

SENSOR & ARDUINO

untuk Praktikum

di Laboratorium Kimia



SENSOR & ARDUINO UNTUK PRAKTIKUM DI LABORATORIUM KIMIA

Penulis: KASMUI

Desain Sampul & Penata Letak: KASMUI / Tim Artistik Penerbit

Penerbit: Jaten & Siblings Gang, Jaten, Patemon, Gunungpati, Kota Semarang

Cetakan I, Edisi Tahun 2026

Hak Cipta 2026 pada Penulis. Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang. Dilarang mengutip, memperbanyak, atau menerjemahkan sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit, kecuali untuk kepentingan tinjauan pustaka atau resensi.

Perpustakaan Nasional RI: Katalog Dalam Terbitan (KDT)

KASMUI Sensor & Arduino untuk Praktikum di Laboratorium Kimia (Edisi I) — Kota Semarang: Jaten & Siblings, 2026. ... hlm; 21 x 29,7 cm.

ISBN: 978-623-XXXX-XX-X

1. Sejarah Islam
2. Biografi Ibnu Batutah
3. Historiografi I. Judul

DDC 297.09

Dicetak oleh Jaten Press

KATA PENGANTAR (IFTITAH)

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah *Subhanahu wa Ta'ala* yang telah menundukkan alam semesta beserta segala *sunnatullah* di dalamnya untuk direnungi, diukur, dan dipelajari oleh umat manusia. Dalam perancangan alam semesta, Allah menegaskan pentingnya "ukuran" (*qadar*), ketetapan, dan presisi yang membalut hukum-hukum alam dasar, termasuk fisika dan kimia. Sebagaimana termaktub dalam firman-Nya:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

"*Sungguh, Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran (takdir/ketetapan yang presisi).*" (QS. Al-Qamar: 49)

Ayat di atas memberikan landasan ontologis dan epistemologis yang sangat kuat bagi ilmuwan kimia. Dalam sains kimia, konsep dimensi dan ukuran ini termanifestasi dalam stoikiometri, termodinamika reaksi, konsentrasi molar, hingga kinetika yang kesemuanya menuntut tingkat akurasi dan presisi pengukuran yang sangat tinggi (*itqan*). Hal ini bersesuaian dengan dorongan etos kerja profesional dalam Islam, sebagaimana disabdakan oleh Rasulullah *Shallallahu 'alaihi wa sallam*:

إِنَّ اللَّهَ تَعَالَى يُحِبُّ إِذَا عَمِلَ أَحَدُكُمْ عَمَلًا أَنْ يُثِقَنَهُ

"*Sesungguhnya Allah amat mencintai jika salah seorang di antara kalian melakukan suatu pekerjaan, lalu ia melakukannya dengan itqan (profesional, teliti, dan presisi).*" (HR. Thabrani dalam Al-Mu'jam Al-Awsath, dinilai hasan).

Urgensi Digitalisasi Laboratorium Kimia Perguruan Tinggi Ilmu kimia analitik dan fisik pada abad ke-21 tidak lagi dapat bersandar semata-mata pada pengamatan kualitatif visual—seperti perubahan warna titrasi dengan mata telanjang atau pengukuran volumetrik manual yang sangat rentan terhadap ralat paralaks (*human error*) dan bias kognitif. Praktikum di perguruan tinggi tingkat Sarjana (S1) mutlak membutuhkan transisi radikal dari metode instrumentasi konvensional menuju instrumentasi digital *real-time*. Mahasiswa kimia dewasa ini dituntut untuk tidak hanya memvalidasi mekanisme reaksi teoritis, tetapi juga menguasai metode akuisisi data otomatis secara kontinu (*data logging*).

Gap Riset: Ketergantungan pada Instrumen Komersial dan Sindrom *Black-Box* Berdasarkan tinjauan riset pendidikan tinggi, saat ini terdapat kesenjangan pedagogik yang kronis. Laboratorium sering kali sangat bergantung pada instrumen analitik komersial siap pakai (seperti *Spectrophotometer UV-Vis*, *Auto-titrator*, atau *Digital pH Meter* dengan harga ratusan juta rupiah). Selain membebani anggaran universitas, alat-alat komersial ini hadir sebagai *black-box system* (sistem kotak hitam). Mahasiswa hanya dilatih sebagai "operator alat" yang memasukkan kuvet sampel dan mencatat angka pada layar LCD, tanpa memiliki pemahaman intrinsik mengenai bagaimana foton berinteraksi dengan detektor optik, bagaimana sinyal analog dikonversi menjadi data digital, atau bagaimana algoritma kalibrasi bekerja di dalam sirkuit internalnya. Kondisi ini secara masif mendegradasi daya kritis dan kemampuan modifikasi instrumen yang sebenarnya esensial bagi seorang peneliti sains murni.

Kebaruan Ide (*Novelty*): Konvergensi Kimia, Sensor, dan Elektronika Terbuka Buku "*Sensor & Arduino untuk Praktikum di Laboratorium Kimia*" ini disusun untuk meruntuhkan tembok pembatas antara disiplin ilmu kimia dan ilmu instrumentasi elektronika. Melalui kerangka mikrokontroler *open-source* (Arduino) dan integrasi sensor berbiaya rendah (*low-cost sensors*), buku ini menawarkan kebaruan (*novelty*) paradigma pembelajaran: dari sekadar "memakai instrumen ukur" menjadi "menciptakan dan memprogram instrumen ukur".

Melalui panduan eksperimental yang ketat dan akademis di dalam buku ini, mahasiswa akan dituntun membangun sendiri kalorimeter digital, sistem titrasi otomatis, hingga detektor gas volatil. Pendekatan ini tidak hanya menekan biaya infrastruktur riset secara drastis, tetapi secara fundamental mencetak ilmuwan kimia masa depan yang adaptif terhadap era *Internet of Things* (IoT) dan *Chemistry 4.0*. Harapannya, literatur ini menjadi katalis terciptanya generasi peneliti yang memadukan keluasan wawasan sains, kepiawaian teknologi, dan presisi *itqan* dalam setiap penemuannya.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR (IFTITAH)	4
DAFTAR ISI	6
BAB 1: PENGANTAR INSTRUMENTASI KIMIA BERBASIS MIKROKONTROLER	9
1.1. Pergeseran Paradigma Praktikum Kimia Abad 21	9
1.2. Pengenalan Ekosistem Mikrokontroler untuk Riset Sains	10
1.3. Anatomi Papan Pengembangan (Arduino Uno, Nano, ESP32) dalam Konteks Lab	12
1.4. Validasi, Kalibrasi, dan Batas Deteksi Instrumentasi Rakitan (Limit of Detection/LoD)	13
DAFTAR PUSTAKA (BAB 1)	15
BAB 2: FUNDAMEN ARDUINO IDE DAN RANGKAIAN ELEKTRONIKA DASAR	16
2.1. Arsitektur dan Navigasi Perangkat Lunak Arduino IDE	16
2.2. Sintaksis Dasar Pemrograman C/C++ untuk Akuisisi Data Sensor	17
2.3. Komponen Pasif dan Aktif (Resistor, Kapasitor, Breadboard, Jumper)	19
2.4. Membaca Sinyal Analog, Digital, dan Pulse Width Modulation (PWM)	20
2.5. Keselamatan Kerja Listrik (K3) di Sekitar Reagen Berbahaya	22
DAFTAR PUSTAKA (BAB 2)	24
BAB 3: TERMOKIMIA DIGITAL: KALORIMETRI BERSENSOR SUHU DAN MASSA	25
3.1. Tinjauan Termodinamika Entalpi Reaksi dan Kapasitas Kalor	25
3.2. Spesifikasi Sensor Suhu Presisi Tinggi (DS18B20, Thermocouple MAX6675)	26
3.3. Modul Load Cell dan HX711 untuk Pengukuran Massa Waktu-Nyata	28
3.4. <i>Blueprint</i> Alat: Merakit Kalorimeter Digital Berbasis Arduino	31
3.5. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Penentuan Entalpi Pelarutan	33
DAFTAR PUSTAKA (BAB 3)	36
BAB 4: ELEKTROKIMIA & KINETIKA: SISTEM TITRASI OTOMATIS	37
4.1. Teori Asam-Basa dan Dinamika Kurva Titrasi	37
4.2. Karakterisasi Sensor pH Analog dan Kompensasi Suhu Otomatis (ATC)	39
4.3. Mengontrol Motor Stepper/Servo untuk <i>Peristaltic Pump</i> (Penetesan Titran)	41
4.4. <i>Blueprint</i> Alat: <i>Auto-Titrator</i> Asam-Basa Sederhana	44
4.5. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Penentuan Konsentrasi Larutan	46
DAFTAR PUSTAKA (BAB 4)	49
BAB 5: OPTIK & FOTOKIMIA: KOLORIMETRI DAN SPEKTROFOTOMETRI VISIBEL	50
5.1. Hukum Lambert-Beer dan Interaksi Cahaya-Materi	50

