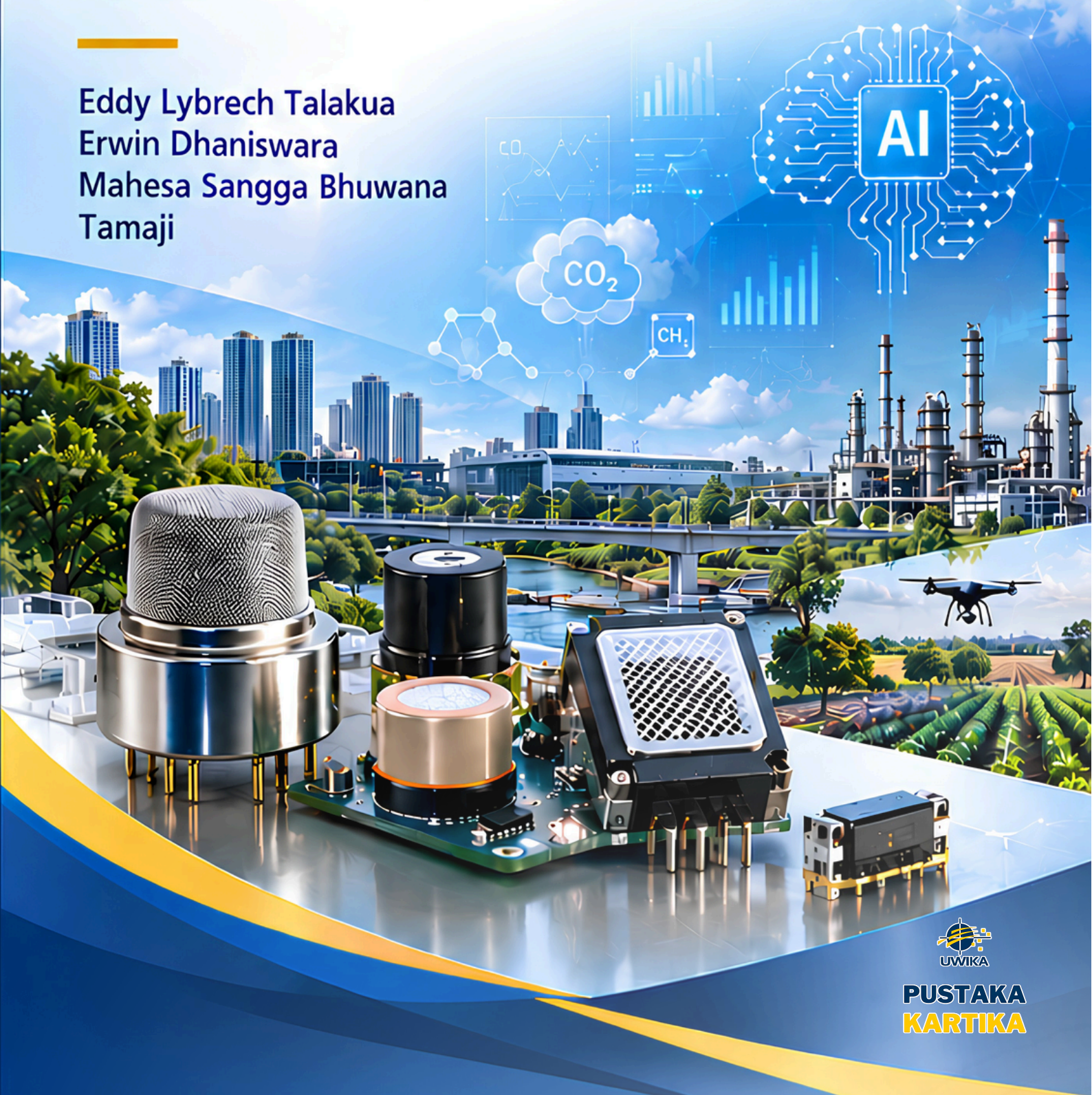
TEKNOLOGI SENSOR GAS

Teori, Teknologi, Sistem Instrumentasi, Kecerdasan Buatan, dan Aplikasi Multisektor

Eddy Lybrech Talakua
Erwin Dhaniswara
Mahesa Sangga Bhuwana
Tamaji



UWIKA
PUSTAKA KARTIKA

Teknologi Sensor Gas: Teori, Teknologi, Sistem Instrumentasi, Kecerdasan Buatan, dan Aplikasi Multisektor

Penulis:

Eddy Lybrech Talakua
Erwin Dhaniswara
Mahesa Sangga Bhuwana
Tamaji

UWIKA
PUSTAKA
KARTIKA

Teknologi Sensor Gas:
Teori, Teknologi, Sistem Instrumentasi, Kecerdasan Buatan, dan Aplikasi Multisektor

ISBN : 978-634-97433-2-7 (PDF)

Penulis:
Eddy Lybrech Talakua, Erwin Dhaniswara
Mahesa Sangga Bhuwana, Tamaji

Layout:
Taufik Fajril

Desain Cover:
Dwi Gustara

Surabaya : Pustaka Kartika, 2026

UWIKA
PUSTAKA
KARTIKA

Diterbitkan oleh
PUSTAKA KARTIKA
Alamat Redaksi:
Jl. Sutorejo Prima Utara II No.1, Kalisari,
Kec. Mulyorejo, Surabaya, 60112
Anggota IKAPI No : 471/JTI/2026

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-Undang
Hak penerbitan pada Pustaka Kartika. Dilarang keras menerjemahkan, memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk atau cara apapun tanpa mendapatkan izin tertulis dari penulis dan penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas selesainya penyusunan buku ini. Sensor gas merupakan salah satu komponen paling vital dalam kehidupan modern, meskipun keberadaannya sering luput dari perhatian. Ia bekerja diam-diam di balik alarm kebocoran LPG di dapur, di balik sistem pemantauan kualitas udara kota, di balik proses kendali emisi kendaraan, hingga di balik sistem keselamatan pekerja tambang bawah tanah. Tanpa sensor gas yang andal, banyak risiko yang seharusnya dapat dicegah justru berubah menjadi bencana.

Topik ini tumbuh dari pengamatan bahwa literatur berbahasa Indonesia mengenai sensor gas masih sangat terbatas, sementara kebutuhan Informasi terhadap pemahaman yang komprehensif — bukan sekadar tutorial pemrograman sensor MQ-2 di mikrokontroler — terus meningkat.

Banyak sumber belajar yang tersedia secara daring bersifat terpotong-potong: membahas rangkaian tanpa teori material, atau membahas machine learning tanpa memahami keterbatasan fisis sensor yang menghasilkan datanya. Buku ini disusun untuk menjembatani kesenjangan tersebut.

Penulis menyadari bahwa bidang sensor gas berkembang sangat cepat, terutama dengan hadirnya nanomaterial baru, kecerdasan buatan tertanam, dan konektivitas IoT generasi lanjut. Oleh karena itu, buku ini disusun tidak hanya sebagai kumpulan fakta teknis, tetapi juga sebagai kerangka berpikir sistematis yang memungkinkan pembaca terus mengikuti perkembangan teknologi ini di masa depan.

Surabaya, September 2026

Tim Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR iii

DAFTAR ISI v

BAB 1

PENDAHULUAN DAN LATAR BELAKANG TEKNOLOGI SENSOR GAS 1

1.1 Fenomena Keberadaan Gas dalam Kehidupan Sehari-hari 1

1.2 Gas di Lingkungan, Atmosfer, dan Gas Rumah Kaca 3

1.3 Gas Berbahaya, Gas Beracun, dan Gas Mudah Terbakar 4

1.4 Gas dalam Proses Industri, Energi, Kendaraan, dan Tubuh Manusia 5

1.5 Mengapa Gas Harus Dideteksi dan Diukur? 7

1.6 Sejarah Awal Teknologi Deteksi Gas hingga Era Digital 8

1.7 Revolusi Industri, Era IoT, dan Sensor Gas Pintar 9

1.8 Kecerdasan Buatan dalam Sensor Gas dan Tantangan Masa Depan 10

1.9 Contoh Kasus Nyata Aplikasi Deteksi Gas 12

BAB 2

KONSEP DASAR GAS DAN KARAKTERISTIKNYA 15

2.1 Pengertian, Struktur, dan Sifat Molekul Gas 15

2.2 Konsentrasi Gas: ppm, ppb, Persen, dan Volume Fraction 16

2.3 Tekanan Parsial, Temperatur, dan Kelembapan 18

2.4 Difusi, Adsorpsi, dan Absorpsi Gas 19

2.5 Reaksi Kimia Gas: Toksik, Mudah Terbakar, Korosif, dan Inert 20

2.6 Gas Rumah Kaca dan Dampaknya . 21

2.7 Persamaan dan Contoh Konversi Satuan Konsentrasi Gas 22

BAB 3

PRINSIP DASAR SENSOR GAS 25

3.1 Definisi Sensor, Sensor Gas, dan Transduser.....25

3.2 Sensor vs Transduser, Sensor vs Detektor, Sensor vs Analyzer.....26

3.3 Mekanisme Sensing dan Interaksi Gas dengan Material Sensitif 28

3.4 Perubahan Resistansi, Arus, Tegangan, Kapasitansi, dan Massa 29

3.5 Perubahan Sifat Optik dan Potensial Elektrokimia.....30

3.6 Diagram Blok Sistem Sensor Gas...30

BAB 4

KLASIFIKASI TEKNOLOGI SENSOR GAS 33

4.1 Metal Oxide Semiconductor (MOS) 33

4.2 Electrochemical Sensor dan Catalytic/Combustible Sensor.....34

4.3 Infrared/NDIR Sensor, Optical Sensor, dan Photoionization Detector...35

4.4 Thermal Conductivity Sensor dan Acoustic Sensor (SAW, QCM) 36

4.5 MEMS Gas Sensor dan Nanomaterial Gas Sensor 37

4.6 Flexible, Wearable, dan Bio-inspired Gas Sensor 37

4.7 Sensor Gas Berbasis Graphene, CNT, dan Material 2D 38

4.8 Tabel Perbandingan Menyeluruh Antarteknologi Sensor Gas 39

BAB 5

METAL OXIDE SEMICONDUCTOR (MOS) GAS SENSOR 43

5.1 Prinsip Kerja: Chemisorption, Physisorption, dan Oxygen Adsorption 43

5.2 Perubahan Carrier Concentration dan Resistansi 45

5.3 Temperatur Operasi, Heater, dan Pengaruhnya terhadap Kinerja 46

5.4 Sensitivitas, Selektivitas, Response Time, Recovery Time 47

5.5 Drift, Aging, dan Pengaruh Kelembapan 48

5.6 Material Sensing: SnO2, ZnO, WO3, TiO2, In2O3, CuO, NiO.....49

5.7 Sensor Komersial Keluarga MQ sebagai Contoh Edukatif dan Keterbatasannya.....50

BAB 6

SENSOR GAS ELEKTROKIMIA.....53

6.1 Prinsip Elektrokimia: Working, Counter, dan Reference Electrode 53

6.2 Elektrolit serta Reaksi Oksidasi dan Reduksi.....55

6.3 Sensor Amperometrik, Potentiometrik, dan Konduktometrik....56

6.4 Sensitivitas, Selektivitas, Lifetime, dan Cross-sensitivity.....57

6.5 Aplikasi Deteksi CO, NO2, SO2, H2S, O2, Cl2, dan NH3 59

BAB 7

SENSOR GAS OPTIK DAN INFRARED 61

7.1 Prinsip Absorpsi Cahaya dan Hukum Beer-Lambert 61

7.2 Non-Dispersive Infrared (NDIR): Sumber IR, Optical Path, Detektor, Filter 62

7.3 Optical Gas Sensing dan Laser Absorption Spectroscopy 64

7.4 Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) 64

7.5 Photoacoustic Gas Sensing 65

7.6 Persamaan dan Contoh Perhitungan Sederhana 66

BAB 8

SENSOR GAS BERBASIS MEMS DAN NANOTEKNOLOGI 69

8.1 Perkembangan MEMS untuk Sensor Gas 69

8.2 Nanowire, Nanotube, Graphene, dan Carbon Nanotube 70

8.3 Metal Oxide Nanostructure, Quantum Dots, dan Material 2D (MXene) 71

8.4 Nanokomposit untuk Sensor Gas ... 72

8.5 Pengaruh Nanoteknologi terhadap Surface Area, Sensitivitas, Response Time, Selektivitas, dan Daya Rendah ...73

BAB 9

KARAKTERISTIK DAN PARAMETER KINERJA SENSOR GAS 77

9.1 Sensitivitas, Selektivitas, Akurasi, Presisi, dan Resolusi 77

9.2 Limit of Detection (LOD), Response Time, dan Recovery Time.....78

9.3 Repeatability, Reproducibility, dan Stabilitas.....79

9.4 Hysteresis, Drift, Noise, dan Cross-sensitivity 80

9.5 Ketergantungan terhadap Temperatur, Kelembapan, dan Penuaan Sensor 81

9.6 Contoh Perhitungan Parameter Kinerja Sensor.....82

BAB 10

SISTEM INSTRUMENTASI SENSOR GAS 85

10.1 Dari Sensor Individual Menuju Sistem Pengukuran 85

10.2 Resistor Divider, Jembatan Wheatstone, Op-Amp, dan Instrumentation Amplifier 86

10.3 Filtering, ADC, dan DAC..... 87

10.4 Mikrokontroler: ESP32, Arduino, dan Raspberry Pi..... 88

10.5 Data Logger dan Arsitektur Sistem Instrumentasi 90

10.6 Contoh Rancangan Arsitektur Sistem Lengkap 91

BAB 11

GAS SENSOR ARRAY DAN ELECTRONIC NOSE 95

11.1 Konsep Sensor Array dan Alasan Satu Sensor Tidak Cukup 95

11.2 Cross-sensitivity dan Fingerprint Gas..... 96

11.3 Konsep Electronic Nose (E-Nose) dan Sensor Fusion..... 98

11.4 Feature Extraction dan Pattern Recognition 99

11.5 PCA, LDA, Clustering, Klasifikasi, dan Regresi.....100

11.6 Diagram Arsitektur Electronic Nose 101

BAB 12

MACHINE LEARNING UNTUK SENSOR GAS 105

12.1 Preprocessing, Normalisasi, dan Feature Extraction 105

12.2 PCA, LDA, k-NN, Decision Tree, Random Forest 106

12.3 SVM, ANN, CNN, RNN/LSTM, dan Ensemble Learning.....107

12.4 Klasifikasi vs Regresi dalam Estimasi Konsentrasi Gas.....109

12.5 Estimasi Konsentrasi Gas Kuantitatif dengan Sensor Array dan ML 110

12.6 Evaluasi Model: Accuracy, Precision, Recall, F1-score, MAE, MSE, RMSE, R2 111

BAB 13

IOT DAN SENSOR GAS CERDAS 115

13.1 Konsep IoT untuk Sensor Gas 115

13.2 Konektivitas: Wi-Fi, Bluetooth, LoRa/LoRaWAN 116

13.3 Protokol Komunikasi MQTT dan HTTP 117

13.4 Cloud, Database, dan Dashboard Monitoring 118

13.5 Mobile Monitoring, Alarm, dan Remote Monitoring 119

13.6 Contoh Arsitektur: Sensor Gas–ESP32–MQTT–Cloud–Database–Dashboard–Smartphone 120

Catatan Desain — IoT untuk Sistem Sensor Gas 123

BAB 14

EDGE AI DAN TINYML PADA SENSOR GAS 125

14.1 Edge Computing dan Edge AI 125

14.2 Konsep TinyML pada Mikrokontroler 126

14.3 Model Compression dan Quantization 127

14.4 Inference Real-time dengan Daya Rendah 128

14.5 Perbandingan Cloud AI, Edge AI, dan TinyML 130

Research Insight — Evaluasi Edge AI dan TinyML 133

BAB 15

KALIBRASI DAN VALIDASI SENSOR GAS 135

15.1 Mengapa Kalibrasi Sensor Gas Diperlukan? 135

15.2 Zero Calibration dan Span Calibration.....136

15.3 Kalibrasi Satu Titik, Multititik, Dinamis, dan Adaptif 137

15.4 Instrumen Referensi, Ruang Kalibrasi, dan Gas Standar.....138

15.5 Ketidakpastian (Uncertainty) dan Validasi 139

15.6 Contoh Desain Eksperimen Kalibrasi 141

BAB 16

PENGARUH LINGKUNGAN TERHADAP SENSOR GAS 145

16.1 Pengaruh Temperatur, Kelembapan, dan Tekanan..... 145

16.2 Pengaruh Aliran Udara, Debu, dan Kontaminasi..... 146

16.3 Sensor Poisoning, Aging, dan Environmental Drift..... 147

16.4 Metode Kompensasi Temperatur dan Kelembapan 149

BAB 17

APLIKASI SENSOR GAS DI SEKTOR LINGKUNGAN..... 153

17.1 Kualitas Udara dan Polusi Udara Perkotaan 153

17.2 Deteksi CO, CO2, NOx, SOx, O3, dan VOC 154

17.3 Gas Rumah Kaca dan Emisi Industri 155

17.4 Smart City dan Pemantauan Kualitas Udara Dalam Ruangan (IAQ)..... 156

17.5 Studi Kasus Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis IoT 157

BAB 18

APLIKASI SENSOR GAS DI SEKTOR INDUSTRI.....159

18.1 Industri Manufaktur, Petrokimia, dan Refinery.....159

18.2 Industri Kimia, Pengolahan Pangan, dan Semikonduktor 160

18.3 Pengolahan Air Limbah, Boiler, dan Combustion Monitoring.....161

18.4 Deteksi Kebocoran Gas dan Keselamatan Industri.....162

BAB 19

APLIKASI SENSOR GAS DI SEKTOR ENERGI.....165

19.1 LPG, LNG, dan Gas Alam 165

19.2 Hidrogen, Fuel Cell, dan Keselamatan Baterai 166

19.3 Biogas, Geothermal, dan Pembangkit Listrik.....168

19.4 Hydrogen Sensing dan Hydrogen Safety 169

BAB 20

APLIKASI SENSOR GAS PADA OTOMOTIF 171

20.1 Emisi Gas Buang dan Proses Pembakaran 171

20.2 Air-Fuel Ratio dan Oxygen Sensor 172

20.3 Deteksi NOx, CO, CO2, dan HC 173

20.4 Cabin Air Quality serta Keselamatan Baterai EV dan Kendaraan Hidrogen . 174

20.5 Konsep Smart Fuel/Gas Monitoring System 175

BAB 21

APLIKASI SENSOR GAS DI BIDANG KESEHATAN..... 177

21.1 Napas Manusia sebagai Sumber Informasi Biokimia..... 177

21.2 VOC sebagai Biomarker: Aseton, Amonia, dan Nitric Oxide 179

21.3 Prinsip Kerja Breath Analysis.....181

21.4 Electronic Nose untuk Skrining Awal Berbasis Napas 183

21.5 Wearable Gas Sensing untuk Pemantauan Kesehatan 184

21.6 Batasan Ilmiah: Bukan Alat Diagnosis Medis Tanpa Validasi Klinis dan Regulasi.....185

BAB 22

APLIKASI SENSOR GAS DI PERTANIAN DAN PETERNAKAN 189

22.1 Greenhouse dan Gas Terkait Tanah (NH3, CH4, CO2) 189

22.2 Etilen dan Pemantauan Kematangan Buah 191

22.3 Pemantauan Kandang Unggas dan Peternakan.....193

22.4 Smart Agriculture Berbasis Sensor Gas 195

BAB 23

APLIKASI SENSOR GAS DI BIDANG PANGAN.....197

23.1 Deteksi Kesegaran dan Pembusukan Pangan (Spoilage)..... 197

23.2 VOC dan Electronic Nose untuk Daging, Ikan, Buah, Sayur 199

23.3 Pemantauan Fermentasi dan Pengemasan Pangan 201

23.4 Contoh Sistem E-Nose untuk Industri Pangan..... 202

BAB 24

APLIKASI SENSOR GAS DI RUMAH TANGGA DAN SMART HOME..... 205

24.1 Deteksi Kebocoran LPG, CO, dan Asap..... 205

24.2 Indoor Air Quality pada Smart Kitchen dan Smart Building 207

24.3 Sistem Alarm dan Notifikasi Berbasis IoT..... 208

24.4 Contoh Rancangan Sistem Berbasis ESP32 210

BAB 25

APLIKASI SENSOR GAS DI PERTAMBANGAN DAN KESELAMATAN KERJA.....213

25.1 Deteksi Metana, CO, H2S, dan Kekurangan Oksigen.....213

25.2 Combustible Gas Monitoring pada Area Bawah Tanah.....215

25.3 Wearable Gas Detector untuk Keselamatan Pekerja.....217

25.4 Sistem Alarm Keselamatan Kerja (K3).....219

BAB 26

TEKNOLOGI SENSOR GAS GENERASI TERBARU.....221

26.1 AI-Enhanced Gas Sensing dan Multimodal Sensing.....221

26.2 Nanomaterial Lanjut: Graphene, Material 2D, dan MXene 223

26.3 Flexible dan Wearable Sensor Generasi Baru.....225

26.4 Wireless Sensor Network dan Self-Powered Gas Sensor.....226

26.5 Energy Harvesting dan Bio-inspired Sensing 227

26.6 Neuromorphic Gas Sensing, Digital Twin, dan Sensor Fusion 229

26.7 Autonomous Calibration serta Edge Intelligence 230

BAB 27

TREN DAN MASA DEPAN TEKNOLOGI SENSOR GAS 233

27.1 Arah Miniaturisasi, Low-Power, dan Konektivitas Nirkabel..... 233

27.2 AI Embedded dan Kalibrasi Otomatis 234

27.3 Multi-Gas Sensing dan Pengukuran Kuantitatif Real-Time..... 235

27.4 Sensor Wearable dan Implantable 236

27.5 Smart City, Industry 4.0, dan Industry 5.0..... 237

27.6 Roadmap Teknologi Sensor Gas Lima hingga Lima Belas Tahun ke Depan 238

BAB 28

METODOLOGI PENGEMBANGAN SISTEM SENSOR GAS.....241

28.1 Identifikasi Kebutuhan dan Pemilihan Target Gas.....241

28.2 Pemilihan Sensor dan Desain Hardware.....242

28.3 Signal Conditioning dan Data Acquisition.....243

28.4 Eksperimen, Kalibrasi, dan Preprocessing Data.....244

28.5 Feature Extraction, Machine Learning, dan Validasi.....245

28.6 Prototipe, Uji Lapangan, dan Evaluasi.....247

BAB 29

STUDI KASUS PERANCANGAN SISTEM SENSOR GAS CERDAS.....249

29.1 Studi Kasus 1: Smart LPG Leakage Detector.....249

29.2 Studi Kasus 2: IoT Air Quality Monitoring System.....252

29.3 Studi Kasus 3: Electronic Nose untuk Identifikasi Jenis Gas..... 253

29.4 Studi Kasus 4: Gas Sensor Array dan Machine Learning untuk Estimasi Konsentrasi Gas..... 255

29.5 Studi Kasus 5: TinyML Gas Detection System..... 257

29.6 Ringkasan dan Perbandingan Kelima Studi Kasus 259

BAB 30

ETIKA, KESELAMATAN, STANDARDISASI, DAN REGULASI 261

30.1 Keselamatan Penggunaan Gas dan Keselamatan Laboratorium (K3)..... 261

30.2 Alarm Threshold, Kegagalan Sensor, False Alarm, dan Missed Detection..... 262

30.3 Redundansi dan Keandalan Sistem (Reliability)..... 264

30.4 Keamanan Siber (Cybersecurity) dan Privasi Data pada IoT 265

30.5 Standardisasi, Sertifikasi, dan Regulasi Terkait secara Umum 267

BAB 31

KESIMPULAN 271

31.1 Kesimpulan Umum Perkembangan Teknologi Sensor Gas 271

31.2 Tantangan dan Peluang Riset.....273

31.3 Peluang Industri dan Inovasi.....274

31.4 Peluang Pengembangan Startup Teknologi Sensor Gas 275

GLOSARIUM 278

INDEKS.....294

DAFTAR PUSTAKA.....300

BAB 1
PENDAHULUAN DAN LATAR BELAKANG TEKNOLOGI SENSOR GAS

Bab ini membuka pembahasan buku dengan menempatkan gas dan sensor gas dalam konteks kehidupan sehari-hari, sebelum menelusuri sejarah panjang teknologi deteksi gas dan bagaimana ia berevolusi menuju era sensor pintar berbasis kecerdasan buatan.

1.1 Fenomena Keberadaan Gas dalam Kehidupan Sehari-hari

Gas adalah salah satu dari tiga wujud dasar materi, bersama padat dan cair, namun keberadaannya paling sering luput dari kesadaran manusia karena sifatnya yang umumnya tidak berwarna dan tidak berbau. Udara yang kita hirup setiap detik merupakan campuran gas: sekitar 78%

nitrogen, 21% oksigen, dan sisanya berbagai gas jejak (trace gas) seperti argon, karbon dioksida, serta uap air dalam jumlah bervariasi. Perubahan kecil pada komposisi campuran ini — bahkan dalam orde bagian per juta (ppm) — dapat berdampak besar terhadap kenyamanan, kesehatan, bahkan keselamatan manusia.

Dalam kehidupan sehari-hari, gas hadir dalam berbagai konteks: gas alam dan LPG yang digunakan untuk memasak, gas buang kendaraan bermotor yang mengandung karbon monoksida (CO) dan nitrogen oksida (NOx), gas hasil respirasi dan metabolisme tubuh manusia, hingga gas yang dihasilkan proses industri berskala besar. Kesadaran akan keberadaan gas-gas ini menjadi titik tolak pentingnya teknologi sensor gas — sebuah 'indra' buatan yang mampu mendeteksi apa yang tidak dapat dirasakan langsung oleh indra manusia.

1.2 Gas di Lingkungan, Atmosfer, dan Gas Rumah Kaca

Atmosfer bumi tersusun dari berbagai lapisan gas yang menopang kehidupan, namun aktivitas manusia telah mengubah komposisi tersebut secara signifikan sejak revolusi industri. Gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO2), metana (CH4), dinitrogen oksida (N2O), dan uap air berperan menahan panas matahari di atmosfer melalui efek rumah kaca — sebuah fenomena alami yang menjadi bermasalah ketika konsentrasinya meningkat drastis akibat pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan aktivitas industri.

Pemantauan konsentrasi gas-gas ini di atmosfer, baik pada skala lokal (kualitas udara perkotaan) maupun global (stasiun pemantauan iklim), sepenuhnya bergantung pada keberadaan sensor gas yang akurat dan andal. Tanpa data pengukuran yang konsisten, kebijakan lingkungan dan

mitigasi perubahan iklim tidak dapat disusun berdasarkan bukti ilmiah yang memadai.

1.3 Gas Berbahaya, Gas Beracun, dan Gas Mudah Terbakar

Sebagian gas bersifat berbahaya bagi manusia melalui tiga mekanisme utama: toksisitas (meracuni tubuh, seperti karbon monoksida yang mengikat hemoglobin darah menggantikan oksigen), sifat mudah terbakar atau eksplosif (seperti metana dan LPG yang dapat memicu ledakan pada konsentrasi tertentu di udara), dan sifat korosif atau iritan (seperti klorin dan amonia yang merusak jaringan saluran pernapasan). Setiap kategori bahaya ini memerlukan pendekatan deteksi yang berbeda, baik dari sisi ambang batas alarm, kecepatan respons sensor, maupun jenis material sensing yang digunakan.

Istilah Lower Explosive Limit (LEL) dan Upper Explosive Limit (UEL) menjadi

rujukan penting dalam mendesain sistem deteksi gas mudah terbakar: LEL adalah konsentrasi minimum gas di udara yang masih dapat menyulut ledakan, sementara di bawah nilai tersebut campuran dianggap terlalu 'kurus' (lean) untuk terbakar. Sistem alarm keselamatan pada umumnya diatur untuk memicu peringatan jauh di bawah nilai LEL, misalnya pada 10–20% dari LEL, guna memberikan waktu evakuasi yang cukup.

1.4 Gas dalam Proses Industri, Energi, Kendaraan, dan Tubuh Manusia

Di sektor industri, gas berperan baik sebagai bahan baku (misalnya hidrogen dalam industri kimia), produk samping proses (misalnya gas buang boiler), maupun indikator kondisi proses (misalnya rasio udara-bahan bakar pada proses pembakaran). Di sektor energi, gas alam dan hidrogen menjadi sumber energi strategis

yang memerlukan pemantauan kebocoran secara ketat mengingat sifatnya yang mudah terbakar. Pada kendaraan bermotor, sensor oksigen (oxygen sensor) pada sistem gas buang menjadi komponen krusial untuk optimasi efisiensi bahan bakar dan pengendalian emisi.

Menariknya, tubuh manusia sendiri juga menghasilkan dan melepaskan berbagai senyawa organik volatil (Volatile Organic Compounds/VOC) melalui napas, kulit, dan keringat, yang komposisinya dapat berubah seiring kondisi kesehatan atau metabolisme seseorang. Fenomena inilah yang mendasari bidang breath analysis — deteksi gas napas sebagai jendela non-invasif untuk memahami kondisi fisiologis, yang akan dibahas lebih mendalam pada Bab 21.

1.5 Mengapa Gas Harus Dideteksi dan Diukur?

Terdapat empat alasan mendasar mengapa deteksi dan pengukuran gas menjadi kebutuhan penting: keselamatan (mencegah kecelakaan akibat gas beracun, mudah terbakar, atau kekurangan oksigen), kesehatan (memantau kualitas udara yang dihirup manusia dalam jangka panjang), efisiensi proses (mengoptimalkan pembakaran, produksi, dan konsumsi energi berdasarkan komposisi gas), serta kepatuhan regulasi dan lingkungan (memenuhi baku mutu emisi dan standar kualitas udara yang ditetapkan otoritas berwenang).

Keempat alasan ini saling terkait dan menjadi motivasi utama berkembangnya teknologi sensor gas selama lebih dari satu abad terakhir, dari alat mekanis sederhana hingga sistem cerdas yang mampu belajar mengenali pola gas kompleks.

1.6 Sejarah Awal Teknologi Deteksi Gas hingga Era Digital

Upaya manusia mendeteksi gas berbahaya telah berlangsung jauh sebelum sensor elektronik ditemukan. Pada awal abad ke-19, penambang batu bara menggunakan lampu Davy — lampu minyak dengan kasa logam pelindung yang nyala apinya berubah bentuk saat bersentuhan dengan gas metana, memberi peringatan visual sederhana. Metode biologis seperti membawa burung kanari ke dalam terowongan tambang juga digunakan: burung yang jauh lebih sensitif terhadap gas beracun akan menunjukkan tanda keracunan sebelum kadar gas membahayakan manusia.

Memasuki pertengahan abad ke-20, sensor elektronik mulai berkembang, dimulai dari sensor katalitik (pellistor) untuk gas mudah terbakar dan sensor elektrokimia awal untuk gas toksik tertentu. Titik balik penting terjadi pada dekade 1960–1970-an

ketika Naoyoshi Taguchi mengembangkan sensor gas berbasis semikonduktor oksida logam (Metal Oxide Semiconductor/MOS), yang kemudian dikomersialkan secara luas dan menjadi cikal bakal sensor gas terjangkau yang masih digunakan hingga kini.



Gambar 1.1. Garis waktu perkembangan teknologi deteksi gas, dari lampu Davy hingga era IoT dan kecerdasan buatan.

1.7 Revolusi Industri, Era IoT, dan Sensor Gas Pintar

Perkembangan mikroelektronika sejak akhir abad ke-20 memungkinkan sensor gas terintegrasi dengan rangkaian pengondisi sinyal, mikrokontroler, dan komunikasi digital dalam ukuran yang semakin kecil dan

hemat daya. Era Industri 4.0 menandai pergeseran dari sensor gas berdiri sendiri (standalone) menuju sensor gas yang terhubung dalam jaringan Internet of Things (IoT) — mampu mengirimkan data secara nirkabel ke platform cloud, memicu notifikasi otomatis, dan diintegrasikan ke dalam sistem kendali yang lebih besar.

Konsep 'sensor pintar' (smart sensor) merujuk pada sensor yang tidak hanya mengukur, tetapi juga melakukan pemrosesan awal, kalibrasi mandiri, kompensasi lingkungan, hingga pengambilan keputusan sederhana pada tingkat perangkat itu sendiri (edge), sebelum data dikirimkan lebih lanjut.

1.8 Kecerdasan Buatan dalam Sensor Gas dan Tantangan Masa Depan

Integrasi kecerdasan buatan, khususnya machine learning, membuka kemampuan baru bagi sensor gas: dari

sekadar mendeteksi keberadaan satu jenis gas, menjadi mampu mengenali pola kompleks campuran beberapa gas sekaligus (multi-gas fingerprinting), memperkirakan konsentrasi secara kuantitatif meski sensor yang digunakan bersifat non-selektif, hingga melakukan kalibrasi adaptif terhadap perubahan lingkungan. Perkembangan edge AI dan TinyML lebih jauh memungkinkan seluruh proses inferensi ini berjalan langsung pada mikrokontroler berdaya rendah, tanpa bergantung pada koneksi internet yang konstan.

Meski demikian, tantangan besar masih terbuka: keterbatasan selektivitas material sensing, drift jangka panjang, kebutuhan dataset pelatihan yang representatif, konsumsi daya, serta standarisasi dan validasi ilmiah sebelum sensor gas berbasis AI dapat diandalkan pada aplikasi kritis seperti keselamatan kerja atau diagnosis kesehatan. Tantangan-

tantangan inilah yang akan dibahas berulang kali di sepanjang buku ini, sebagai pengingat bahwa kecanggihan algoritma tidak dapat menutupi keterbatasan fisis material sensor itu sendiri.

