilkan konsentrasi yang lebih tinggi atau lebih rendah di semua titik data dengan beberapa nilai deviasi tetap. Bias harus dihitung secara berkala, sebaiknya setiap kali kalibrasi dilakukan. Gambar A1 menunjukkan grafik garis yang mewakili bias dalam data sensor.

Bias dapat diperkirakan dengan menggunakan rumus berikut: di mana B adalah Bias, C adalah konsentrasi polutan rata-rata yang diukur oleh sensor dan C_R adalah konsentrasi rata-rata dari polutan yang sama yang diukur dengan referensi memantau.

$$B = \left(\frac{C}{C_R} \right) - 1$$

Presisi

Presisi data yang diukur menunjukkan pengulangan konsentrasi ketika sensor digunakan untuk mengumpulkan data dalam kondisi yang sama beberapa kali. Durasi pengukuran yang pendek seperti interval 1 detik dapat menghasilkan presisi yang lebih rendah yang dapat dikoreksi sampai batas tertentu dengan mengelompokkan data ke dalam rata-rata 5 menit.

Di mana P adalah presisi, C_s adalah standar deviasi pengukuran dan C_m adalah rata-rata pengukuran pada konsentrasi tetap.

$$P = \left(\frac{C_s}{C_m} \right)$$

B. Ringkasan Panduan untuk Menginformasikan Permintaan Proposal (RFP)

Bagian ini dimaksudkan untuk menginformasikan pengembangan evaluasi dan bidang teknis permintaan proposal untuk jaringan sensor udara. Bagian ini memberikan kerangka sampel dan kriteria sampel yang diperlukan untuk meminta dan mengevaluasi kualifikasi vendor, pengalaman, dan tanggapan yang diterima. Termasuk di dalamnya adalah daftar periksa untuk tugas, layanan, dan fitur yang mungkin ingin diminta oleh otoritas pengatur. Contoh template dapat digunakan sebagai titik awal untuk diadaptasi sesuai dengan tujuan dan konteks proyek.

Kriteria Evaluasi Proposal

Kriteria berikut dapat digunakan untuk mengevaluasi proposal yang diajukan:

1. Luas cakupan layanan dan dukungan;
2. Menunjukkan kinerja dan pengalaman dalam konteks yang relevan;
3. Rekam jejak layanan di negara/wilayah;
4. Masa garansi dan waktu penyelesaian untuk perbaikan/penggantian;
5. Kualitas data dan kemudahan akses; dan
6. Biaya keseluruhan.

Kualifikasi dan Pengalaman Vendor

Pengalaman masa lalu

1. Buat daftar proyek sebelumnya yang dilakukan dalam kapasitas yang sama
2. Untuk setiap proyek dicantumkan dalam proposal:
3. Deskripsi singkat
 - a. Nama dan informasi kontak klien organisasi
 - b. Tanggal layanan
 - c. Ringkasan laporan atau publikasi
 - d. Izin untuk menghubungi klien? Ya Tidak

Demonstrasi Kinerja

Pelamar dapat menyertakan informasi berikut sebagai demonstrasi kinerja masa lalu:

- Publikasi dengan penelaahan sejawat (*peer-review*)
- Laporan atau kertas putih oleh organisasi independen
- Sertifikasi teknologi sensor berdasarkan standar

kinerja yang dikeluarkan oleh pemerintah lembaga dan asosiasi

- Bukti kinerja sensor dalam polusi dan kondisi cuaca serupa (seperti yang dijelaskan dalam SOW)
- Bukti evaluasi kinerja sensor oleh organisasi yang kredibel
 - Apakah evaluasi termasuk evaluasi lapangan?
Ya Tidak
 - Cantumkan nama evaluasi organisasi?
 - Tentukan tanggal dan periode waktu masing-masing evaluasi?

Pengalaman Personel

Jelaskan dalam proposal, pengalaman personel untuk masing-masing tingkat layanan dukungan yang ditawarkan.

Lokasi dukungan pelanggan

Daftar lokasi dan informasi kontak untuk kantor lokal dan regional bersama dengan waktu penyelesaian yang diharapkan untuk keluhan dan penggantian.