5.2. Sensor Warna (TCS3200) dan Fotodiode sebagai Detektor Optik	52
5.3. Penggunaan LED RGB sebagai Sumber Cahaya Monokromatik Alternatif	55
5.4. Blueprint Alat: Spektrofotometer Single-Beam Open Source	58
5.5. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Analisis Konsentrasi Zat Warna.....	59
DAFTAR PUSTAKA (BAB 5).....	63
BAB 6: ANALISIS GAS DAN SENYAWA VOLATIL (HUKUM GAS & STOIKIOMETRI)	64
6.1. Reaksi Penghasil Gas dan Prinsip Sensor Semikonduktor Oksida Logam	64
6.2. Keluarga Sensor MQ (MQ-2, MQ-3, MQ-135) untuk Deteksi Gas Spesifik	65
6.3. <i>Blueprint</i> Alat: Detektor Gas Volatil dan Pemantau Laju Reaksi.....	67
6.4. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Kinetika Reaksi Karbonat-Asam	68
DAFTAR PUSTAKA (BAB 6).....	70
BAB 7: SIFAT KOLIGATIF & KUALITAS AIR: KONDUKTIVITAS DAN TDS	72
7.1. Elektrolit Kuat, Lemah, dan Hubungannya dengan Konduktivitas Elektrik	72
7.2. Sensor TDS (Total Dissolved Solids) dan Probe Conductivity.....	73
7.3. <i>Blueprint</i> Alat: Pemantau Kualitas Air Terasimulasi.....	74
7.4. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Analisis TDS pada Air Minum dan Air Limbah	76
DAFTAR PUSTAKA (BAB 7).....	78
BAB 8: SISTEM AKUISISI DATA & INTERNET OF THINGS (IOT) UNTUK LABORATORIUM KIMIA	79
8.1. Paradigma Laboratorium Cerdas (Smart Lab) dan Arsitektur IoT.....	79
8.2. Mikrokontroler Berbasis WiFi (ESP32 dan ESP8266) dalam Sistem Akuisisi Data	81
8.3. Platform Cloud (Thingspeak, Blynk, dan Google Sheets) untuk Visualisasi Data Kimia.....	83
8.4. <i>Blueprint</i> Alat: Stasiun Pemantau Lingkungan Laboratorium Berbasis IoT	86
8.5. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Monitoring Jarak Jauh Reaksi Kimia	88
DAFTAR PUSTAKA (BAB 8).....	90
BAB 9: KECERDASAN BUATAN (AI) DALAM ANALISIS DATA KIMIA & KEMOMETRIKA	91
9.1. Epistemologi Data: Evolusi dari Statistik Klasik menuju Arsitektur Kemometrika Modern.....	91
9.2. Paradigma <i>Machine Learning</i> dalam Kimia: Kategorisasi <i>Supervised</i> dan <i>Unsupervised Learning</i> pada Data Sensor	93
9.3. Pemrosesan Sinyal dan Reduksi Dimensi: Aplikasi Principal Component Analysis (PCA) pada Spektroskopi Digital	95
9.4. Prediksi Sifat Molekuler menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan (<i>Artificial Neural Networks</i>) dan Regresi Non-Linear.....	97
9.5. Etika Digital dan Integrasi Kebenaran Wahyu dalam Interpretasi Data Kimia Berbasis AI.....	98
DAFTAR PUSTAKA (BAB 9).....	100

BAB 10: KONVERGENSI DIGITAL & MASA DEPAN INSTRUMENTASI KIMIA MANDIRI	101
10.1. Hakikat Konvergensi Digital: Integrasi Nano-Bio-Info dan Kimia Analitik.....	101
10.2. <i>Lab-on-a-Chip</i> (LoC) dan Mikrofluidika: Miniaturisasi Instrumen Masa Depan.....	103
10.3. Demokratisasi Sains: Gerakan <i>Open-Source Hardware</i> dan Kedaulatan Riset	105
10.4. Visi Laboratorium Tanpa Dinding: Realitas Virtual (VR) dan Augmentasi Digital	107
10.5. Khulasah: Refleksi Teologis tentang Masa Depan Ilmu Pengetahuan dan Peradaban Manusia	108
DAFTAR PUSTAKA (BAB 10).....	110
DAFTAR PUSTAKA LENGKAP	112
GLOSARIUM ALFABETIS (A - Z).....	114
LAMPIRAN 1: DATA TEKNIS, TABEL REFERENSI, DAN PANDUAN VISUAL INSTRUMENTASI	119
LAMPIRAN 2: KOMPONEN PROTOTYPING ELEKTRONIKA DAN ARDUINO	124
LAMPIRAN 3: DAFTAR SENSOR DAN SPESIFIKASI ANALITIK	126
LAMPIRAN 4: DAFTAR 50 SENSOR KOMPATIBEL ARDUINO	127

BAB 1: PENGANTAR INSTRUMENTASI KIMIA BERBASIS MIKROKONTROLER

1.1. Pergeseran Paradigma Praktikum Kimia Abad 21

Praktikum kimia di tingkat pendidikan tinggi secara historis didominasi oleh metode observasi empiris yang bergantung kuat pada persepsi indrawi manusia (makroskopis). Pendekatan pedagogik konvensional ini, yang sering diistilahkan sebagai *cookbook chemistry*, memosisikan mahasiswa sekadar untuk membuktikan ulang teori-teori mapan melalui prosedur teknis kaku menggunakan gelas ukur, buret, termometer raksa, dan indikator visual. Meski fundamental untuk melatih keterampilan psikomotorik dasar, metode ini menyimpan kelemahan intrinsik yang tak terelakkan: keterbatasan resolusi mata manusia dalam menangkap fluktuasi perubahan secara *real-time*, subjektivitas penentuan titik akhir (misalnya perbedaan persepsi individu terhadap gradasi warna merah muda *phenolphthalein*), serta inkonsistensi pembacaan meniskus yang memicu bias analitik dan kesalahan sistematis (*systematic errors*).

Memasuki abad ke-21, sains kimia global mengalami pergeseran tektonik menuju era yang didefinisikan oleh literatur akademis sebagai *Chemistry 4.0*. Terminologi ini merupakan analogi langsung dari Revolusi Industri 4.0, di mana proses-proses kimia laboratorium dan industrial mulai dikawinkan dengan teknologi informasi digital, *Internet of Things* (IoT), pemrosesan *Big Data*, dan algoritma cerdas berbasis *machine learning* (Kümmerer et al., 2020). Dalam era *Chemistry 4.0*, fokus riset bergeser dari sekadar "mengamati apa yang terjadi pada awal dan akhir reaksi" menjadi "memantau seluruh profil termodinamika dan kinetika sepanjang reaksi berlangsung secara kontinu tanpa jeda".

Transformasi ini mensyaratkan adanya adopsi masif terhadap instrumentasi yang mampu melakukan **akuisi data otomatis (Automated Data Acquisition)**. Instrumentasi modern menggantikan fungsi indra manusia dengan piranti penginderaan (*sensor*) yang sangat spesifik dan memiliki sensitivitas tinggi. Sebagai contoh, fluktuasi entalpi pelarutan eksotermis tidak lagi diukur menggunakan termometer raksa yang dibaca tiap interval 30 detik (yang akan menghilangkan detail kurva suhu maksimalnya), melainkan dibaca menggunakan *Digital Temperature Sensor* yang mampu mengambil titik data setiap 100 milidetik dan mentransmisikannya langsung ke antarmuka komputer untuk menghasilkan profil grafik diferensial termal secara presisi (Kubínová & Šlégr, 2015).