1.9 Contoh Kasus Nyata Aplikasi Deteksi Gas

Sebagai gambaran penutup bab ini, berikut beberapa contoh nyata penerapan sensor gas: sistem alarm kebocoran LPG rumah tangga yang mencegah kebakaran domestik; jaringan pemantau kualitas udara kota (seperti indeks AQI) yang menjadi dasar kebijakan pembatasan aktivitas luar ruang saat polusi tinggi; detektor gas portabel yang wajib dikenakan pekerja tambang dan ruang terbatas (confined space); sensor oksigen pada kendaraan yang mengoptimalkan konsumsi bahan bakar; hingga purwarupa electronic nose di laboratorium riset yang tengah

dikembangkan untuk skrining awal kondisi kesehatan melalui analisis napas.

Contoh-contoh ini menunjukkan bahwa sensor gas bukan sekadar komponen elektronik kecil, melainkan fondasi bagi sistem keselamatan, lingkungan, dan kesehatan berskala luas — sebuah bidang yang akan diuraikan lebih mendalam pada bab-bab berikutnya.

BAB 2
KONSEP DASAR GAS DAN KARAKTERISTIKNYA

Sebelum membahas prinsip kerja sensor, pembaca perlu memahami sifat-sifat dasar gas dan cara menyatakan konsentrasinya secara kuantitatif. Bab ini menjadi jembatan antara fisika-kimia dasar dan rekayasa sensor pada bab-bab selanjutnya.

2.1 Pengertian, Struktur, dan Sifat Molekul Gas

Gas adalah wujud materi yang partikel-partikelnya bergerak bebas dan memiliki jarak antarmolekul yang jauh lebih besar dibandingkan wujud padat maupun cair, sehingga gas tidak memiliki bentuk maupun volume tetap dan akan selalu mengisi seluruh ruang wadahnya. Sifat ini dijelaskan oleh teori kinetik gas, yang memodelkan molekul gas sebagai partikel-partikel yang bergerak acak dan saling

bertumbukan secara elastis dengan dinding wadah, menghasilkan besaran makroskopik yang kita kenal sebagai tekanan.

Pemahaman struktur molekul gas penting dalam konteks sensor karena setiap jenis gas memiliki ukuran molekul, polaritas, dan reaktivitas kimia yang berbeda — faktor-faktor inilah yang menentukan bagaimana suatu gas berinteraksi dengan material sensitif pada sensor, serta menjadi dasar mengapa satu jenis sensor cenderung lebih responsif terhadap gas tertentu dibanding gas lainnya.

2.2 Konsentrasi Gas: ppm, ppb, Persen, dan Volume Fraction

Konsentrasi gas dalam campuran (misalnya di udara) umumnya dinyatakan dalam beberapa satuan yang saling berkaitan. Persen volume (%) menyatakan proporsi volume suatu gas terhadap volume total campuran. Part per million (ppm) dan

part per billion (ppb) digunakan untuk menyatakan konsentrasi gas dalam jumlah yang sangat kecil — umum dijumpai pada standar kualitas udara dan ambang bahaya gas toksik.

Hubungan antar-satuan ini bersifat tetap: 1% setara dengan 10.000 ppm, dan 1 ppm setara dengan 1.000 ppb. Sebagai ilustrasi, ambang batas paparan karbon monoksida (CO) yang direkomendasikan berbagai standar keselamatan kerja berada pada kisaran puluhan ppm untuk paparan jangka pendek, sementara ambang kematian dapat terjadi pada level ratusan hingga ribuan ppm bergantung durasi paparan — menunjukkan betapa sensitifnya rentang pengukuran yang harus mampu ditangani oleh sensor gas toksik.

2.3 Tekanan Parsial, Temperatur, dan Kelembapan

Dalam campuran gas, setiap komponen gas menyumbang tekanan parsial sesuai proporsi molnya, sebagaimana dinyatakan Hukum Dalton: tekanan total campuran gas sama dengan jumlah tekanan parsial setiap komponen penyusunnya. Konsep ini penting dalam sensor gas optik dan elektrokimia, di mana laju difusi gas menuju permukaan sensitif sensor dipengaruhi oleh tekanan parsial gas target.

Temperatur dan kelembapan relatif lingkungan turut memengaruhi perilaku gas dan, yang lebih penting bagi perancang sistem sensor, memengaruhi kinerja material sensing itu sendiri. Sensor MOS, misalnya, sangat sensitif terhadap perubahan temperatur operasi, sementara kelembapan tinggi dapat mengganggu pembacaan berbagai jenis sensor elektrokimia dan MOS melalui mekanisme cross-sensitivity

terhadap uap air — topik yang akan dibahas mendalam pada Bab 16.

2.4 Difusi, Adsorpsi, dan Absorpsi Gas

Difusi adalah proses perpindahan molekul gas dari daerah berkonsentrasi tinggi menuju daerah berkonsentrasi rendah akibat gerak acak molekul, dan menjadi mekanisme utama yang membawa gas target menuju permukaan sensor. Adsorpsi merujuk pada penempelan molekul gas pada permukaan suatu material tanpa masuk ke dalam struktur material tersebut (terbagi menjadi physisorption yang bersifat lemah/reversibel dan chemisorption yang melibatkan ikatan kimia lebih kuat), sementara absorpsi merujuk pada penyerapan gas hingga masuk ke dalam struktur material.

Perbedaan mendasar antara adsorpsi dan absorpsi ini menjadi kunci memahami mengapa sensor MOS (berbasis adsorpsi

permukaan) memiliki karakteristik respons yang berbeda dari sensor elektrokimia (berbasis reaksi dan difusi elektrolit) — keduanya akan diuraikan rinci pada Bab 5 dan Bab 6.

2.5 Reaksi Kimia Gas: Toksik, Mudah Terbakar, Korosif, dan Inert

Dari sudut pandang kimia, gas dapat dikelompokkan berdasarkan sifat reaktivitasnya. Gas toksik (seperti CO, H2S, NH3) berbahaya karena mengganggu proses biokimia tubuh pada konsentrasi rendah. Gas mudah terbakar (seperti CH4, LPG, H2) dapat menyulut kebakaran atau ledakan bila bercampur udara dalam rentang konsentrasi tertentu. Gas korosif (seperti Cl2, SO2) merusak material dan jaringan biologis melalui reaksi kimia langsung. Sementara gas inert (seperti N2, Ar) relatif tidak reaktif namun tetap berbahaya dalam konteks lain, yaitu menggantikan oksigen di ruang

tertutup dan menyebabkan asfiksia (kekurangan oksigen).

Klasifikasi ini menjadi dasar pemilihan jenis sensor: gas toksik umumnya dideteksi sensor elektrokimia karena selektivitasnya yang relatif baik, gas mudah terbakar dideteksi sensor katalitik atau MOS, sedangkan gas inert memerlukan sensor oksigen untuk mendeteksi kekurangan O2 secara tidak langsung.

2.6 Gas Rumah Kaca dan Dampaknya

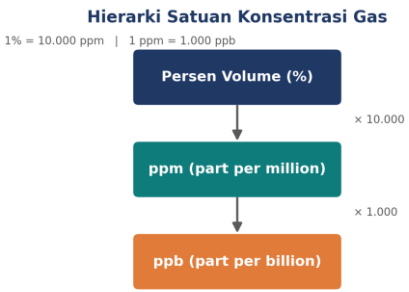
Gas rumah kaca utama — CO2, CH4, N2O, dan uap air — memiliki kapasitas berbeda dalam menahan panas, yang dinyatakan melalui konsep Global Warming Potential (GWP) relatif terhadap CO2. Metana, misalnya, memiliki GWP puluhan kali lebih besar dari CO2 dalam kerangka waktu 20 tahun, meskipun konsentrasinya di atmosfer jauh lebih rendah. Pemantauan gas-gas ini menjadi salah satu aplikasi sensor gas

dengan dampak jangka panjang terbesar, mendukung kebijakan mitigasi perubahan iklim berbasis data (dibahas lebih lanjut pada Bab 17).

2.7 Persamaan dan Contoh Konversi Satuan Konsentrasi Gas

Konversi antar-satuan konsentrasi gas mengikuti hubungan sederhana berikut:

1% volume = 10.000 ppm
1 ppm = 1.000 ppb
1% volume = 10.000.000 ppb



Gambar 2.1. Hierarki satuan konsentrasi gas (persen, ppm, ppb).

Contoh Perhitungan 2.1: Sebuah sensor gas metana membaca konsentrasi 0,25% volume di udara. Nyatakan nilai tersebut dalam satuan ppm, dan bandingkan dengan nilai LEL metana yang umumnya berada pada sekitar 5% volume (50.000 ppm).

$$0{,}25\% \times 10.000 = 2.500 \text{ ppm}$$

Dengan demikian, pembacaan 2.500 ppm tersebut setara dengan sekitar 5% dari nilai LEL metana (2.500/50.000 = 0,05 = 5%LEL), yang berarti kondisi ini masih jauh dari ambang mudah terbakar namun sudah cukup tinggi untuk memicu alarm peringatan dini pada kebanyakan sistem deteksi kebocoran gas komersial.

BAB 3
PRINSIP DASAR SENSOR GAS

Bab ini menjelaskan definisi dan prinsip umum sensor gas sebagai fondasi konseptual sebelum masuk ke pembahasan klasifikasi teknologi secara rinci pada Bab 4.

3.1 Definisi Sensor, Sensor Gas, dan Transduser

Secara umum, sensor didefinisikan sebagai perangkat yang mendeteksi atau mengukur besaran fisis, kimia, atau biologis dari lingkungannya dan mengubahnya menjadi sinyal yang dapat diproses lebih lanjut, umumnya sinyal listrik. Sensor gas, secara spesifik, adalah sensor yang dirancang untuk mendeteksi keberadaan dan/atau mengukur konsentrasi gas tertentu di lingkungan sekitarnya.

Transduser adalah istilah yang lebih luas, merujuk pada perangkat apapun yang mengubah satu bentuk energi menjadi bentuk energi lain. Dalam konteks sensor gas, transduser adalah komponen yang mengubah perubahan fisis akibat interaksi gas dengan material sensitif (misalnya perubahan resistansi, arus, atau intensitas cahaya) menjadi sinyal listrik yang terukur. Dengan demikian, setiap sensor gas pada dasarnya mengandung sebuah transduser di dalamnya, namun tidak setiap transduser adalah sensor gas.

3.2 Sensor vs Transduser, Sensor vs Detektor, Sensor vs Analyzer

Ketiga istilah — sensor, detektor, dan analyzer — sering digunakan secara tertukar dalam percakapan sehari-hari, padahal memiliki perbedaan teknis penting. Detektor gas (gas detector) umumnya merujuk pada sensor yang berfungsi memberi peringatan

biner (ada/tidak ada gas, atau di atas/di bawah ambang tertentu), sebagaimana pada alarm kebocoran LPG rumah tangga. Sensor gas dalam pengertian lebih luas dapat memberikan pembacaan kuantitatif berkelanjutan (bukan hanya biner). Gas analyzer merujuk pada instrumen yang lebih kompleks dan presisi tinggi, sering kali berbasis prinsip spektroskopi atau kromatografi, yang mampu mengukur konsentrasi gas secara sangat akurat dan sering digunakan sebagai instrumen referensi untuk kalibrasi sensor yang lebih murah (dibahas pada Bab 15).

Perbedaan ini penting dipahami pembaca agar tidak menyamaratakan kemampuan seluruh perangkat 'sensor gas' yang beredar di pasaran — sensor murah seperti seri MQ pada dasarnya lebih tepat disebut detektor semi-kuantitatif, bukan analyzer presisi tinggi.

3.3 Mekanisme Sensing dan Interaksi Gas dengan Material Sensitif

Inti dari setiap sensor gas adalah interaksi fisik atau kimia antara molekul gas target dengan material sensitif (sensing material) yang dipilih secara spesifik agar responsif terhadap gas tersebut. Interaksi ini dapat berupa reaksi kimia permukaan (seperti pada sensor MOS dan elektrokimia), penyerapan energi elektromagnetik pada panjang gelombang tertentu (seperti pada sensor optik/NDIR), atau perubahan massa akibat penyerapan gas pada lapisan tipis material (seperti pada sensor akustik gelombang permukaan/SAW).

Kualitas interaksi ini — seberapa kuat, cepat, dan selektif reaksinya terhadap gas target dibanding gas pengganggu lain — menentukan parameter kinerja sensor seperti sensitivitas dan selektivitas, yang akan dibahas rinci pada Bab 9.

3.4 Perubahan Resistansi, Arus, Tegangan, Kapasitansi, dan Massa

Berbagai jenis sensor gas mengonversi interaksi kimia menjadi sinyal listrik melalui mekanisme fisis yang berbeda-beda. Sensor MOS memanfaatkan perubahan resistansi listrik material semikonduktor akibat perubahan konsentrasi elektron bebas pada permukaannya. Sensor elektrokimia menghasilkan arus listrik proporsional terhadap laju reaksi elektrokimia gas target pada elektroda kerja. Beberapa sensor kapasitif memanfaatkan perubahan kapasitansi akibat perubahan konstanta dielektrik lapisan sensitif saat menyerap gas tertentu (umum pada sensor kelembapan dan beberapa sensor VOC). Sensor akustik seperti Quartz Crystal Microbalance (QCM) memanfaatkan perubahan massa mikroskopis pada permukaan kristal kuarsa yang menggeser frekuensi resonansinya.

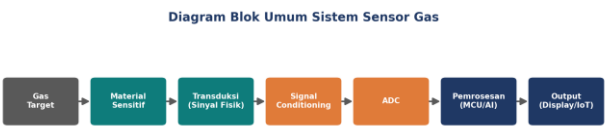
3.5 Perubahan Sifat Optik dan Potensial Elektrokimia

Selain perubahan sifat listrik, sensor gas juga dapat memanfaatkan perubahan sifat optik — misalnya penyerapan cahaya inframerah pada panjang gelombang karakteristik gas tertentu (prinsip NDIR yang dibahas pada Bab 7), atau perubahan warna material indikator akibat reaksi kimia dengan gas (sensor kolorimetrik). Pada sensor elektrokimia jenis potentiometrik, alih-alih arus, yang diukur adalah beda potensial listrik yang terbentuk akibat reaksi kimia pada elektroda, sebanding secara logaritmik dengan konsentrasi gas target sesuai persamaan Nernst.

3.6 Diagram Blok Sistem Sensor Gas

Terlepas dari perbedaan mekanisme fisis di atas, hampir seluruh sistem sensor gas modern dapat digambarkan melalui satu diagram blok umum yang sama,

sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1. Gas target berinteraksi dengan material sensitif, menghasilkan perubahan besaran fisis yang kemudian diubah oleh transduser menjadi sinyal listrik mentah. Sinyal ini umumnya masih lemah dan mengandung derau (noise), sehingga memerlukan tahap signal conditioning (penguatan, penyaringan/filtering, dan linierisasi) sebelum diubah menjadi bentuk digital melalui Analog-to-Digital Converter (ADC).



Gambar 3.1. Diagram blok umum sistem sensor gas, dari gas target hingga output ke pengguna atau sistem lain.

Data digital tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler atau unit pemrosesan lain — pada sistem modern, tahap ini dapat

mencakup algoritma kalibrasi, kompensasi lingkungan, hingga inferensi machine learning — sebelum akhirnya ditampilkan kepada pengguna (melalui layar atau indikator LED/buzzer) dan/atau dikirimkan ke sistem lain melalui platform IoT. Kerangka diagram blok ini akan menjadi rujukan berulang di sepanjang buku, khususnya pada Bab 10 (Sistem Instrumentasi) dan Bab 13 (IoT dan Sensor Gas Cerdas).

BAB 4
KLASIFIKASI TEKNOLOGI SENSOR GAS

Setelah memahami prinsip umum sensing pada Bab 3, bab ini memetakan ragam teknologi sensor gas yang ada saat ini berdasarkan prinsip transduksinya, sebagai peta jalan (roadmap) sebelum masing-masing dibahas mendalam pada bab-bab khusus (Bab 5–8).

4.1 Metal Oxide Semiconductor (MOS)

Sensor gas semikonduktor, yang paling umum berbasis oksida logam (Metal Oxide Semiconductor/MOS) seperti SnO2 dan ZnO, bekerja berdasarkan perubahan resistansi listrik material akibat reaksi permukaan dengan gas target pada temperatur operasi tinggi (umumnya 200–400°C). Teknologi ini populer karena biaya produksinya rendah, umur pakai relatif

panjang, dan mampu mendeteksi berbagai gas mudah terbakar maupun VOC, meskipun selektivitasnya terhadap gas spesifik cenderung rendah. Pembahasan mendalam mengenai MOS disajikan pada Bab 5.

4.2 Electrochemical Sensor dan Catalytic/Combustible Sensor

Sensor elektrokimia memanfaatkan reaksi oksidasi-reduksi gas target pada elektroda yang terendam elektrolit, menghasilkan arus atau tegangan listrik yang sebanding dengan konsentrasi gas. Teknologi ini unggul dalam selektivitas untuk gas toksik spesifik (CO, H2S, NO2, dsb.) dibanding MOS, namun memiliki keterbatasan umur pakai elektrolit (biasanya 1–3 tahun). Sensor katalitik (pellistor), di sisi lain, dirancang khusus mendeteksi gas mudah terbakar melalui panas reaksi pembakaran katalitik pada elemen sensor,

umum digunakan sebagai detektor LEL di industri. Pembahasan mendalam sensor elektrokimia disajikan pada Bab 6.

4.3 Infrared/NDIR Sensor, Optical Sensor, dan Photoionization Detector

Sensor optik memanfaatkan interaksi gas dengan cahaya, paling umum melalui prinsip Non-Dispersive Infrared (NDIR) yang mengukur penyerapan cahaya inframerah pada panjang gelombang karakteristik gas tertentu (misalnya CO2 pada sekitar 4,26 μm). Photoionization Detector (PID) menggunakan lampu ultraviolet berenergi tinggi untuk mengionisasi molekul VOC, menghasilkan arus listrik proporsional terhadap konsentrasi. Teknologi optik umumnya menawarkan selektivitas dan stabilitas jangka panjang yang superior dibanding MOS maupun elektrokimia, dengan konsekuensi harga dan kompleksitas yang

lebih tinggi. Pembahasan mendalam disajikan pada Bab 7.

4.4 Thermal Conductivity Sensor dan Acoustic Sensor (SAW, QCM)

Sensor konduktivitas termal mengukur perbedaan kemampuan hantar panas suatu campuran gas dibanding udara referensi, cocok untuk gas dengan konduktivitas termal yang jauh berbeda dari udara seperti hidrogen dan helium. Sensor akustik gelombang permukaan (Surface Acoustic Wave/SAW) dan Quartz Crystal Microbalance (QCM) mendeteksi gas melalui perubahan massa mikroskopis pada lapisan sensitif yang melapisi permukaan kristal piezoelektrik, menggeser frekuensi resonansi osilasi — teknologi ini menawarkan sensitivitas sangat tinggi hingga level nanogram, sering digunakan pada aplikasi riset dan deteksi VOC jejak.

4.5 MEMS Gas Sensor dan Nanomaterial Gas Sensor

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) memungkinkan miniaturisasi elemen sensor gas hingga skala mikrometer, secara drastis menurunkan konsumsi daya heater dibanding sensor MOS konvensional sekaligus mempercepat waktu respons. Dikombinasikan dengan nanomaterial (nanowire, nanotube, quantum dots), luas permukaan aktif sensor meningkat signifikan, meningkatkan sensitivitas pada konsentrasi gas yang sangat rendah. Kombinasi MEMS dan nanomaterial menjadi arah utama miniaturisasi sensor gas generasi terbaru, dibahas rinci pada Bab 8.

4.6 Flexible, Wearable, dan Bio-inspired Gas Sensor

Perkembangan material fleksibel dan elektronika cetak (printed electronics) memungkinkan sensor gas dibuat pada

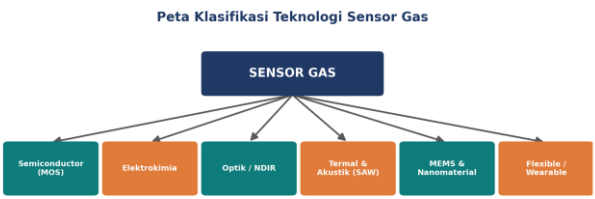
substrat lentur yang dapat ditempelkan pada pakaian, kulit, atau permukaan lengkung lainnya — membuka aplikasi baru seperti pemantauan paparan gas personal secara terus-menerus. Pendekatan bio-inspired, di sisi lain, meniru mekanisme penciuman biologis (seperti reseptor olfaktori mamalia) untuk merancang array sensor dengan selektivitas silang yang meniru pola pengenalan aroma alami, mendasari perkembangan electronic nose pada Bab 11.

4.7 Sensor Gas Berbasis Graphene, CNT, dan Material 2D

Graphene, carbon nanotube (CNT), dan material dua dimensi lain seperti MXene menawarkan luas permukaan spesifik yang sangat besar per satuan massa serta konduktivitas listrik unggul, menjadikannya kandidat kuat material sensing generasi mendatang. Sensor berbasis material ini berpotensi beroperasi pada temperatur ruang

(tanpa heater berdaya tinggi seperti MOS konvensional) sekaligus menawarkan sensitivitas hingga level part-per-billion. Tantangan utamanya terletak pada reproduksibilitas fabrikasi skala besar dan selektivitas yang masih perlu direkayasa lebih lanjut, sebagaimana akan dibahas pada Bab 26.

4.8 Tabel Perbandingan Menyeluruh Antarteknologi Sensor Gas



Gambar 4.1. Peta klasifikasi teknologi sensor gas berdasarkan prinsip transduksi.

Tabel 4.1. Perbandingan menyeluruh antarteknologi sensor gas.

Teknologi	Prinsip Sinyal	Selektivitas	Umur Pakai	Biaya	Contoh Target Gas
MOS (Semiconductor)	Perubahan resistansi	Rendah–Sedang	3–5+ tahun	Rendah	CH4, LPG, CO, VOC
Elektrokimia	Arus/tegangan	Sedang–Tinggi	1–3 tahun (elektrolit)	Sedang	CO, H2S, NO2, O2
Katalitik (Pellistor)	Panas reaksi	Rendah (kelompok combustible)	2–5 tahun	Sedang	CH4, LPG, H2
NDIR / Optik	Absorpsi cahaya IR	Tinggi	5–10+ tahun	Tinggi	CO2, CH4, hidrokarbon
Konduktivitas Termal	Beda hantar panas	Rendah	Panjang	Sedang	H2, He
SAW/QCM (Akustik)	Perubahan massa	Sedang (bergantung lapisan)	Bervariasi	Tinggi	VOC jejak, riset
MEMS/Nanomaterial	Bervariasi (miniatur)	Sedang–Tinggi (berkembang)	Bervariasi	Tinggi (riset)	Multi-gas, VOC

Tabel 4.1 di atas merangkum karakteristik utama setiap kategori sensor gas yang telah

diuraikan. Pemilihan teknologi yang tepat untuk suatu aplikasi bergantung pada kombinasi kebutuhan: target gas, rentang konsentrasi, kecepatan respons, umur pakai, anggaran, serta kondisi lingkungan operasi — pertimbangan yang akan dibahas lebih rinci pada Bab 28 (Metodologi Pengembangan Sistem Sensor Gas).

Teknologi	Contoh target	Selektivitas *	Respons *	Kekuatan utama	Keterbatasan utama
MOS	CO, VOC, CH_4, H_2	Sedang–rendah	Sedang	Murah, array mudah	Drift, humidity, heater
Elektrokimia	CO, H_2S, SO_2, NO_2, O_2	Tinggi–sedang	Cepat	Selektif, daya rendah	Lifetime, cross-sensitivity
NDIR	CO_2, CH_4, hidrokarbon tertentu	Tinggi	Cepat	Stabil, non-contact	Optik dan biaya
PID	VOC terionisasi	Tinggi untuk kelas tertentu	Cepat	Sensitif pada VOC	Tidak semua gas terionisasi
SAW/QCM	VOC/uap tertentu	Bervariasi	Cepat	Mass-sensitive	Butuh coating/kompensasi
MEMS	Tergantung material	Bervariasi	Cepat	Miniatur, low-power	Proses fabrikasi

Catatan: perbandingan bersifat konseptual. Kinerja aktual bergantung pada material,

desain, kondisi operasi, kalibrasi, dan lingkungan aplikasi.

BAB 5
METAL OXIDE SEMICONDUCTOR (MOS) GAS SENSOR

Sebagai teknologi sensor gas yang paling luas digunakan pada aplikasi edukatif, hobiis, dan komersial terjangkau, MOS gas sensor mendapat pembahasan tersendiri secara mendalam pada bab ini — mencakup prinsip fisika permukaan, parameter kinerja, material sensing, hingga keterbatasan penting yang perlu dipahami sebelum menggunakannya dalam suatu sistem.

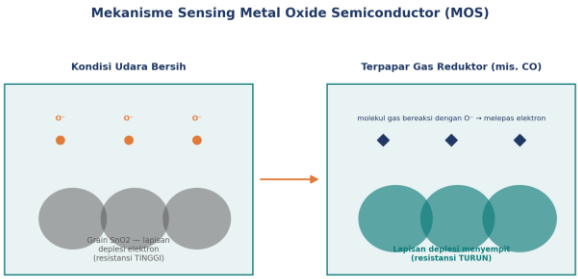
5.1 Prinsip Kerja: Chemisorption, Physisorption, dan Oxygen Adsorption

Sensor MOS bekerja berdasarkan interaksi antara gas target dengan oksigen yang teradsorpsi pada permukaan butiran (grain) material semikonduktor oksida logam, seperti timah oksida (SnO2). Pada kondisi udara bersih dan temperatur operasi

tinggi (200–400°C), molekul oksigen dari udara akan teradsorpsi secara chemisorption pada permukaan grain, menangkap elektron bebas dari pita konduksi material dan membentuk spesies ion oksigen ($O2^{-}$, O^{-}, atau O^{2-} tergantung temperatur). Proses ini membentuk lapisan deplesi elektron (electron depletion layer) di dekat permukaan grain, yang meningkatkan resistansi listrik keseluruhan material.

Ketika gas target yang bersifat reduktor (seperti CO, H2, atau senyawa hidrokarbon) hadir, molekul gas tersebut bereaksi dengan ion oksigen teradsorpsi pada permukaan, melepaskan kembali elektron yang sebelumnya terperangkap ke dalam pita konduksi material. Pelepasan elektron ini mempersempit lapisan deplesi dan menurunkan resistansi listrik sensor secara signifikan — inilah mekanisme dasar yang dimanfaatkan untuk mendeteksi keberadaan gas.

5.2 Perubahan Carrier Concentration dan Resistansi



Gambar 5.1. Perbandingan kondisi lapisan deplesi elektron pada grain SnO2 saat udara bersih (resistansi tinggi) dan saat terpapar gas reduktor (resistansi turun).

Besarnya perubahan resistansi ini umumnya dinyatakan melalui rasio sensitivitas S, yang didefinisikan sebagai perbandingan resistansi sensor pada udara bersih (Ra) terhadap resistansi saat terpapar gas target (Rs) untuk gas reduktor, sebagaimana akan dibahas pada bagian persamaan berikutnya.

5.3 Temperatur Operasi, Heater, dan Pengaruhnya terhadap Kinerja

Reaksi adsorpsi-desorpsi oksigen dan gas target pada permukaan MOS bersifat sangat bergantung temperatur, sehingga hampir seluruh sensor MOS dilengkapi elemen pemanas (heater) internal untuk menjaga temperatur operasi optimal, umumnya pada rentang 200–400°C tergantung material dan gas target. Temperatur operasi yang berbeda dapat menggeser selektivitas sensor terhadap jenis gas tertentu — fenomena ini bahkan dimanfaatkan pada beberapa sensor MOS modern yang melakukan pemindaian (sweeping) temperatur secara periodik untuk membedakan beberapa jenis gas menggunakan satu elemen sensor saja (temperature-modulated operation).

Konsekuensi dari kebutuhan pemanas ini adalah konsumsi daya sensor MOS yang relatif tinggi dibanding sensor elektrokimia,

menjadi pertimbangan penting pada aplikasi bertenaga baterai atau IoT hemat daya (dibahas pada Bab 14).

5.4 Sensitivitas, Selektivitas, Response Time, Recovery Time

Sensitivitas sensor MOS umumnya cukup tinggi untuk mendeteksi gas hingga level puluhan ppm, namun selektivitasnya terhadap gas spesifik relatif rendah — sebuah sensor MOS yang dirancang untuk gas metana biasanya tetap menunjukkan respons (meski lebih kecil) terhadap gas mudah terbakar lain seperti LPG, alkohol, atau bahkan asap. Response time (waktu yang dibutuhkan sensor mencapai sebagian besar nilai akhir pembacaan setelah terpapar gas) sensor MOS umumnya berkisar 10–60 detik, sementara recovery time (waktu kembali ke baseline setelah gas dihilangkan) bisa lebih lama, dalam orde puluhan detik hingga beberapa menit.

5.5 Drift, Aging, dan Pengaruh Kelembapan

Salah satu keterbatasan signifikan sensor MOS adalah drift jangka panjang — pergeseran nilai baseline resistansi seiring waktu akibat perubahan struktur mikro material grain pada temperatur operasi tinggi yang terus-menerus. Fenomena aging ini menyebabkan sensor MOS memerlukan kalibrasi ulang berkala, dan akurasinya cenderung menurun setelah pemakaian bertahun-tahun. Selain itu, kelembapan relatif lingkungan turut memengaruhi jumlah oksigen teradsorpsi pada permukaan grain, menyebabkan cross-sensitivity terhadap uap air yang dapat menghasilkan pembacaan keliru bila tidak dikompensasi secara perangkat lunak.

5.6 Material Sensing: SnO2, ZnO, WO3, TiO2, In2O3, CuO, NiO

Tabel 5.1. Material sensing MOS dan karakteristiknya.

Material	Struktur	Target Gas Khas	Catatan
SnO2 (Timah Oksida)	Semikonduktor tipe-n	LPG, CO, asap, metana	Material paling umum, dasar sensor seri MQ
ZnO (Seng Oksida)	Semikonduktor tipe-n	Etanol, VOC, H2	Sensitif pada nanostruktur (nanowire/nanorod)
WO3 (Wolfram Trioksida)	Semikonduktor tipe-n	NO2, O3, H2S	Baik untuk gas oksidator
TiO2 (Titanium Dioksida)	Semikonduktor tipe-n	O2, H2, VOC	Stabilitas kimia tinggi
In2O3 (Indium Oksida)	Semikonduktor tipe-n	O3, NO2, CO	Respons cepat pada nanostruktur
CuO (Tembaga Oksida)	Semikonduktor tipe-p	H2S, CO	Sering dikombinasikan (heterojunction) dgn SnO2
NiO (Nikel Oksida)	Semikonduktor tipe-p	H2, CO, etanol	Dikembangkan untuk sensor suhu rendah

Tabel 5.1 merangkum beberapa material oksida logam yang umum digunakan sebagai lapisan sensitif sensor MOS beserta karakteristik dan target gas khasnya. Pemilihan material, ukuran butiran (grain size), serta penambahan dopan (seperti Pd, Pt, atau Au dalam jumlah sangat kecil) menjadi area riset aktif untuk meningkatkan sensitivitas dan selektivitas material MOS.

5.7 Sensor Komersial Keluarga MQ sebagai Contoh Edukatif dan Keterbatasannya

Sensor gas seri MQ (seperti MQ-2, MQ-3, MQ-7, MQ-135) merupakan sensor MOS berbiaya sangat rendah yang populer digunakan pada proyek edukasi, purwarupa hobiis, dan sistem IoT sederhana karena kemudahan integrasinya dengan mikrokontroler seperti Arduino dan ESP32. Meski demikian, penting ditegaskan secara

ilmiah dan jujur bahwa sensor seri MQ pada umumnya tidak dikalibrasi secara presisi dari pabrik, memiliki selektivitas rendah terhadap campuran gas kompleks, rentan terhadap drift signifikan, serta membutuhkan waktu pemanasan awal (burn-in/preheating) yang dapat mencapai puluhan jam hingga puluhan menit sebelum pembacaan stabil.

Oleh karena itu, sensor seri MQ lebih tepat digunakan sebagai alat deteksi kualitatif (ada/tidak ada gas, atau tren relatif naik-turun) daripada sebagai instrumen pengukuran kuantitatif presisi tinggi tanpa proses kalibrasi tambahan menggunakan gas standar dan instrumen referensi, sebagaimana akan dibahas pada Bab 15.

Catatan Desain — Untuk pengukuran kuantitatif, nilai resistansi atau rasio Rs/R0 sebaiknya dipetakan melalui kurva kalibrasi terhadap konsentrasi gas acuan. Pembacaan sensor

MQ tidak sebaiknya diperlakukan sebagai konsentrasi absolut tanpa validasi.

BAB 6
SENSOR GAS ELEKTROKIMIA

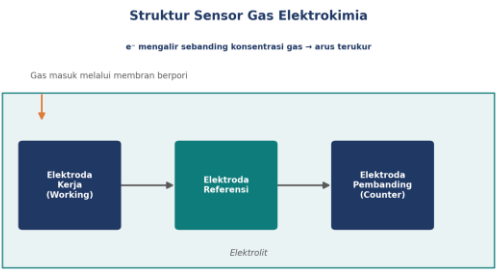
Setelah membahas MOS pada Bab 5, bab ini mengupas sensor gas elektrokimia — teknologi yang menawarkan selektivitas lebih baik untuk gas toksik spesifik, menjadikannya pilihan utama pada aplikasi keselamatan kerja dan industri.

6.1 Prinsip Elektrokimia: Working, Counter, dan Reference Electrode

Sensor gas elektrokimia umumnya tersusun dari tiga elektroda yang terendam dalam elektrolit: elektroda kerja (working electrode) tempat gas target berdifusi dan bereaksi secara elektrokimia, elektroda pembanding (counter electrode) yang menyeimbangkan reaksi pada elektroda kerja agar arus dapat mengalir dalam rangkaian tertutup, dan elektroda referensi (reference electrode) yang menjaga

potensial elektroda kerja tetap stabil terlepas dari perubahan arus yang terjadi.

Gas target berdifusi melalui membran berpori menuju elektroda kerja, tempat terjadinya reaksi elektrokimia — oksidasi atau reduksi — yang menghasilkan aliran elektron sebanding dengan laju reaksi, yang pada gilirannya sebanding dengan konsentrasi gas di lingkungan sekitar sensor.