Masukan Potensial untuk Pernyataan Kerja

(Diisi oleh organisasi yang mengeluarkan permintaan proposal)

Latar Belakang dan Tujuan

- Lokasi umum studi _____
- Tujuan jaringan _____
- Durasi studi _____
- Catatan: Biasanya 12 hingga 24 bulan adalah minimum durasi yang dibutuhkan untuk mengukur berbagai kondisi selama musim yang berbeda. Anda mungkin ingin mempertimbangkan pilihan untuk memperpanjang studi.
- Polutan yang akan diukur _____
- Jumlah sensor udara _____
- Lokasi situs sensor udara (jika tersedia) _____
- Data tambahan yang dibutuhkan (cuaca, emisi, dll.) _____

Spesifikasi Sensor

Centang kotak yang informasi pendukungnya disediakan/layanan disertakan dan memberikan tambahan detail dalam proposal.

- Kinerja Sensor
 - Tentukan bias, presisi, korelasi dan root mean square error (RMSE) dan berikan data pendukung sebagai bagian dari proposal
Bias ____
presisi ____
Koefisien korelasi minimum (dengan kelas referensi) ____
RMSE ____
 - Catatan: Persyaratan untuk parameter di atas adalah sebagai berikut (diisi berdasarkan kebutuhan proyek):
Bias Maksimum ____
Presisi Minimum ____
Koefisien korelasi minimum (dengan nilai ref) ____
Maksimum RMSE ____
- Sensor Waktu Aktif
 - Tentukan rata-rata kelengkapan data sensor ____
Berikan data pendukung dalam proposal
 - Catatan: Kelengkapan data minimal persyaratannya adalah 75% yaitu sensor udara yang berfungsi dan menghasilkan data yang valid setidaknya 75%.
- Kalibrasi Data
 - Jelaskan dalam proposal bagaimana data dikalibrasi ____
 - Tentukan frekuensi dan proses data kalibrasi ____
- Listrik dan telekomunikasi
- Bagaimana sensor udara ditenagai?
(Centang semua yang berlaku)
 - Surya ____
 - Sambungan Listrik ____
 - Baterai ____
- Untuk baterai internal, sertakan waktu yang diperlukan untuk muatan penuh ____

Bagaimana data ditransmisikan

(Centang semua yang sesuai)

- Wi-Fi ____
Biaya ditanggung oleh vendor ○Ya ○Tidak
- Seluler ____
Biaya ditanggung oleh vendor ○Ya ○Tidak
- Spesifikasi lainnya
 - Tentukan resolusi waktu data ____
 - Catatan: Persyaratan minimum adalah frekuensi 1 menit
 - Tentukan format data yang disimpan ____
 - Catatan: Data harus dalam mesin yang dapat dibaca format (misalnya .csv)
 - Semua infrastruktur pendukung yaitu instalasi, pemasangan, perangkat keras pendukung harus termasuk dalam pengajuan harga.
 - Sensor udara harus tahan cuaca dan mampu beroperasi dalam kondisi tegangan menurun, dingin, dan hujan.
 - Vendor harus menyertakan panduan pengguna saat ini dan manual yang meliputi pemasangan, pengoperasian, akses data, dan perbaikan.

Layanan Instalasi

Centang kotak yang sesuai untuk layanan yang diberikan

- Lokasi penempatan: Vendor akan memilih situs berdasarkan pada spesifikasi proyek dan akan bertanggung jawab untuk pengaturan tenaga listrik, infrastruktur pendukung, mengembangkan perjanjian akses, dan memastikan keamanan dan akses yang aman. Situs yang dipilih harus mewakili kualitas udara di daerah dengan gangguan minimal dari sekitar lokasi.
- Kolokasi dengan situs referensi: Vendor akan mengatur dan mengoperasikan sensor udara di sebelah referensi lokasi sebelum proyek dimulai. Sensor apa saja yang tidak memenuhi spesifikasi akan diganti oleh vendor.
- Instalasi di tempat: Vendor akan mengatur dan pasang sensor di lokasi yang dipilih. Penjual akan bertanggung jawab atas infrastruktur yang dibutuhkan untuk menginstal di situs. Vendor akan mengkonfirmasi itu setiap sensor beroperasi dengan benar setelah di tempat instalasi dan juga dokumentasi situs kondisi, lokasi, dan ketinggian.