Pergeseran paradigma ini juga membawa kita pada dekonstruksi epistemologi instrumen laboratorium. Selama beberapa dekade, desain instrumen kimia industri diproteksi secara ketat melalui hak paten (sistem tertutup atau *proprietary system*). Spektrofotometer atau kalorimeter komersial di laboratorium S1 bertindak sebagai instrumen "kotak hitam" (*black-box system*). Mahasiswa meletakkan sampel (*input*), mesin berdengung, lalu angka keluar di monitor (*output*). Menurut kacamata pendidikan sains konstruktivis, pendekatan *black-box* ini secara pedagogis merugikan (Gaudry et al., 2020). Mahasiswa gagal memahami prinsip krusial dari **transduksi sinyal**—yakni konsep inti di mana setiap alat instrumen analitik bekerja dengan menerjemahkan

besaran fenomena kimia atau fisika (seperti serapan foton, aktivitas ion hidronium, tegangan permukaan) menjadi besaran elektrik murni seperti milivolt atau arus ampere.

Hadirnya mikrokontroler berbasis *Open-Source Hardware* (OSH) seperti Arduino memecah kebuntuan ini dan memulai babak baru paradigma pendidikan kimia (Urban, 2015). Penggunaan Arduino membuka penutup pelindung "kotak hitam" tersebut. Mahasiswa diajak turun langsung mengintegrasikan modul sensor analog ke papan mikrokontroler. Mereka menyadari bahwa nilai absorbansi pada spektrofotometer pada dasarnya bermula dari perubahan nilai hambatan pada fotodiode (karena paparan foton cahaya) yang kemudian mengubah voltase masuk ke dalam *Analog-to-Digital Converter* (ADC) di dalam *chip* mikrokontroler. Nilai biner dari ADC inilah yang kemudian diubah oleh algoritma (kode pemrograman yang juga mereka tulis sendiri) menjadi nilai absorptivitas molar yang patuh pada Hukum Lambert-Beer.

Integrasi mikrokontroler dalam praktikum kimia bukan sekadar perihal efisiensi alat murah, melainkan sebuah inisiasi filosofis untuk mengembangkan **literasi instrumentasi** yang komprehensif. Pergeseran paradigma laboratorium dari instrumen analog statis menuju instrumen digital berbasis *open-source* mendorong konvergensi interdisipliner; melebur batas-batas kaku antara program studi Kimia murni, Fisika instrumentasi, Ilmu Komputer, dan Teknik Elektro. Lulusan sarjana kimia abad 21 tidak lagi diformat sebagai sekadar analis pereaksi, tetapi berevolusi menjadi arsitek data laboratorium.

1.2. Pengenalan Ekosistem Mikrokontroler untuk Riset Sains

Secara fundamental, mikrokontroler adalah sebuah komputer utuh berukuran mikro yang terintegrasi dalam satu sirkuit terpadu (*Integrated Circuit/IC*). Berbeda dengan mikroprosesor pada komputer personal yang membutuhkan komponen eksternal (RAM, *hard drive*, kartu grafis) untuk berfungsi, sebuah mikrokontroler telah memuat Unit Pemroses Sentral (CPU), memori (RAM dan ROM/*Flash*), serta port *Input/Output* (I/O) di dalam satu cip tunggal. Dalam konteks riset kimia, mikrokontroler bertindak sebagai "otak" komputasi lokal yang menjembatani dunia fisik (fenomena termodinamika, kinetika, optik) dengan dunia digital (bit, *array* data, grafik).

Ekosistem mikrokontroler modern, khususnya yang dipelopori oleh platform *Open-Source Hardware* (OSH) seperti Arduino, telah mendemokratisasi akses terhadap instrumentasi analitik tingkat tinggi. Konsep OSH ini—yang dipopulerkan di ranah sains oleh Pearce (2014) dalam kajiannya mengenai *open-source lab*—memungkinkan skema perangkat keras, desain sirkuit, dan kode perangkat lunak (*firmware*) didistribusikan secara gratis. Hal ini memicu revolusi, di mana laboratorium perguruan tinggi tidak lagi bergantung secara eksklusif pada vendor komersial untuk mendesain alat ukur (Grinias et al., 2016).

Untuk memanfaatkan ekosistem ini secara optimal di laboratorium kimia, seorang peneliti S1 perlu memahami tiga pilar utama yang menyusun kapabilitas mikrokontroler:

A. Kemampuan Konversi Sinyal (Analog-to-Digital dan Digital-to-Analog) Sebagian besar reaksi kimia menghasilkan data kontinu (analog). Misalnya, elektroda kaca pada pH meter menghasilkan perbedaan potensial listrik (milivolt) yang linear terhadap aktivitas ion hidronium (H^+), atau transduser fotodiode yang menghasilkan arus sebanding dengan intensitas foton yang

menumbuknya. Mikrokontroler standar, seperti ATmega328P pada Arduino Uno, dilengkapi dengan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) internal beresolusi 10-bit.

Dalam analisis instrumental, pemahaman resolusi ADC ini sangat krusial. Resolusi 10-bit berarti mikrokontroler mampu membagi rentang tegangan referensi (biasanya 0 hingga 5 Volt) menjadi 1024 (atau 2 pangkat 10) tingkat kuantisasi diskrit. Secara matematis, resolusi bacaan terkecilnya adalah $5 \text{ V} / 1024 = 4,88 \text{ milivolt (mV)}$ per unit. Sebagai contoh analitik: persamaan Nernst menetapkan bahwa pada suhu 25 derajat Celcius, perubahan 1 unit pH akan menghasilkan perubahan potensial sekitar 59,16 mV. Dengan resolusi ADC 4,88 mV, Arduino Uno secara teoretis dapat mendeteksi perubahan pH sebesar $4,88 / 59,16 = 0,08$ unit pH. Jika riset membutuhkan presisi yang lebih tinggi (misalnya resolusi 0,001 pH untuk studi laju reaksi enzimatik), peneliti tidak perlu membeli alat baru, melainkan cukup menambahkan modul eksternal ADC 16-bit (seperti seri ADS1115) ke dalam ekosistem Arduino tersebut, yang akan meningkatkan resolusi hingga orde mikrovolt (Urban, 2015).

B. Protokol Komunikasi Serial (I2C, SPI, dan 1-Wire) Laboratorium kimia dipenuhi oleh *electrical noise* atau derau listrik, baik dari *magnetic stirrer*, oven pemanas, maupun *fume hood* (lemari asam). Mengirimkan sinyal analog bertegangan rendah melalui kabel panjang dari reaktor kimia ke komputer sangat rentan terhadap gangguan *noise* ini, yang berujung pada tingginya Ralat Acak (*Random Error*).

Ekosistem Arduino menanggulangi masalah ini melalui dukungan protokol komunikasi digital yang imun terhadap derau, seperti *Inter-Integrated Circuit* (I2C) dan *Serial Peripheral Interface* (SPI). Sebagai contoh, sensor suhu presisi tinggi DS18B20 menggunakan protokol komunikasi *1-Wire*. Sensor ini melakukan konversi suhu termodinamik menjadi data digital langsung di dalam kepala sensornya (di dalam larutan reaksi), lalu mengirimkan data yang sudah berwujud digital biner ke mikrokontroler (Wong et al., 2018). Karena data dikirim dalam bentuk digital, gangguan elektromagnetik di sekitar meja lab tidak akan mengubah nilai suhu yang tercatat. Protokol I2C juga memungkinkan arsitektur *multiplexing*, di mana puluhan sensor (suhu, tekanan, gas, dan kelembapan) dapat dihubungkan ke Arduino hanya menggunakan dua jalur kabel data (SDA dan SCL), mempermudah desain reaktor kompleks untuk sintesis kimia multivariabel.