Gambar 6.1. Struktur umum sensor gas elektrokimia dengan tiga elektroda (kerja, referensi, pembanding) terendam elektrolit.

6.2 Elektrolit serta Reaksi Oksidasi dan Reduksi

Elektrolit — umumnya berupa larutan asam encer atau gel polimer — berfungsi sebagai medium penghantar ion antarelektroda sekaligus tempat berlangsungnya reaksi setengah sel. Sebagai contoh, pada sensor CO elektrokimia, reaksi oksidasi CO menjadi CO2 pada elektroda kerja melepaskan elektron yang mengalir melalui rangkaian eksternal menuju elektroda pembanding, tempat terjadi reaksi reduksi oksigen menjadi air. Besarnya arus yang dihasilkan berbanding lurus dengan laju reaksi oksidasi CO, dan karenanya berbanding lurus dengan konsentrasi CO di udara sekitar sensor — memberikan sensor ini karakteristik linier yang sangat berguna untuk pengukuran kuantitatif.

6.3 Sensor Amperometrik, Potentiometrik, dan Konduktometrik

Berdasarkan besaran listrik yang diukur, sensor elektrokimia terbagi menjadi tiga jenis utama. Sensor amperometrik mengukur arus listrik yang dihasilkan reaksi elektrokimia pada tegangan bias tetap, dan merupakan jenis paling umum digunakan untuk deteksi gas toksik seperti CO, H2S, dan NO2 karena hubungan linier antara arus dan konsentrasi. Sensor potentiometrik mengukur beda potensial listrik yang terbentuk pada elektroda tanpa aliran arus signifikan, mengikuti hubungan logaritmik terhadap konsentrasi gas sesuai persamaan Nernst — cocok untuk rentang konsentrasi yang sangat lebar. Sensor konduktometrik mengukur perubahan konduktivitas listrik elektrolit akibat reaksi kimia dengan gas target, jenis yang relatif kurang umum dibanding dua jenis lainnya.

6.4 Sensitivitas, Selektivitas, Lifetime, dan Cross-sensitivity

Dibanding sensor MOS, sensor elektrokimia umumnya menawarkan selektivitas yang jauh lebih baik terhadap gas target spesifik, karena reaksi elektrokimia yang terjadi cenderung spesifik terhadap jenis gas tertentu, ditambah adanya filter kimia (scrubber filter) pada beberapa desain sensor untuk menyaring gas pengganggu sebelum mencapai elektroda kerja. Meski demikian, cross-sensitivity tetap dapat terjadi — misalnya sensor H2S dapat menunjukkan respons parsial terhadap SO2 yang memiliki struktur reaksi elektrokimia serupa.

Keterbatasan utama sensor elektrokimia terletak pada umur pakainya yang terbatas, umumnya 1 hingga 3 tahun tergantung jenis gas dan kondisi penyimpanan, karena elektrolit dan elektroda mengalami degradasi bertahap

seiring waktu — bahkan ketika sensor tidak digunakan aktif (self-discharge/aging pasif). Hal ini menjadikan penjadwalan penggantian sensor sebagai bagian penting perawatan sistem berbasis sensor elektrokimia, khususnya pada aplikasi keselamatan kritis.

6.5 Aplikasi Deteksi CO, NO2, SO2, H2S, O2, Cl2, dan NH3

Tabel 6.1. Ragam gas target sensor elektrokimia dan aplikasinya.

Gas Target	Prinsip Reaksi	Rentang Deteksi Umum	Aplikasi Khas
CO (Karbon Monoksida)	Oksidasi amperometrik	0–500 ppm	Alarm rumah tangga, keselamatan industri
H2S (Hidrogen Sulfida)	Oksidasi amperometrik	0–100 ppm	Pertambangan, pengolahan limbah
NO2 (Nitrogen Dioksida)	Reduksi amperometrik	0–20 ppm	Kualitas udara, emisi kendaraan
SO2 (Sulfur Dioksida)	Oksidasi amperometrik	0–20 ppm	Industri, kualitas udara
O2 (Oksigen)	Reduksi (sel galvanik)	0–25% volume	Deteksi kekurangan oksigen, ruang terbatas
Cl2 (Klorin)	Reduksi amperometrik	0–10 ppm	Industri kimia, pengolahan air
NH3 (Amonia)	Oksidasi amperometrik	0–100 ppm	Pertanian, peternakan, refrigerasi industri

Tabel 6.1 merangkum jenis gas target yang umum dideteksi menggunakan sensor elektrokimia beserta rentang aplikasinya. Sensor oksigen (O2) elektrokimia patut mendapat perhatian khusus karena prinsip kerjanya sedikit berbeda — alih-alih mendeteksi gas berbahaya, sensor ini justru memantau kadar oksigen normal (sekitar 20,9%) dan memicu alarm ketika kadar tersebut turun signifikan, mengindikasikan risiko asfiksia di ruang tertutup atau ruang terbatas (confined space), sebagaimana dibahas pada Bab 25.

Catatan Desain — Pada aplikasi keselamatan, pemilihan sensor elektrokimia perlu memperhitungkan rentang ukur, lifetime, kondisi lingkungan, cross-sensitivity, serta prosedur pengujian dan kalibrasi yang sesuai.

BAB 7
SENSOR GAS OPTIK DAN INFRARED

Bab ini membahas teknologi sensor gas berbasis interaksi cahaya, dengan fokus utama pada Non-Dispersive Infrared (NDIR) yang banyak digunakan pada pengukuran CO2 dan hidrokarbon presisi tinggi, serta prinsip optik lanjutan lainnya.

7.1 Prinsip Absorpsi Cahaya dan Hukum Beer-Lambert

Setiap molekul gas menyerap cahaya pada panjang gelombang karakteristik tertentu, sesuai mode getaran ikatan kimianya — fenomena inilah yang dimanfaatkan sensor gas optik. Hubungan antara intensitas cahaya yang diserap dengan konsentrasi gas dinyatakan melalui Hukum Beer-Lambert, yang menyatakan bahwa penyerapan cahaya bersifat eksponensial terhadap hasil kali antara konsentrasi gas,

panjang lintasan optik, dan koefisien absorpsi molar gas tersebut pada panjang gelombang yang diukur.

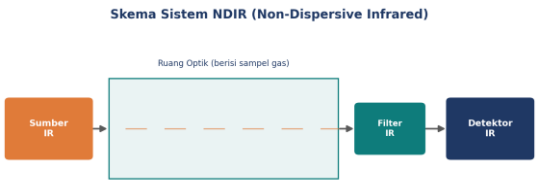
$$I = I0 \times exp(-\alpha \cdot c \cdot L)$$

dengan I0 adalah intensitas cahaya mula-mula, I adalah intensitas setelah melewati gas, α adalah koefisien absorpsi molar gas, c adalah konsentrasi gas, dan L adalah panjang lintasan optik. Persamaan ini menjadi dasar seluruh perhitungan konsentrasi gas pada sensor optik, termasuk NDIR.

7.2 Non-Dispersive Infrared (NDIR): Sumber IR, Optical Path, Detektor, Filter

NDIR merupakan teknologi sensor optik paling populer untuk pengukuran gas seperti CO2, CH4, dan berbagai hidrokarbon. Sebuah sensor NDIR terdiri dari sumber cahaya inframerah (umumnya lampu pijar miniatur atau LED inframerah), ruang optik (optical chamber) tempat cahaya

melewati sampel gas, filter optik sempit yang hanya meloloskan panjang gelombang karakteristik gas target (misalnya sekitar 4,26 µm untuk CO2), dan detektor inframerah yang mengukur intensitas cahaya setelah melewati sampel.



Gambar 7.1. Skema sistem NDIR: sumber IR, ruang optik berisi sampel gas, filter panjang gelombang spesifik, dan detektor.

Istilah 'non-dispersive' merujuk pada tidak digunakannya prisma atau kisi difraksi untuk menyebarkan spektrum cahaya secara kontinu (dispersive spectroscopy); sebagai gantinya, filter optik sempit langsung menyaring panjang gelombang spesifik yang relevan, menjadikan desain NDIR lebih sederhana dan murah dibanding

spektrometer inframerah penuh, namun tetap mempertahankan selektivitas tinggi terhadap gas target.

7.3 Optical Gas Sensing dan Laser Absorption Spectroscopy

Selain NDIR, teknik spektroskopi absorpsi berbasis laser menawarkan resolusi spektral yang jauh lebih tinggi, memungkinkan pembedaan gas dengan spektrum absorpsi yang sangat berdekatan. Sumber cahaya laser yang sangat monokromatik memungkinkan pengukuran pada satu panjang gelombang sempit dengan presisi tinggi, cocok untuk aplikasi riset dan pemantauan gas jejak (trace gas) pada konsentrasi part-per-billion.

7.4 Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS)

TDLAS merupakan salah satu teknik laser absorption spectroscopy yang paling

banyak diaplikasikan secara komersial, memanfaatkan laser dioda yang panjang gelombangnya dapat disetel (tuned) secara presisi melalui pengaturan arus dan temperatur, memungkinkan pemindaian (scanning) melewati garis absorpsi gas target secara sangat akurat. TDLAS umum digunakan pada pemantauan emisi industri, deteksi kebocoran gas jarak jauh (remote sensing), serta pengukuran gas proses pada temperatur dan tekanan tinggi yang sulit dijangkau sensor kontak langsung.

7.5 Photoacoustic Gas Sensing

Prinsip photoacoustic memanfaatkan efek pemanasan periodik gas akibat penyerapan cahaya termodulasi, yang menghasilkan gelombang tekanan (suara) berfrekuensi sama dengan modulasi cahaya, terdeteksi menggunakan mikrofon sensitif. Teknik ini menawarkan sensitivitas sangat tinggi tanpa memerlukan lintasan optik

panjang seperti NDIR konvensional, menjadikannya menarik untuk sensor gas miniatur bersensitivitas tinggi, meski kompleksitas rangkaian pemrosesan sinyal akustiknya lebih tinggi.

7.6 Persamaan dan Contoh Perhitungan Sederhana

Contoh Perhitungan 7.1: Sebuah sensor NDIR CO2 memiliki koefisien absorpsi efektif α sedemikian sehingga pada panjang lintasan optik L = 5 cm, intensitas cahaya berkurang menjadi 70% dari intensitas mula-mula (I/I0 = 0,70) saat konsentrasi CO2 sebesar 800 ppm. Hubungan ini digunakan sensor untuk menyusun kurva kalibrasi antara rasio I/I0 dan konsentrasi gas, yang kemudian disimpan dalam firmware sensor sebagai tabel lookup atau persamaan regresi guna mengonversi pembacaan optik mentah

menjadi nilai konsentrasi ppm secara real-time.

Pendekatan ini menegaskan bahwa keakuratan sensor NDIR sangat bergantung pada kestabilan sumber cahaya dan detektor dari waktu ke waktu — sedikit penurunan intensitas sumber cahaya akibat penuaan komponen dapat disalahartikan sebagai peningkatan konsentrasi gas apabila tidak dikompensasi melalui kanal referensi (dual-wavelength referencing), teknik umum yang digunakan sensor NDIR kelas industri untuk menjaga akurasi jangka panjang.

Catatan Desain — Stabilitas sumber cahaya, kebersihan optical path, temperatur, tekanan, dan karakteristik detektor dapat memengaruhi hasil. Sistem optik perlu baseline/reference handling agar perubahan intensitas tidak langsung dianggap sebagai perubahan konsentrasi.

BAB 8
SENSOR GAS BERBASIS MEMS DAN NANOTEKNOLOGI

Bab ini menelusuri arah miniaturisasi sensor gas melalui teknologi Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) dan pemanfaatan nanomaterial, yang secara bersamaan meningkatkan sensitivitas dan menurunkan konsumsi daya sensor gas generasi terbaru.

8.1 Perkembangan MEMS untuk Sensor Gas

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) merupakan teknologi fabrikasi yang memungkinkan pembuatan struktur mekanis dan elektronik berskala mikrometer pada satu chip silikon menggunakan proses microfabrication yang serupa dengan industri semikonduktor. Diterapkan pada sensor gas, MEMS memungkinkan pembuatan elemen pemanas (microheater)

berukuran sangat kecil dengan massa termal yang jauh lebih rendah dibanding elemen pemanas keramik konvensional pada sensor MOS tradisional.

Massa termal yang rendah ini membawa dua keuntungan signifikan: konsumsi daya pemanasan dapat ditekan hingga puluhan kali lebih rendah (dari orde ratusan miliwatt menjadi puluhan miliwatt, bahkan miliwatt tunggal pada desain pulsed-heating), dan waktu untuk mencapai temperatur operasi stabil menjadi jauh lebih singkat, memungkinkan mode operasi berdenyut (pulsed operation) yang semakin menghemat energi baterai pada aplikasi portabel dan IoT.

8.2 Nanowire, Nanotube, Graphene, dan Carbon Nanotube

Struktur nano seperti nanowire (kawat nano) dan nanotube (tabung nano) menawarkan rasio luas permukaan terhadap

volume yang jauh lebih besar dibanding material bulk konvensional, secara langsung meningkatkan jumlah situs aktif (active site) yang tersedia untuk reaksi adsorpsi gas target. Graphene — lembaran karbon setebal satu atom — dan carbon nanotube (CNT) menjadi dua material nano yang paling banyak diteliti untuk sensor gas karena kombinasi konduktivitas listrik tinggi, luas permukaan spesifik ekstrem, dan kemampuan difungsionalisasi permukaannya (surface functionalization) untuk meningkatkan selektivitas terhadap gas tertentu.

8.3 Metal Oxide Nanostructure, Quantum Dots, dan Material 2D (MXene)

Material oksida logam yang telah dibahas pada Bab 5 (seperti SnO2 dan ZnO) juga dapat direkayasa dalam bentuk nanostruktur — nanorod, nanosheet, atau nanoflower — untuk meningkatkan kinerja

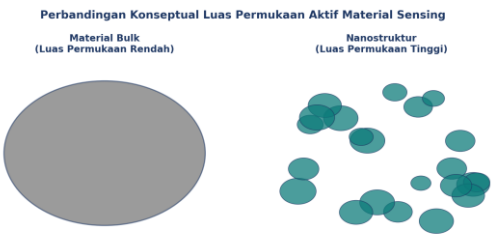
sensornya dibanding bentuk bulk konvensional. Quantum dots, partikel semikonduktor berukuran beberapa nanometer, menawarkan sifat elektronik unik akibat efek kurungan kuantum (quantum confinement) yang dapat direkayasa untuk aplikasi sensing spesifik. MXene, kelas material dua dimensi berbasis karbida dan nitrida logam transisi yang relatif baru ditemukan (sejak 2011), menunjukkan potensi besar sebagai material sensing gas suhu ruang berkat konduktivitas listrik tinggi dan kelimpahan gugus fungsi permukaan yang reaktif terhadap berbagai molekul gas.

8.4 Nanokomposit untuk Sensor Gas

Menggabungkan dua atau lebih material nano — misalnya oksida logam dengan graphene, atau nanopartikel logam mulia (Pd, Pt, Au) dengan material oksida — menjadi strategi umum untuk memperoleh

keunggulan gabungan (synergistic effect) yang tidak dimiliki material tunggal. Nanopartikel logam mulia, misalnya, sering ditambahkan sebagai katalis (dopant) pada permukaan oksida logam untuk mempercepat reaksi disosiasi molekul gas target, secara signifikan meningkatkan sensitivitas dan menurunkan temperatur operasi yang dibutuhkan.

8.5 Pengaruh Nanoteknologi terhadap Surface Area, Sensitivitas, Response Time, Selektivitas, dan Daya Rendah



Gambar 8.1. Perbandingan konseptual luas permukaan aktif material sensing bulk konvensional versus nanostruktur pada volume material yang sama.

Secara ringkas, penerapan nanoteknologi pada sensor gas memberikan lima dampak utama yang saling berkaitan: peningkatan luas permukaan aktif per satuan volume material, yang berujung pada peningkatan sensitivitas terhadap konsentrasi gas rendah; percepatan response time dan recovery time akibat jarak difusi molekul gas yang lebih pendek menuju situs aktif; potensi peningkatan selektivitas melalui rekayasa permukaan (surface engineering) dan fungsionalisasi kimia yang presisi; serta penurunan konsumsi daya karena kompatibilitasnya dengan platform MEMS berdaya rendah.

Meski menjanjikan, tantangan signifikan tetap ada pada sisi reproduksibilitas fabrikasi dalam skala besar, stabilitas jangka panjang material nano di lingkungan nyata (yang dapat berbeda jauh dari kondisi laboratorium terkontrol), serta biaya produksi yang masih

relatif tinggi dibanding sensor MOS konvensional — faktor-faktor yang menjelaskan mengapa sebagian besar sensor berbasis nanomaterial murni saat ini masih berada pada tahap riset dan belum terkomersialisasi secara luas.

Catatan Desain — Nanomaterial sebaiknya dinilai bukan hanya dari respons maksimum, tetapi juga stabilitas, repeatability, selektivitas, reproduksibilitas fabrikasi, konsumsi daya, dan kompatibilitas proses produksi.

BAB 9
KARAKTERISTIK DAN PARAMETER KINERJA SENSOR GAS

Setelah mengenal berbagai teknologi sensor pada Bab 4–8, bab ini menyusun kerangka evaluasi yang berlaku universal: parameter kinerja apa saja yang perlu diperhatikan saat memilih, menguji, atau membandingkan sensor gas, terlepas dari teknologi yang mendasarinya.

9.1 Sensitivitas, Selektivitas, Akurasi, Presisi, dan Resolusi

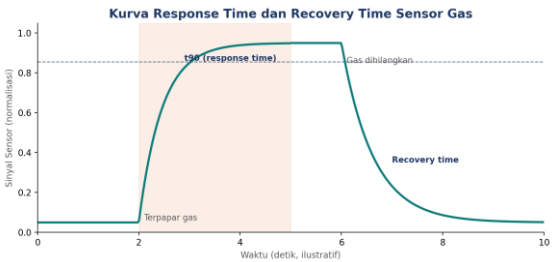
Sensitivitas menyatakan seberapa besar perubahan sinyal output sensor terhadap perubahan konsentrasi gas target, umumnya dinyatakan sebagai rasio (misalnya Ra/Rs pada sensor MOS) atau kemiringan kurva kalibrasi. Selektivitas menyatakan kemampuan sensor merespons gas target secara spesifik dibanding gas-gas pengganggu lain di lingkungan yang sama.

Akurasi menyatakan seberapa dekat hasil pengukuran sensor terhadap nilai sebenarnya (dapat diverifikasi melalui instrumen referensi), sementara presisi menyatakan konsistensi hasil pengukuran berulang pada kondisi yang sama, meskipun belum tentu mendekati nilai sebenarnya. Resolusi menyatakan perubahan konsentrasi terkecil yang masih dapat dibedakan oleh sensor.

9.2 Limit of Detection (LOD), Response Time, dan Recovery Time

Limit of Detection (LOD) adalah konsentrasi gas terendah yang masih dapat dideteksi secara andal oleh sensor, dibedakan dari noise pengukuran latar belakang, umumnya didefinisikan sebagai tiga kali simpangan baku (standar deviasi) sinyal pada kondisi tanpa gas target. Response time (t90) adalah waktu yang dibutuhkan sensor untuk mencapai 90% dari

nilai akhir pembacaannya setelah terpapar konsentrasi gas tertentu secara tiba-tiba, sementara recovery time adalah waktu yang dibutuhkan sinyal sensor kembali ke 90% mendekati nilai baseline setelah gas target dihilangkan.



Gambar 9.1. Kurva respons sensor terhadap waktu, menunjukkan response time (t90) saat paparan gas dan recovery time setelah gas dihilangkan.

9.3 Repeatability, Reproducibility, dan Stabilitas

Repeatability mengacu pada konsistensi hasil pengukuran ketika pengujian diulang pada sensor dan kondisi pengukuran yang sama persis dalam rentang waktu singkat. Reproducibility mengacu

pada konsistensi hasil antara sensor-sensor berbeda dari batch produksi yang sama, atau antara pengujian yang dilakukan pada waktu dan kondisi yang berbeda — parameter yang sangat penting bagi produsen sensor untuk menjamin kualitas produksi massal. Stabilitas mengacu pada konsistensi kinerja sensor dari waktu ke waktu dalam rentang bulan hingga tahun, berkaitan erat dengan fenomena drift dan aging yang telah disinggung pada Bab 5.

9.4 Hysteresis, Drift, Noise, dan Cross-sensitivity

Hysteresis menyatakan perbedaan pembacaan sensor pada konsentrasi gas yang sama namun dicapai dari arah berbeda (misalnya saat konsentrasi sedang naik dibanding sedang turun), umum terjadi pada sensor berbasis adsorpsi permukaan seperti MOS. Drift menyatakan pergeseran nilai baseline atau sensitivitas sensor secara

perlahan seiring waktu meski tanpa paparan gas target. Noise menyatakan fluktuasi acak pada sinyal output yang membatasi resolusi efektif sensor. Cross-sensitivity, sebagaimana disinggung pada bab-bab sebelumnya, menyatakan respons sensor terhadap gas selain gas target yang dimaksud, menjadi sumber utama kesalahan pengukuran pada sensor berselektivitas rendah.

9.5 Ketergantungan terhadap Temperatur, Kelembapan, dan Penuaan Sensor

Hampir seluruh parameter kinerja di atas — sensitivitas, response time, baseline — dipengaruhi oleh kondisi lingkungan operasi, terutama temperatur dan kelembapan relatif, dengan tingkat pengaruh yang berbeda-beda antarteknologi sensor (dibahas mendalam pada Bab 16). Penuaan sensor (aging) merupakan proses jangka

panjang yang tidak dapat sepenuhnya dihindari, namun dapat dikompensasi melalui kalibrasi ulang berkala (Bab 15) dan, pada sistem modern, melalui algoritma kompensasi drift berbasis machine learning (Bab 12).

9.6 Contoh Perhitungan Parameter Kinerja Sensor

Contoh Perhitungan 9.1: Sebuah sensor MOS menunjukkan resistansi pada udara bersih Ra = 10 kΩ, dan resistansi saat terpapar 100 ppm gas target Rs = 2 kΩ. Sensitivitas sensor terhadap gas reduktor tersebut dapat dihitung sebagai:

$$S = Ra / Rs = 10\ k\Omega / 2\ k\Omega = 5$$

Nilai S = 5 berarti resistansi sensor turun lima kali lipat pada konsentrasi 100 ppm dibanding kondisi udara bersih — semakin besar nilai S, semakin sensitif sensor terhadap gas target tersebut. Contoh

Perhitungan 9.2: Bila sensor yang sama menunjukkan simpangan baku sinyal sebesar 0,05 kΩ pada kondisi udara bersih tanpa gas target, dan hubungan antara resistansi dan konsentrasi diketahui linier dengan kemiringan 0,04 kΩ/ppm pada rentang rendah, maka estimasi Limit of Detection (LOD) dapat dihitung sebagai:

$$LOD = (3 \times 0{,}05\ k\Omega) / 0{,}04\ k\Omega/ppm = 3{,}75\ ppm$$

Sehingga sensor tersebut secara teoretis dapat diandalkan mendeteksi gas target pada konsentrasi serendah sekitar 3,75 ppm, di bawah nilai mana sinyal tidak lagi dapat dibedakan secara andal dari noise latar belakang.

Tabel 9.1. Parameter utama dan pendekatan evaluasi kinerja sensor gas.

Parameter	Makna	Pendekatan evaluasi
Sensitivity	Kemiringan respons terhadap perubahan konsentrasi	Kurva kalibrasi
Selectivity	Kemampuan membedakan gas target dari interferen	Uji target + interferen
LOD	Batas konsentrasi terendah yang dapat dibedakan dari noise	Blank/noise + metode statistik
Response/Recovery	Kecepatan mencapai dan meninggalkan respons	Uji step concentration
Repeatability	Konsistensi pada kondisi pengukuran berulang	Pengukuran berulang
Drift	Perubahan baseline/respons terhadap waktu	Long-term monitoring
Uncertainty	Rentang ketidakpastian hasil ukur	Budget ketidakpastian

Catatan Desain — Nilai satu metrik kinerja tidak boleh digunakan sendirian untuk menyatakan keberhasilan sensor. Evaluasi sebaiknya menggunakan kombinasi metrik dan kondisi pengujian yang terdokumentasi.

BAB 10
SISTEM INSTRUMENTASI SENSOR GAS

Bab ini menutup rangkaian pembahasan fondasi teknologi (Bab 4–9) dengan menunjukkan bagaimana sensor gas — betapapun canggihnya — hanyalah satu komponen dalam sebuah sistem instrumentasi yang lebih besar, mencakup rangkaian pengondisi sinyal, konversi digital, hingga pemrosesan data.

10.1 Dari Sensor Individual Menuju Sistem Pengukuran

Sebuah sensor gas, dilihat secara terisolasi, hanya menghasilkan perubahan besaran fisis mentah (resistansi, arus, atau tegangan kecil) yang belum dapat langsung diinterpretasikan sebagai nilai konsentrasi gas yang bermakna. Diperlukan rangkaian pendukung yang mengubah, memperkuat, menyaring, mendigitalkan, dan memproses

sinyal tersebut sebelum dapat ditampilkan kepada pengguna atau digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan otomatis (misalnya memicu alarm). Bab ini menguraikan setiap tahap dalam rantai instrumentasi tersebut secara berurutan.

10.2 Resistor Divider, Jembatan Wheatstone, Op-Amp, dan Instrumentation Amplifier

Untuk sensor resistif seperti MOS, rangkaian pembagi tegangan (voltage/resistor divider) merupakan metode paling sederhana untuk mengubah perubahan resistansi menjadi tegangan yang dapat dibaca mikrokontroler, dengan memasang resistor beban (load resistor) secara seri dengan sensor. Untuk pengukuran perubahan resistansi yang sangat kecil dengan presisi tinggi, rangkaian jembatan Wheatstone menawarkan sensitivitas lebih baik dengan

menyeimbangkan empat lengan resistif dan mengukur tegangan selisih di antaranya.

Sinyal keluaran dari sensor elektrokimia, yang umumnya berupa arus sangat kecil (orde nanoampere hingga mikroampere), memerlukan penguatan menggunakan penguat operasional (operational amplifier/op-amp) yang dikonfigurasi sebagai transimpedance amplifier untuk mengubah arus menjadi tegangan terukur. Instrumentation amplifier, varian op-amp presisi tinggi dengan impedansi input sangat besar dan penolakan derau mode-bersama (common-mode noise rejection) yang unggul, umum digunakan ketika sinyal sensor sangat lemah dan rentan terhadap interferensi elektromagnetik.

10.3 Filtering, ADC, dan DAC

Sinyal analog dari sensor umumnya mengandung derau frekuensi tinggi yang tidak relevan dengan perubahan konsentrasi

gas yang sebenarnya bersifat relatif lambat; filter low-pass analog atau digital digunakan untuk meredam derau ini sebelum atau sesudah proses digitalisasi. Analog-to-Digital Converter (ADC) mengonversi sinyal tegangan analog menjadi representasi digital yang dapat diproses mikrokontroler, dengan resolusi (jumlah bit) ADC menentukan seberapa halus tingkat konsentrasi gas yang dapat dibedakan sistem. Digital-to-Analog Converter (DAC), meski lebih jarang digunakan pada sisi input sensor, diperlukan pada beberapa aplikasi yang membutuhkan keluaran sinyal analog standar industri (misalnya 4–20 mA) untuk kompatibilitas dengan sistem kendali proses yang sudah ada.

10.4 Mikrokontroler: ESP32, Arduino, dan Raspberry Pi

Pemilihan platform pemrosesan bergantung pada kompleksitas aplikasi.

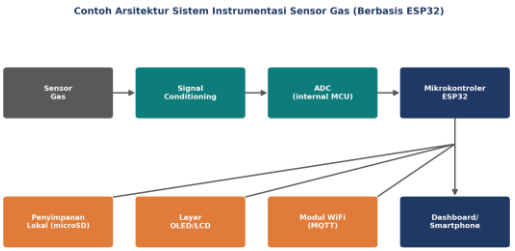
Arduino, dengan mikrokontroler berdaya rendah dan ekosistem pemrograman yang sederhana, cocok untuk purwarupa dan aplikasi edukasi dengan kebutuhan pemrosesan ringan. ESP32 menawarkan keunggulan tambahan berupa konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, menjadikannya pilihan populer untuk aplikasi IoT sensor gas (dibahas lebih lanjut pada Bab 13) sekaligus tetap hemat daya dan berbiaya rendah. Raspberry Pi, sebagai komputer papan tunggal (single-board computer) dengan kemampuan pemrosesan jauh lebih besar, cocok untuk aplikasi yang membutuhkan pemrosesan data kompleks di tepi jaringan (edge computing), termasuk menjalankan model machine learning yang lebih besar dibanding yang mampu dijalankan mikrokontroler kelas Arduino/ESP32.

10.5 Data Logger dan Arsitektur Sistem Instrumentasi

Untuk aplikasi pemantauan jangka panjang, data logger — baik berupa modul penyimpanan lokal (kartu microSD) maupun basis data pada server jarak jauh — menjadi komponen penting untuk merekam riwayat pengukuran, memungkinkan analisis tren, deteksi anomali, dan pemenuhan kebutuhan pelaporan regulasi. Arsitektur sistem instrumentasi sensor gas yang lengkap dapat digambarkan sebagai integrasi seluruh komponen yang telah dibahas: dari sensor dan rangkaian pengondisi sinyal analog, melalui ADC menuju mikrokontroler, dilengkapi penyimpanan data lokal dan/atau konektivitas jaringan menuju sistem yang lebih luas.

10.6 Contoh Rancangan Arsitektur Sistem Lengkap

Sebagai ilustrasi, Gambar 10.1 menunjukkan contoh arsitektur sistem instrumentasi sensor gas berbasis ESP32 yang mengintegrasikan seluruh komponen yang telah dibahas dalam bab ini: sensor gas (MOS atau elektrokimia) terhubung ke rangkaian pengondisi sinyal (pembagi tegangan atau transimpedance amplifier), diikuti ADC internal mikrokontroler, diproses oleh firmware yang melakukan kalibrasi dan kompensasi, disimpan sementara pada memori lokal, ditampilkan pada layar OLED/LCD, dan dikirimkan secara nirkabel ke platform cloud melalui protokol MQTT untuk dipantau melalui dashboard maupun aplikasi ponsel.



Gambar 10.1. Contoh arsitektur sistem instrumentasi sensor gas lengkap berbasis mikrokontroler ESP32.

Arsitektur semacam ini menjadi pola dasar (reference design) yang akan dijumpai kembali dalam berbagai bentuk pada pembahasan sensor array dan electronic nose (Bab 11), integrasi machine learning (Bab 12), sistem IoT (Bab 13), hingga studi kasus perancangan sistem sensor gas cerdas pada Bab 29.

Tabel 10.1. Lapisan arsitektur sistem instrumentasi sensor gas dan parameter desainnya.

Lapisan	Contoh komponen	Fungsi
Sensing	Sensor/MOS/EC/NDIR/array	Menghasilkan perubahan resistansi, arus, tegangan, atau sinyal optik
Analog Front-End	Divider, bridge, op-amp, filter	Menyesuaikan level, impedansi, dan bandwidth
ADC	ADC internal/eksternal	Mengubah sinyal analog menjadi data digital
Processing	ESP32/Arduino/Raspberry Pi	Filtering, feature extraction, calibration, inference
Storage/Communication	SD, Wi-Fi, MQTT, cloud	Penyimpanan dan transmisi data
Display/Decision	OLED, dashboard, alarm	Menyajikan hasil dan memicu tindakan

Catatan Desain — Kesalahan pada analog front-end, grounding, ADC reference, sampling, atau filtering dapat diteruskan hingga model AI. Karena itu validasi sistem perlu mencakup jalur analog dan digital secara end-to-end.

BAB 11
GAS SENSOR ARRAY DAN ELECTRONIC NOSE

Bab ini membuka Bagian Kedua buku yang berfokus pada kecerdasan sistem sensor gas, dimulai dari gagasan menggabungkan beberapa sensor sekaligus dalam satu array untuk mengatasi keterbatasan selektivitas sensor tunggal, hingga konsep electronic nose yang meniru mekanisme penciuman biologis.

11.1 Konsep Sensor Array dan Alasan Satu Sensor Tidak Cukup

Sebagaimana dibahas pada bab-bab sebelumnya, hampir seluruh teknologi sensor gas tunggal memiliki keterbatasan selektivitas — satu sensor MOS, misalnya, akan merespons berbagai gas mudah terbakar sekaligus, bukan hanya satu jenis gas target secara eksklusif. Ketika aplikasi menuntut kemampuan membedakan

beberapa jenis gas dalam satu lingkungan pengukuran, solusi satu sensor tunggal menjadi tidak memadai, betapapun sensitifnya sensor tersebut.

Gas sensor array mengatasi keterbatasan ini dengan menggabungkan beberapa sensor yang memiliki profil sensitivitas berbeda-beda terhadap berbagai jenis gas dalam satu sistem pengukuran. Alih-alih mengandalkan satu sensor 'sempurna' yang selektif terhadap satu gas, pendekatan array memanfaatkan pola respons kolektif dari seluruh sensor sebagai 'sidik jari' (fingerprint) yang unik untuk setiap jenis maupun campuran gas.

11.2 Cross-sensitivity dan Fingerprint Gas

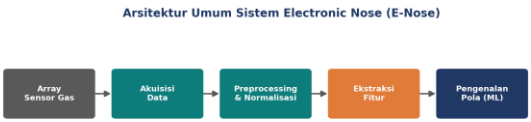
Cross-sensitivity, yang pada sensor tunggal dianggap sebagai kelemahan (sumber kesalahan pengukuran), justru menjadi aset berharga dalam konteks sensor

array. Setiap sensor dalam array merespons berbagai gas dengan intensitas dan pola yang berbeda-beda, sehingga kombinasi respons dari seluruh sensor pada suatu waktu tertentu membentuk pola multidimensi yang khas untuk jenis gas atau campuran gas tertentu — inilah yang disebut fingerprint gas.