Pertimbangan Utama untuk Pengembangan dan Evaluasi Permintaan Proposal

- Pastikan proposal vendor menggambarkan layanan dukungan apa yang termasuk (atau tidak termasuk) dalam harga mereka.
- Vendor juga harus menyediakan biaya penggantian dan layanan jika proyek berlangsung lebih lama dari masa garansi.
- Memilih vendor yang memiliki dukungan pelanggan secara lokal dan memastikan waktu penyelesaian yang lebih cepat untuk penggantian dan perbaikan (untuk memastikan kualitas data).
- Tanyakan tentang layanan tambahan yang dapat disediakan vendor (mis. penempatan, "colocation" dengan situs referensi dan pemasangan situs dari sensor).
- Vendor harus memberikan bukti verifikasi/ evaluasi produk LCS mereka oleh organisasi independen dan kredibel.
- Vendor harus menyediakan data dari evaluasi yang dilakukan di bawah pengaturan yang sebanding untuk mendukung klaim kinerja lapangan. Ini untuk memastikan bahwa ada bukti kinerja LCS di bawah polusi dan kondisi cuaca yang serupa.
- Vendor tidak boleh mengirimkan model yang unik atau eksperimental.

Layanan Pemeliharaan dan Garansi

- Tentukan masa garansi _____ (minimum 12 bulan diperlukan)

- Tentukan biaya garansi tambahan _____

Centang kotak untuk layanan yang termasuk dalam garansi

- Titik Pemeliharaan berkala di tempat.
Tentukan seberapa sering pemeliharaan akan dilakukan dilakukan _____
- Biaya penggantian sensor (pengiriman, pemasangan, dll.)
Tentukan waktu penyelesaian untuk perbaikan dan pengganti _____
Apakah biaya pengiriman sudah termasuk dalam garansi? _____

Layanan Data

Centang kotak yang sesuai untuk layanan yang disertakan

Catatan: Data harus dalam format yang dapat dibaca mesin (misalnya .csv).

- Sistem manajemen data
Jelaskan sistem pengelolaan data dalam proposal _____
- Portal data berbasis-web
 - Tentukan jumlah pengguna maksimum (jika ada) _____
 - Portalnya adalah: publik pribadi kedua pilihan termasuk
- Layanan kalibrasi data
 - Tentukan frekuensi kalibrasi _____
 - Jelaskan bagaimana data mentah dan terkalibrasi disimpan/diakses (dalam proposal) _____
- Aplikasi seluler
 - Aplikasi ini: publik pribadi kedua pilihan termasuk
 - Aplikasi seluler berjalan di: Android iOS keduanya
- Retensi data
 - Tentukan berapa lama data akan disimpan _____
 - Jelaskan bagaimana data akan disimpan/ diakses (dalam proposal)
 - Pemeriksaan kontrol kualitas (wajib)
- Jelaskan protokol untuk pemeriksaan kontrol kualitas (dalam usulan)
- Alarm dan peringatan
 - Jelaskan jenis peringatan yang tersedia (mis. email/ pesan teks saat sensor mati atau ada konsentrasi yang sangat tinggi).
- Tersedianya aplikasi program antarmuka

Layanan Pelatihan

- Tentukan apakah pelatihan jarak jauh atau tatap muka

Berapa banyak waktu yang dibutuhkan untuk pelatihan? _____

- Apakah ada perjalanan yang diperlukan

Centang kotak yang sesuai untuk pelatihan yang diberikan:

- Pemasangan, pengoperasian, dan sensor udara pemeliharaan
- Akses data
- Fitur dan fungsi portal web
- Prosedur dan metode kalibrasi
- Protokol "colocation"
- Lainnya, sebutkan _____

Dukungan Pelanggan

Centang kotak yang sesuai untuk dukungan pelanggan yang diberikan:

- Dukungan panggilan
Berikan informasi kontak _____
- Dukungan setelah jam kerja
Berikan informasi kontak _____
- Tinjauan dan analisis data





Penggunaan Terintegrasi Sensor Berbiaya Rendah untuk Memperkuat
Manajemen Kualitas Udara