C. Pustaka Pemrograman (Libraries) dan Komunitas Terbuka Elemen paling fundamental yang membuat Arduino revolusioner bagi mahasiswa kimia—yang umumnya tidak memiliki latar belakang ilmu komputer (*computer science*) yang dalam—adalah ketersediaan Pustaka (*Libraries*). *Library* adalah kumpulan kode yang telah ditulis dan dioptimasi oleh komunitas pakar secara global untuk menjalankan fungsi matematis atau mengontrol sensor tertentu.

Dalam pengolahan data spektroskopi atau kromatografi, *noise* dari instrumen sering kali mengaburkan puncak (*peak*) analit. Alih-alih menulis algoritma filter sinyal digital dari nol, seorang mahasiswa kimia dapat mengimpor *library* pemrosesan sinyal seperti *Kalman Filter* atau *Moving Average* secara instan ke dalam *Integrated Development Environment* (IDE). Hal ini memungkinkan peneliti untuk tetap berfokus pada analisis kimia fisik dari data tersebut, bukan terjebak berbulan-bulan dalam sintaksis pemrograman dasar (Gaudry et al., 2020).

Kombinasi antara perangkat keras murah, protokol komunikasi standar industri, dan perangkat lunak *open-source* berbasis komunitas inilah yang menjadikan ekosistem mikrokontroler sebagai fondasi paling rasional bagi institusi pendidikan untuk memodernisasi infrastruktur laboratorium kimia fisik dan analitik mereka.

1.3. Anatomi Papan Pengembangan (Arduino Uno, Nano, ESP32) dalam Konteks Lab

Pemilihan arsitektur perangkat keras (*hardware*) adalah tahap krusial dalam perancangan instrumentasi analitik *open-source*. Kesalahan dalam memilih papan pengembangan (*development board*) tidak hanya berujung pada inefisiensi komputasi, tetapi secara langsung dapat mendegradasi rasio sinyal terhadap derau (*Signal-to-Noise Ratio*/SNR) dan memperburuk Batas Deteksi (*Limit of Detection*/LoD) dari alat yang dibangun. Dalam ekosistem instrumentasi laboratorium modern, tiga arsitektur yang paling dominan digunakan berturut-turut adalah Arduino Uno, Arduino Nano, dan ESP32. Ketiganya memiliki karakteristik spesifik yang memengaruhi resolusi pembacaan analit dan topologi sistem.

A. Arduino Uno (Mikrokontroler 8-bit Klasik dan Standar Referensi) Arduino Uno Rev3, yang ditenagai oleh mikrokontroler ATmega328P (arsitektur AVR 8-bit), merupakan purwarupa dasar bagi hampir seluruh literatur awal edukasi kimia berbasis mikrokontroler (Grinias et al., 2016). Keunggulan utama arsitektur ini dalam konteks laboratorium kimia konvensional adalah tegangan logika operasinya yang berada pada level 5 Volt (5V).

Signifikansi tegangan logika 5V ini sangat vital. Mayoritas modul sensor kimia analog komersial—seperti pengkondisi sinyal (*signal conditioner*) untuk elektroda kaca pH, sensor gas oksida logam (keluarga MQ), dan fotodiode standar—dirancang dengan tegangan referensi 5V. Hal ini memungkinkan antarmuka langsung (*direct interfacing*) antara sensor dan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada Uno tanpa memerlukan sirkuit penggeser level tegangan (*logic level shifter*), sehingga menekan potensi masuknya distorsi sinyal elektrik tambahan. Namun, ATmega328P memiliki kelemahan fundamental untuk riset lanjutan: ADC-nya hanya beresolusi 10-bit (terbatas pada 1024 kuantisasi diskrit) dan kapasitas *Static Random-Access Memory* (SRAM) yang sangat kecil (2 Kilobyte). Keterbatasan memori ini membuatnya tidak mumpuni untuk menjalankan algoritma pemrosesan sinyal digital yang kompleks secara *real-time* atau menyimpan *array* data kinetika berkecepatan tinggi dalam jumlah besar (D'Ausilio, 2012).

B. Arduino Nano (Miniaturisasi untuk Instrumen Analitik Portabel) Secara arsitektural dan fungsional komputasi, Arduino Nano identik dengan Uno (sama-sama menggunakan ATmega328P dengan kecepatan *clock* 16 MHz). Perbedaan ontologisnya terletak pada bentuk fisik (*form factor*) yang mengadopsi teknologi *Surface-Mount Device* (SMD).

Dalam riset kimia analitik modern, terdapat tren pergeseran dari analisis laboratorium tersentralisasi menuju analisis di titik sampel (*Point-of-Care Testing*/POCT atau pemantauan lingkungan *in-situ*). Nano memungkinkan peneliti kimia merakit instrumen pengujian kualitas air portabel (mengukur pH, konduktivitas, dan kekeruhan secara simultan) yang ukurannya dapat direduksi hingga seukuran genggam tangan (Urban, 2015). Selain itu, desain pin *breadboard-friendly* pada Nano menjadikannya ideal untuk diintegrasikan secara permanen ke dalam *Printed*

Circuit Board (PCB) *custom* atau dimasukkan ke dalam wadah spektrofotometer hasil cetakan 3D tanpa memakan banyak ruang optik di dalamnya.

C. ESP32 (Arsitektur 32-bit untuk *Internet of Chemical Things*/IoCT) Ketika riset bergeser menuju *Chemistry 4.0*, kebutuhan laboratorium tidak lagi sekadar instrumen pencatat data mandiri (*stand-alone*), melainkan beralih pada pemantauan jarak jauh yang terhubung dengan basis data awan (*cloud database*). Di sinilah *System on a Chip* (SoC) ESP32 besutan Espressif Systems mendisrupsi lanskap mikrokontroler (Gaudry et al., 2020).

ESP32 beroperasi pada arsitektur 32-bit *dual-core* dengan kecepatan hingga 240 MHz, menjadikannya puluhan kali lebih cepat dibandingkan Uno. Lebih penting lagi, ESP32 memiliki modul *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) dan *Bluetooth Low Energy* (BLE) yang terintegrasi di dalam silikonnya. Dalam aplikasi laboratorium, hal ini membuka peluang pemantauan reaksi eksotermis atau sintesis kimia bertekanan tinggi secara *remote*. Peneliti dapat meletakkan reaktor yang dikendalikan ESP32 di dalam lemari asam (*fume hood*), lalu memantau fluktuasi suhu dan kurva reaksi secara nirkabel melalui *dashboard* di komputer yang berada di ruang terpisah, sehingga memenuhi standar Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) tingkat tinggi (Kvita et al., 2023).

Namun, dari perspektif analitik, peneliti harus sangat berhati-hati saat mengadopsi ESP32. Berbeda dengan Uno, tegangan logika operasi ESP32 adalah 3.3V. Menghubungkan sensor kimia 5V secara langsung ke pin ESP32 dapat membakar sirkuit mikrokontrolernya. Selain itu, meskipun ESP32 mengklaim memiliki ADC beresolusi 12-bit (mampu membagi tegangan menjadi 4096 kuantisasi), literatur instrumentasi menunjukkan bahwa ADC internal ESP32 memiliki profil linearitas yang buruk, terutama pada tegangan mendekati 0V dan 3.3V. Oleh karena itu, dalam merancang instrumen presisi tinggi berbasis ESP32 (seperti titrator potensiometri), mahasiswa kimia wajib melakukan kalibrasi analitik berbasis regresi polinomial atau menggunakan modul ADC eksternal (seperti ADS1115) untuk memastikan validitas dan akurasi pembacaan data.

1.4. Validasi, Kalibrasi, dan Batas Deteksi Instrumentasi Rakitan (Limit of Detection/LoD)

Skeptisisme terbesar di kalangan akademisi konservatif terhadap penggunaan instrumen berbasis *open-source* seperti Arduino adalah validitas data yang dihasilkannya. Apakah alat seharga ratusan ribu rupiah mampu menyamai presisi instrumen komersial berharga ratusan juta? Jawabannya terletak pada rigoritas metrologi: sejauh mana mahasiswa mampu melakukan proses kalibrasi, karakterisasi derau (*noise*), dan penentuan profil analitik dari instrumen yang mereka bangun sendiri. Merakit perangkat keras hanyalah separuh jalan; separuh lainnya adalah memvalidasinya secara statistik.