Sebagai analogi, meskipun mata manusia tidak dapat membedakan seluruh warna hanya dari satu jenis reseptor cahaya, kombinasi respons tiga jenis reseptor warna (merah, hijau, biru) pada retina memungkinkan otak membedakan jutaan warna berbeda. Prinsip serupa mendasari gas sensor array: kombinasi beberapa sensor non-selektif dapat menghasilkan kemampuan diskriminasi yang jauh melampaui kemampuan sensor individual manapun.

11.3 Konsep Electronic Nose (E-Nose) dan Sensor Fusion

Electronic nose (e-nose) adalah sistem yang mengintegrasikan gas sensor array dengan algoritma pengenalan pola (pattern recognition) untuk meniru mekanisme penciuman biologis, di mana ratusan jenis reseptor olfaktori pada hidung mamalia bekerja secara kolektif untuk mengenali ribuan jenis aroma berbeda. Istilah 'sensor fusion' merujuk pada proses penggabungan data dari berbagai sensor (yang mungkin berbeda jenis teknologinya sekaligus, misalnya kombinasi MOS dan elektrokimia dalam satu array) menjadi satu representasi terpadu yang lebih informatif dibanding data sensor individual.



Gambar 11.1. Arsitektur umum sistem electronic nose: array sensor gas, akuisisi data, ekstraksi fitur, hingga pengenalan pola.

11.4 Feature Extraction dan Pattern Recognition

Data mentah dari sensor array — berupa deretan waktu (time series) sinyal dari setiap sensor — umumnya terlalu besar dan mengandung redundansi untuk langsung digunakan sebagai input algoritma klasifikasi. Tahap ekstraksi fitur (feature extraction) menyederhanakan data mentah ini menjadi sekumpulan nilai representatif yang lebih ringkas, seperti nilai puncak respons, luas area di bawah kurva respons, kemiringan (slope) kurva pada fase transien, atau nilai resistansi/arus pada saat kesetimbangan (steady-state) tercapai.

Fitur-fitur inilah yang kemudian menjadi input bagi algoritma pengenalan pola (pattern recognition), yang bertugas mengklasifikasikan atau memperkirakan konsentrasi gas berdasarkan pola fitur yang teramati — topik yang akan dibahas mendalam pada Bab 12.

11.5 PCA, LDA, Clustering, Klasifikasi, dan Regresi

Principal Component Analysis (PCA) merupakan teknik reduksi dimensi yang umum digunakan pada tahap awal analisis data e-nose, mentransformasikan data fitur berdimensi tinggi (dari banyak sensor) menjadi beberapa komponen utama yang menjelaskan sebagian besar variasi data, memudahkan visualisasi dan interpretasi pola pengelompokan gas secara visual dalam dua atau tiga dimensi. Linear Discriminant Analysis (LDA) serupa dengan PCA namun secara spesifik mengoptimalkan pemisahan

antarkelas gas yang telah diketahui labelnya, menjadikannya lebih efektif untuk tujuan klasifikasi dibanding PCA yang bersifat unsupervised.

Clustering (pengelompokan tanpa label, seperti k-means) berguna untuk eksplorasi data ketika label gas belum diketahui, sementara klasifikasi (dengan label) bertujuan mengategorikan sampel ke dalam kelas gas tertentu, dan regresi bertujuan memperkirakan nilai kontinu seperti konsentrasi gas secara kuantitatif. Ketiga pendekatan ini — beserta algoritma machine learning yang lebih kompleks — akan dibahas mendalam pada Bab 12.

11.6 Diagram Arsitektur Electronic Nose

Secara ringkas, arsitektur sistem electronic nose yang lengkap terdiri dari lima tahap berurutan: (1) paparan sampel gas ke seluruh sensor dalam array secara bersamaan, (2) akuisisi data time series dari

setiap sensor, (3) preprocessing (penghilangan derau, normalisasi, kompensasi baseline), (4) ekstraksi fitur dari data yang telah diproses, dan (5) klasifikasi atau regresi menggunakan model pengenalan pola yang telah dilatih sebelumnya. Kerangka ini menjadi dasar seluruh sistem e-nose modern, baik untuk aplikasi riset laboratorium maupun sistem komersial siap pakai, dan akan menjadi rujukan pada pembahasan aplikasi kesehatan (Bab 21) dan pangan (Bab 23).

Tabel 11.1. Tahapan pengembangan dataset dan sistem electronic nose.

Tahap	Input	Output utama	Risiko yang perlu dikendalikan
Akuisisi	Respons sensor + metadata	Raw sensor matrix	Noise, drift, kondisi lingkungan
Preprocessing	Raw matrix	Data terkoreksi/ternormalisasi	Over-processing, baseline bias
Feature extraction	Kurva respons	Feature vector	Fitur redundan
Modeling	Feature vector + label	Model klasifikasi/regresi	Overfitting
Validation	Data yang belum dilihat model	Metrik generalisasi	Data leakage

Untuk aplikasi kuantitatif, setiap sampel perlu memiliki pasangan data: vektor respons sensor dan nilai referensi konsentrasi. Untuk aplikasi klasifikasi, label harus didefinisikan sebelum proses pelatihan dan dipisahkan dari data uji. Pemisahan data pada tingkat sesi pengukuran lebih aman daripada membagi titik data yang berasal dari satu eksperimen secara acak, karena titik yang sangat berdekatan dapat menyebabkan kebocoran informasi (data leakage).

Keberhasilan electronic nose tidak hanya ditentukan oleh jumlah sensor, tetapi oleh keragaman respons sensor, kualitas label, kondisi akuisisi, dan representasi lingkungan. Dataset sebaiknya mencakup variasi konsentrasi gas, temperatur, kelembapan, batch sensor, serta kondisi baseline agar model tidak hanya mengenali pola eksperimen tertentu.

BAB 12
MACHINE LEARNING UNTUK SENSOR GAS

Melanjutkan konsep pattern recognition pada Bab 11, bab ini menguraikan secara lebih mendalam algoritma machine learning yang umum digunakan untuk mengolah data sensor gas, dari preprocessing dasar hingga arsitektur deep learning modern.

12.1 Preprocessing, Normalisasi, dan Feature Extraction

Sebelum data sensor gas dapat digunakan melatih model machine learning, serangkaian tahap preprocessing perlu dilakukan: penghilangan derau (denoising) menggunakan filter digital, koreksi baseline untuk mengompensasi drift sensor, dan normalisasi untuk menyetarakan rentang nilai antarsensor yang mungkin memiliki skala sangat berbeda (misalnya sensor MOS dengan resistansi orde kilo-ohm dibanding

sensor elektrokimia dengan arus orde mikroampere). Normalisasi umum dilakukan melalui teknik min-max scaling (menskalakan nilai ke rentang 0–1) atau standardisasi skor-z (mengubah data agar memiliki rata-rata nol dan simpangan baku satu).

12.2 PCA, LDA, k-NN, Decision Tree, Random Forest

Selain sebagai teknik reduksi dimensi (Bab 11), PCA dan LDA juga dapat berfungsi sebagai tahap preprocessing sebelum algoritma klasifikasi lain diterapkan. K-Nearest Neighbors (k-NN) adalah algoritma klasifikasi sederhana yang mengklasifikasikan sampel baru berdasarkan kelas mayoritas dari k sampel pelatihan terdekat dalam ruang fitur — mudah diimplementasikan namun kurang efisien untuk dataset besar. Decision tree membangun struktur keputusan bercabang

berdasarkan aturan ambang batas nilai fitur, menawarkan interpretabilitas tinggi (mudah dipahami manusia) namun rentan overfitting pada dataset kecil. Random forest mengatasi kelemahan ini dengan menggabungkan banyak decision tree yang dilatih pada subset data berbeda (teknik ensemble bagging), meningkatkan akurasi dan ketahanan terhadap overfitting secara signifikan.

12.3 SVM, ANN, CNN, RNN/LSTM, dan Ensemble Learning

Support Vector Machine (SVM) mencari bidang pemisah (hyperplane) optimal antarkelas dalam ruang fitur, efektif untuk dataset berdimensi tinggi dengan jumlah sampel terbatas — kondisi yang sering dijumpai pada eksperimen sensor gas skala laboratorium. Artificial Neural Network (ANN) memodelkan hubungan nonlinear kompleks antara fitur sensor dan

kelas/konsentrasi gas melalui lapisan neuron buatan yang saling terhubung, dengan bobot yang dipelajari dari data pelatihan.

Convolutional Neural Network (CNN), yang awalnya populer untuk pengolahan citra, juga dapat diterapkan pada data sensor gas dengan memperlakukan data time series multisensor sebagai citra dua dimensi (waktu × sensor), memungkinkan ekstraksi fitur otomatis tanpa perekayasaan fitur manual. Recurrent Neural Network (RNN) dan variannya Long Short-Term Memory (LSTM) dirancang khusus untuk data sekuensial seperti time series sensor gas, mampu menangkap pola temporal dan ketergantungan jangka panjang dalam data respons sensor. Ensemble learning, seperti gradient boosting, menggabungkan prediksi dari beberapa model sederhana untuk menghasilkan prediksi akhir yang lebih akurat dan stabil.

12.4 Klasifikasi vs Regresi dalam Estimasi Konsentrasi Gas

Terdapat perbedaan mendasar antara dua jenis tugas machine learning pada aplikasi sensor gas. Klasifikasi bertujuan menentukan kategori diskret, misalnya mengidentifikasi jenis gas yang hadir (metana, LPG, alkohol, atau kombinasinya) tanpa menyatakan nilai konsentrasi secara eksplisit. Regresi, di sisi lain, bertujuan memperkirakan nilai kontinu, misalnya estimasi konsentrasi gas dalam satuan ppm berdasarkan pola respons sensor array. Kedua pendekatan ini sering digunakan secara berurutan dalam sistem nyata: klasifikasi terlebih dahulu untuk menentukan jenis gas dominan, diikuti regresi khusus untuk gas tersebut guna memperkirakan konsentrasinya secara kuantitatif.

12.5 Estimasi Konsentrasi Gas Kuantitatif dengan Sensor Array dan ML

Salah satu kontribusi terpenting machine learning pada bidang sensor gas adalah memungkinkan estimasi konsentrasi kuantitatif menggunakan sensor-sensor yang secara individual bersifat non-selektif dan non-linier, seperti sensor MOS. Dengan melatih model regresi pada dataset yang mencakup berbagai kombinasi jenis gas dan konsentrasi (yang diukur menggunakan instrumen referensi sebagai ground truth), model dapat mempelajari pemetaan kompleks antara pola respons sensor array dan nilai konsentrasi yang sebenarnya — sesuatu yang mustahil dicapai hanya dengan persamaan kalibrasi linier sederhana pada sensor tunggal.

12.6 Evaluasi Model: Accuracy, Precision, Recall, F1-score, MAE, MSE, RMSE, R2

Tabel 12.1. Metrik evaluasi model machine learning untuk klasifikasi dan regresi.

Metrik	Jenis Tugas	Interpretasi
Accuracy	Klasifikasi	Proporsi prediksi benar dari total prediksi
Precision	Klasifikasi	Proporsi prediksi positif yang benar-benar positif
Recall	Klasifikasi	Proporsi kasus positif aktual yang berhasil terdeteksi
F1-score	Klasifikasi	Rata-rata harmonik precision dan recall
MAE	Regresi	Rata-rata besar kesalahan absolut prediksi
RMSE	Regresi	Akar rata-rata kuadrat kesalahan, sensitif terhadap outlier
R^2 (R-squared)	Regresi	Proporsi variasi data yang dijelaskan model (0–1)

Tabel 12.1 merangkum metrik evaluasi yang umum digunakan untuk menilai kinerja model machine learning pada aplikasi sensor gas. Untuk tugas klasifikasi, accuracy

menyatakan proporsi prediksi benar secara keseluruhan, sementara precision dan recall lebih relevan pada kasus kelas tidak seimbang (misalnya mendeteksi kebocoran gas berbahaya yang jarang terjadi namun kritis untuk tidak terlewat), dan F1-score menyeimbangkan keduanya. Untuk tugas regresi, Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE) menyatakan besarnya kesalahan prediksi dalam satuan yang sama dengan target (misalnya ppm), sementara koefisien determinasi (R^2) menyatakan seberapa baik model menjelaskan variasi data, dengan nilai mendekati 1 menandakan kecocokan model yang sangat baik.

Jenis tugas	Contoh keluaran	Metrik utama	Catatan
Klasifikasi	Jenis gas / kelas kondisi	Accuracy, Precision, Recall, F1	Perhatikan class imbalance
Regresi	Konsentrasi ppm	MAE, RMSE, R^2	Bandingkan dengan referensi
Deteksi anomali	Normal/abnormal	Precision, Recall, F1	Definisi abnormal harus jelas

Untuk regresi konsentrasi gas, MAE dan RMSE sebaiknya dilaporkan bersama R^2. Untuk klasifikasi, accuracy sebaiknya dilengkapi precision, recall, dan F1-score, terutama ketika jumlah sampel setiap kelas tidak seimbang.

Normalisasi dan transformasi parameter yang dihitung dari data training tidak boleh dihitung ulang menggunakan keseluruhan dataset sebelum pembagian data. Jika statistik seluruh dataset digunakan sejak awal, informasi dari data uji dapat masuk ke proses training dan menghasilkan estimasi performa yang terlalu optimistis.

Pipeline machine learning untuk sensor gas harus diperlakukan sebagai bagian dari

sistem pengukuran. Urutan preprocessing, normalisasi, feature extraction, pembagian data, training, validasi, dan pengujian perlu dicatat agar hasil dapat direproduksi.

BAB 13
IOT DAN SENSOR GAS CERDAS

Bab ini membahas bagaimana sensor gas terhubung ke dalam jaringan Internet of Things (IoT), memungkinkan pemantauan jarak jauh, notifikasi otomatis, dan integrasi dengan sistem yang lebih luas — pola yang telah disinggung pada arsitektur instrumentasi Bab 10.

13.1 Konsep IoT untuk Sensor Gas

Internet of Things (IoT) merujuk pada jaringan perangkat fisik yang dilengkapi sensor, perangkat lunak, dan konektivitas, memungkinkan pertukaran data melalui internet tanpa memerlukan interaksi manusia langsung pada setiap titik. Diterapkan pada sensor gas, IoT mentransformasikan perangkat yang sebelumnya berdiri sendiri (standalone) menjadi node dalam jaringan yang lebih

besar, memungkinkan data konsentrasi gas dari berbagai lokasi dikumpulkan, dianalisis, dan direspons secara terpusat maupun otomatis.

13.2 Konektivitas: Wi-Fi, Bluetooth, LoRa/LoRaWAN

Pemilihan teknologi konektivitas nirkabel bergantung pada kebutuhan aplikasi. Wi-Fi menawarkan bandwidth tinggi dan kemudahan integrasi dengan infrastruktur jaringan yang sudah ada, namun mengonsumsi daya relatif besar dan jangkauannya terbatas pada area sekitar titik akses (umumnya puluhan meter di dalam ruangan). Bluetooth, khususnya Bluetooth Low Energy (BLE), cocok untuk aplikasi jarak dekat dengan kebutuhan daya sangat rendah, seperti sensor gas wearable yang berkomunikasi dengan smartphone pengguna.

LoRa (Long Range) dan protokol jaringannya LoRaWAN menawarkan jangkauan sangat jauh (beberapa kilometer di area terbuka) dengan konsumsi daya sangat rendah, meski dengan bandwidth data yang terbatas — kombinasi karakteristik yang ideal untuk jaringan sensor gas terdistribusi skala luas seperti pemantauan kualitas udara kota atau jaringan sensor pertanian, di mana volume data per pembacaan kecil namun jangkauan dan umur baterai menjadi prioritas utama.

13.3 Protokol Komunikasi MQTT dan HTTP

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) merupakan protokol komunikasi ringan berbasis model publish-subscribe yang dirancang khusus untuk perangkat IoT dengan sumber daya terbatas dan koneksi jaringan yang mungkin tidak stabil. Dalam model ini, perangkat sensor (publisher)

mengirimkan data ke sebuah broker pusat pada topik tertentu, dan aplikasi lain yang berlangganan (subscriber) topik tersebut akan menerima data secara otomatis — arsitektur yang sangat efisien untuk skenario banyak sensor mengirim data ke banyak aplikasi pemantau sekaligus.

HTTP (Hypertext Transfer Protocol), protokol web yang lebih umum dikenal, juga dapat digunakan untuk komunikasi IoT melalui REST API, namun umumnya kurang efisien dibanding MQTT untuk pengiriman data telemetri berfrekuensi tinggi karena overhead header yang lebih besar pada setiap permintaan.

13.4 Cloud, Database, dan Dashboard Monitoring

Data yang dikirimkan sensor gas melalui jaringan IoT umumnya disimpan pada platform cloud, baik menggunakan layanan cloud komersial (seperti AWS IoT,

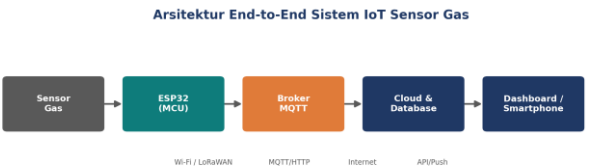
Google Cloud IoT, atau Azure IoT Hub) maupun server basis data yang dikelola sendiri. Basis data time series, yang dioptimalkan khusus untuk menyimpan dan mengambil data bertanda waktu dalam volume besar, umum digunakan untuk aplikasi pemantauan sensor gas berkelanjutan. Dashboard monitoring, baik berbasis web maupun aplikasi mobile, memvisualisasikan data ini dalam bentuk grafik tren, peta sebaran, atau indikator status secara real-time bagi pengguna akhir.

13.5 Mobile Monitoring, Alarm, dan Remote Monitoring

Integrasi dengan aplikasi mobile memungkinkan pengguna memantau kondisi gas dari mana saja, sekaligus menerima notifikasi push secara instan ketika konsentrasi gas melewati ambang batas yang telah ditentukan — kemampuan yang sangat berharga pada aplikasi

keselamatan seperti deteksi kebocoran LPG rumah tangga saat penghuni sedang tidak berada di rumah. Remote monitoring skala lebih besar, seperti pemantauan beberapa fasilitas industri sekaligus dari satu pusat kendali, turut dimungkinkan melalui arsitektur IoT yang sama, hanya berbeda pada skala jumlah node sensor yang terhubung.

13.6 Contoh Arsitektur: Sensor Gas–ESP32–MQTT–Cloud–Database–Dashboard–Smartphone



Gambar 13.1. Contoh arsitektur end-to-end sistem IoT sensor gas, dari sensor fisik hingga aplikasi pemantauan pengguna.

Gambar 13.1 mengilustrasikan alur data lengkap sistem IoT sensor gas: sensor gas

menghasilkan sinyal yang dibaca dan diproses awal oleh mikrokontroler ESP32, yang kemudian mengirimkan data terstruktur (umumnya dalam format JSON) ke broker MQTT melalui koneksi Wi-Fi. Broker meneruskan data ke layanan cloud yang menyimpannya dalam basis data time series, sekaligus memicu logika bisnis tambahan seperti pengecekan ambang alarm. Dashboard web dan aplikasi smartphone kemudian mengakses data ini — baik melalui langganan MQTT langsung maupun API basis data — untuk menampilkannya kepada pengguna akhir secara real-time, melengkapi arsitektur instrumentasi dasar yang telah diperkenalkan pada Bab 10.

Tabel 13.1. Lapisan arsitektur IoT sensor gas dan parameter desain.

Layer	Fungsi	Contoh	Parameter desain
Sensing	Akuisisi gas	MOS/EC/NDIR	Range, sensitivity, drift
Edge	Filtering & decision	ESP32/MCU	Latency, memory, power
Network	Transport data	Wi-Fi/LoRa/MQTT	Coverage, reliability
Platform	Storage & analytics	Database/cloud	Retention, security
Application	Monitoring & alarm	Dashboard/mobile	Threshold, notification

Data sensor sebaiknya disertai timestamp, identitas perangkat, satuan, status sensor, serta metadata temperatur dan kelembapan. Metadata tersebut penting untuk analisis drift dan audit kualitas data.

Untuk sistem yang menghasilkan alarm keselamatan, fungsi alarm lokal sebaiknya tidak bergantung sepenuhnya pada koneksi internet. Perangkat dapat tetap melakukan thresholding atau inferensi lokal, sedangkan cloud digunakan untuk logging, visualisasi, analitik, dan pemantauan jarak jauh.

Arsitektur IoT sensor gas harus dirancang berdasarkan kebutuhan keselamatan dan kontinuitas pengukuran, bukan hanya kemudahan menampilkan data. Jalur data dapat dibagi menjadi sensing layer, edge/device layer, network layer, platform/data layer, dan application layer.

Catatan Desain — IoT untuk Sistem Sensor Gas

BAB 14
EDGE AI DAN TINYML PADA SENSOR GAS

Melengkapi pembahasan IoT pada Bab 13, bab ini membahas pergeseran pemrosesan kecerdasan buatan dari cloud menuju perangkat tepi (edge), yang membuka kemampuan analitik cerdas bahkan pada sensor gas berdaya sangat rendah tanpa konektivitas internet konstan.

14.1 Edge Computing dan Edge AI

Edge computing merujuk pada paradigma pemrosesan data yang dilakukan sedekat mungkin dengan sumber data (di 'tepi' jaringan, yaitu pada perangkat itu sendiri atau gateway lokal), berlawanan dengan pendekatan cloud computing tradisional yang mengirimkan seluruh data mentah ke server pusat untuk diproses. Edge AI menerapkan prinsip ini secara spesifik

pada beban kerja kecerdasan buatan — menjalankan inferensi model machine learning langsung pada perangkat edge, bukan pada server cloud.

Manfaat utama edge AI pada sensor gas meliputi: latensi yang jauh lebih rendah (keputusan dapat diambil dalam hitungan milidetik tanpa menunggu round-trip komunikasi ke cloud), ketahanan terhadap gangguan konektivitas (sistem tetap dapat memicu alarm keselamatan meski koneksi internet terputus), pengurangan volume data yang perlu dikirimkan (hanya hasil inferensi yang dikirim, bukan seluruh data mentah), dan peningkatan privasi data.

14.2 Konsep TinyML pada Mikrokontroler

TinyML merupakan cabang edge AI yang secara spesifik berfokus pada menjalankan model machine learning pada perangkat dengan sumber daya sangat

terbatas — mikrokontroler berdaya rendah dengan memori RAM hanya puluhan hingga ratusan kilobyte dan tanpa unit pemrosesan grafis (GPU) khusus, seperti ESP32 atau seri mikrokontroler ARM Cortex-M. Kemampuan menjalankan inferensi machine learning pada perangkat sekecil dan sehemat daya ini membuka aplikasi sensor gas cerdas yang dapat beroperasi bertahun-tahun menggunakan baterai kecil, tanpa memerlukan koneksi cloud sama sekali untuk fungsi inti pendeteksiannya.

14.3 Model Compression dan Quantization

Model machine learning yang dilatih menggunakan framework standar (seperti TensorFlow atau PyTorch) pada komputer berdaya besar umumnya terlalu besar dan kompleks untuk langsung dijalankan pada mikrokontroler. Teknik model compression, seperti pruning (menghilangkan

bobot/koneksi neuron yang kontribusinya minimal terhadap akurasi model) dan quantization (mengurangi presisi numerik bobot model, misalnya dari representasi floating-point 32-bit menjadi integer 8-bit), memungkinkan ukuran model dipangkas secara drastis — sering kali hingga 4 hingga 10 kali lebih kecil — dengan penurunan akurasi yang relatif minimal jika dilakukan dengan cermat.

Framework seperti TensorFlow Lite for Microcontrollers menyediakan alat bantu terstandarisasi untuk melakukan konversi dan optimasi model machine learning agar dapat dijalankan pada mikrokontroler kelas ESP32 maupun yang lebih terbatas.

14.4 Inference Real-time dengan Daya Rendah

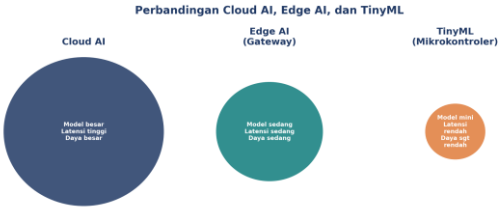
Dengan model yang telah dikompresi, inferensi (proses menghasilkan prediksi dari data baru menggunakan model yang telah

dilatih) dapat dilakukan langsung pada mikrokontroler dalam hitungan milidetik hingga puluhan milidetik, dengan konsumsi energi yang jauh lebih rendah dibanding mengirimkan data mentah secara terus-menerus ke cloud melalui radio Wi-Fi atau seluler — mengingat transmisi data nirkabel umumnya jauh lebih boros energi dibanding komputasi lokal pada mikrokontroler modern. Karakteristik inilah yang menjadikan TinyML sangat sesuai untuk sensor gas portabel bertenaga baterai yang perlu beroperasi dalam jangka waktu lama tanpa penggantian atau pengisian ulang baterai yang sering.

14.5 Perbandingan Cloud AI, Edge AI, dan TinyML

Tabel 14.1. Perbandingan Cloud AI, Edge AI, dan TinyML.

Aspek	Cloud AI	Edge AI (Gateway)	TinyML (Mikrokontroler)
Lokasi pemrosesan	Server cloud jarak jauh	Perangkat gateway lokal	Mikrokontroler pada sensor
Latensi	Tinggi (bergantung jaringan)	Sedang	Sangat rendah (real-time)
Konsumsi daya	Tinggi (transmisi data terus-menerus)	Sedang	Sangat rendah
Kompleksitas model	Sangat besar, tanpa batas praktis	Besar–sedang	Sangat terbatas (setelah kompresi)
Ketergantungan internet	Mutlak diperlukan	Sebagian diperlukan	Tidak diperlukan untuk inferensi



Gambar 14.1. Perbandingan konseptual arsitektur Cloud AI, Edge AI, dan TinyML berdasarkan lokasi pemrosesan, latensi, dan konsumsi daya.

Tabel 14.1 dan Gambar 14.1 merangkum perbedaan mendasar ketiga pendekatan ini. Pemilihan pendekatan yang tepat bergantung pada kebutuhan aplikasi: Cloud AI cocok ketika kompleksitas model sangat tinggi dan latensi bukan prioritas utama; Edge AI pada gateway lokal cocok untuk pemrosesan menengah dengan kebutuhan respons cepat; sementara TinyML pada mikrokontroler cocok untuk aplikasi sensor gas portabel berdaya rendah yang membutuhkan respons instan dan operasi mandiri tanpa bergantung konektivitas

jaringan — sebagaimana akan diterapkan pada studi kasus Bab 29.

Arsitektur	Pemrosesan	Kelebihan	Keterbatasan
Cloud AI	Cloud/server	Komputasi besar, model kompleks	Bergantung koneksi, latency
Edge AI	Gateway/perangkat edge	Latency rendah, data lokal	Resource terbatas
TinyML	Mikrokontroler	Sangat rendah latency & bandwidth	Model dan memori terbatas

Pada sistem sensor gas, preprocessing juga merupakan bagian dari beban komputasi. Pipeline yang terlalu kompleks dapat menghilangkan keuntungan latency yang diperoleh dari pemindahan model ke edge.

Quantization dan pruning dapat menurunkan kebutuhan komputasi, tetapi perubahan representasi numerik dapat memengaruhi akurasi. Oleh karena itu, model terkompresi perlu diuji kembali menggunakan dataset validasi yang mewakili kondisi operasional.

Pemilihan model TinyML tidak cukup berdasarkan accuracy. Model perlu dievaluasi sebagai sistem embedded dengan mempertimbangkan ukuran model,

penggunaan RAM/flash, waktu inference, konsumsi energi, dan stabilitas prediksi ketika kondisi lingkungan berubah.

Research Insight — Evaluasi Edge AI dan TinyML

BAB 15
KALIBRASI DAN VALIDASI SENSOR GAS

Menjadi bagian penutup dari rangkaian pembahasan sistem sensor cerdas pada Bagian III buku ini, bab ini kembali menegaskan prinsip fundamental yang telah disinggung berulang kali sejak Bab 5: betapapun canggih algoritma yang menyertainya, sensor gas tetap memerlukan kalibrasi berkala dan validasi yang cermat agar pembacaannya dapat dipercaya.

15.1 Mengapa Kalibrasi Sensor Gas Diperlukan?

Kalibrasi adalah proses membandingkan pembacaan sensor terhadap nilai referensi yang telah diketahui akurasinya (umumnya menggunakan gas standar bersertifikat atau instrumen analyzer presisi tinggi), kemudian menyesuaikan parameter konversi sensor agar

pembacaannya sesuai dengan nilai referensi tersebut. Kalibrasi diperlukan karena beberapa alasan: variasi kecil antarsensor akibat proses manufaktur (bahkan sensor dari model dan batch produksi yang sama dapat memiliki karakteristik sedikit berbeda), drift dan aging yang terjadi seiring waktu pemakaian (Bab 5, Bab 9), serta perubahan kondisi lingkungan operasi dibanding kondisi saat sensor pertama kali diproduksi atau dikalibrasi terakhir kali.

15.2 Zero Calibration dan Span Calibration

Zero calibration (kalibrasi titik nol) dilakukan dengan mengekspos sensor pada udara bersih atau gas nol (zero gas, bebas dari gas target) untuk menetapkan titik referensi baseline — nilai pembacaan sensor yang seharusnya menunjukkan konsentrasi nol. Span calibration (kalibrasi rentang) dilakukan dengan mengekspos sensor pada

gas standar berkonsentrasi diketahui (span gas) untuk menetapkan kemiringan (slope) kurva kalibrasi, memastikan sensor memberikan pembacaan yang benar pada rentang konsentrasi operasionalnya. Kedua langkah ini umumnya dilakukan berurutan — zero terlebih dahulu, diikuti span — untuk menghasilkan kurva kalibrasi dua titik yang layak digunakan pada rentang pengukuran linier.

15.3 Kalibrasi Satu Titik, Multititik, Dinamis, dan Adaptif

Kalibrasi satu titik (menggunakan hanya satu konsentrasi gas standar) merupakan pendekatan paling sederhana namun hanya valid jika hubungan antara sinyal sensor dan konsentrasi gas bersifat linier serta melalui titik asal (nol). Kalibrasi multititik menggunakan beberapa konsentrasi gas standar berbeda untuk memetakan kurva kalibrasi secara lebih

akurat, terutama penting untuk sensor dengan karakteristik respons nonlinier seperti sensor MOS. Kalibrasi dinamis dilakukan secara berkelanjutan atau berkala otomatis selama sensor beroperasi, sementara kalibrasi adaptif memanfaatkan algoritma (termasuk machine learning, Bab 12) untuk menyesuaikan parameter kalibrasi secara mandiri berdasarkan pola drift yang terdeteksi dari waktu ke waktu, tanpa memerlukan intervensi manual yang sering.

15.4 Instrumen Referensi, Ruang Kalibrasi, dan Gas Standar

Kalibrasi yang andal memerlukan instrumen referensi dengan akurasi jauh lebih tinggi dibanding sensor yang dikalibrasi — umumnya berupa gas analyzer presisi tinggi berbasis prinsip spektroskopi (Bab 7) yang telah tersertifikasi dan tertelusur (traceable) ke standar metrologi nasional maupun internasional. Ruang

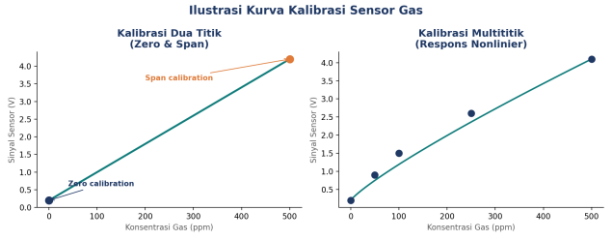
kalibrasi (calibration chamber) menyediakan lingkungan terkontrol di mana konsentrasi gas dapat diatur secara presisi dan homogen di sekitar sensor yang diuji, meminimalkan variabel pengganggu seperti aliran udara tidak merata atau kontaminasi eksternal. Gas standar (calibration gas), yang tersedia dalam tabung bertekanan dengan konsentrasi bersertifikat, menjadi sumber referensi konsentrasi gas yang akurat untuk proses span calibration.

15.5 Ketidakpastian (Uncertainty) dan Validasi

Setiap hasil pengukuran, betapapun cermat proses kalibrasinya, tetap mengandung ketidakpastian (uncertainty) yang perlu dikuantifikasi dan dilaporkan, mencerminkan rentang nilai di mana nilai sebenarnya kemungkinan besar berada. Sumber ketidakpastian meliputi ketidakpastian instrumen referensi itu

sendiri, variasi lingkungan selama proses kalibrasi, serta resolusi dan noise sensor yang dikalibrasi. Validasi, sebagai langkah terpisah dari kalibrasi, melibatkan pengujian independen terhadap sampel atau kondisi yang belum pernah digunakan selama proses kalibrasi, guna memastikan model kalibrasi (atau model machine learning pada sistem sensor array/e-nose) benar-benar mampu menggeneralisasi dengan baik pada kondisi baru, bukan sekadar menghafal data kalibrasi yang telah dilihat sebelumnya (fenomena overfitting yang telah disinggung pada Bab 12).

15.6 Contoh Desain Eksperimen Kalibrasi



Gambar 15.1. Ilustrasi kurva kalibrasi dua titik (zero dan span) serta kurva kalibrasi multititik untuk sensor dengan respons nonlinier.

Sebagai ilustrasi desain eksperimen kalibrasi multititik, sebuah sensor MOS dapat diuji pada lima tingkat konsentrasi gas standar berbeda (misalnya 0, 50, 100, 250, dan 500 ppm), masing-masing diulang tiga kali pengukuran untuk menilai repeatability, dengan setiap pengujian diberi jeda waktu recovery yang cukup agar sensor kembali ke baseline sebelum pengujian konsentrasi berikutnya. Data yang terkumpul kemudian digunakan menyusun kurva kalibrasi — baik melalui regresi linier sederhana pada rentang

yang cukup linier, maupun regresi nonlinier atau model machine learning bila karakteristik sensor menuntut pendekatan yang lebih kompleks — yang selanjutnya ditanamkan ke dalam firmware sistem sebagai fungsi konversi dari sinyal mentah menjadi nilai konsentrasi gas yang siap ditampilkan kepada pengguna.

Tabel 15.1. Metode kalibrasi dan karakteristik penggunaannya.

Metode	Tujuan	Kelebihan	Keterbatasan
Zero	Menetapkan baseline	Sederhana	Tidak menentukan slope
Span	Menetapkan respons pada referensi	Mendukung penyesuaian sensitivitas	Memerlukan gas/referensi
Multititik	Membangun hubungan respons–konsentrasi	Lebih representatif	Eksperimen lebih banyak
Adaptif	Mengikuti perubahan karakteristik sensor	Dapat mengurangi drift	Memerlukan data dan validasi kontinu

Untuk penelitian sensor gas berbasis machine learning, kalibrasi dan validasi sebaiknya dilaporkan bersama uncertainty,

repeatability, jumlah pengulangan, rentang konsentrasi, dan kondisi lingkungan.

Validasi dilakukan setelah model atau kurva kalibrasi dibangun. Data validasi sebaiknya berasal dari pengukuran yang tidak digunakan untuk menentukan parameter model. Dengan demikian, performa yang dilaporkan lebih mendekati kemampuan sistem pada kondisi yang belum dilihat.

Kalibrasi harus dibedakan dari sekadar mengatur sensor agar menghasilkan angka tertentu. Kalibrasi menghubungkan respons instrumen dengan nilai referensi melalui prosedur yang terdokumentasi. Kondisi gas, temperatur, kelembapan, waktu stabilisasi, laju aliran, dan instrumen referensi perlu dicatat.

BAB 16
PENGARUH LINGKUNGAN TERHADAP SENSOR GAS

Memasuki pembahasan aplikasi pada Bagian IV buku ini, bab ini menyatukan berbagai isu lingkungan yang telah disinggung sepintas pada bab-bab sebelumnya (Bab 2, 5, 9) menjadi pembahasan sistematis tersendiri, sebelum masuk ke rangkaian bab aplikasi multisektor.

16.1 Pengaruh Temperatur, Kelembapan, dan Tekanan

Temperatur lingkungan memengaruhi hampir seluruh jenis sensor gas, meski melalui mekanisme yang berbeda-beda. Pada sensor MOS, temperatur lingkungan yang berfluktuasi dapat mengganggu kestabilan temperatur operasi yang dijaga elemen pemanas, sementara pada sensor elektrokimia, temperatur memengaruhi laju

reaksi kimia dan viskositas elektrolit, umumnya mempercepat respons namun juga mempercepat degradasi pada temperatur tinggi. Kelembapan relatif memengaruhi sensor MOS melalui kompetisi molekul air dengan molekul gas target pada situs adsorpsi permukaan, dan memengaruhi sensor elektrokimia melalui perubahan konsentrasi elektrolit akibat penguapan atau penyerapan uap air. Tekanan atmosfer, meski pengaruhnya relatif kecil pada kebanyakan aplikasi permukaan bumi, dapat menjadi signifikan pada aplikasi dataran tinggi atau ruang bertekanan terkendali, memengaruhi laju difusi gas menuju permukaan sensor.

16.2 Pengaruh Aliran Udara, Debu, dan Kontaminasi

Kecepatan aliran udara di sekitar sensor memengaruhi laju penyediaan gas segar menuju permukaan sensitif, sehingga

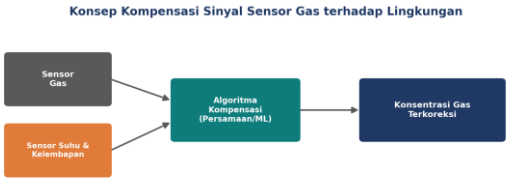
sensor yang sama dapat menunjukkan response time berbeda pada kondisi udara tenang dibanding kondisi berangin atau dekat sistem ventilasi. Debu dan partikulat dapat menempel pada permukaan sensor atau menyumbat membran berpori pada sensor elektrokimia, secara bertahap menurunkan sensitivitas dan memperlambat response time. Kontaminasi kimia dari senyawa lain di lingkungan — seperti silikon volatil yang umum ditemukan pada produk perawatan pribadi dan sealant — dapat meracuni (poisoning) katalis pada sensor katalitik maupun MOS secara permanen, kondisi yang dikenal sebagai sensor poisoning.

16.3 Sensor Poisoning, Aging, dan Environmental Drift

Sensor poisoning merujuk pada degradasi permanen kinerja sensor akibat paparan senyawa kimia tertentu yang

bereaksi ireversibel dengan material sensitif, berbeda dari drift dan aging alami (Bab 5, Bab 9) yang bersifat bertahap dan terkait waktu pemakaian. Silikon, sulfur, dan senyawa halogen tertentu dikenal sebagai racun umum bagi sensor katalitik dan beberapa jenis sensor MOS. Environmental drift merujuk pada pergeseran baseline sensor yang secara spesifik disebabkan oleh perubahan kondisi lingkungan jangka panjang (misalnya perubahan musim yang memengaruhi kelembapan rata-rata), yang perlu dibedakan secara analitis dari drift akibat penuaan material itu sendiri agar strategi kompensasi yang diterapkan tepat sasaran.

16.4 Metode Kompensasi Temperatur dan Kelembapan



Gambar 16.1. Konsep kompensasi sinyal sensor gas menggunakan data sensor temperatur dan kelembapan tambahan sebelum menghasilkan pembacaan konsentrasi gas terkoreksi.

Pendekatan paling umum untuk mengompensasi pengaruh lingkungan adalah menambahkan sensor temperatur dan kelembapan terpisah berdampingan dengan sensor gas utama, kemudian menerapkan faktor koreksi matematis (baik berupa persamaan empiris sederhana maupun model machine learning yang lebih kompleks, Bab 12) terhadap pembacaan sensor gas berdasarkan kondisi temperatur dan kelembapan yang terukur secara bersamaan. Beberapa sensor gas komersial

kelas industri bahkan telah mengintegrasikan kompensasi ini langsung pada tingkat firmware, menghasilkan pembacaan yang relatif stabil meski kondisi lingkungan operasional bervariasi. Pendekatan berbasis machine learning menawarkan keunggulan tambahan: model dapat mempelajari pola kompensasi yang jauh lebih kompleks dan spesifik terhadap karakteristik sensor individual dibanding persamaan koreksi generik, meski dengan kebutuhan data pelatihan yang representatif terhadap rentang kondisi lingkungan yang akan dihadapi sensor di lapangan.

Tabel 16.1. Faktor lingkungan, dampak terhadap sensor gas, dan strategi mitigasi.

Faktor	Dampak umum	Strategi mitigasi
Temperatur	Mengubah kinetics dan respons sensor	Kontrol temperatur / temperature compensation
Kelembapan	Mengubah adsorpsi dan konduktivitas	Humidity sensor + compensation
Tekanan	Mengubah densitas/difusi gas	Kompensasi tekanan / kontrol chamber
Aliran	Mengubah transport gas & response time	Kontrol flow rate
Debu/kontaminan	Menutupi atau merusak sensing layer	Filter, enclosure, maintenance

Environmental drift perlu dibedakan dari aging dan poisoning. Drift dapat bersifat reversibel atau mengikuti perubahan kondisi lingkungan, sedangkan aging berkaitan dengan perubahan karakteristik sensor sepanjang waktu dan poisoning dapat menyebabkan degradasi akibat kontaminan tertentu.

Strategi kompensasi dapat dilakukan secara fisik melalui pengendalian kondisi chamber,

secara instrumentasi melalui sensor temperatur/kelembapan tambahan, atau secara komputasional melalui regresi dan machine learning. Metode yang dipilih harus diuji pada kondisi yang berbeda dari data training.

Temperatur dan kelembapan sebaiknya diperlakukan sebagai variabel sistem, bukan sekadar gangguan. Pada eksperimen berbasis sensor array, keduanya dapat menjadi fitur tambahan, variabel kontrol, atau kovariat yang digunakan untuk membangun model kompensasi.

BAB 17
APLIKASI SENSOR GAS DI SEKTOR LINGKUNGAN

Bab pertama dari rangkaian bab aplikasi multisektor ini membahas peran sensor gas dalam pemantauan kualitas udara dan lingkungan — salah satu aplikasi dengan dampak sosial dan kesehatan masyarakat paling luas.

17.1 Kualitas Udara dan Polusi Udara Perkotaan

Polusi udara perkotaan, yang berasal dari emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, dan pembakaran biomassa, menjadi salah satu tantangan kesehatan masyarakat terbesar di banyak kota besar dunia, termasuk di Indonesia. Indeks Kualitas Udara (Air Quality Index/AQI), yang dihitung berdasarkan konsentrasi beberapa polutan utama, menjadi metrik umum yang dikomunikasikan kepada masyarakat untuk

memberikan gambaran sederhana mengenai tingkat risiko kesehatan dari kondisi udara pada waktu tertentu. Jaringan sensor gas yang tersebar di berbagai titik kota menjadi tulang punggung pengumpulan data yang mendasari perhitungan AQI ini.

17.2 Deteksi CO, CO2, NOx, SOx, O3, dan VOC

Beberapa polutan udara utama yang dipantau secara rutin meliputi karbon monoksida (CO) dari pembakaran tidak sempurna, karbon dioksida (CO2) sebagai indikator ventilasi dan gas rumah kaca, nitrogen oksida (NOx) dan sulfur oksida (SOx) dari pembakaran bahan bakar fosil dan aktivitas industri, ozon troposfer (O3) yang terbentuk dari reaksi fotokimia polutan lain di bawah sinar matahari, serta senyawa organik volatil (VOC) dari berbagai sumber termasuk pelarut industri dan emisi kendaraan. Setiap polutan ini memerlukan

teknologi sensor yang berbeda-beda — sebagaimana telah dibahas pada Bab 4 hingga Bab 8 — dipilih berdasarkan kebutuhan sensitivitas, selektivitas, dan biaya operasional jaringan pemantauan berskala luas.

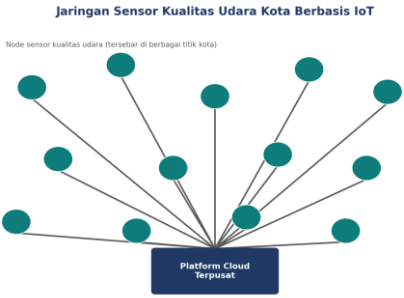
17.3 Gas Rumah Kaca dan Emisi Industri

Selain pemantauan kualitas udara untuk kesehatan masyarakat, sensor gas juga berperan penting dalam pemantauan emisi gas rumah kaca dari fasilitas industri untuk keperluan pelaporan regulasi dan verifikasi komitmen pengurangan emisi. Sistem Continuous Emission Monitoring System (CEMS), yang umumnya menggabungkan sensor NDIR presisi tinggi (Bab 7) dengan sistem sampling dan pencatatan data otomatis, menjadi standar industri untuk memantau emisi cerobong pabrik secara berkelanjutan dan real-time.

17.4 Smart City dan Pemantauan Kualitas Udara Dalam Ruangan (IAQ)

Konsep smart city mengintegrasikan jaringan sensor gas berbiaya rendah namun tersebar luas (memanfaatkan teknologi IoT yang telah dibahas pada Bab 13) untuk memberikan gambaran kualitas udara dengan resolusi spasial jauh lebih tinggi dibanding stasiun pemantauan pemerintah konvensional yang jumlahnya terbatas. Indoor Air Quality (IAQ), di sisi lain, berfokus pada pemantauan kualitas udara dalam ruangan — rumah, kantor, sekolah — di mana manusia modern menghabiskan sebagian besar waktunya, dengan perhatian khusus pada CO2 (indikator ventilasi), VOC, dan partikulat dari aktivitas memasak maupun produk rumah tangga.

17.5 Studi Kasus Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis IoT



Gambar 17.1. Konsep jaringan sensor kualitas udara terdistribusi berbasis IoT pada skala kota, mengintegrasikan berbagai titik pemantauan menuju satu platform terpusat.

Sebagai ilustrasi, sebuah sistem pemantauan kualitas udara kota berbasis IoT umumnya menggabungkan puluhan hingga ratusan node sensor berbiaya rendah (memanfaatkan sensor MOS dan elektrokimia yang telah dibahas pada Bab 5 dan Bab 6) yang tersebar di berbagai titik strategis, mengirimkan data secara berkala melalui jaringan LoRaWAN atau seluler menuju platform cloud terpusat. Data dari jaringan berbiaya rendah ini

umumnya dikalibrasi secara berkala terhadap beberapa stasiun referensi presisi tinggi (Bab 15) untuk menjaga akurasi keseluruhan jaringan, sebuah pendekatan yang menyeimbangkan cakupan spasial yang luas dengan akurasi pengukuran yang tetap dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

BAB 18
APLIKASI SENSOR GAS DI SEKTOR INDUSTRI

Bab ini membahas peran sensor gas dalam menjaga keselamatan pekerja dan efisiensi proses pada berbagai jenis industri, sektor yang secara historis menjadi pendorong utama perkembangan awal teknologi sensor gas (Bab 1).

18.1 Industri Manufaktur, Petrokimia, dan Refinery

Fasilitas manufaktur, petrokimia, dan kilang minyak (refinery) menangani berbagai bahan kimia dan hidrokarbon yang berpotensi mudah terbakar, toksik, atau eksplosif, menjadikan pemantauan gas sebagai komponen tak terpisahkan dari sistem keselamatan proses (process safety). Sensor gas tetap (fixed gas detector) yang dipasang permanen di titik-titik kritis seperti area perpipaan, tangki penyimpanan, dan

ruang kompresor, bekerja berdampingan dengan detektor gas portabel yang dibawa pekerja untuk memberikan lapisan perlindungan berlapis (layered protection) terhadap risiko kebocoran gas.

18.2 Industri Kimia, Pengolahan Pangan, dan Semikonduktor

Industri kimia sering menangani gas-gas berbahaya spesifik seperti klorin, amonia, dan berbagai pelarut organik volatil, memerlukan sensor elektrokimia dan NDIR dengan selektivitas tinggi (Bab 6, Bab 7) untuk memantau paparan pekerja sesuai standar keselamatan kerja. Industri pengolahan pangan memanfaatkan sensor gas untuk memantau proses fermentasi dan mendeteksi kebocoran gas pendingin (refrigerant) pada sistem pendingin skala besar. Industri semikonduktor, yang menggunakan berbagai gas proses berbahaya dalam jumlah kecil namun

konsentrasi tinggi (seperti silan dan arsin), memerlukan sistem deteksi kebocoran dengan sensitivitas sangat tinggi mengingat toksisitas ekstrem gas-gas tersebut bahkan pada konsentrasi sangat rendah.

18.3 Pengolahan Air Limbah, Boiler, dan Combustion Monitoring

Fasilitas pengolahan air limbah menghasilkan gas metana dan hidrogen sulfida sebagai produk sampingan proses anaerobik, memerlukan pemantauan berkelanjutan baik untuk keselamatan pekerja (H2S bersifat sangat toksik bahkan pada konsentrasi rendah) maupun potensi pemanfaatan biogas sebagai sumber energi (dibahas lebih lanjut pada Bab 19). Sistem boiler industri memanfaatkan sensor oksigen (Bab 6) untuk memantau dan mengoptimalkan rasio udara-bahan bakar pada proses pembakaran, meningkatkan efisiensi energi sekaligus menurunkan emisi

gas buang berbahaya seperti CO dan NOx — aplikasi combustion monitoring yang secara prinsip serupa dengan sensor oksigen otomotif yang akan dibahas pada Bab 20.

18.4 Deteksi Kebocoran Gas dan Keselamatan Industri



Gambar 18.1. Skema sistem deteksi kebocoran gas industri dengan sensor tetap di titik kritis dan alur eskalasi alarm.

Sistem deteksi kebocoran gas industri modern umumnya dirancang dengan pendekatan berjenjang: sensor tetap terus-menerus memantau area berisiko dan mengirimkan sinyal ke sistem kendali pusat, yang kemudian memicu serangkaian respons otomatis bertingkat — mulai dari peringatan visual dan suara lokal pada konsentrasi

rendah, hingga aktivasi sistem ventilasi darurat, penghentian otomatis proses (emergency shutdown), dan evakuasi pada konsentrasi yang lebih tinggi mendekati ambang bahaya. Redundansi sensor (memasang lebih dari satu sensor pada titik kritis yang sama) dan diagnostik mandiri (self-diagnostic) menjadi praktik umum untuk memastikan sistem tetap dapat diandalkan meski salah satu sensor mengalami kegagalan — topik yang akan dibahas lebih mendalam pada Bab 30 mengenai keandalan sistem.

BAB 19
APLIKASI SENSOR GAS DI SEKTOR ENERGI

Bab ini mengupas peran sensor gas dalam sektor energi, mulai dari bahan bakar konvensional seperti LPG dan gas alam, hingga hidrogen dan biogas yang menjadi tumpuan penting transisi energi menuju sumber yang lebih berkelanjutan.

19.1 LPG, LNG, dan Gas Alam

Liquefied Petroleum Gas (LPG) dan gas alam (baik dalam bentuk terkompresi/CNG maupun cair/LNG) menjadi sumber energi rumah tangga dan industri yang luas digunakan, namun sifatnya yang mudah terbakar menuntut pemantauan kebocoran yang ketat sepanjang rantai pasokan — mulai dari fasilitas produksi dan penyimpanan, jaringan distribusi pipa, terminal LNG, hingga titik

penggunaan akhir di rumah tangga dan industri. Sensor MOS dan katalitik (Bab 5, Bab 4) umum digunakan pada titik-titik ini karena kombinasi biaya terjangkau dan sensitivitas memadai terhadap hidrokarbon.

19.2 Hidrogen, Fuel Cell, dan Keselamatan Baterai

Hidrogen, yang semakin dilirik sebagai vektor energi bersih untuk transportasi dan penyimpanan energi terbarukan, memiliki karakteristik keselamatan unik: rentang mudah terbakar yang sangat lebar (4–75% volume di udara), energi penyulutan yang sangat rendah, dan molekul yang sangat kecil sehingga mudah bocor melalui celah yang tidak dapat dilalui gas lain. Karakteristik ini menuntut sensor hidrogen dengan response time sangat cepat dan sensitivitas tinggi pada konsentrasi rendah, di mana teknologi sensor konduktivitas termal (Bab 4) dan sensor

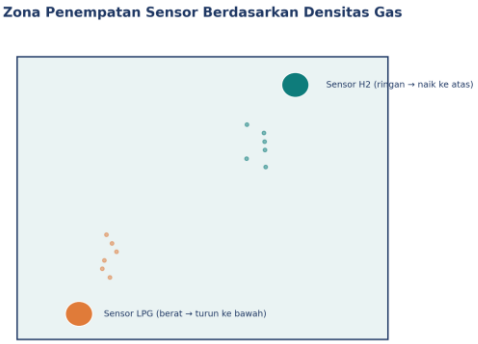
elektrokimia khusus hidrogen sering menjadi pilihan.

Sel bahan bakar (fuel cell) hidrogen, yang mengonversi hidrogen menjadi listrik melalui reaksi elektrokimia, memerlukan pemantauan kebocoran hidrogen di sekitar sistem sebagai bagian integral desain keselamatannya. Baterai litium-ion skala besar, yang semakin banyak digunakan pada kendaraan listrik dan penyimpanan energi stasioner, juga memerlukan pemantauan gas — sel baterai yang mengalami kegagalan termal (thermal runaway) melepaskan gas-gas mudah terbakar dan toksik sebagai tanda peringatan dini sebelum kebakaran terjadi, menjadikan deteksi gas dini sebagai lapisan keselamatan penting pada sistem penyimpanan energi baterai skala besar.

19.3 Biogas, Geothermal, dan Pembangkit Listrik

Biogas, yang dihasilkan dari proses anaerobik limbah organik (sebagaimana disinggung pada Bab 18), umumnya mengandung campuran metana, karbon dioksida, dan sejumlah kecil hidrogen sulfida yang bersifat korosif terhadap peralatan pembangkit. Pemantauan komposisi biogas secara akurat — memanfaatkan sensor NDIR untuk CH4/CO2 dan sensor elektrokimia untuk H2S — penting untuk mengoptimalkan efisiensi pembakaran sekaligus melindungi peralatan dari korosi. Pembangkit listrik geothermal menghadapi tantangan serupa dengan gas hidrogen sulfida yang secara alami terkandung dalam uap panas bumi, memerlukan pemantauan berkelanjutan baik untuk keselamatan pekerja maupun kepatuhan terhadap baku mutu emisi lingkungan.

19.4 Hydrogen Sensing dan Hydrogen Safety



Gambar 19.1. Ilustrasi zona penempatan sensor hidrogen pada fasilitas penyimpanan dan fuel cell, memperhitungkan sifat hidrogen yang ringan dan cenderung naik ke area atas ruangan.

Mengingat densitas hidrogen yang jauh lebih ringan dari udara, gas ini cenderung terakumulasi di bagian atas ruangan tertutup saat terjadi kebocoran — berbeda dari LPG yang lebih berat dari udara dan cenderung terakumulasi di bagian bawah. Perbedaan sifat fisik ini secara langsung memengaruhi strategi penempatan sensor: sensor hidrogen

idealnya dipasang mendekati langit-langit ruangan atau titik potensial akumulasi gas, sementara sensor LPG/gas alam lebih efektif dipasang mendekati lantai. Prinsip penempatan berbasis sifat fisik gas semacam ini merupakan pertimbangan praktis penting yang sering luput diperhatikan dalam perancangan sistem deteksi gas, namun sangat memengaruhi efektivitas sistem dalam mendeteksi kebocoran secara dini.

BAB 20
APLIKASI SENSOR GAS PADA OTOMOTIF

Menutup rangkaian lima bab aplikasi pertama, bab ini membahas peran sensor gas pada kendaraan bermotor — mulai dari sensor oksigen klasik yang telah digunakan puluhan tahun, hingga tantangan baru yang dihadirkan kendaraan listrik dan berbahan bakar hidrogen.

20.1 Emisi Gas Buang dan Proses Pembakaran

Proses pembakaran bahan bakar pada mesin kendaraan menghasilkan berbagai produk sampingan gas, termasuk karbon dioksida (produk pembakaran sempurna), karbon monoksida dan hidrokarbon tidak terbakar (produk pembakaran tidak sempurna), serta nitrogen oksida (terbentuk dari reaksi nitrogen dan oksigen udara pada temperatur pembakaran tinggi). Komposisi

gas buang ini sangat bergantung pada rasio udara terhadap bahan bakar yang masuk ke ruang bakar, menjadikan pemantauan dan pengendalian rasio ini sebagai kunci utama optimasi emisi dan efisiensi bahan bakar kendaraan modern.

20.2 Air-Fuel Ratio dan Oxygen Sensor

Sensor oksigen (oxygen sensor atau lambda sensor), yang dipasang pada sistem gas buang kendaraan, mengukur konsentrasi oksigen sisa dalam gas buang sebagai indikator tidak langsung dari rasio udara-bahan bakar yang terjadi selama pembakaran. Unit kendali mesin (Engine Control Unit/ECU) menggunakan sinyal dari sensor oksigen ini dalam skema kendali umpan balik (closed-loop feedback) untuk menyesuaikan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan secara real-time, menjaga rasio udara-bahan bakar tetap mendekati rasio stoikiometrik ideal yang meminimalkan

emisi sekaligus menjaga efisiensi pembakaran. Sensor oksigen otomotif pada dasarnya merupakan aplikasi sensor elektrokimia jenis potentiometrik (Bab 6) yang dirancang khusus untuk beroperasi pada temperatur gas buang yang tinggi.

20.3 Deteksi NOx, CO, CO2, dan HC

Selain sensor oksigen untuk kendali umpan balik, kendaraan modern — khususnya kendaraan bermesin diesel yang menghadapi standar emisi NOx yang ketat — juga dilengkapi sensor NOx khusus untuk memantau dan mengendalikan sistem pengurangan emisi katalitik selektif (Selective Catalytic Reduction/SCR). Pengujian emisi kendaraan (uji emisi berkala maupun uji tipe kendaraan baru) memanfaatkan analyzer gas presisi tinggi berbasis NDIR (Bab 7) untuk mengukur konsentrasi CO, CO2, dan hidrokarbon (HC) pada gas buang sebagai bagian dari

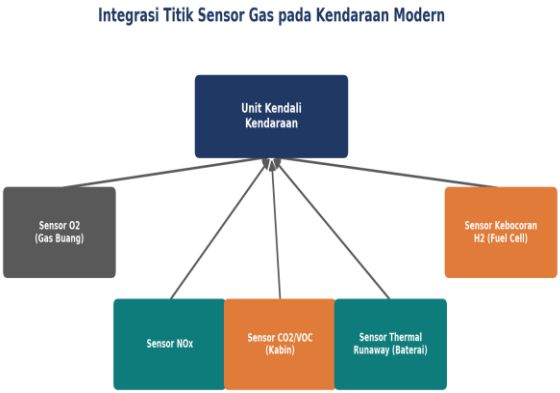
verifikasi kepatuhan terhadap baku mutu emisi yang ditetapkan regulasi.

20.4 Cabin Air Quality serta Keselamatan Baterai EV dan Kendaraan Hidrogen

Selain pemantauan gas buang, kendaraan modern juga semakin memperhatikan kualitas udara kabin (cabin air quality), memanfaatkan sensor CO2 dan VOC (Bab 4, Bab 7) untuk memicu sistem ventilasi otomatis yang menjaga kenyamanan dan kewaspadaan pengemudi, khususnya pada perjalanan jarak jauh di mana kadar CO2 kabin dapat terakumulasi akibat resirkulasi udara. Kendaraan listrik (EV) menghadapi kebutuhan baru berupa pemantauan gas thermal runaway pada paket baterai (sebagaimana disinggung pada Bab 19), sementara kendaraan berbahan bakar hidrogen memerlukan sistem deteksi kebocoran hidrogen yang terintegrasi dengan sistem keselamatan kendaraan

secara menyeluruh, mengingat karakteristik hidrogen yang sangat mudah terbakar dan cepat berdifusi.

20.5 Konsep Smart Fuel/Gas Monitoring System



Gambar 20.1. Konsep integrasi berbagai titik sensor gas pada kendaraan modern: gas buang, kabin, dan sistem baterai/hidrogen.

Kendaraan generasi mendatang cenderung mengintegrasikan berbagai titik sensor gas ini — gas buang, kabin, dan sistem

baterai/hidrogen — ke dalam satu arsitektur pemantauan terpadu yang terhubung dengan unit kendali kendaraan secara keseluruhan, memanfaatkan prinsip sensor fusion (Bab 11) dan bahkan machine learning (Bab 12) untuk mendeteksi pola anomali yang mengindikasikan masalah mekanis atau risiko keselamatan sejak dini, sebelum berkembang menjadi kegagalan sistem yang lebih serius. Tren ini mencerminkan pergeseran umum sensor gas otomotif dari komponen kendali emisi tunggal menuju bagian integral sistem keselamatan dan diagnostik kendaraan yang lebih luas.

BAB 21
APLIKASI SENSOR GAS DI BIDANG KESEHATAN

Bab ini mengupas salah satu aplikasi sensor gas yang paling menjanjikan sekaligus paling menuntut kehati-hatian ilmiah: pemanfaatan gas sebagai jendela non-invasif untuk memahami kondisi fisiologis manusia. Pembahasan disajikan lebih mendalam agar pembaca memahami baik potensi besar maupun batas-batas ilmiah yang wajib disadari sebelum bidang ini dapat digunakan secara klinis.

21.1 Napas Manusia sebagai Sumber Informasi Biokimia

Setiap hembusan napas manusia membawa lebih dari sekadar karbon dioksida dan uap air. Di dalamnya terkandung ratusan hingga ribuan senyawa organik volatil (Volatile Organic Compounds/VOC) dalam konsentrasi sangat

rendah — umumnya part-per-billion hingga part-per-trillion — yang berasal dari proses metabolisme sel di seluruh tubuh, berdifusi ke dalam aliran darah, kemudian dilepaskan melalui pertukaran gas di paru-paru. Komposisi VOC ini bersifat dinamis dan dapat berubah seiring kondisi fisiologis maupun patologis seseorang, menjadikannya sumber informasi biokimia yang menarik untuk dipelajari secara non-invasif — tanpa perlu pengambilan sampel darah atau jaringan.

Gagasan bahwa napas dapat mencerminkan kondisi kesehatan sebetulnya bukan hal baru; tenaga medis sejak lama mengenali bau napas manusia sebagai bau khas tertentu, misalnya bau manis buah pada penderita diabetes yang tidak terkontrol (akibat produksi aseton berlebih) atau bau amonia pada gagal ginjal. Yang membedakan pendekatan modern adalah upaya mengukur dan mengidentifikasi

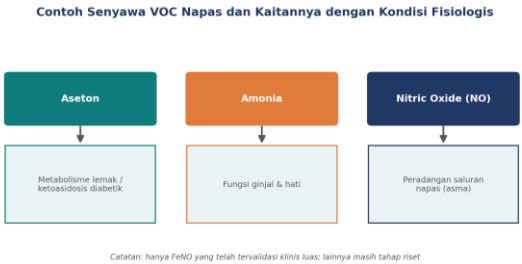
senyawa-senyawa ini secara objektif dan kuantitatif menggunakan instrumen, bukan sekadar mengandalkan penciuman manusia yang subjektif.

21.2 VOC sebagai Biomarker: Aseton, Amonia, dan Nitric Oxide

Beberapa senyawa VOC dalam napas telah diteliti secara ekstensif sebagai kandidat biomarker kondisi kesehatan tertentu. Aseton, yang terbentuk sebagai produk sampingan metabolisme lemak (ketogenesis), meningkat kadarnya dalam napas penderita diabetes yang mengalami ketoasidosis, maupun pada kondisi puasa berkepanjangan atau diet ketogenik — menjadikannya kandidat penanda pemantauan metabolisme glukosa non-invasif yang aktif diteliti. Amonia dalam napas berkaitan dengan fungsi ginjal dan hati; kadar amonia yang meningkat dapat mengindikasikan gangguan pada organ-

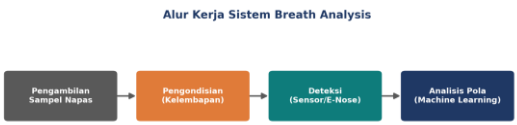
organ tersebut dalam memetabolisme senyawa nitrogen.

Nitric oxide (NO) dalam napas yang dihembuskan (fractional exhaled nitric oxide/FeNO) merupakan salah satu biomarker napas yang paling maju validasi klinisnya, digunakan secara luas sebagai indikator peradangan saluran napas pada penderita asma, bahkan telah tersedia sebagai alat bantu diagnostik komersial yang disetujui otoritas kesehatan di beberapa negara. Keberhasilan FeNO menjadi contoh penting bahwa validasi klinis yang ketat dan panjang memang mungkin dicapai untuk biomarker napas tertentu, meski jalannya panjang dan menuntut bukti ilmiah yang kuat.



Gambar 21.1. Contoh senyawa VOC napas dan kaitannya dengan kondisi fisiologis tertentu.

21.3 Prinsip Kerja Breath Analysis



Gambar 21.2. Alur kerja sistem breath analysis: pengambilan sampel napas, pemisahan/pengondisian, deteksi menggunakan sensor gas array, hingga analisis pola.

Secara umum, sistem breath analysis bekerja melalui beberapa tahap: pengumpulan sampel napas (umumnya bagian akhir hembusan napas atau alveolar breath yang dianggap paling mencerminkan komposisi

gas darah), pengondisian sampel (mengatasi kelembapan tinggi napas manusia yang dapat mengganggu banyak jenis sensor gas, sebagaimana dibahas pada Bab 16), deteksi menggunakan sensor tunggal terkalibrasi khusus (untuk biomarker spesifik seperti FeNO) atau sensor array/electronic nose (Bab 11) untuk pola VOC yang lebih kompleks, dan akhirnya analisis data — baik melalui perbandingan terhadap ambang batas klinis yang telah divalidasi, maupun melalui algoritma machine learning (Bab 12) yang mencari pola VOC terkait kondisi kesehatan tertentu.

Tantangan teknis breath analysis sangat besar: konsentrasi VOC target seringkali berada pada level part-per-billion atau lebih rendah, jauh di bawah kemampuan deteksi sensor MOS dan elektrokimia konvensional, menuntut sensor dengan sensitivitas sangat tinggi (sering kali mengandalkan teknologi nanomaterial dari

Bab 8) atau instrumen spektrometri massa presisi tinggi yang jauh lebih mahal dan tidak portabel.

21.4 Electronic Nose untuk Skrining Awal Berbasis Napas

Berbagai kelompok riset di seluruh dunia telah mengeksplorasi penggunaan electronic nose (Bab 11) untuk skrining awal berbagai kondisi kesehatan berdasarkan pola VOC napas, mulai dari penyakit paru obstruktif kronis, kanker paru, infeksi saluran napas, hingga gangguan metabolik. Pendekatan ini menarik karena berpotensi menyediakan alat skrining yang cepat, murah, dan non-invasif dibanding metode diagnostik konvensional yang sering memerlukan pencitraan atau prosedur invasif.

Meski demikian, penting dipahami bahwa mayoritas penelitian di bidang ini masih berada pada tahap eksplorasi ilmiah

(proof of concept) dengan ukuran sampel penelitian yang relatif kecil, sehingga hasil yang menjanjikan pada satu studi belum tentu tereplikasi secara konsisten pada populasi yang lebih luas dan beragam. Variabilitas antarindividu (usia, pola makan, kebiasaan merokok, obat-obatan yang dikonsumsi) turut memengaruhi komposisi VOC napas, menambah kompleksitas dalam membangun model yang benar-benar generalisasi dengan baik di luar kondisi penelitian awal.