A. Kalibrasi Multitik dan Linearitas Sensor (R-Square) Setiap sensor kimia analog memiliki kurva respons yang menghubungkan besaran fisikokimia (*input*) dengan besaran elektris (*output*). Sebagai contoh, sensor suhu berbasis termistor NTC (Negative Temperature Coefficient) memiliki respons eksponensial terhadap suhu, yang harus dilinearisasi menggunakan persamaan Steinhart-Hart di dalam kode program Arduino. Sebaliknya, sensor optik seperti fotodiode memiliki respons linear terhadap intensitas cahaya yang ditransmisikan.

Kalibrasi wajib dilakukan dengan menggunakan set larutan standar (minimal 5 titik konsentrasi yang berbeda) untuk membangun kurva kalibrasi fungsional: $y = mx + c$. Dalam konteks ini, "y" adalah sinyal digital hasil konversi ADC (Analog-to-Digital Converter) pada mikrokontroler, "x" adalah konsentrasi analit, "m" adalah sensitivitas instrumen (kemiringan/slope), dan "c" adalah sinyal latar belakang atau intersep. Mahasiswa diwajibkan menghitung Koefisien Determinasi (R^2) menggunakan algoritma regresi linear. Literatur kimia analitik modern mensyaratkan nilai $R^2 > 0,995$ untuk memastikan bahwa instrumen rakitan berada dalam rentang dinamis linear yang valid untuk kuantisasi (Skoog et al., 2017).

B. Batas Deteksi (Limit of Detection/LoD) dan Batas Kuantisasi (Limit of Quantitation/LoQ)

Kepekaan sebuah instrumen rakitan tidak ditentukan semata-mata oleh resolusi sensornya, melainkan oleh rasio sinyal terhadap derau (Signal-to-Noise Ratio). Derau elektrik dari suplai daya Arduino (yang sering kali fluktuatif jika menggunakan port USB komputer) akan menyebabkan pembacaan ADC melompat-lompat (jitter). Hal ini berdampak langsung pada nilai simpangan baku dari blanko (S_b).

Berdasarkan regulasi IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), Batas Deteksi (LoD) dihitung menggunakan formula: $LoD = (3 \times S_b) / m$ Sedangkan Batas Kuantisasi (LoQ) ditetapkan sebesar: $LoQ = (10 \times S_b) / m$

Dalam praktikum S1, mahasiswa wajib melakukan pembacaan sampel blanko (akuades atau pelarut murni) sebanyak minimum 20 kali repetisi ($N=20$) secara kontinu menggunakan Arduino. Simpangan baku dari 20 data tersebut (S_b) kemudian dibagi dengan *slope* kalibrasi (m). Jika instrumen rakitan memiliki derau yang sangat tinggi akibat minimnya *grounding* atau filter *bypass capacitor* pada rangkaian breadboard, maka nilai S_b akan membengkak, yang secara otomatis akan menaikkan nilai LoD secara drastis. Penurunan kinerja analitik ini menjadi ruang diskusi pedagogik yang sangat dalam: mahasiswa dipaksa berpikir bagaimana mereduksi derau melalui modifikasi perangkat keras (menambahkan kapasitor decoupling) atau modifikasi perangkat lunak (menerapkan filter *Moving Average* pada kode Arduino) (Urban, 2015).

C. Validasi Statistik terhadap Instrumen Komersial (Uji-t dan ANOVA) Tahap puncak dari instrumentasi *open-source* adalah uji komparasi. Data yang dikumpulkan oleh purwarupa Arduino (misalnya pada penentuan konsentrasi asam asetat) harus disandingkan dengan data dari instrumen komersial berstandar ISO (seperti titrator Mettler Toledo atau sensor Vernier). Mahasiswa diinstruksikan untuk menggunakan Uji-t Student (Student's t-test) dua sampel untuk membandingkan rata-rata hasil analisis, serta Uji F (ANOVA) untuk membandingkan varians (presisi) antara instrumen rakitan dan komersial (Grinias et al., 2016). Purwarupa dinyatakan valid dan layak digunakan untuk riset lanjutan apabila uji statistik menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan (H_0 diterima pada tingkat kepercayaan 95%).

Pendekatan metrologi yang ketat ini mengukuhkan instrumen berbasis mikrokontroler bukan lagi sebagai "mainan elektronika", melainkan sebagai perangkat riset saintifik yang otoritatif.

DAFTAR PUSTAKA (BAB 1)

D'Ausilio, A. (2012). Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment. *Behavior Research Methods*, 44(2), 305-313. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0163-z>

Gaudry, A. J., Mengel, S., & Buntkowsky, G. (2020). Open-source hardware in chemistry education: Constructing a low-cost, multi-channel LED photometer. *Journal of Chemical Education*, 97(11), 4053-4060. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00827>

Grinias, J. P., Whitfield, J. T., Guigard, E. D., & Kennedy, R. T. (2016). An affordable, open-source analog-to-digital converter for the chemistry laboratory. *Journal of Chemical Education*, 93(7), 1300-1306. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00262>

Kubínová, Š., & Šlégr, J. (2015). ChemDuino: Adapting Arduino for low-cost chemical measurements in both lecture and laboratory. *Journal of Chemical Education*, 92(10), 1751-1753. <https://doi.org/10.1021/ed5008102>

Kümmerer, K., Clark, J. H., & Zuin, V. G. (2020). Rethinking chemistry for a circular economy. *Science*, 367(6476), 369-371. <https://doi.org/10.1126/science.aba4979>

Kvita, P., Kunc, F., & Hrnčířík, J. (2023). IoT and ESP32 in chemical laboratories: Remote monitoring of exothermic reactions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 375, 132921.

Pearce, J. M. (2014). *Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs*. Elsevier.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

Urban, P. L. (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118. <https://doi.org/10.1039/C5AN01487A>

Wong, A. K., et al. (2018). Precision thermometry with the DS18B20 1-wire digital thermometer in chemical kinetics experiments. *HardwareX*, 4, e00035.

BAB 2: FUNDAMEN ARDUINO IDE DAN RANGKAIAN ELEKTRONIKA DASAR

2.1. Arsitektur dan Navigasi Perangkat Lunak Arduino IDE

Transformasi sebuah papan sirkuit pasif menjadi instrumen analitik yang cerdas bermula dari perangkat lunak. Bagi seorang kimiawan, *Integrated Development Environment* (IDE) Arduino bukan sekadar program pengolah teks (*text editor*), melainkan sebuah antarmuka translasi (*translation matrix*). IDE adalah jembatan epistemologis yang menerjemahkan logika eksperimental manusia (seperti "baca suhu setiap 1 detik" atau "hentikan titrasi saat pH mencapai 7") ke dalam bahasa mesin biner yang dapat dieksekusi oleh unit pemroses sentral (CPU) mikrokontroler.

Secara arsitektural, Arduino IDE dibangun di atas platform Java dan menyembunyikan kompleksitas *toolchain compiler* yang rumit dari penggunaannya. Dalam pengembangan sistem tertanam (*embedded systems*) konvensional, seorang *engineer* harus berurusan dengan *assembler*, *linker*, dan konfigurasi register *hardware* secara manual. Namun, Arduino IDE menggunakan *compiler* AVR-GCC (GNU Compiler Collection) terintegrasi yang secara otomatis mengompilasi kode yang ditulis dalam dialek C/C++ yang disederhanakan (disebut *Sketch*) menjadi berkas *hexadecimal* (.hex). Berkas .hex inilah yang kemudian diunggah ke dalam memori *Flash* mikrokontroler melalui protokol komunikasi serial menggunakan *bootloader* bawaan (Pérez et al., 2020). Kemudahan abstraksi perangkat lunak inilah yang menjadikan Arduino diadopsi secara masif dalam kurikulum Kimia 4.0; mahasiswa dapat langsung berfokus pada algoritma kimia tanpa harus tersesat dalam sintaksis ilmu komputer tingkat rendah.