21.5 Wearable Gas Sensing untuk Pemantauan Kesehatan

Selain analisis napas dalam satu waktu pengukuran (snapshot), perkembangan sensor gas fleksibel dan wearable (Bab 4, Bab 26) membuka kemungkinan pemantauan paparan gas atau kondisi metabolik secara berkelanjutan sepanjang hari, misalnya melalui sensor yang

ditempelkan pada masker, dipasang pada pakaian, atau diintegrasikan pada perangkat wearable seperti gelang atau jam pintar. Pemantauan berkelanjutan semacam ini berpotensi menangkap fluktuasi kondisi kesehatan dari waktu ke waktu yang mungkin terlewat pada pengukuran sesaat, meski dengan tantangan tambahan berupa stabilitas jangka panjang sensor pada kondisi pemakaian nyata (bukan laboratorium terkontrol) dan konsumsi daya untuk operasi berkelanjutan.

21.6 Batasan Ilmiah: Bukan Alat Diagnosis Medis Tanpa Validasi Klinis dan Regulasi

Poin ini perlu ditekankan secara eksplisit dan berulang: sistem breath analysis maupun electronic nose berbasis sensor gas — betapapun menjanjikan hasil awal penelitiannya — tidak dapat dan tidak boleh digunakan sebagai alat diagnosis

medis definitif tanpa melalui proses validasi klinis yang ketat (uji klinis terkontrol pada populasi yang cukup besar dan beragam) serta memperoleh izin edar dari otoritas regulasi kesehatan yang berwenang di suatu negara. Kegagalan membedakan antara 'sensor yang menunjukkan korelasi menjanjikan pada penelitian awal' dengan 'alat diagnostik yang telah tervalidasi secara klinis' dapat berakibat serius, mulai dari kesalahan diagnosis, penundaan penanganan medis yang sebenarnya diperlukan, hingga kecemasan yang tidak berdasar pada penggunanya.

Untuk peneliti yang tertarik mengembangkan sistem sensor gas untuk aplikasi kesehatan, sikap ilmiah yang jujur menuntut kejelasan dalam mengomunikasikan bahwa purwarupa penelitian bersifat eksploratif dan edukatif, bukan produk medis siap pakai, hingga melalui tahapan validasi dan regulasi yang

semestinya — sebuah prinsip kehati-hatian yang konsisten dengan semangat buku ini sejak pembahasan keterbatasan sensor MQ pada Bab 5.

BAB 22
APLIKASI SENSOR GAS DI PERTANIAN DAN PETERNAKAN

Bab ini menguraikan bagaimana sensor gas berkontribusi pada modernisasi sektor pertanian dan peternakan, mulai dari optimalisasi lingkungan tumbuh tanaman di rumah kaca hingga pemantauan kesejahteraan hewan ternak — bidang yang secara kolektif dikenal sebagai smart agriculture atau precision farming.

22.1 Greenhouse dan Gas Terkait Tanah (NH3, CH4, CO2)

Rumah kaca (greenhouse) modern semakin mengandalkan sistem kendali lingkungan otomatis untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman, dan konsentrasi karbon dioksida menjadi salah satu parameter kunci yang dipantau secara ketat. Tanaman menyerap CO2 melalui fotosintesis, sehingga konsentrasinya di

dalam rumah kaca tertutup dapat menurun signifikan pada siang hari saat aktivitas fotosintesis tinggi, khususnya bila ventilasi terbatas. Banyak operasi rumah kaca komersial bahkan secara sengaja menambahkan CO2 (CO2 enrichment/fertilization) hingga konsentrasi 800–1200 ppm — jauh di atas konsentrasi atmosfer normal sekitar 420 ppm — untuk meningkatkan laju fotosintesis dan hasil panen, menjadikan sensor NDIR CO2 (Bab 7) sebagai instrumen kendali proses yang esensial, bukan sekadar alat pemantauan pasif.

Amonia (NH3), yang umumnya berasal dari dekomposisi bahan organik atau pemupukan nitrogen berlebih dalam media tanam, perlu dipantau karena konsentrasi tinggi dapat meracuni akar tanaman dan mengganggu penyerapan nutrisi. Metana (CH4), meski kurang umum menjadi perhatian langsung pada rumah kaca

tanaman, relevan pada sistem pertanian terintegrasi yang menggabungkan pengolahan limbah organik (composting) di sekitar area budidaya, di mana pemantauannya membantu mengelola proses dekomposisi secara optimal sekaligus mencegah pelepasan gas rumah kaca berlebih ke atmosfer (Bab 2).

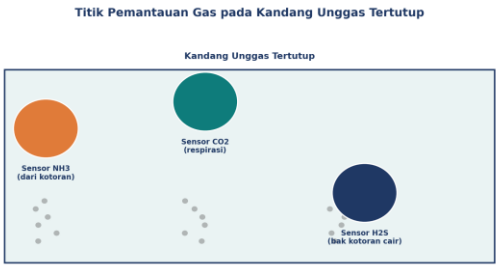
22.2 Etilen dan Pemantauan Kematangan Buah

Etilen (C_2H_4) merupakan hormon tumbuhan gas yang berperan sentral dalam proses pematangan buah, penuaan bunga, dan gugurnya daun. Buah-buahan klimakterik seperti pisang, mangga, alpukat, dan tomat menghasilkan lonjakan produksi etilen secara mandiri saat memasuki fase pematangan, yang kemudian memicu serangkaian perubahan biokimia seperti pelunakan tekstur, perubahan warna, dan peningkatan kadar gula. Pemantauan

konsentrasi etilen di ruang penyimpanan pascapanen menjadi krusial secara komersial: konsentrasi etilen yang tidak terkendali dapat mempercepat pematangan secara tidak merata atau bahkan menyebabkan pembusukan dini pada seluruh stok buah dalam satu ruang penyimpanan akibat efek 'satu buah busuk merusak yang lain' yang dimediasi gas etilen ini.

Deteksi etilen pada konsentrasi rendah (part-per-billion) menjadi tantangan tersendiri karena molekul etilen berukuran kecil dan reaktivitas kimianya relatif rendah dibanding banyak VOC lain, menuntut sensor dengan sensitivitas dan selektivitas khusus — area di mana sensor berbasis nanomaterial (Bab 8) menunjukkan potensi menjanjikan dibanding sensor MOS konvensional.

22.3 Pemantauan Kandang Unggas dan Peternakan



Gambar 22.1. Titik-titik pemantauan gas pada kandang unggas tertutup: amonia, karbon dioksida, dan hidrogen sulfida dari kotoran ternak.

Kandang unggas dan fasilitas peternakan tertutup menghadapi tantangan kualitas udara yang signifikan akibat akumulasi gas dari kotoran hewan dalam kepadatan tinggi. Amonia, yang terbentuk dari penguraian nitrogen dalam kotoran unggas, menjadi perhatian utama karena konsentrasi tinggi (di atas sekitar 25 ppm menurut berbagai pedoman kesejahteraan hewan) dapat mengiritasi saluran pernapasan unggas, menurunkan produktivitas, meningkatkan

kerentanan terhadap penyakit pernapasan, dan pada konsentrasi sangat tinggi membahayakan pekerja kandang itu sendiri. Karbon dioksida, yang terakumulasi dari respirasi hewan dalam kepadatan tinggi dan ventilasi terbatas (khususnya pada malam hari saat sistem ventilasi sering dikurangi untuk menghemat energi pemanasan), menjadi indikator penting kecukupan pertukaran udara kandang.

Hidrogen sulfida, yang terbentuk dari dekomposisi anaerobik kotoran ternak yang terendam cairan (umum pada sistem pembuangan kotoran cair/slurry), berbahaya tidak hanya bagi hewan ternak namun juga menjadi risiko fatal bagi pekerja yang melakukan pengadukan atau pembersihan bak penampungan kotoran cair — H2S dapat terlepas dalam konsentrasi sangat tinggi secara tiba-tiba saat cairan teraduk, sebuah risiko keselamatan kerja yang nyata dan telah menyebabkan kematian pekerja

peternakan di berbagai belahan dunia, menjadikan sistem alarm gas portabel sama pentingnya di sektor ini seperti pada sektor pertambangan (Bab 25).

22.4 Smart Agriculture Berbasis Sensor Gas

Integrasi sensor gas dengan platform IoT (Bab 13) memungkinkan pemantauan kondisi rumah kaca dan kandang ternak secara otomatis dan real-time, dengan sistem yang dapat memicu tindakan otomatis — misalnya mengaktifkan kipas ventilasi ketika kadar amonia atau CO2 melewati ambang batas tertentu — tanpa memerlukan pemantauan manual terus-menerus oleh petugas. Pendekatan precision farming ini semakin banyak diadopsi karena tiga alasan utama: peningkatan produktivitas melalui kondisi lingkungan tumbuh yang senantiasa optimal, pengurangan biaya operasional melalui otomasi yang mengurangi

kebutuhan tenaga kerja untuk pemantauan manual, serta perbaikan kesejahteraan hewan (animal welfare) yang semakin menjadi tuntutan pasar dan regulasi di banyak negara.

Tantangan penerapan sensor gas pada lingkungan pertanian dan peternakan meliputi kondisi operasi yang jauh lebih keras dibanding laboratorium — kelembapan tinggi, debu organik, dan kadar amonia korosif yang dapat mempercepat degradasi sensor (fenomena environmental drift dan poisoning yang dibahas pada Bab 16) — menuntut perhatian khusus pada pemilihan sensor tahan lingkungan serta jadwal kalibrasi dan penggantian yang lebih sering dibanding aplikasi indoor yang lebih terkendali.

BAB 23
APLIKASI SENSOR GAS DI BIDANG PANGAN

Bab ini membahas peran sensor gas dalam menjaga keamanan dan kualitas pangan, dari deteksi pembusukan dini hingga pemantauan proses fermentasi, sebuah bidang yang menghubungkan prinsip electronic nose (Bab 11) dengan kebutuhan praktis industri pangan sehari-hari.

23.1 Deteksi Kesegaran dan Pembusukan Pangan (Spoilage)

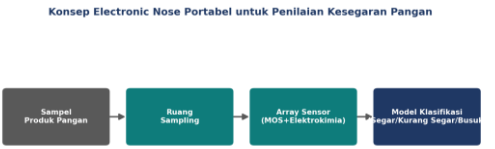
Proses pembusukan pangan — baik akibat aktivitas mikroorganisme (bakteri, kapang, khamir) maupun reaksi kimia enzimatik alami dalam bahan pangan itu sendiri — secara konsisten menghasilkan pelepasan senyawa volatil sebagai produk sampingan metabolisme. Senyawa-senyawa inilah yang menjadi dasar bau khas yang kita kenali sebagai tanda makanan mulai atau

telah membusuk, dan menjadi target deteksi sensor gas dalam aplikasi pangan. Berbeda dari indikator kesegaran pangan konvensional yang mengandalkan inspeksi visual atau uji laboratorium destruktif (yang merusak sampel dan memerlukan waktu), deteksi berbasis gas menawarkan potensi pengujian non-destruktif yang dapat dilakukan cepat, bahkan berkelanjutan.

Setiap jenis pangan cenderung memiliki profil senyawa volatil pembusukan yang khas, dipengaruhi oleh komposisi biokimia bahan pangan tersebut dan jenis mikroorganisme yang dominan tumbuh pada kondisi penyimpanannya. Pemahaman profil spesifik ini menjadi dasar perancangan sistem deteksi kesegaran yang disesuaikan untuk jenis pangan tertentu, alih-alih menggunakan pendekatan generik untuk semua jenis produk.

23.2 VOC dan Electronic Nose untuk Daging, Ikan, Buah, Sayur

Pada produk daging dan ikan, pembusukan oleh bakteri menghasilkan senyawa nitrogen volatil seperti amonia dan berbagai senyawa amina biogenik (termasuk trimetilamina yang menjadi penanda klasik pembusukan ikan, bertanggung jawab atas bau amis yang menyengat pada ikan tidak segar), serta senyawa sulfur volatil seperti hidrogen sulfida dan metil merkaptan yang menghasilkan bau busuk khas. Sensor elektrokimia untuk amonia dan H2S (Bab 6), maupun sensor MOS yang sensitif terhadap senyawa nitrogen dan sulfur (Bab 5), umum digunakan sebagai basis sistem deteksi kesegaran daging dan ikan berbiaya relatif terjangkau.



Gambar 23.1. Konsep sistem electronic nose portabel untuk penilaian kesegaran produk pangan di titik distribusi atau ritel.

Pada buah dan sayur, selain etilen yang telah dibahas pada Bab 22 sebagai penanda pematangan alami, pembusukan lanjut oleh kapang dan bakteri menghasilkan berbagai VOC tambahan seperti alkohol dan ester dari proses fermentasi tidak terkendali, maupun senyawa dengan bau apek/berjamur yang khas. Electronic nose yang dilatih mengenali kombinasi pola VOC dari berbagai kelas senyawa ini (bukan hanya satu senyawa tunggal) umumnya menunjukkan akurasi klasifikasi tingkat kesegaran yang lebih baik dibanding sensor tunggal, sejalan dengan prinsip sensor array yang telah dibahas pada Bab 11.

23.3 Pemantauan Fermentasi dan Pengemasan Pangan

Berbeda dari konteks pembusukan yang tidak diinginkan, banyak proses produksi pangan justru sengaja memanfaatkan fermentasi terkendali — pembuatan tempe, tape, yoghurt, keju, kecap, hingga minuman fermentasi seperti bir dan anggur — di mana pemantauan gas menjadi alat kendali proses yang berharga. Produksi CO2 oleh ragi selama fermentasi alkohol, misalnya, dapat dipantau sebagai indikator tidak langsung laju dan tahap fermentasi, membantu produsen menentukan waktu optimal untuk menghentikan atau melanjutkan proses fermentasi guna mencapai karakteristik produk yang diinginkan.

Pada pengemasan pangan modern, teknologi Modified Atmosphere Packaging (MAP) — yang mengatur komposisi gas di dalam kemasan (umumnya kombinasi CO2,

N2, dan O2 dalam proporsi tertentu) untuk memperpanjang umur simpan produk — memerlukan verifikasi komposisi gas kemasan baik pada tahap produksi (quality control) maupun sebagai indikator kebocoran kemasan yang dapat dideteksi melalui perubahan komposisi gas dari nilai target yang telah ditetapkan.

23.4 Contoh Sistem E-Nose untuk Industri Pangan

Sebagai ilustrasi penerapan menyeluruh, sebuah sistem electronic nose untuk industri pangan skala menengah umumnya mengombinasikan beberapa elemen: array sensor gas (kombinasi MOS dan elektrokimia untuk mencakup rentang senyawa volatil yang luas), ruang sampling terkendali (memastikan volume udara dan waktu paparan yang konsisten antarpengukuran untuk menjaga reproduksibilitas, Bab 9), serta model

klasifikasi machine learning (Bab 12) yang telah dilatih menggunakan sampel produk pada berbagai tingkat kesegaran yang diverifikasi secara independen melalui metode laboratorium konvensional sebagai ground truth.

Sistem semacam ini dapat diterapkan pada beberapa titik dalam rantai pasok pangan: di fasilitas produksi sebagai kendali mutu sebelum produk dikirim, di pusat distribusi sebagai verifikasi kondisi produk yang diterima, maupun di titik ritel sebagai alat bantu keputusan penarikan produk yang mendekati akhir masa simpan — meski, sebagaimana ditekankan pada pembahasan aplikasi kesehatan di Bab 21, sistem berbasis sensor gas berbiaya rendah sebaiknya diposisikan sebagai alat bantu skrining awal yang mempercepat dan mengefisienkan proses, bukan pengganti mutlak standar keamanan pangan yang telah ditetapkan regulasi (seperti uji mikrobiologi

laboratorium) untuk keputusan kritis terkait keamanan konsumen.

BAB 24
APLIKASI SENSOR GAS DI RUMAH TANGGA DAN SMART HOME

Bab ini membahas aplikasi sensor gas yang paling dekat dengan kehidupan sehari-hari pembaca: sistem keselamatan dan kenyamanan rumah tangga, mulai dari alarm kebocoran LPG sederhana hingga integrasi penuh dalam ekosistem smart home modern.

24.1 Deteksi Kebocoran LPG, CO, dan Asap

Alarm kebocoran gas LPG merupakan salah satu aplikasi sensor gas rumah tangga paling mendasar dan telah menyelamatkan banyak nyawa sejak diperkenalkan secara luas. Perangkat ini umumnya mengandalkan sensor MOS (Bab 5) berbiaya rendah yang dipasang mendekati lantai dapur — sesuai prinsip penempatan berdasarkan densitas gas yang telah dibahas pada Bab 19,

mengingat LPG lebih berat dari udara dan cenderung terkumpul di area rendah ruangan saat bocor. Detektor karbon monoksida (CO), yang idealnya dipasang di dekat perangkat pembakaran bahan bakar seperti pemanas air gas atau di area kamar tidur, memberikan perlindungan terhadap risiko keracunan CO yang tidak berbau dan tidak berwarna — salah satu penyebab kematian akibat gas yang paling banyak terjadi secara tidak sengaja di rumah tangga di seluruh dunia.

Detektor asap (smoke detector), meski secara ketat bukan sensor gas dalam pengertian mendeteksi molekul gas spesifik (melainkan mendeteksi partikel asap melalui prinsip optik hamburan cahaya atau ionisasi), sering diintegrasikan dalam satu unit bersama sensor CO pada produk komersial modern, memberikan perlindungan ganda terhadap risiko

kebakaran dan keracunan gas dalam satu perangkat terpadu.

24.2 Indoor Air Quality pada Smart Kitchen dan Smart Building

Selain fungsi keselamatan darurat, sensor gas modern pada rumah tangga dan bangunan pintar (smart building) juga berperan dalam pemantauan kualitas udara sehari-hari secara berkelanjutan. Dapur, sebagai sumber utama polutan udara dalam ruangan rumah tangga (dari aktivitas memasak, khususnya menggunakan kompor gas atau metode memasak dengan asap seperti memanggang), semakin dilengkapi sensor CO2 dan VOC yang terintegrasi dengan sistem exhaust fan otomatis — mengaktifkan ventilasi secara cerdas berdasarkan kondisi udara aktual, bukan hanya saklar manual yang sering lupa dinyalakan atau dimatikan penghuni.

Pada skala bangunan yang lebih luas seperti gedung perkantoran, sensor CO2 sering digunakan sebagai proxy tidak langsung untuk menilai kecukupan ventilasi terhadap kepadatan penghuni ruangan — konsentrasi CO2 dalam ruangan tertutup berkorelasi dengan jumlah orang dan lamanya waktu tanpa pertukaran udara segar, menjadikannya indikator praktis yang relevan tidak hanya untuk kenyamanan namun juga untuk mengurangi risiko penularan penyakit pernapasan melalui udara, topik yang mendapat perhatian luas terutama sejak pandemi global beberapa tahun terakhir.

24.3 Sistem Alarm dan Notifikasi Berbasis IoT

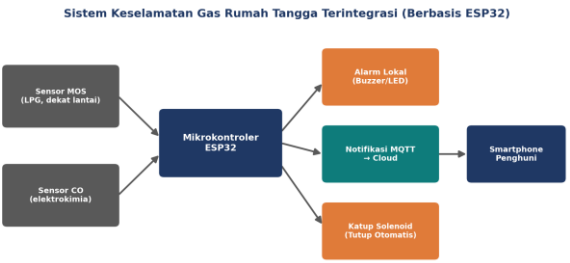
Integrasi sensor gas rumah tangga dengan platform IoT (Bab 13) menghadirkan lapisan perlindungan tambahan yang signifikan dibanding alarm lokal

konvensional: notifikasi push ke smartphone penghuni bahkan ketika mereka sedang berada jauh dari rumah, memungkinkan tindakan cepat seperti menghubungi tetangga atau layanan darurat pada kondisi kebocoran gas yang terdeteksi saat rumah kosong. Beberapa sistem smart home lanjutan bahkan mengintegrasikan sensor gas dengan aktuator otomatis, seperti katup solenoid yang secara otomatis menutup pasokan gas LPG ke kompor ketika konsentrasi gas terdeteksi melebihi ambang bahaya, menambahkan lapisan keselamatan aktif di luar sekadar peringatan pasif.

Pertimbangan penting dalam merancang sistem alarm gas rumah tangga berbasis IoT adalah keandalan koneksi dan sumber daya cadangan: sistem yang sepenuhnya bergantung pada koneksi Wi-Fi dan listrik PLN dapat gagal berfungsi justru pada momen kritis seperti pemadaman listrik, menjadikan baterai cadangan dan,

idealnya, mekanisme alarm lokal (suara/visual) yang tetap berfungsi independen dari konektivitas jaringan sebagai praktik desain yang baik — sebuah pertimbangan keandalan sistem yang akan dibahas lebih mendalam pada Bab 30.

24.4 Contoh Rancangan Sistem Berbasis ESP32



Gambar 24.1. Contoh rancangan sistem keselamatan gas rumah tangga terintegrasi berbasis ESP32, menggabungkan sensor gas, alarm lokal, dan notifikasi IoT.

Sebagai ilustrasi menyeluruh yang menggabungkan berbagai konsep dari bab-

bab sebelumnya, sebuah sistem keselamatan gas rumah tangga berbasis ESP32 dapat dirancang dengan arsitektur berikut: sensor MOS untuk deteksi LPG/gas mudah terbakar dipasang dekat lantai dapur, sensor elektrokimia CO dipasang di area kamar tidur atau dekat pemanas air gas, keduanya terhubung ke mikrokontroler ESP32 yang melakukan pembacaan berkala dan menerapkan ambang batas alarm yang telah dikalibrasi (Bab 15). Ketika ambang batas terlampaui, sistem mengaktifkan alarm lokal (buzzer dan LED), mengirimkan notifikasi melalui protokol MQTT ke platform cloud (Bab 13), dan — pada implementasi lanjutan — memicu aktuator katup solenoid untuk menutup pasokan gas secara otomatis.

Rancangan semacam ini, meski relatif sederhana dari sisi kompleksitas algoritma dibanding sistem electronic nose atau machine learning lanjutan yang dibahas pada Bab 11–12, tetap menuntut kecermatan pada

aspek-aspek fundamental yang telah dibahas panjang lebar sepanjang buku ini: penempatan sensor berdasarkan sifat fisik gas target (Bab 19), kalibrasi ambang batas alarm yang tepat (Bab 15), serta pertimbangan keandalan sistem agar benar-benar berfungsi pada saat dibutuhkan.

BAB 25
APLIKASI SENSOR GAS DI PERTAMBANGAN DAN KESELAMATAN KERJA

Menutup rangkaian bab aplikasi multisektor (Bab 17–25), bab ini membahas aplikasi sensor gas dengan taruhan keselamatan paling tinggi dan sejarah paling panjang — pertambangan bawah tanah dan ruang terbatas (confined space) — sekaligus kembali mengingatkan pada asal-usul teknologi deteksi gas yang telah diperkenalkan pada Bab 1.

25.1 Deteksi Metana, CO, H2S, dan Kekurangan Oksigen

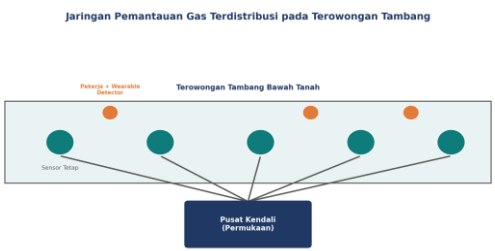
Lingkungan pertambangan bawah tanah, khususnya tambang batu bara, secara alami mengandung berbagai gas berbahaya yang terlepas dari lapisan batuan maupun terbentuk dari proses geologis dan biologis di dalam tambang. Metana (CH4), yang

terperangkap dalam lapisan batu bara dan terlepas selama proses penambangan, menjadi risiko utama ledakan tambang yang telah menyebabkan banyak tragedi sepanjang sejarah pertambangan dunia — risiko yang sama yang mendorong penemuan lampu Davy pada awal abad ke-19 sebagaimana diceritakan pada Bab 1. Karbon monoksida terbentuk dari proses pembakaran tidak sempurna (termasuk dari kebakaran tambang yang sulit terdeteksi secara visual di kedalaman) maupun dari peledakan bahan peledak yang umum digunakan dalam operasi penambangan.

Hidrogen sulfida dapat terlepas dari lapisan batuan tertentu maupun terbentuk dari dekomposisi bahan organik di area tambang yang lembap, sementara kekurangan oksigen (hipoksia) dapat terjadi akibat konsumsi oksigen oleh proses oksidasi mineral tertentu (seperti pirit) atau akibat tergantikannya oksigen oleh gas inert

yang terakumulasi di ruang tertutup dengan ventilasi terbatas — sebagaimana disinggung pada konsep gas inert di Bab 2. Kombinasi keempat bahaya gas ini — mudah terbakar (metana), toksik (CO, H2S), dan asfiksia (kekurangan O2) — menjadikan tambang bawah tanah sebagai salah satu lingkungan kerja dengan risiko gas paling kompleks yang dihadapi manusia, menuntut sistem pemantauan multi-gas yang komprehensif.

25.2 Combustible Gas Monitoring pada Area Bawah Tanah



Gambar 25.1. Konsep jaringan pemantauan gas terdistribusi pada terowongan tambang bawah

tanah, menggabungkan sensor tetap dan detektor portabel pekerja.

Sistem pemantauan gas mudah terbakar pada tambang bawah tanah modern umumnya menggabungkan sensor tetap (fixed sensor) yang dipasang di berbagai titik sepanjang terowongan dan area kerja, terhubung ke sistem pemantauan terpusat di permukaan melalui jaringan kabel atau nirkabel yang dirancang tahan terhadap kondisi ekstrem bawah tanah (kelembapan tinggi, debu, getaran). Sensor katalitik (pellistor, Bab 4) secara historis menjadi teknologi dominan untuk pemantauan metana di lingkungan tambang karena keandalannya yang telah teruji puluhan tahun, meski sensor inframerah (NDIR, Bab 7) semakin banyak diadopsi pada instalasi modern karena keunggulan stabilitas jangka panjang dan ketahanannya terhadap sensor poisoning yang dapat terjadi pada sensor

katalitik akibat paparan senyawa penghambat katalis di lingkungan tambang.

Selain sensor tetap, regulasi keselamatan pertambangan di banyak negara mewajibkan setiap pekerja yang memasuki area bawah tanah membawa detektor gas portabel personal (personal gas monitor) yang secara berkelanjutan memantau beberapa gas sekaligus (umumnya kombinasi metana, CO, H2S, dan O2 dalam satu unit), memberikan lapisan perlindungan independen yang tetap berfungsi bahkan bila terjadi kegagalan pada sistem pemantauan tetap, sesuai prinsip redundansi keselamatan yang telah disinggung pada Bab 18.

25.3 Wearable Gas Detector untuk Keselamatan Pekerja

Detektor gas portabel yang dikenakan pekerja (wearable gas detector) telah berkembang jauh dari perangkat sederhana ke sistem yang jauh lebih cerdas dan

terintegrasi. Perangkat modern umumnya dilengkapi kemampuan pencatatan data (data logging) untuk keperluan audit keselamatan kerja, konektivitas nirkabel (memanfaatkan prinsip IoT dari Bab 13) yang memungkinkan status setiap pekerja dipantau secara real-time dari pusat kendali di permukaan, serta fitur man-down (mendeteksi ketika pekerja tidak bergerak dalam durasi tertentu, mengindikasikan kemungkinan pekerja pingsan atau cedera) yang secara otomatis memicu alarm darurat bahkan ketika pekerja sendiri tidak mampu meminta bantuan.

Tantangan teknis utama perangkat wearable ini adalah menyeimbangkan kebutuhan pemantauan berkelanjutan sepanjang shift kerja (yang dapat berlangsung delapan hingga dua belas jam) dengan keterbatasan ukuran, bobot, dan kapasitas baterai perangkat yang harus tetap nyaman dikenakan pekerja sepanjang hari

kerja — sebuah pertimbangan desain di mana prinsip TinyML dan edge AI berdaya rendah (Bab 14) menjadi semakin relevan untuk generasi wearable gas detector mendatang yang mungkin menambahkan kemampuan deteksi pola anomali cerdas tanpa mengorbankan umur baterai.

25.4 Sistem Alarm Keselamatan Kerja (K3)

Sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (K3) yang komprehensif pada industri berisiko tinggi seperti pertambangan tidak hanya bergantung pada teknologi deteksi gas semata, melainkan mengintegrasikannya ke dalam prosedur organisasi yang lebih luas: protokol evakuasi yang jelas dan telah dilatihkan secara berkala kepada seluruh pekerja, sistem komunikasi darurat yang tetap berfungsi pada kondisi krisis, titik kumpul (assembly point) yang telah ditetapkan dan diketahui

seluruh personel, serta audit dan pemeliharaan berkala terhadap seluruh peralatan deteksi gas untuk memastikan kalibrasi (Bab 15) dan fungsi alarm tetap sesuai standar yang dipersyaratkan regulasi keselamatan kerja yang berlaku.

Penting dipahami bahwa secanggih apa pun teknologi sensor gas yang digunakan, keberhasilan sistem keselamatan kerja pada akhirnya bergantung pada faktor manusia: budaya keselamatan yang kuat di tempat kerja, kepatuhan terhadap prosedur, serta kesiapan merespons alarm secara tepat dan cepat. Teknologi sensor gas — sebagaimana ditekankan berulang kali sepanjang buku ini, mulai dari keterbatasan sensor MQ pada Bab 5 hingga batasan validasi klinis pada Bab 21 — adalah alat bantu yang sangat berharga, namun bukan pengganti kewaspadaan, pelatihan, dan tanggung jawab manusia dalam menjaga keselamatan diri sendiri maupun rekan kerja.

BAB 26
TEKNOLOGI SENSOR GAS GENERASI TERBARU

Membuka Bagian Keempat buku ini, bab ini mengupas secara mendalam berbagai terobosan riset mutakhir yang mulai bergeser dari laboratorium menuju purwarupa dan produk awal, memberikan gambaran ke mana arah teknologi sensor gas bergerak dalam dekade mendatang.

26.1 AI-Enhanced Gas Sensing dan Multimodal Sensing

Jika Bab 12 telah membahas bagaimana machine learning diterapkan pada data sensor gas yang sudah terkumpul, riset generasi terbaru mendorong integrasi kecerdasan buatan jauh lebih dalam ke dalam keseluruhan siklus hidup sensor — mulai dari desain material yang dibantu AI (menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk memprediksi kombinasi

material sensing yang paling menjanjikan sebelum disintesis secara fisik di laboratorium, mempercepat proses riset dan pengembangan material baru), hingga sistem yang secara mandiri menyesuaikan parameter operasinya (seperti temperatur pemanas pada sensor MOS) secara real-time berdasarkan pola sinyal yang dikenali algoritma, tanpa memerlukan aturan tetap yang diprogram manual sebelumnya.

Multimodal sensing merujuk pada penggabungan berbagai jenis modalitas sensor sekaligus — bukan hanya gas, namun juga suhu, kelembapan, tekanan, getaran, bahkan citra visual — ke dalam satu sistem analisis terpadu. Pendekatan ini memungkinkan sistem mengenali konteks yang jauh lebih kaya dibanding mengandalkan data gas semata; misalnya, sistem pemantauan industri yang menggabungkan data gas dengan data getaran mesin dapat membedakan apakah

peningkatan gas tertentu disebabkan oleh kebocoran murni atau berkaitan dengan kondisi mekanis mesin yang mulai bermasalah, memberikan diagnosis yang jauh lebih informatif dibanding sensor gas yang berdiri sendiri.

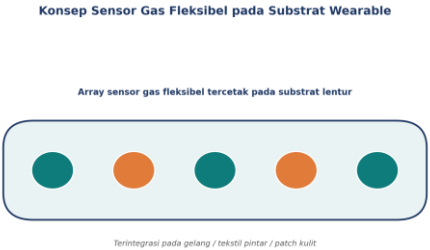
26.2 Nanomaterial Lanjut: Graphene, Material 2D, dan MXene

Melanjutkan pembahasan dasar nanomaterial pada Bab 8, riset generasi terbaru terus mendorong batas kinerja material dua dimensi. MXene, kelas material yang relatif baru ditemukan sejak awal dekade 2010-an, terus menunjukkan hasil riset yang menjanjikan berkat kombinasi konduktivitas listrik metalik, kelimpahan gugus fungsi permukaan yang dapat direkayasa (surface termination engineering), dan kemampuan beroperasi pada temperatur ruang tanpa kebutuhan elemen pemanas berdaya tinggi seperti

sensor MOS konvensional — sebuah keunggulan signifikan untuk aplikasi wearable dan IoT berdaya sangat rendah.

Heterostruktur — kombinasi dua atau lebih material 2D berbeda yang ditumpuk membentuk struktur berlapis dengan sifat elektronik baru yang tidak dimiliki material penyusunnya secara individual — menjadi arah riset aktif lain, membuka kemungkinan merekayasa selektivitas sensor secara jauh lebih presisi dibanding material tunggal, meski tantangan reproduksibilitas fabrikasi skala besar (yang telah disinggung pada Bab 8) tetap menjadi hambatan utama menuju komersialisasi luas.

26.3 Flexible dan Wearable Sensor Generasi Baru



Gambar 26.1. Ilustrasi konsep sensor gas fleksibel generasi baru terintegrasi pada substrat lentur untuk aplikasi wearable dan pemantauan paparan personal.

Generasi terbaru sensor gas fleksibel semakin mengarah pada integrasi penuh dengan tekstil pintar (smart textile) dan elektronika kulit (epidermal electronics) — sensor yang dicetak langsung pada serat kain atau ditempelkan pada kulit menggunakan perekat biokompatibel yang dapat dipakai berhari-hari tanpa iritasi. Teknik pencetakan seperti inkjet printing dan screen printing memungkinkan produksi sensor fleksibel

dengan biaya yang jauh lebih rendah dibanding proses fabrikasi semikonduktor konvensional, membuka jalan bagi sensor gas sekali pakai (disposable) berbiaya sangat rendah untuk aplikasi pemantauan personal skala besar.

26.4 Wireless Sensor Network dan Self-Powered Gas Sensor

Wireless Sensor Network (WSN) generasi terbaru semakin menekankan efisiensi energi ekstrem, memungkinkan jaringan ratusan hingga ribuan node sensor gas beroperasi bertahun-tahun tanpa penggantian baterai — dicapai melalui kombinasi protokol komunikasi hemat daya (Bab 13), algoritma TinyML berdaya rendah (Bab 14), dan mode tidur (sleep mode) yang mengaktifkan sensor hanya secara periodik alih-alih pemantauan kontinu.

Self-powered gas sensor melangkah lebih jauh dengan mengeliminasi kebutuhan

baterai konvensional sama sekali, memanfaatkan sumber energi ambient di sekitar sensor — panel surya mini untuk lingkungan outdoor, triboelectric nanogenerator yang menghasilkan listrik dari gerakan mekanis (relevan untuk sensor wearable yang bergerak mengikuti tubuh pengguna), atau bahkan piezoelectric generator yang memanen energi dari getaran mesin di lingkungan industri.

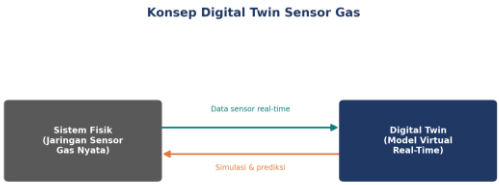
26.5 Energy Harvesting dan Bio-inspired Sensing

Energy harvesting — teknik memanen energi kecil dari lingkungan sekitar (cahaya, panas, getaran, gelombang radio) untuk mencatu daya perangkat elektronik berdaya sangat rendah — menjadi pelengkap penting bagi visi sensor gas yang benar-benar mandiri energi (energy autonomous), terutama untuk aplikasi di lokasi terpencil yang sulit dijangkau untuk penggantian

baterai rutin, seperti jaringan sensor kualitas udara di area hutan atau pegunungan.

Pendekatan bio-inspired, yang telah disinggung sekilas pada Bab 4, terus berkembang dengan penelitian yang semakin mendalami mekanisme reseptor olfaktori biologis pada tingkat molekuler, berupaya meniru tidak hanya struktur array sensor namun juga mekanisme pemrosesan sinyal saraf penciuman (olfactory neural processing) yang terjadi di otak, membuka kemungkinan arsitektur pemrosesan sinyal sensor gas yang jauh lebih efisien energi dibanding pendekatan machine learning konvensional.

26.6 Neuromorphic Gas Sensing, Digital Twin, dan Sensor Fusion



Gambar 26.2. Konsep digital twin sensor gas: representasi virtual yang disinkronkan dengan data sensor fisik secara real-time untuk simulasi dan prediksi.

Neuromorphic computing — arsitektur komputasi yang terinspirasi struktur dan cara kerja otak biologis, menggunakan 'neuron' dan 'sinaps' buatan alih-alih arsitektur komputer konvensional — mulai dieksplorasi untuk pemrosesan sinyal sensor gas, menjanjikan efisiensi energi yang jauh lebih baik dibanding pemrosesan machine learning konvensional untuk tugas pengenalan pola tertentu, meski teknologi ini secara keseluruhan masih berada pada

tahap riset awal dan belum banyak diterapkan secara luas di luar laboratorium.

Digital twin merujuk pada representasi virtual suatu sistem fisik yang disinkronkan secara real-time dengan data dari sistem aslinya, memungkinkan simulasi skenario ('bagaimana jika') tanpa risiko pada sistem fisik yang sebenarnya. Diterapkan pada sensor gas, digital twin dari suatu fasilitas industri dapat mengintegrasikan data dari seluruh jaringan sensor gas yang terpasang untuk memprediksi pola penyebaran gas dalam skenario kebocoran hipotetis, membantu perencanaan tata letak sensor yang optimal maupun perencanaan respons darurat sebelum insiden sungguhan terjadi.

26.7 Autonomous Calibration serta Edge Intelligence

Kalibrasi otomatis mandiri (autonomous calibration), yang telah disinggung sebagai kalibrasi adaptif pada

Bab 15, terus berkembang dengan pendekatan yang semakin canggih: beberapa riset mengeksplorasi penggunaan beberapa sensor redundan dengan karakteristik drift yang berbeda-beda sebagai referensi silang satu sama lain (cross-calibration), memungkinkan sistem mendeteksi dan mengoreksi drift tanpa memerlukan gas standar referensi eksternal secara berkala — sebuah pendekatan yang berpotensi signifikan mengurangi biaya pemeliharaan jaringan sensor skala besar.

Edge intelligence, sebagai kelanjutan visi edge AI dan TinyML pada Bab 14, mengarah pada sistem yang tidak hanya menjalankan inferensi model yang telah dilatih sebelumnya, namun juga mampu melakukan adaptasi dan pembelajaran terbatas langsung di perangkat (on-device learning), memungkinkan sensor menyesuaikan model deteksinya terhadap karakteristik lingkungan spesifik tempat ia

dipasang tanpa perlu mengirim data kembali ke cloud untuk pelatihan ulang model secara terpusat.

BAB 27
TREN DAN MASA DEPAN TEKNOLOGI SENSOR GAS

Bab ini menyintesis berbagai teknologi generasi terbaru yang telah dibahas pada Bab 26 menjadi gambaran tren industri yang lebih luas, menempatkan perkembangan teknis dalam konteks transformasi ekonomi dan sosial yang lebih besar.

27.1 Arah Miniaturisasi, Low-Power, dan Konektivitas Nirkabel

Tren miniaturisasi sensor gas — didorong kombinasi MEMS (Bab 8), nanomaterial, dan elektronika terintegrasi — terus berlanjut menuju ukuran yang semakin mendekati komponen elektronik pasif konvensional, memungkinkan sensor gas diintegrasikan langsung pada papan sirkuit perangkat konsumen tanpa menambah bobot atau ukuran yang signifikan, sebagaimana

telah terjadi pada sensor lain seperti akselerometer dan giroskop yang kini hadir di hampir setiap smartphone. Konsumsi daya yang terus menurun, dikombinasikan dengan konektivitas nirkabel generasi baru yang juga semakin hemat energi (evolusi lanjutan dari LoRaWAN dan protokol IoT hemat daya lain yang dibahas pada Bab 13), membuka jalan bagi visi sensor gas yang benar-benar 'invisible' — tersemat di mana-mana namun tidak pernah menjadi beban perhatian penggunanya.

27.2 AI Embedded dan Kalibrasi Otomatis

Kecerdasan buatan yang tertanam langsung pada tingkat chip sensor (bukan lagi memerlukan mikrokontroler eksternal terpisah) menjadi arah perkembangan hardware yang signifikan, dengan produsen semikonduktor mulai mengintegrasikan unit pemrosesan neural (Neural Processing

Unit/NPU) mini langsung pada chip sensor itu sendiri. Tren ini, dikombinasikan dengan kalibrasi otomatis yang semakin matang (Bab 26), berpotensi mengurangi drastis kebutuhan intervensi manual sepanjang siklus hidup sensor — dari kalibrasi awal produksi hingga pemeliharaan di lapangan — yang selama ini menjadi salah satu penghambat utama adopsi sensor gas berbiaya rendah untuk aplikasi yang menuntut akurasi tinggi.

27.3 Multi-Gas Sensing dan Pengukuran Kuantitatif Real-Time

Tren jangka panjang bergerak menjauh dari sensor gas tunggal menuju sistem multi-gas terintegrasi yang mampu mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi berbagai jenis gas secara simultan dalam satu perangkat kompak, memanfaatkan kombinasi sensor array (Bab 11) dan machine learning (Bab 12) yang semakin

matang dan efisien secara komputasi. Kemampuan pengukuran kuantitatif real-time — bukan sekadar deteksi ada/tidaknya gas — menjadi standar yang semakin dituntut pasar, didorong kebutuhan aplikasi yang semakin canggih seperti pemantauan kesehatan personal (Bab 21) dan kendali proses industri presisi tinggi yang menuntut data kuantitatif berkelanjutan, bukan hanya alarm biner.

27.4 Sensor Wearable dan Implantable

Melampaui sensor wearable yang telah dibahas pada Bab 8 dan Bab 26, riset mutai mengeksplorasi batas selanjutnya: sensor gas implantable yang ditanam di dalam tubuh untuk pemantauan biokimia berkelanjutan jangka panjang, meski teknologi ini masih menghadapi tantangan besar terkait biokompatibilitas material, sumber daya (bagaimana mencatu daya perangkat yang tertanam dalam tubuh tanpa

operasi penggantian baterai berulang), serta tentu saja proses persetujuan regulasi medis yang jauh lebih ketat dibanding perangkat wearable eksternal, sejalan dengan penekanan kehati-hatian ilmiah yang telah dibahas pada Bab 21.

27.5 Smart City, Industry 4.0, dan Industry 5.0

Pada level makro, sensor gas menjadi salah satu komponen fundamental transformasi smart city (Bab 17) dan Industry 4.0 — paradigma industri yang mengintegrasikan IoT, big data, dan otomasi cerdas ke dalam proses produksi secara menyeluruh. Industry 5.0, sebagai evolusi lanjutan yang mulai dibicarakan, menambahkan penekanan pada kolaborasi manusia-mesin yang lebih harmonis dan keberlanjutan lingkungan, di mana sensor gas berperan ganda: baik sebagai instrumen kendali proses presisi tinggi maupun sebagai

bagian dari sistem pemantauan keberlanjutan yang memastikan operasi industri tetap sejalan dengan target lingkungan dan keselamatan pekerja yang semakin ditekankan.

27.6 Roadmap Teknologi Sensor Gas Lima hingga Lima Belas Tahun ke Depan



Gambar 27.1. Roadmap ilustratif perkembangan teknologi sensor gas dalam horizon lima, sepuluh, dan lima belas tahun mendatang.

Sebagai sintesis penutup bab ini, roadmap ilustratif dapat disusun dalam tiga horizon waktu. Dalam lima tahun ke depan, tren yang sudah terlihat jelas — integrasi AI embedded, adopsi luas TinyML, dan sensor multi-gas berbiaya terjangkau — kemungkinan besar akan menjadi standar

pasar arus utama, bukan lagi sekadar riset eksperimental. Dalam sepuluh tahun ke depan, material generasi baru seperti MXene dan heterostruktur 2D berpotensi mulai keluar dari tahap riset menuju komersialisasi awal skala menengah, seiring tantangan reproduksibilitas fabrikasi mulai teratasi melalui kematangan proses manufaktur. Dalam lima belas tahun ke depan atau lebih, visi yang lebih ambisius — sensor implantable tervalidasi klinis, jaringan sensor gas sepenuhnya mandiri energi berskala kota, dan integrasi neuromorphic computing yang matang — berpotensi mulai terwujud, meski dengan tingkat ketidakpastian yang wajar mengingat rentang waktu prediksi yang panjang dalam bidang teknologi yang berkembang sangat cepat ini.

.

BAB 28
METODOLOGI PENGEMBANGAN SISTEM SENSOR GAS

Bab ini menyajikan panduan metodologis praktis bagi pembaca atau praktisi yang memulai proyek sensor gas — merangkum seluruh konsep dari Bab 1 hingga Bab 27 menjadi alur kerja pengembangan sistem yang runtut dan dapat diikuti langkah demi langkah.

28.1 Identifikasi Kebutuhan dan Pemilihan Target Gas

Setiap proyek sensor gas yang baik dimulai bukan dari pemilihan komponen, melainkan dari pertanyaan mendasar: gas apa yang perlu dideteksi atau diukur, pada rentang konsentrasi berapa, dengan tingkat akurasi seperti apa, dan untuk tujuan apa (peringatan keselamatan biner, atau pengukuran kuantitatif presisi)? Kejelasan pada tahap ini — yang sering terlewat oleh

pengembang pemula yang tergoda langsung membeli sensor populer tanpa analisis kebutuhan yang cermat — akan sangat menentukan seluruh keputusan desain berikutnya. Sebagai contoh, kebutuhan mendeteksi kebocoran LPG di rumah tangga (keselamatan, respons cepat, akurasi kuantitatif bukan prioritas utama) menuntun pada pilihan sensor dan arsitektur sistem yang sangat berbeda dibanding kebutuhan mengukur konsentrasi CO2 presisi tinggi untuk riset kualitas udara (Bab 17).

28.2 Pemilihan Sensor dan Desain Hardware

Berbekal kejelasan kebutuhan dari tahap sebelumnya, pemilihan teknologi sensor dilakukan dengan merujuk kembali pada kerangka klasifikasi Bab 4 dan tabel perbandingan yang telah disajikan — mempertimbangkan trade-off antara sensitivitas, selektivitas, biaya, konsumsi

daya, dan ketersediaan komponen di pasar. Desain hardware kemudian mencakup perancangan rangkaian pengondisi sinyal yang sesuai (Bab 10), pemilihan platform mikrokontroler (ESP32 untuk kebutuhan IoT, Arduino untuk purwarupa sederhana, atau Raspberry Pi untuk kebutuhan pemrosesan lebih berat), serta pertimbangan mekanis seperti casing pelindung dan ventilasi yang memungkinkan gas target mencapai permukaan sensor tanpa terhalang, namun tetap melindungi elektronik dari debu dan kelembapan berlebih.

28.3 Signal Conditioning dan Data Acquisition

Tahap ini menerapkan langsung prinsip-prinsip yang telah dibahas pada Bab 10: merancang rangkaian pembagi tegangan atau transimpedance amplifier sesuai jenis sensor yang dipilih, menentukan resolusi

ADC yang dibutuhkan berdasarkan rentang dan resolusi pengukuran yang ditargetkan, serta menyusun rutin firmware pengambilan data (sampling rate, filtering awal) yang sesuai dengan karakteristik response time sensor yang dipilih. Kesalahan umum pada tahap ini adalah mengabaikan noise elektronik dari lingkungan sekitar (seperti interferensi dari motor listrik atau saluran daya AC di dekatnya), yang dapat menutupi sinyal gas yang sebenarnya ingin diukur — menuntut perhatian pada teknik grounding dan shielding rangkaian yang baik.

28.4 Eksperimen, Kalibrasi, dan Preprocessing Data

Dengan hardware yang telah berfungsi, tahap berikutnya adalah pengujian sistematis: mengumpulkan data respons sensor terhadap berbagai konsentrasi gas target yang telah diketahui nilainya (menggunakan gas standar atau

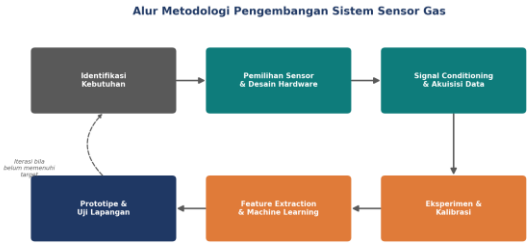
instrumen referensi, sebagaimana dibahas pada Bab 15), pada kondisi lingkungan yang bervariasi untuk memahami sensitivitas sistem terhadap faktor pengganggu (Bab 16). Data yang terkumpul kemudian melalui tahap preprocessing — pembersihan noise, penghilangan outlier yang jelas keliru akibat kesalahan pengukuran, dan normalisasi (Bab 12) — sebelum digunakan untuk menyusun kurva kalibrasi atau melatih model machine learning pada tahap berikutnya.

28.5 Feature Extraction, Machine Learning, dan Validasi

Bagi sistem yang memanfaatkan sensor array atau memerlukan estimasi kuantitatif yang kompleks, tahap ini menerapkan teknik ekstraksi fitur dan pemilihan algoritma machine learning yang sesuai sebagaimana dibahas mendalam pada Bab 11 dan Bab 12 — mempertimbangkan trade-off antara kompleksitas model, akurasi

yang dicapai, dan keterbatasan komputasi platform target (khususnya bila sistem menyasar implementasi TinyML sesuai Bab 14). Validasi yang cermat menggunakan data yang benar-benar terpisah dari data pelatihan (bukan sekadar mengevaluasi ulang pada data yang sama) menjadi langkah krusial yang tidak boleh dilewatkan, guna memastikan model benar-benar generalisasi dengan baik alih-alih sekadar menghafal data pelatihan yang telah dilihat sebelumnya.

28.6 Prototipe, Uji Lapangan, dan Evaluasi



Gambar 28.1. Alur metodologi pengembangan sistem sensor gas, dari identifikasi kebutuhan hingga evaluasi purwarupa di lapangan.

Tahap akhir metodologi ini adalah menguji purwarupa yang telah dibangun pada kondisi dunia nyata (bukan hanya laboratorium terkontrol), yang seringkali mengungkap tantangan tak terduga: variasi lingkungan yang lebih ekstrem dari yang diantisipasi, interferensi gas pengganggu yang tidak dipertimbangkan pada tahap desain, atau masalah keandalan mekanis yang baru muncul setelah penggunaan berkelanjutan dalam jangka waktu lebih lama. Evaluasi

menyeluruh terhadap hasil uji lapangan ini — dibandingkan terhadap target kebutuhan yang telah ditetapkan pada tahap 28.1 — menentukan apakah sistem siap digunakan, memerlukan iterasi desain lebih lanjut, atau mengungkap kebutuhan yang perlu didefinisikan ulang, menutup siklus pengembangan yang pada praktiknya sering kali bersifat iteratif alih-alih benar-benar linier seperti yang digambarkan diagram alur metodologi ini.

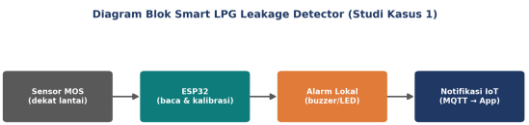
BAB 29
STUDI KASUS PERANCANGAN SISTEM SENSOR GAS CERDAS

Bab ini menghadirkan lima studi kasus perancangan sistem sensor gas yang mengilustrasikan penerapan konkret metodologi Bab 28 dan berbagai konsep teknis yang telah dibahas sepanjang buku, mulai dari sistem sederhana berbasis sensor tunggal hingga sistem cerdas berbasis TinyML. Setiap studi kasus disajikan dengan struktur konsisten: latar belakang, tujuan, diagram blok, komponen, prinsip kerja, metode, parameter kinerja yang diharapkan, keterbatasan, dan arah pengembangan lanjutan.

29.1 Studi Kasus 1: Smart LPG Leakage Detector

Latar belakang dan tujuan: Kebocoran gas LPG rumah tangga tetap menjadi penyebab signifikan insiden kebakaran

domestik di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, akibat instalasi regulator yang kurang baik atau selang gas yang mulai getas dimakan usia. Studi kasus ini bertujuan merancang sistem deteksi kebocoran LPG yang tidak hanya memberikan alarm lokal, namun juga notifikasi jarak jauh kepada penghuni rumah.



Gambar 29.1. Diagram blok Smart LPG Leakage Detector, menggabungkan sensor MOS, mikrokontroler ESP32, dan notifikasi berbasis IoT.

Komponen dan prinsip kerja: Sistem menggunakan sensor MOS (Bab 5) yang dipasang mendekati lantai dapur (Bab 19, Bab 24), dibaca secara berkala oleh mikrokontroler ESP32 melalui rangkaian pembagi tegangan sederhana (Bab 10).

Firmware menerapkan ambang batas alarm dua tingkat — peringatan dini pada konsentrasi rendah dan alarm kritis pada konsentrasi mendekati LEL (Bab 1) — yang telah ditentukan melalui proses kalibrasi menggunakan gas LPG standar (Bab 15).

Parameter kinerja yang diharapkan dan keterbatasan: Sistem semacam ini secara realistis mampu mencapai response time dalam orde puluhan detik dengan biaya komponen yang sangat terjangkau, namun tetap mewarisi keterbatasan selektivitas sensor MOS (Bab 5) — berpotensi memberikan alarm palsu (false alarm) akibat respons terhadap uap alkohol dari produk pembersih rumah tangga, misalnya. Pengembangan lanjutan dapat mengeksplorasi penambahan sensor kedua dengan profil sensitivitas berbeda (menerapkan prinsip sensor array sederhana dari Bab 11) untuk mengurangi tingkat false alarm melalui logika konfirmasi silang.

29.2 Studi Kasus 2: IoT Air Quality Monitoring System

Latar belakang dan tujuan: Studi kasus ini merancang stasiun pemantauan kualitas udara portabel berbiaya rendah yang dapat ditempatkan di berbagai titik untuk melengkapi jaringan pemantauan resmi yang jumlahnya terbatas (Bab 17), memberikan data kualitas udara dengan resolusi spasial lebih tinggi bagi masyarakat maupun peneliti lokal.

Komponen dan prinsip kerja: Sistem menggabungkan beberapa sensor sekaligus — sensor MOS untuk VOC dan gas polutan umum, sensor NDIR untuk CO2 (Bab 7), serta sensor partikulat optik sebagai pelengkap — seluruhnya dibaca oleh ESP32 dan dikirimkan secara berkala melalui Wi-Fi menggunakan protokol MQTT (Bab 13) menuju platform cloud yang menghitung dan menampilkan Indeks Kualitas Udara secara real-time pada dashboard web.

Parameter kinerja yang diharapkan dan keterbatasan: Akurasi absolut sistem berbiaya rendah semacam ini secara realistis tidak akan menyamai stasiun pemantauan resmi yang menggunakan instrumen analyzer presisi tinggi (Bab 7), namun cukup memadai untuk menangkap tren relatif dan pola spasial kualitas udara bila dikalibrasi secara berkala terhadap stasiun referensi terdekat (Bab 15). Pengembangan lanjutan dapat mengintegrasikan algoritma kompensasi lingkungan berbasis machine learning (Bab 12, Bab 16) untuk meningkatkan akurasi tanpa menaikkan biaya komponen secara signifikan.

29.3 Studi Kasus 3: Electronic Nose untuk Identifikasi Jenis Gas

Latar belakang dan tujuan: Studi kasus ini merancang purwarupa electronic nose edukatif yang mampu membedakan beberapa jenis gas atau uap (misalnya

membedakan gas LPG, uap alkohol, dan asap rokok) menggunakan satu set sensor array, sesuai prinsip yang telah dibahas mendalam pada Bab 11.

Komponen dan prinsip kerja: Purwarupa menggunakan 3–4 sensor MOS dengan profil sensitivitas material sensing yang berbeda (Bab 5), ditambah sensor temperatur dan kelembapan sebagai kompensasi lingkungan (Bab 16). Data time series dari seluruh sensor diambil bersamaan saat sampel gas dihadapkan pada array, kemudian fitur-fitur seperti nilai puncak dan luas area kurva respons diekstraksi (Bab 11) sebelum digunakan melatih model klasifikasi sederhana seperti k-NN atau random forest (Bab 12).

Parameter kinerja yang diharapkan dan keterbatasan: Dengan dataset pelatihan yang memadai (idealnya puluhan hingga ratusan sampel per kelas gas, dikumpulkan

pada kondisi lingkungan yang bervariasi), sistem semacam ini secara realistis dapat mencapai akurasi klasifikasi 80–95% untuk membedakan beberapa kelas gas yang cukup berbeda karakteristiknya, meski akurasi dapat menurun signifikan untuk gas-gas dengan profil kimia yang mirip. Pengembangan lanjutan dapat mengeksplorasi arsitektur CNN atau LSTM (Bab 12) untuk menangkap pola temporal respons sensor secara lebih kaya dibanding fitur statistik sederhana.

29.4 Studi Kasus 4: Gas Sensor Array dan Machine Learning untuk Estimasi Konsentrasi Gas

Latar belakang dan tujuan: Berbeda dari studi kasus 3 yang berfokus pada klasifikasi jenis gas, studi kasus ini menyasar tugas regresi — mengestimasi konsentrasi gas secara kuantitatif (dalam ppm) menggunakan sensor array yang secara

individual bersifat non-linier dan non-selektif, sebagaimana dibahas pada Bab 12.5.

Komponen dan prinsip kerja: Sistem menggunakan array sensor MOS yang sama seperti studi kasus 3, namun proses pengumpulan data pelatihan dilakukan dalam ruang kalibrasi terkendali (Bab 15) dengan berbagai konsentrasi gas target yang telah diketahui presisi menggunakan gas standar. Model regresi — mulai dari regresi linier berganda sederhana hingga random forest regressor atau jaringan saraf tiruan (Bab 12) — dilatih memetakan kombinasi pembacaan seluruh sensor array menuju nilai konsentrasi gas yang sebenarnya.

Parameter kinerja yang diharapkan dan keterbatasan: Kinerja dievaluasi menggunakan metrik regresi seperti MAE dan R^2 (Bab 12.6); sistem yang dirancang dan dikalibrasi dengan baik secara realistis

dapat mencapai R^2 di atas 0,9 pada rentang konsentrasi yang tercakup dalam data pelatihan, namun akurasi dapat menurun signifikan di luar rentang tersebut (ekstrapolasi) — sebuah keterbatasan mendasar model machine learning yang penting dipahami pengembang.

29.5 Studi Kasus 5: TinyML Gas Detection System

Latar belakang dan tujuan: Studi kasus ini merancang sistem deteksi gas portabel bertenaga baterai yang menjalankan inferensi machine learning langsung pada mikrokontroler tanpa memerlukan koneksi cloud, sesuai prinsip TinyML yang dibahas pada Bab 14, ditujukan untuk aplikasi yang menuntut operasi mandiri jangka panjang seperti wearable gas detector (Bab 25).

Komponen dan prinsip kerja: Model klasifikasi atau regresi sederhana (misalnya decision tree kompak atau jaringan saraf

tiruan kecil) dilatih terlebih dahulu menggunakan framework standar di komputer, kemudian dikonversi dan dikompresi menggunakan teknik quantization (Bab 14.3) agar dapat dijalankan pada mikrokontroler kelas ESP32 atau ARM Cortex-M dengan memori terbatas, menggunakan framework seperti TensorFlow Lite for Microcontrollers.

Parameter kinerja yang diharapkan dan keterbatasan: Sistem semacam ini secara realistis dapat mencapai inferensi dalam orde puluhan milidetik dengan konsumsi energi yang jauh lebih rendah dibanding mengirim data mentah ke cloud secara terus-menerus, memungkinkan umur baterai dalam orde bulan hingga tahun tergantung frekuensi pengukuran. Trade-off utama yang perlu disadari pengembang adalah penurunan akurasi model akibat proses kompresi (quantization) dibanding model asli sebelum dikompresi — trade-off antara

efisiensi dan akurasi yang perlu dievaluasi cermat sesuai kebutuhan aplikasi spesifik.

29.6 Ringkasan dan Perbandingan Kelima Studi Kasus

Tabel 29.1. Ringkasan dan perbandingan kelima studi kasus.

Studi Kasus	Kompleksitas	Fokus Utama	Bab Terkait
1. Smart LPG Leakage Detector	Dasar	Deteksi biner + notifikasi IoT	5, 10, 13, 15, 19
2. IoT Air Quality Monitoring	Menengah	Multi-sensor + dashboard cloud	7, 13, 15, 17
3. E-Nose Identifikasi Gas	Menengah	Sensor array + klasifikasi ML	5, 11, 12, 16
4. Sensor Array + ML Estimasi Konsentrasi	Lanjut	Regresi kuantitatif	11, 12, 15
5. TinyML Gas Detection	Lanjut	Edge AI berdaya rendah	5, 12, 14, 25

Kelima studi kasus di atas — disusun dengan tingkat kompleksitas yang meningkat secara bertahap, dari sistem sensor tunggal

sederhana hingga sistem TinyML yang mengintegrasikan hampir seluruh konsep dalam buku ini — dimaksudkan sebagai kerangka acuan praktis yang dapat diadaptasi pembaca sesuai kebutuhan dan tingkat kemampuan masing-masing.

BAB 30
ETIKA, KESELAMATAN, STANDARDISASI, DAN REGULASI

Bab ini membahas dimensi non-teknis yang sama pentingnya dengan aspek rekayasa yang telah dibahas panjang lebar sepanjang buku ini: bagaimana sistem sensor gas dirancang, dioperasikan, dan diatur secara bertanggung jawab agar benar-benar memberikan manfaat tanpa menciptakan risiko baru.

30.1 Keselamatan Penggunaan Gas dan Keselamatan Laboratorium (K3)

Pengembangan dan pengujian sistem sensor gas — khususnya yang melibatkan gas standar bertekanan atau gas berbahaya untuk keperluan kalibrasi (Bab 15) — menuntut penerapan prinsip keselamatan dan kesehatan kerja (K3) yang ketat di laboratorium maupun ruang pengujian. Penanganan tabung gas bertekanan

memerlukan prosedur khusus (pengamanan tabung agar tidak jatuh, penggunaan regulator yang sesuai, ventilasi ruang pengujian yang memadai), sementara pengujian dengan gas toksik atau mudah terbakar menuntut penggunaan lemari asam (fume hood), alat pelindung diri yang sesuai, dan prosedur darurat yang jelas bila terjadi kebocoran tidak disengaja selama pengujian.

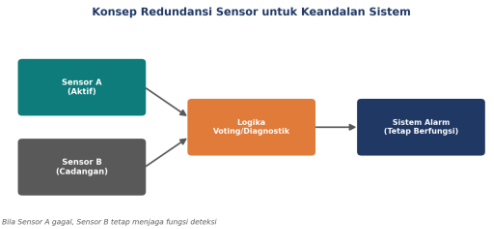
30.2 Alarm Threshold, Kegagalan Sensor, False Alarm, dan Missed Detection

Penetapan ambang batas alarm (alarm threshold) pada sistem sensor gas melibatkan trade-off etis dan praktis yang penting: ambang batas yang terlalu sensitif (rendah) akan menghasilkan false alarm (alarm palsu) yang sering, berisiko membuat pengguna mengabaikan atau bahkan menonaktifkan sistem alarm karena dianggap mengganggu (fenomena 'alarm fatigue' yang telah didokumentasikan luas

pada berbagai bidang keselamatan, termasuk di lingkungan medis). Sebaliknya, ambang batas yang terlalu longgar (tinggi) berisiko missed detection — gagal memicu alarm pada kondisi yang sebenarnya berbahaya, dengan konsekuensi yang jauh lebih fatal.

Penetapan ambang batas yang tepat idealnya mempertimbangkan konteks aplikasi secara spesifik, konsekuensi relatif dari kedua jenis kesalahan (false alarm versus missed detection) pada aplikasi tersebut, serta karakteristik kinerja sensor yang sebenarnya (sensitivitas, noise, drift — Bab 9) alih-alih sekadar mengikuti nilai default dari datasheet produsen tanpa validasi kontekstual.

30.3 Redundansi dan Keandalan Sistem (Reliability)



Gambar 30.1. Konsep redundansi sensor: kegagalan satu sensor tidak melumpuhkan keseluruhan sistem deteksi berkat cadangan sensor lain yang tetap berfungsi.

Sebagaimana disinggung pada pembahasan aplikasi industri (Bab 18) dan pertambangan (Bab 25), redundansi — memasang lebih dari satu sensor independen pada titik kritis yang sama — menjadi prinsip desain penting untuk aplikasi dengan taruhan keselamatan tinggi, memastikan kegagalan satu sensor (baik akibat kerusakan komponen, habisnya umur pakai elektrolit pada sensor elektrokimia, maupun drift yang tidak terkalibrasi) tidak melumpuhkan

keseluruhan kemampuan deteksi sistem. Diagnostik mandiri (self-diagnostic), yang memungkinkan sistem mendeteksi dan melaporkan kondisi kegagalan sensor secara otomatis (misalnya melalui pemantauan apakah sinyal sensor berada pada rentang yang masuk akal secara fisis), melengkapi redundansi dengan memberikan peringatan dini bahwa pemeliharaan atau penggantian sensor diperlukan, sebelum kegagalan total terjadi tanpa disadari.

30.4 Keamanan Siber (Cybersecurity) dan Privasi Data pada IoT

Integrasi sensor gas dengan platform IoT (Bab 13) membawa dimensi risiko baru yang perlu disadari pengembang: keamanan siber. Sistem yang terhubung ke internet berpotensi menjadi target serangan siber — mulai dari upaya mengakses data secara tidak sah, memanipulasi pembacaan sensor untuk menyembunyikan kondisi berbahaya

sesungguhnya (skenario yang sangat serius pada konteks keselamatan industri), hingga menjadikan perangkat IoT yang tidak terlindungi sebagai titik masuk (entry point) bagi serangan terhadap jaringan yang lebih luas. Praktik keamanan dasar seperti enkripsi komunikasi data, autentikasi perangkat yang kuat, serta pembaruan firmware berkala untuk menambal celah keamanan yang ditemukan, menjadi pertimbangan desain yang tidak boleh diabaikan meski sering kali dianggap sebagai fitur 'tambahan' oleh pengembang pemula yang lebih fokus pada fungsionalitas inti.

Privasi data juga menjadi pertimbangan penting, khususnya pada aplikasi yang mengumpulkan data terkait individu tertentu — misalnya sensor wearable pemantauan kesehatan (Bab 21) yang berpotensi mengungkap informasi sensitif tentang kondisi kesehatan seseorang,

atau sistem pemantauan kualitas udara rumah tangga yang secara tidak langsung dapat mengungkap pola aktivitas penghuni rumah (misalnya waktu memasak yang terdeteksi dari lonjakan VOC dapur). Pengembang sistem sensor gas yang bertanggung jawab perlu mempertimbangkan bagaimana data dikumpulkan, disimpan, dan siapa saja yang memiliki akses terhadapnya, sejalan dengan prinsip perlindungan data pribadi yang semakin ditegaskan berbagai regulasi di banyak negara.

30.5 Standardisasi, Sertifikasi, dan Regulasi Terkait secara Umum

Berbagai badan standardisasi internasional dan nasional menetapkan persyaratan teknis dan prosedur pengujian bagi perangkat deteksi gas, khususnya untuk aplikasi keselamatan kritis seperti deteksi gas mudah terbakar dan toksik di lingkungan

industri. Sertifikasi semacam ini umumnya mencakup pengujian kinerja pada kondisi lingkungan ekstrem, uji ketahanan jangka panjang, serta verifikasi independen terhadap klaim sensitivitas dan akurasi yang diklaim produsen — sebuah proses yang jauh lebih ketat dibanding sekadar pengujian internal produsen semata.