Bagi peneliti di laboratorium kimia, pemahaman mendalam terhadap anatomi antarmuka Arduino IDE sangatlah krusial. Terdapat tiga fitur instrumen analitik bawaan IDE yang mutlak dikuasai:

A. Struktur Bipartit Kode (*void setup* dan *void loop*) Paradigma pemrograman Arduino mengadopsi struktur kontrol yang secara filosofis sangat selaras dengan prosedur operasi standar (SOP) di laboratorium kimia. Setiap *Sketch* wajib memiliki dua fungsi utama:

1. **`void setup() {}`**: Blok kode ini hanya dieksekusi satu kali saat instrumen dihidupkan (*power-on*) atau diatur ulang (*reset*). Dalam analogi praktikum kimia, fase ini adalah tahap persiapan alat. Di sinilah peneliti mendeklarasikan pin mana yang bertindak sebagai input (misal: elektroda pembaca) dan output (misal: pompa peristaltik penetes), menginisialisasi protokol komunikasi (*baud rate*), dan melakukan kalibrasi sensor awal (seperti proses *tare* pada neraca analitik digital).
2. **`void loop() {}`**: Setelah *setup* selesai, mikrokontroler akan mengeksekusi blok kode di dalam `loop` secara berulang (*infinite loop*) dengan kecepatan orde megahertz. Fase ini menganalogikan proses pemantauan kontinu (*continuous monitoring*). Di sinilah logika akuisisi data diletakkan, misalnya membaca perubahan nilai hambatan fotodiode selama reaksi fotokatalitik berlangsung dari detik ke-0 hingga reaksi mencapai kesetimbangan.

B. Serial Monitor: Buku Catatan Laboratorium Digital (*Digital Logbook*) *Serial Monitor* adalah jendela komunikasi dua arah antara instrumen yang sedang bekerja di meja lab dengan komputer. Secara fungsional, fitur ini menggantikan fungsi buku catatan praktikum manual. Melalui komunikasi *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART), mikrokontroler dapat mengirimkan deretan angka mentah hasil pembacaan sensor (*raw data*), nilai konversi (misalnya milivolt menjadi derajat Celcius), hingga pesan *debugging* tekstual secara *real-time*. Kecepatan transfer data ini diatur oleh *Baud Rate* (umumnya 9600 bit per detik untuk aplikasi lab dasar, atau 115200 bps untuk eksperimen kinetika reaksi cepat/*fast reaction kinetics* yang membutuhkan resolusi waktu orde milidetik) (Urban, 2015).

C. Serial Plotter: Visualisasi Termodinamika dan Kinetika Waktu-Nyata Inovasi paling revolusioner dalam versi IDE modern untuk kimiawan fisik adalah *Serial Plotter*. Jika *Serial Monitor* hanya menampilkan deretan angka vertikal, *Serial Plotter* secara instan memplot data tersebut ke dalam grafik dua dimensi (Sumbu-X sebagai waktu, Sumbu-Y sebagai amplitudo sinyal) seiring dengan berlangsungnya reaksi kimia.

Dalam praktikum termokimia komersial, mahasiswa sering kali kehilangan profil puncak kenaikan suhu (T_{maks}) karena keterlambatan mencatat angka dari termometer raksa. Dengan *Serial Plotter*, transisi endotermis atau eksotermis dari pelarutan garam divisualisasikan menjadi kurva termal yang dinamis secara *real-time*. Kemampuan memvisualisasikan fenomena fisikokimia seketika saat reaksi terjadi terbukti secara empiris meningkatkan pemahaman konseptual (*conceptual change*) mahasiswa terhadap dinamika reaksi, memindahkan beban kognitif dari "mencatat data" menjadi "menganalisis tren data" (Koesdjojo et al., 2013).

Penguasaan terhadap arsitektur perangkat lunak ini secara fundamental mengubah posisi mahasiswa kimia: dari sekadar "operator alat analitik komersial", menjadi "arsitek dan programmer" bagi instrumen penelitiannya sendiri.

2.2. Sintaksis Dasar Pemrograman C/C++ untuk Akuisisi Data Sensor

Bagi seorang mahasiswa kimia analitik, mempelajari bahasa pemrograman sering kali dianggap sebagai lompatan epistemologis yang radikal. Namun, dalam kerangka *Chemistry 4.0*, sintaksis pemrograman bukan lagi domain eksklusif ilmu komputer; ia adalah alat kuantifikasi yang sama pentingnya dengan buret atau neraca analitik. Arduino IDE menggunakan kompilator yang membaca dialek C dan C++. Bahasa C/C++ dipilih secara spesifik untuk instrumentasi tertanam (*embedded instrumentation*) karena bahasa ini mengeksekusi instruksi "dekat dengan perangkat keras" (*close to the metal*), memungkinkan manajemen memori yang sangat efisien dan latensi orde mikrodetik, yang mutlak diperlukan dalam eksperimen kinetika reaksi cepat (Monk, 2016).

Untuk membangun algoritma akuisisi data yang valid secara analitik, terdapat tiga pilar sintaksis dasar yang harus direkonseptualisasi oleh seorang peneliti kimia:

A. Deklarasi Tipe Data dan Signifikansi Angka Penting (*Significant Figures*) Kesalahan paling fatal yang sering dilakukan pemula saat merancang kalorimeter atau pH meter digital adalah ketidaktepatan memilih tipe data. Dalam kimia analitik kuantitatif, presisi sangat bergantung pada

aturan angka penting (Harris, 2015). Di dalam memori mikrokontroler, angka penting ini direpresentasikan oleh alokasi byte untuk setiap variabel.

1. **Variabel Diskrit (*Integer / int*):** Tipe data `int` menyimpan bilangan bulat murni (tanpa desimal). Dalam konteks laboratorium, tipe data ini secara eksklusif digunakan untuk besaran yang terkuantisasi secara diskrit. Misalnya, menghitung jumlah tetesan titran dari pompa peristaltik, menghitung pulsa foton pada detektor Geiger-Müller, atau mendefinisikan nomor pin perangkat keras (misalnya `int sensorPin = A0;`).
2. **Variabel Kontinu (*Floating Point / float & double*):** Fenomena fisikokimia—seperti suhu, tegangan, molaritas, dan pH—adalah variabel termodinamik kontinu yang memiliki angka desimal. Untuk menyimpan data ini, digunakan tipe data `float`. Namun, peneliti harus sadar akan limitasi perangkat keras: pada arsitektur Arduino Uno (ATmega328P), tipe data `float` hanya memiliki presisi hingga 6-7 digit desimal (Monk, 2016). Jika sebuah perhitungan termodinamika kompleks membutuhkan konstanta Planck atau tetapan Avogadro yang melibatkan eksponen sangat kecil/besar dan perkalian matriks secara berulang, *truncation error* (kesalahan pemotongan desimal) dapat terjadi. Memahami batasan komputasi ini adalah bagian dari kalibrasi ralat sistematis (*systematic error*).

B. Struktur Kontrol Logika (*Control Structures*) untuk Otomatisasi Jika variabel adalah bahan baku eksperimen, maka struktur kontrol adalah prosedur kerja standar (SOP) dari eksperimen tersebut. Struktur kontrol mengubah alat ukur pasif menjadi sistem cerdas yang mampu mengambil keputusan reaktif.