Bagi pengembang sistem sensor gas untuk aplikasi komersial atau industri, memahami kerangka regulasi dan standar yang berlaku di yurisdiksi dan sektor industri terkait menjadi keharusan sejak tahap awal perancangan (bukan sekadar pertimbangan di akhir proyek), mengingat persyaratan sertifikasi dapat sangat memengaruhi keputusan desain — mulai dari pemilihan komponen bersertifikat, desain casing yang memenuhi standar ketahanan lingkungan tertentu, hingga dokumentasi teknis yang perlu disiapkan untuk proses sertifikasi. Bagi proyek

akademik dan purwarupa penelitian, meski sertifikasi formal umumnya belum diperlukan, memahami kerangka acuan standar yang relevan tetap bermanfaat sebagai referensi praktik terbaik (best practice) dalam perancangan sistem.

BAB 31
KESIMPULAN

Sebagai penutup buku ini, bab terakhir merangkum perjalanan pembahasan dari Bab 1 hingga Bab 30, menyintesis benang merah yang menghubungkan seluruh topik, serta menawarkan refleksi mengenai tantangan dan peluang bagi pembaca yang ingin melangkah lebih jauh di bidang teknologi sensor gas.

31.1 Kesimpulan Umum Perkembangan Teknologi Sensor Gas

Perjalanan panjang buku ini — dari pertanyaan mendasar mengapa gas perlu dideteksi (Bab 1), menyusuri berbagai prinsip fisika dan kimia sensing (Bab 2–9), sistem instrumentasi dan kecerdasan buatan (Bab 10–15), aplikasi multisektor yang luas (Bab 16–25), hingga teknologi generasi terbaru dan metodologi pengembangan (Bab

26–30) — mengungkap sebuah benang merah yang konsisten: sensor gas, betapapun beragam teknologi dan aplikasinya, senantiasa berhadapan dengan trade-off fundamental yang sama antara sensitivitas, selektivitas, biaya, konsumsi daya, dan keandalan jangka panjang.

Tidak ada satu teknologi sensor gas yang secara universal 'terbaik' untuk seluruh aplikasi — sensor MOS yang terjangkau namun kurang selektif (Bab 5) memiliki tempatnya sendiri berdampingan dengan sensor NDIR yang presisi namun mahal (Bab 7), sebagaimana sistem sederhana berbasis alarm biner memiliki tempatnya sendiri berdampingan dengan sistem cerdas berbasis machine learning dan IoT yang jauh lebih kompleks. Kebijaksanaan seorang perancang sistem sensor gas yang baik terletak pada kemampuan memilih teknologi dan pendekatan yang tepat sesuai kebutuhan spesifik aplikasi — bukan sekadar mengejar

teknologi paling canggih atau paling murah tanpa pertimbangan konteks.

31.2 Tantangan Riset

Beberapa tantangan riset mendasar tetap terbuka lebar di bidang ini: peningkatan selektivitas sensor berbiaya rendah tanpa mengorbankan keterjangkauan harga, pengembangan material sensing baru yang stabil jangka panjang pada kondisi lingkungan nyata (bukan hanya kondisi laboratorium terkontrol), serta jembatan yang masih perlu dipersempit antara hasil riset machine learning yang menjanjikan pada dataset terbatas dengan performa sesungguhnya pada kondisi dunia nyata yang jauh lebih bervariasi dan tidak terduga.

Peluang yang menjanjikan mencakup eksplorasi lebih lanjut material nano generasi baru (Bab 8, Bab 26), pengembangan algoritma kompensasi lingkungan dan kalibrasi otomatis yang lebih

cerdas (Bab 15, Bab 16, Bab 26), validasi klinis yang lebih ketat untuk aplikasi kesehatan berbasis napas (Bab 21), serta penelitian interdisipliner yang menggabungkan keahlian teknik elektro, kimia material, ilmu komputer, dan domain aplikasi spesifik (kedokteran, pertanian, lingkungan) untuk menghasilkan sistem yang benar-benar menjawab kebutuhan nyata, bukan sekadar demonstrasi kemampuan teknis semata.

31.3 Peluang Industri dan Inovasi

Dari perspektif industri, pasar sensor gas terus tumbuh seiring meningkatnya kesadaran akan kualitas udara, regulasi lingkungan yang semakin ketat di berbagai negara, serta transformasi digital yang mendorong adopsi IoT di hampir semua sektor industri. Peluang inovasi terbuka luas bagi wirausahawan teknologi (technopreneur) yang mampu

menggabungkan pemahaman teknis mendalam mengenai sensor gas dengan pemahaman kebutuhan pasar yang spesifik — baik itu solusi keselamatan industri yang lebih terjangkau bagi usaha kecil-menengah, sistem pemantauan lingkungan yang lebih mudah diakses masyarakat umum, maupun aplikasi niche yang belum banyak tergarap seperti pemantauan kualitas udara untuk kelompok rentan (penderita asma, lansia) secara personal.

31.4 Peluang Pengembangan Startup Teknologi Sensor Gas

Menutup buku ini, penulis ingin menyampaikan optimisme bahwa bidang teknologi sensor gas menawarkan ruang yang luas bagi inovasi dan wirausaha teknologi di Indonesia maupun secara global. Kombinasi kebutuhan nyata yang terus tumbuh (kualitas udara, keselamatan industri, ketahanan pangan, kesehatan

masyarakat) dengan kemajuan teknologi pendukung yang semakin terjangkau (mikrokontroler murah, konektivitas IoT yang matang, framework machine learning yang semakin mudah diakses) menciptakan kondisi yang menguntungkan bagi lahirnya inovasi baru dari kalangan akademisi, peneliti, maupun wirausahawan muda.

GLOSARIUM

Glosarium berikut memuat 121 istilah kunci yang digunakan sepanjang buku, disusun alfabetis dengan definisi singkat yang konsisten dengan penggunaan istilah pada bab terkait.

Istilah	Definisi
Absorpsi	Proses penyerapan gas hingga masuk ke dalam struktur material, berbeda dari adsorpsi yang hanya menempel di permukaan.
Accuracy (Akurasi)	Seberapa dekat hasil pengukuran sensor terhadap nilai sebenarnya, diverifikasi melalui instrumen referensi.
ADC (Analog-to-Digital Converter)	Komponen yang mengonversi sinyal tegangan analog dari sensor menjadi representasi digital untuk diproses mikrokontroler.
Adsorpsi	Penempelan molekul gas pada permukaan material tanpa masuk ke dalam struktur material tersebut; terbagi menjadi physisorption dan chemisorption.

Istilah	Definisi
Aging (Penuaan Sensor)	Proses degradasi kinerja sensor secara bertahap seiring waktu pemakaian, memengaruhi baseline dan sensitivitas.
AI Embedded	Kecerdasan buatan yang tertanam langsung pada tingkat chip sensor tanpa memerlukan mikrokontroler eksternal terpisah.
Air Quality Index (AQI)	Indeks yang dihitung dari konsentrasi beberapa polutan udara utama untuk mengomunikasikan tingkat risiko kesehatan kepada masyarakat.
Alarm Fatigue	Fenomena pengguna mengabaikan atau menonaktifkan sistem alarm akibat terlalu sering menerima alarm palsu (false alarm).
Alarm Threshold	Ambang batas konsentrasi gas yang ditetapkan untuk memicu peringatan atau alarm pada suatu sistem deteksi.
Amperometrik	Jenis sensor elektrokimia yang mengukur arus listrik yang dihasilkan reaksi elektrokimia pada tegangan bias tetap.
ANN (Artificial Neural Network)	Model machine learning yang memodelkan hubungan nonlinear kompleks melalui lapisan neuron buatan yang saling terhubung.
Asfiksia	Kondisi kekurangan oksigen yang dapat membahayakan nyawa, sering terjadi di

Istilah	Definisi
	ruang tertutup akibat tergantikannya oksigen oleh gas lain.
Baseline	Nilai pembacaan sensor pada kondisi tanpa paparan gas target, menjadi titik acuan perhitungan perubahan sinyal.
Beer-Lambert, Hukum	Hukum yang menyatakan bahwa penyerapan cahaya bersifat eksponensial terhadap konsentrasi gas dan panjang lintasan optik.
Bio-inspired Sensing	Pendekatan perancangan sensor yang meniru mekanisme penciuman biologis pada makhluk hidup.
Biomarker	Senyawa atau tanda biologis terukur yang berkaitan dengan kondisi fisiologis atau patologis tertentu.
Breath Analysis	Analisis komposisi gas dan VOC dalam napas manusia sebagai jendela non-invasif memahami kondisi kesehatan.
Calibration Chamber (Ruang Kalibrasi)	Lingkungan terkendali tempat konsentrasi gas dapat diatur presisi untuk keperluan kalibrasi sensor.
Catalytic Sensor (Pellistor)	Jenis sensor gas mudah terbakar yang mengukur panas dari reaksi pembakaran katalitik pada elemen sensor.

Istilah	Definisi
CEMS (Continuous Emission Monitoring System)	Sistem pemantauan emisi cerobong industri secara berkelanjutan dan real-time.
Chemisorption	Proses adsorpsi yang melibatkan ikatan kimia relatif kuat antara molekul gas dan permukaan material.
Cloud Computing	Model pemrosesan dan penyimpanan data pada server jarak jauh yang diakses melalui internet.
CNN (Convolutional Neural Network)	Arsitektur deep learning yang awalnya populer untuk citra, dapat diterapkan pada data sensor gas time series.
Combustible Gas	Gas yang dapat terbakar atau meledak pada rentang konsentrasi tertentu di udara, misalnya metana dan LPG.
Conductometrik	Jenis sensor elektrokimia yang mengukur perubahan konduktivitas listrik elektrolit akibat reaksi kimia.
Cross-sensitivity	Respons sensor terhadap gas selain gas target yang dimaksud, sumber utama kesalahan pada sensor berselektivitas rendah.

Istilah	Definisi
Digital Twin	Representasi virtual suatu sistem fisik yang disinkronkan secara real-time dengan data dari sistem aslinya.
Drift	Pergeseran nilai baseline atau sensitivitas sensor secara perlahan seiring waktu meski tanpa paparan gas target.
Edge AI	Pemrosesan kecerdasan buatan yang dilakukan langsung pada perangkat tepi jaringan, bukan di server cloud.
Edge Computing	Paradigma pemrosesan data sedekat mungkin dengan sumber data, alih-alih mengirim seluruh data mentah ke server pusat.
Electronic Nose (E-Nose)	Sistem yang mengintegrasikan sensor array dengan algoritma pengenalan pola untuk meniru penciuman biologis.
Elektrolit	Medium penghantar ion pada sensor elektrokimia, tempat berlangsungnya reaksi setengah sel.
Ensemble Learning	Teknik machine learning yang menggabungkan prediksi dari beberapa model sederhana untuk hasil yang lebih akurat.
Environmental Drift	Pergeseran baseline sensor akibat perubahan kondisi lingkungan jangka panjang, berbeda dari aging material.

Istilah	Definisi
Etilen (C2H4)	Hormon tumbuhan gas yang berperan sentral dalam proses pematangan buah dan penuaan tumbuhan.
F1-score	Metrik evaluasi klasifikasi berupa rata-rata harmonik antara precision dan recall.
False Alarm (Alarm Palsu)	Kondisi sistem memicu alarm padahal tidak ada bahaya gas sesungguhnya.
Feature Extraction (Ekstraksi Fitur)	Proses menyederhanakan data mentah sensor menjadi nilai representatif untuk input algoritma machine learning.
FeNO (Fractional Exhaled Nitric Oxide)	Kadar nitric oxide dalam napas yang dihembuskan, biomarker napas tervalidasi klinis untuk peradangan saluran napas.
Fingerprint Gas	Pola respons kolektif dari sensor array yang khas untuk suatu jenis atau campuran gas tertentu.
Gas Analyzer	Instrumen presisi tinggi untuk mengukur konsentrasi gas secara akurat, umum digunakan sebagai referensi kalibrasi.
Gas Rumah Kaca	Gas yang menahan panas matahari di atmosfer melalui efek rumah kaca, seperti CO2, CH4, dan N2O.

Istilah	Definisi
Gas Standar (Calibration Gas)	Gas dengan konsentrasi bersertifikat yang digunakan sebagai referensi pada proses span calibration.
Grain (Butiran)	Unit struktur mikro pada material MOS tempat terjadinya reaksi adsorpsi oksigen dan gas target.
Graphene	Material karbon setebal satu atom dengan luas permukaan spesifik ekstrem, kandidat kuat material sensing generasi baru.
Heterostruktur	Struktur berlapis dari dua atau lebih material 2D berbeda yang menghasilkan sifat elektronik baru.
Hysteresis	Perbedaan pembacaan sensor pada konsentrasi gas yang sama namun dicapai dari arah kenaikan atau penurunan berbeda.
IAQ (Indoor Air Quality)	Kualitas udara dalam ruangan, memperhatikan CO2, VOC, dan partikulat dari aktivitas dalam gedung.
Instrumentation Amplifier	Penguat operasional presisi tinggi dengan impedansi input besar, digunakan untuk sinyal sensor yang sangat lemah.
IoT (Internet of Things)	Jaringan perangkat fisik dengan sensor dan konektivitas yang memungkinkan pertukaran data melalui internet.

Istilah	Definisi
k-NN (k-Nearest Neighbors)	Algoritma klasifikasi yang menentukan kelas sampel baru berdasarkan kelas mayoritas dari k sampel pelatihan terdekat.
Kalibrasi	Proses membandingkan dan menyesuaikan pembacaan sensor terhadap nilai referensi yang telah diketahui akurasinya.
LDA (Linear Discriminant Analysis)	Teknik reduksi dimensi yang mengoptimalkan pemisahan antarkelas gas yang telah diketahui labelnya.
LEL (Lower Explosive Limit)	Konsentrasi minimum suatu gas di udara yang masih dapat menyulut ledakan.
LOD (Limit of Detection)	Konsentrasi gas terendah yang masih dapat dideteksi secara andal oleh sensor, dibedakan dari noise.
LoRaWAN	Protokol jaringan nirkabel jarak jauh berdaya rendah, cocok untuk jaringan sensor gas terdistribusi skala luas.
LSTM (Long Short-Term Memory)	Varian recurrent neural network yang mampu menangkap ketergantungan jangka panjang dalam data sekuensial.
MAE (Mean Absolute Error)	Metrik evaluasi regresi berupa rata-rata besar kesalahan absolut prediksi.
MAP (Modified Atmosphere Packaging)	Teknik pengemasan pangan yang mengatur komposisi gas di dalam kemasan untuk memperpanjang umur simpan.

Istilah	Definisi
MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)	Teknologi fabrikasi struktur mekanis dan elektronik berskala mikrometer pada satu chip.
Missed Detection	Kegagalan sistem memicu alarm pada kondisi yang sebenarnya berbahaya.
MOS (Metal Oxide Semiconductor)	Sensor gas berbasis semikonduktor oksida logam yang bekerja melalui perubahan resistansi akibat reaksi permukaan.
MQTT	Protokol komunikasi ringan berbasis publish-subscribe yang umum digunakan pada sistem IoT sensor gas.
MXene	Kelas material dua dimensi berbasis karbida/nitrida logam transisi dengan potensi besar sebagai sensor gas suhu ruang.
Nanowire	Struktur kawat berskala nano yang menawarkan luas permukaan tinggi untuk meningkatkan kinerja sensor gas.
NDIR (Non-Dispersive Infrared)	Teknologi sensor optik yang mengukur penyerapan cahaya inframerah pada panjang gelombang karakteristik gas target.
Neuromorphic Computing	Arsitektur komputasi yang terinspirasi struktur dan cara kerja otak biologis.

Istilah	Definisi
Noise	Fluktuasi acak pada sinyal output sensor yang membatasi resolusi efektif pengukuran.
Normalisasi	Teknik menyetarakan rentang nilai data antarsensor sebelum digunakan dalam pemrosesan machine learning.
On-device Learning	Kemampuan sistem melakukan adaptasi atau pembelajaran terbatas langsung pada perangkat tanpa mengirim data ke cloud.
Op-amp (Operational Amplifier)	Komponen elektronik untuk menguatkan sinyal lemah dari sensor sebelum diproses lebih lanjut.
Oxygen Sensor (Lambda Sensor)	Sensor elektrokimia otomotif yang mengukur oksigen sisa gas buang sebagai indikator rasio udara-bahan bakar.
PCA (Principal Component Analysis)	Teknik reduksi dimensi yang mentransformasikan data fitur berdimensi tinggi menjadi beberapa komponen utama.
Photoacoustic Sensing	Prinsip sensing berbasis gelombang tekanan/suara yang timbul dari pemanasan periodik gas akibat penyerapan cahaya.
Photoionization Detector (PID)	Sensor yang menggunakan lampu UV untuk mengionisasi molekul VOC, menghasilkan arus proporsional konsentrasi.

Istilah	Definisi
Physisorption	Proses adsorpsi fisik yang bersifat lemah dan reversibel antara molekul gas dan permukaan material.
Poisoning (Sensor Poisoning)	Degradasi permanen kinerja sensor akibat paparan senyawa kimia yang bereaksi ireversibel dengan material sensitif.
Potentiometrik	Jenis sensor elektrokimia yang mengukur beda potensial listrik tanpa aliran arus signifikan.
ppb (part per billion)	Satuan konsentrasi gas setara satu bagian per satu miliar bagian campuran.
ppm (part per million)	Satuan konsentrasi gas setara satu bagian per satu juta bagian campuran.
Precision	Metrik klasifikasi berupa proporsi prediksi positif yang benar-benar positif.
Precision Farming	Pendekatan pertanian presisi yang memanfaatkan sensor dan otomasi untuk optimasi kondisi tumbuh.
Preprocessing	Tahap pembersihan, penyaringan, dan normalisasi data sensor sebelum dianalisis lebih lanjut.
Quantization	Teknik kompresi model machine learning dengan mengurangi presisi numerik bobot model.

Istilah	Definisi
R^2 (R-squared)	Metrik evaluasi regresi yang menyatakan proporsi variasi data yang dijelaskan model.
Random Forest	Algoritma ensemble yang menggabungkan banyak decision tree untuk meningkatkan akurasi dan ketahanan terhadap overfitting.
Recall	Metrik klasifikasi berupa proporsi kasus positif aktual yang berhasil terdeteksi sistem.
Recovery Time	Waktu yang dibutuhkan sinyal sensor kembali mendekati nilai baseline setelah gas target dihilangkan.
Redundansi	Pemasangan lebih dari satu sensor independen pada titik kritis yang sama untuk menjaga keandalan sistem.
Reference Electrode	Elektroda pada sensor elektrokimia yang menjaga potensial elektroda kerja tetap stabil.
Regresi	Tugas machine learning yang memperkirakan nilai kontinu, misalnya estimasi konsentrasi gas dalam ppm.
Reliability (Keandalan)	Kemampuan sistem sensor gas untuk terus berfungsi sesuai spesifikasi meski menghadapi potensi kegagalan komponen.

Istilah	Definisi
Repeatability	Konsistensi hasil pengukuran ketika pengujian diulang pada sensor dan kondisi yang sama dalam waktu singkat.
Reproducibility	Konsistensi hasil antarsensor dari batch produksi yang sama atau antarpengujian pada waktu berbeda.
Resolusi	Perubahan konsentrasi gas terkecil yang masih dapat dibedakan oleh sensor.
Response Time	Waktu yang dibutuhkan sensor mencapai sebagian besar nilai akhir pembacaan setelah terpapar gas.
RMSE (Root Mean Square Error)	Metrik evaluasi regresi berupa akar rata-rata kuadrat kesalahan, sensitif terhadap outlier.
RNN (Recurrent Neural Network)	Arsitektur jaringan saraf yang dirancang untuk data sekuensial seperti time series sensor gas.
SAW (Surface Acoustic Wave)	Sensor akustik yang mendeteksi gas melalui perubahan massa pada permukaan kristal piezoelektrik.
Selektivitas	Kemampuan sensor merespons gas target secara spesifik dibanding gas pengganggu lain.

Istilah	Definisi
Self-powered Sensor	Sensor gas yang mencatu daya sendiri dari sumber energi ambient tanpa baterai konvensional.
Sensitivitas	Besarnya perubahan sinyal output sensor terhadap perubahan konsentrasi gas target.
Sensor Array	Kombinasi beberapa sensor gas dengan profil sensitivitas berbeda dalam satu sistem pengukuran.
Sensor Fusion	Proses penggabungan data dari berbagai sensor menjadi satu representasi terpadu yang lebih informatif.
Signal Conditioning	Tahap penguatan, penyaringan, dan linierisasi sinyal sensor sebelum digitalisasi.
Span Calibration	Kalibrasi menggunakan gas standar berkonsentrasi diketahui untuk menetapkan kemiringan kurva kalibrasi.
Spoilage (Pembusukan)	Proses penurunan kualitas pangan akibat aktivitas mikroorganisme atau reaksi kimia enzimatik.
Stabilitas	Konsistensi kinerja sensor dari waktu ke waktu dalam rentang bulan hingga tahun.
SVM (Support Vector Machine)	Algoritma klasifikasi yang mencari bidang pemisah optimal antarkelas dalam ruang fitur.

Istilah	Definisi
TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)	Teknik spektroskopi laser presisi tinggi untuk pengukuran gas jejak.
Thermal Runaway	Kegagalan termal pada sel baterai yang melepaskan gas mudah terbakar dan toksik sebagai tanda peringatan dini.
TinyML	Cabang edge AI yang menjalankan inferensi machine learning pada mikrokontroler berdaya sangat rendah.
Transduser	Perangkat yang mengubah satu bentuk energi menjadi bentuk energi lain, inti dari setiap sensor gas.
UEL (Upper Explosive Limit)	Konsentrasi maksimum suatu gas di udara yang masih dapat menyulut ledakan.
Uncertainty (Ketidakpastian)	Rentang nilai di mana nilai pengukuran sebenarnya kemungkinan besar berada.
Validasi	Pengujian independen model atau kalibrasi menggunakan data yang belum pernah dilihat sebelumnya.
VOC (Volatile Organic Compounds)	Senyawa organik volatil yang mudah menguap pada suhu ruang, banyak menjadi target sensor gas.

Istilah	Definisi
Wearable Sensor	Sensor gas yang dikenakan pada tubuh untuk pemantauan paparan atau kondisi secara berkelanjutan.
Working Electrode (Elektroda Kerja)	Elektroda pada sensor elektrokimia tempat gas target bereaksi secara elektrokimia.
WSN (Wireless Sensor Network)	Jaringan node sensor yang saling terhubung secara nirkabel untuk pemantauan terdistribusi.
Zero Calibration	Kalibrasi menggunakan udara bersih atau gas nol untuk menetapkan titik referensi baseline sensor.

INDEKS

Indeks berikut memuat 132 entri istilah teknis beserta nomor Bab tempat istilah tersebut dibahas.

Istilah	Bab	Istilah	Bab
ADC	3, 10	LPG	1, 19, 24, 29
Adsorpsi	2, 3, 5	LSTM	12
AI Embedded	26, 27	MAE	12
Air Quality Index (AQI)	17	MAP (Modified Atmosphere Packaging)	23
Akurasi	9	MEMS	4, 8
Alarm Fatigue	30	Metana (CH4)	18, 19, 25
Alarm Threshold	15, 18, 30	Missed Detection	30
Amonia (NH3)	6, 18, 22, 23	MOS (Metal Oxide Semiconductor)	4, 5
Amperometrik	6	MQ, Sensor Seri	5, 29

Istilah	Bab	Istilah	Bab
ANN	12	MQTT	13, 17, 24, 29
AQI	17	MXene	4, 8, 26
Arsitektur IoT	13	Nanowire	4, 8
Aseton	21	NDIR	4, 7, 17, 20
Asfiksia	2, 25	Neuromorphic Computing	26
Baseline	9, 15	Noise	9
Beer-Lambert, Hukum	7	NOx	17, 20
Bio-inspired Sensing	4, 26	O2 (Oksigen), Sensor	6, 20, 25
Biogas	18, 19	Oxygen Sensor (Lambda Sensor)	20
Biomarker	21	PCA	11, 12
Breath Analysis	21	Pellistor	4, 18, 25
Calibration Chamber	15	Photoacoustic Sensing	7

Istilah	Bab	Istilah	Bab
Catalytic Sensor (Pellistor)	4, 18, 25	Photoionization Detector	4
CEMS	17	Physisorption	2, 5
Chemisorption	2, 5	Poisoning, Sensor	16, 25
Cloud AI	14	Potentiometrik	6, 20
CNN	12	ppm / ppb	2
CO (Karbon Monoksida)	1, 6, 17, 20, 24, 25	Precision Farming	22
CO2 (Karbon Dioksida)	2, 7, 17, 22, 24	Precision (metrik)	12
Combustible Gas	1, 4, 18, 25	R^2 (R-squared)	12
Cross-sensitivity	5, 9, 11	Random Forest	12
Digital Twin	26	Recall	12
Drift	5, 9, 15, 16	Recovery Time	9

Istilah	Bab	Istilah	Bab
Edge AI	14, 26, 27	Redundansi	18, 25, 30
Edge Computing	14	Regresi	11, 12
Elektrolit	6	Reliability	18, 30
Electronic Nose (E-Nose)	11, 21, 23	Repeatability	9
Emisi Kendaraan	20	Reproducibility	9
Energy Harvesting	26	Resolusi	9
Ensemble Learning	12	Response Time	9
Environmental Drift	16	RMSE	12
Etilen	22, 23	RNN	12
F1-score	12	SAW (Surface Acoustic Wave)	4
False Alarm	18, 29, 30	Selektivitas	9
FeNO	21	Self-powered Sensor	26

Istilah	Bab	Istilah	Bab
Feature Extraction	11, 12, 28	Sensitivitas	9
Fingerprint Gas	11	Sensor Array	11, 12
Fuel Cell	19	Sensor Fusion	11, 20, 26
Gas Analyzer	3, 15	Signal Conditioning	10, 28
Gas Rumah Kaca	2, 17	Smart City	17, 27
Gas Standar	15	Smart Home	24
Graphene	4, 8, 26	SO2	6, 17
H2S (Hidrogen Sulfida)	6, 18, 22, 25	Span Calibration	15
Heterostruktur	26	Spoilage (Pembusukan Pangan)	23
Hidrogen	19, 20	Stabilitas	9
Hysteresis	9	SVM	12
IAQ (Indoor Air Quality)	17, 24	TDLAS	7
Instrumentation Amplifier	10	Thermal Runaway	19, 20

Istilah	Bab	Istilah	Bab
IoT	13, 17, 24	TinyML	14, 26, 29
k-NN	12	Transduser	3
Kalibrasi	15, 28	Uncertainty	15
Kandang Unggas	22	Validasi	12, 15, 21
Katup Solenoid	24	VOC	17, 21, 22, 23
LDA	11, 12	Wearable Sensor	8, 21, 25, 26, 27
LEL / UEL	1, 29	Working Electrode	6
LOD	9	WSN (Wireless Sensor Network)	13, 26
LoRaWAN	13, 17	Zero Calibration	15

DAFTAR PUSTAKA

No.	Sumber (Judul, Jurnal/Penerbit, Tahun, DOI)
1	Metal oxide semiconductors for gas sensing. Engineering Reports, vol. 5, no. 6, e12604, 2023. DOI/ref: 10.1002/eng2.12604.
2	Stability of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors: A Review. IEEE Sensors Journal, 2022. DOI/ref: 10.1109/JSEN.2022.3148264.
3	N. Owusu, "Modification of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors Using Conducting Polymer Materials". Journal of Sensors, art. 7427986, 11 pages, 2023. DOI/ref: 10.1155/2023/7427986.
4	Metal oxide semiconductors for gas sensors: A comprehensive review of materials, mechanisms, and performance. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2026. DOI/ref: 10.1016/j.jsamd.2025 (ScienceDirect, lihat rincian pada laman jurnal).
5	Advances in metal oxide semiconductor gas sensors for trace gas detection: From material fundamentals to device engineering. ScienceDirect (Sensors and Actuators B: Chemical, terkait), 2025. DOI/ref: lihat DOI pada laman ScienceDirect S0925838825046146.

No.	Sumber (Judul, Jurnal/Penerbit, Tahun, DOI)
6	Road Map of Semiconductor Metal-Oxide-Based Sensors: A Review. Sensors (MDPI), vol. 23, no. 15, art. 6849, 2023. DOI/ref: 10.3390/s23156849.
7	Recent Advances in Electrochemical Sensors for Detecting Toxic Gases: NO2, SO2 and H2S. Sensors (MDPI) — tersedia pada PMC, 2019. DOI/ref: PMC6413198 (lihat PubMed Central).
8	M. Li et al., "Enhanced Gas Classification in Electronic Nose Systems Using an SMOTE-Augmented Machine Learning Framework". Sensors (MDPI), art. 714, 2026. DOI/ref: 10.3390/s26020714.
9	Understanding the Concepts of Smart E-Nose Technology in Combination With Machine Learning for New Era of Food Safety: An Advanced Review. Food Safety and Health (Wiley), 2025. DOI/ref: 10.1002/fsh3.70029.
10	K. Peng et al., "E-Nose: Time–Frequency Attention Convolutional Neural Network for Gas Classification and Concentration Prediction". Sensors (MDPI), vol. 24, no. 13, art. 4126, 2024. DOI/ref: 10.3390/s24134126.
11	Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. Artificial Intelligence Review (Springer), 2025. DOI/ref: 10.1007/s10462-025-11277-9.

No.	Sumber (Judul, Jurnal/Penerbit, Tahun, DOI)
12	AI-IoT Low-Cost Pollution-Monitoring Sensor Network to Assist Citizens with Respiratory Problems. tersedia pada PubMed Central (PMC10708678), 2023. DOI/ref: lihat PMC10708678.
13	On the Security and Data Integrity of Low-Cost Sensor Networks for Air Quality Monitoring. tersedia pada PubMed Central (PMC6308815), 2019. DOI/ref: lihat PMC6308815.
14	E. Sabato et al., "TinyML for Ubiquitous Edge AI". arXiv preprint, 2021. DOI/ref: arXiv:2102.01255.
15	"Gas Leakage Detection Using Tiny Machine Learning". Electronics (MDPI), vol. 13, no. 23, art. 4768, 2024. DOI/ref: 10.3390/electronics13234768.
16	Y. Yoon et al., "Flexible Graphene-Based Wearable Gas and Chemical Sensors". ACS Applied Materials & Interfaces, 2017. DOI/ref: 10.1021/acsami.7b07063.
17	Recent Advances in Flexible and Wearable Gas Sensors Harnessing the Potential of 2D Materials. Small Science (Wiley), 2025. DOI/ref: 10.1002/smsc.202500025.

No.	Sumber (Judul, Jurnal/Penerbit, Tahun, DOI)
18	State-of-the-Art advances and challenges in wearable gas sensors for emerging applications: Innovations and future prospects. ScienceDirect (Sensors and Actuators / terkait, S1385894724093902), 2024. DOI/ref: lihat DOI pada laman ScienceDirect.
19	M. Azlouk, M. A. Basyooni-M. Kabatas, Y. R. Eker, E. Zor, H. Bingol, "Graphene oxide nanocellulose composite as a highly efficient substrate-free room temperature gas sensor". Results in Engineering, vol. 22, art. 102228, 2024. DOI/ref: 10.1016/j.rineng.2024.102228 (lihat laman DOAJ).
20	Application of electronic nose and machine learning used to detect soybean gases under water stress and variability throughout the daytime. Frontiers in Plant Science, 2024. DOI/ref: 10.3389/fpls.2024.1323296.
21	H. Chou, L. Godbeer, M. Allsworth, B. Boyle, M. L. Ball, et al., "Progress and challenges of developing volatile metabolites from exhaled breath as a biomarker platform". Metabolomics, vol. 20, no. 4, art. 72, 2024. DOI/ref: 10.1007/s11306-024-02142-x.
22	A. N. Damdam, L. O. Ozay, C. K. Ozcan, A. Alzahrani, R. Helabi, K. N. Salama, "IoT-Enabled Electronic Nose System for Beef Quality Monitoring and Spoilage Detection". Foods, vol.

No.	Sumber (Judul, Jurnal/Penerbit, Tahun, DOI)
	12, no. 11, art. 2227, 2023. DOI/ref: 10.3390/foods12112227.
23	X. Fan, R. Zhong, H. Liang, Q. Zhong, H. Huang, et al., "Exhaled VOC detection in lung cancer screening: a comprehensive meta-analysis". BMC Cancer, vol. 24, art. 786, 2024. DOI/ref: 10.1186/s12885-024-12537-7.
24	"Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0". ScienceDirect (Journal terkait IIoT), 2024. DOI/ref: lihat DOI pada laman ScienceDirect S277266222400002X.
25	"Research Progress on Ammonia Sensors Based on Ti3C2Tx MXene at Room Temperature: A Review". tersedia pada PubMed Central (PMC11280721), 2024. DOI/ref: lihat PMC11280721.
26	"A Comparative Review of Graphene and MXene-Based Composites towards Gas Sensing". tersedia pada PubMed Central (PMC11478074), 2024. DOI/ref: lihat PMC11478074.
27	"Recent advances in MXene gas sensors: synthesis, composites, and mechanisms". npj 2D Materials and Applications, 2025. DOI/ref: lihat DOI pada laman nature.com/articles/s41699-025-00586-w.

No.	Sumber (Judul, Jurnal/Penerbit, Tahun, DOI)
28	"Sustainable innovations in e-nose sensor arrays for meat and seafood preservation: Advances in volatile compound detection". ScienceDirect, 2026. DOI/ref: lihat DOI pada laman ScienceDirect S2590123026013009.
29	"A Systematic Review of the Applications of Electronic Nose and Electronic Tongue in Food Quality Assessment and Safety". MDPI (Foods/Biosensors terkait), vol. 13, no. 5, art. 161, 2025. DOI/ref: 10.3390/... (lihat laman MDPI).

TEKNOLOGI SENSOR GAS

Teori, Teknologi, Sistem Instrumentasi, Kecerdasan Buatan, dan Aplikasi Multisektor



UWIKA
PUSTAKA KARTIKA

Penerbit Pustaka Kartika
Jl. Sutorejo Prima Utara II/1, Surabaya 60113
Telp. (031) - 5922403 / 5926359
Email: perpustakaan@widyakartika.ac.id

ISBN 978-634-97433-2-7 (PDF)
9 786349 743327