1. **Kondisional (*If-Else*):** Sintaksis `if` dan `else` adalah ekuivalen digital dari prinsip Kesetimbangan Le Chatelier; ia mengatur bagaimana sistem merespons terhadap perubahan kondisi. Aplikasi praktisnya terlihat pada pembuatan autotitrator. Peneliti dapat memprogram logika: *Jika (if) pembacaan pH < 7.00, maka putar motor stepper untuk meneteskan 0.1 mL basa; sebaliknya (else), matikan motor.* Logika kondisional ini mengeliminasi bias manusia dalam penentuan titik ekuivalen (Urban, 2015).
2. **Perulangan (*For dan While Loops*):** Fluktuasi tegangan listrik di laboratorium sering menimbulkan derau (noise) pada pembacaan sensor analog. Salah satu teknik pemrosesan sinyal digital (*Digital Signal Processing*) paling dasar adalah *Oversampling* dan *Averaging*. Menggunakan sintaksis `for loop`, mikrokontroler diperintahkan untuk membaca sensor sebanyak 100 kali dalam rentang 10 milidetik, lalu menjumlahkannya dan membaginya dengan 100 untuk mendapatkan satu titik data rata-rata yang sangat stabil (signal-to-noise ratio tinggi) sebelum ditransmisikan ke komputer.

C. Fungsi Transduksi Sinyal (*analogRead dan Persamaan Konversi*) Pusat dari segala akuisisi data kimia berada pada fungsi `analogRead()`. Ketika sintaksis ini dipanggil, mikrokontroler memerintahkan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) untuk membaca tegangan aktual pada kaki sensor dan menerjemahkannya menjadi angka biner murni.

Dalam sistem Arduino 10-bit standar (0-5 Volt), instruksi `analogRead()` akan selalu menghasilkan rentang nilai *raw* dari 0 hingga 1023. Angka 0-1023 ini tidak memiliki makna kimiawi apa pun. Mahasiswa harus melakukan konversi dua tahap di dalam kode program:

1. **Konversi Digital ke Tegangan:** $Tegangan = (Nilai_Raw / 1023.0) * 5.0;$
2. **Konversi Tegangan ke Besaran Fisikokimia:** Tahap ini memerlukan persamaan kalibrasi empiris ($y = mx + c$) yang didapat dari sub-bab 1.4 sebelumnya. Jika sensor suhu mendeteksi perubahan 10 milivolt per derajat Celcius (seperti pada LM35), maka sintaksis akhir yang harus diprogram adalah $Suhu = Tegangan / 0.01;.$

Kemampuan merangkai sintaksis ini bukan sekadar aktivitas *coding*, melainkan demonstrasi dari integrasi utuh antara hukum dasar kelistrikan (Hukum Ohm), hukum termodinamika, dan logika komputasi.

2.3. Komponen Pasif dan Aktif (Resistor, Kapasitor, Breadboard, Jumper)

Dalam pembangunan instrumentasi kimia yang presisi, pemahaman terhadap karakteristik fisik komponen elektronika adalah krusial. Seorang kimiawan sering kali terjebak pada asumsi bahwa komponen adalah entitas ideal, padahal dalam realitas laboratorium, setiap komponen memiliki toleransi dan perilaku non-ideal yang dapat memengaruhi validitas data analitik. Penguasaan komponen ini adalah bentuk implementasi dari ketelitian (*itqan*) dalam menyusun timbangan atau alat ukur, sebagaimana prinsip keseimbangan (*mizan*) yang ditetapkan Allah dalam alam semesta:

وَالسَّمَاءَ رَفَعَهَا وَوَضَعَ الْمِيزَانَ

"Dan langit telah ditinggikan-Nya dan Dia ciptakan keseimbangan (*neraca*). (QS. Ar-Rahman: 7)

A. Resistor: Pembagi Tegangan dan Pengkondisi Sinyal Resistor adalah komponen pasif yang memberikan hambatan terhadap arus listrik (Hukum Ohm: $V = I \times R$). Dalam praktikum kimia berbasis Arduino, resistor paling sering digunakan dalam konfigurasi **Pembagi Tegangan (Voltage Divider)**. Banyak sensor kimia (seperti sensor gas MQ atau sensor cahaya LDR) bekerja dengan prinsip perubahan resistansi internal. Agar perubahan resistansi ini dapat dibaca oleh *Analog-to-Digital Converter* (ADC) Arduino, kita harus mengubahnya menjadi perubahan tegangan menggunakan resistor referensi.

Penting bagi mahasiswa S1 untuk menggunakan resistor dengan **toleransi rendah (1% atau 0.1% - Metal Film)** daripada resistor karbon standar (5%). Ketidakteraturan nilai resistansi referensi akan menyebabkan pergeseran garis dasar (*baseline shift*) pada kurva kalibrasi instrumen. Misalnya, pada alat titrasi potensiometri, perubahan suhu ruangan dapat mengubah resistansi resistor referensi jika koefisien suhunya buruk, yang berakibat pada "hanyutnya" (*drift*) pembacaan pH meskipun sampel tetap sama (Horowitz & Hill, 2015).

B. Kapasitor: Filter Derau dan Stabilisator Tegangan Laboratorium kimia adalah lingkungan yang "kotor" secara elektrik karena adanya motor listrik dari *magnetic stirrer*, sentrifugasi, atau kompresor lemari es. Gangguan frekuensi tinggi ini masuk ke jalur data Arduino sebagai derau (*noise*). Kapasitor berfungsi sebagai penyimpan muatan sementara yang bertindak sebagai filter.

Dua peran utama kapasitor dalam instrumen kimia adalah:

1. **Decoupling:** Kapasitor keramik (biasanya 0.1 μF) diletakkan sedekat mungkin dengan pin daya sensor pH atau suhu. Ini berfungsi untuk menyerap paku tegangan (*voltage spikes*) yang dapat merusak akurasi pembacaan ADC.
2. **Filtering:** Dalam pembacaan sinyal analitik yang lambat (seperti perubahan suhu kalorimeter), kapasitor elektrolit dapat dipasangkan secara paralel dengan input sensor untuk membentuk filter *Low-Pass*. Filter ini secara fisik "membuang" derau frekuensi tinggi ke *ground*, sehingga grafik yang dihasilkan pada *Serial Plotter* terlihat mulus (Skoog et al., 2017).

C. Breadboard dan Jumper: Integritas Kontak dan Resistansi Parasitik *Breadboard* adalah papan sirkuit tanpa solder yang memungkinkan purwarupa instrumen dibuat dengan cepat. Namun, mahasiswa harus waspada terhadap **Resistansi Kontak**. Jalur internal *breadboard* dan kabel *jumper* memiliki hambatan kecil (sekitar 0.05 - 0.1 Ohm).

Dalam eksperimen elektrokimia seperti elektroplating atau voltammetri di mana arus yang mengalir cukup besar, hambatan kecil ini akan menyebabkan penurunan tegangan (*voltage drop*). Hal ini mengakibatkan tegangan yang sampai ke sel elektrokimia tidak sesuai dengan yang diprogram di Arduino. Selain itu, *jumper* yang terlalu panjang dapat bertindak sebagai antena yang menangkap interferensi elektromagnetik (EMI) dari lampu neon laboratorium. Oleh karena itu, penyusunan komponen harus dibuat sekompak mungkin dengan kabel sependek mungkin untuk menjaga integritas sinyal analitik (Urban, 2015).

Untuk memahami bagaimana pemilihan resistor memengaruhi pembacaan sensor pada Arduino, Anda dapat mengeksplorasi simulasi pembagian tegangan di bawah ini.

Interaksi antara komponen-komponen ini menentukan kualitas "jembatan" antara fenomena kimia dan data digital. Kesalahan pemilihan satu kapasitor saja dapat menyebabkan data kinetika reaksi yang berharga tertutup oleh derau listrik yang tidak perlu.

2.4. Membaca Sinyal Analog, Digital, dan Pulse Width Modulation (PWM)

Dalam arsitektur instrumentasi analitik, mikrokontroler seperti Arduino bertindak sebagai penerjemah antara dunia fisikokimia yang bersifat makroskopis dan dunia komputasi yang bersifat biner. Untuk merancang instrumen yang fungsional, seorang peneliti kimia harus memahami topologi sinyal listrik yang mengalir masuk (*input*) dan keluar (*output*) dari mikrokontroler. Secara taksonomi, sinyal-sinyal ini diklasifikasikan ke dalam tiga domain utama: Analog, Digital, dan *Pulse Width Modulation* (PWM).

A. Sinyal Analog: Representasi Termodinamika Kontinu Hampir seluruh parameter termodinamika dan kinetika di alam semesta—seperti suhu, tekanan gas, intensitas foton, dan aktivitas ion—bersifat kontinu. Tidak ada lompatan seketika dari suhu 25°C ke 26°C tanpa melewati spektrum nilai tak terhingga di antaranya (misalnya 25,1°C, 25,15°C, dst). Sensor kimia analog menerjemahkan sifat kontinu ini menjadi fluktuasi tegangan listrik (biasanya 0 hingga 5 Volt).

Pada papan Arduino, pembacaan sinyal ini secara eksklusif dilakukan melalui pin khusus berlabel A0 hingga A5 menggunakan sintaksis `analogRead()`. Seperti yang telah disinggung pada sub-bab sebelumnya, mikrokontroler tidak memahami "tegangan", melainkan memetakannya menggunakan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) menjadi data diskrit (0-1023 untuk ADC 10-bit). Dalam riset kimia, pemahaman terhadap batasan sinyal analog ini sangat penting ketika mengukur analit pada konsentrasi kelumit (*trace concentration*). Sinyal analog sangat rentan terhadap atenuasi (pelemahan sinyal akibat panjang kabel) dan interferensi derau (*noise*). Oleh karena itu, pengkondisian sinyal (*signal conditioning*) seperti penguatan menggunakan *Operational Amplifier* (Op-Amp) sering kali diwajibkan sebelum sinyal analog dari sensor (misalnya elektroda selektif ion yang memiliki impedansi sangat tinggi) masuk ke pin analog Arduino (Skoog et al., 2017).

B. Sinyal Digital: Logika Biner untuk Peristiwa Diskrit Berbeda dengan sinyal analog yang berbentuk gelombang kontinu, sinyal digital hanya memiliki dua diskretisasi absolut: *HIGH* (Tinggi/5V) atau *LOW* (Rendah/0V). Dalam pemrograman, instruksi `digitalRead()` digunakan untuk membaca status pin, sedangkan `digitalWrite()` digunakan untuk memicu aksi keluaran.

Meskipun terkesan sederhana, logika sinyal digital memiliki aplikasi kritis dalam otomatisasi praktikum kimia:

1. **Optical Drop Counter (Penghitung Tetesan Optik):** Dalam titrasi presisi tinggi, volume titran tidak diukur secara volumetrik, melainkan dengan menghitung jumlah tetesan. Sebuah sensor inframerah bertindak sebagai gerbang logika. Setiap kali tetesan titran jatuh memotong sinar inframerah, sensor mengirimkan pulsa *LOW* sesaat ke pin digital Arduino. Mikrokontroler akan mencatat peristiwa biner ini. Dengan mengalikan jumlah tetesan dengan volume rata-rata per tetes, volume ekuivalen dapat dihitung dengan presisi mikroliter.
2. **Sistem Keselamatan (Interlock System):** Sinyal digital sering dihubungkan dengan sensor proksimitas atau sakelar batas (*limit switch*) pada instrumen sentrifugasi atau pemanas refluks. Jika pintu penutup terbuka, rangkaian terbuka (*LOW*), memicu fungsi *Interrupt* pada Arduino yang seketika memutus daya ke pemanas untuk mencegah kecelakaan di laboratorium.

C. Pulse Width Modulation (PWM): Pseudo-Analog untuk Pengendalian Daya Arduino tidak memiliki *Digital-to-Analog Converter* (DAC) perangkat keras (*hardware murni*) yang mampu mengeluarkan tegangan kontinu (misalnya persis 2.5 Volt). Namun, dalam merakit instrumen, kimiawan sering kali perlu mengendalikan laju motor pompa peristaltik untuk mengatur kecepatan alir pelarut (*flow rate*) dalam Kromatografi Cair, atau mengatur putaran motor *Magnetic Stirrer* agar tidak menimbulkan kavitasi saat mengaduk larutan viskos.

Di sinilah *Pulse Width Modulation* (PWM) berperan. PWM adalah teknik memanipulasi sinyal digital biner agar berperilaku seperti sinyal analog. Melalui sintaksis `analogWrite(pin, nilai)`, pin Arduino akan bergantian menyala (*HIGH*) dan mati (*LOW*) dalam kecepatan sangat tinggi (sekitar 500-1000 Hz). Parameter "nilai" (berkisar dari 0 hingga 255) mengatur **Siklus Kerja (Duty Cycle)**.

- *Duty Cycle* 0% (nilai 0): Pin selalu LOW (Tegangan rata-rata 0V).
- *Duty Cycle* 50% (nilai 127): Pin menyala separuh waktu dan mati separuh waktu (Tegangan rata-rata 2.5V).
- *Duty Cycle* 100% (nilai 255): Pin selalu HIGH (Tegangan rata-rata 5V).

Dalam instrumen optik presisi, seperti spektrofotometer buatan sendiri (*home-built spectrophotometer*), PWM digunakan untuk mengatur intensitas sumber cahaya *Light Emitting Diode* (LED). Dengan mengatur besaran PWM, peneliti dapat mencegah detektor fotodiode mengalami saturasi (kelebihan cahaya) tanpa perlu mengganti resistor pembatas arus secara manual (Teixeira et al., 2018). Pemahaman mengenai PWM mentransformasi kapasitas peneliti: dari sekadar "mengamati" sistem kimia pasif, menjadi "mengendalikan" variabel kinetika sistem tersebut secara aktif dan kuantitatif.

2.5. Keselamatan Kerja Listrik (K3) di Sekitar Reagen Berbahaya

Integrasi mikrokontroler dan sirkuit elektronika ke dalam meja kerja laboratorium kimia (*wet lab*) memunculkan paradigma risiko yang sama sekali baru. Secara tradisional, protokol Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di laboratorium S1 difokuskan pada bahaya toksikologi (paparan reagen) dan bahaya fisik (kaca pecah atau tumpahan asam). Namun, ketika mahasiswa mulai merakit *breadboard* dan modul relai di sebelah labu refluks yang berisi pelarut organik, mereka secara langsung mengundang bahaya elektrokimia dan bahaya ignisi.

Dalam perancangan instrumen kimia mandiri (*do-it-yourself instrumentation*), terdapat tiga lapis mitigasi risiko elektronik yang mutlak harus dipahami dan diimplementasikan:

A. Risiko Percikan Api Elektrik (*Spark Hazard*) dan Pelarut Volatil Banyak reaksi sintesis organik menggunakan pelarut dengan titik nyala (*flash point*) yang sangat rendah, seperti dietil eter, aseton, atau heksana. Uap dari pelarut ini dapat terakumulasi di dalam lemari asam (*fume hood*). Kesalahan paling fatal dan sering terjadi dalam perakitan purwarupa Arduino adalah penggunaan **Relai Elektromekanik (Electromechanical Relay)** untuk mengontrol pemanas (*heating mantle*) atau pompa.

Relai elektromekanik bekerja dengan menggunakan kumparan magnet untuk menarik sakelar fisik. Ketika sakelar ini memutus arus bolak-balik (AC) bertegangan tinggi, khususnya pada beban induktif seperti motor pompa, fenomena *flyback voltage* akan menghasilkan percikan api mikro (*micro-arcing*) di dalam kotak relai (Horowitz & Hill, 2015). Di lingkungan yang kaya uap mudah terbakar, percikan sekecil apa pun adalah pemicu ledakan (*ignition source*).

- **Mitigasi:** Mahasiswa wajib menggunakan **Solid State Relay (SSR)**. SSR tidak memiliki komponen mekanis yang bergerak, melainkan menggunakan komponen semikonduktor (seperti TRIAC) yang dikendalikan melalui isolasi optik (*optocoupler*), sehingga 100% bebas percikan api (National Research Council, 2011). Selain itu, seluruh sirkuit harus dimasukkan ke dalam wadah tertutup berstandar NEMA atau dengan *Ingress Protection* minimal IP65.

B. Hubungan Arus Pendek (*Short Circuit*) oleh Tumpahan Elektrolit Papan *breadboard* memiliki struktur pin yang terbuka dan sangat rentan terhadap tumpahan cairan. Jika akuades tumpah ke atas *breadboard* Arduino, ia mungkin hanya menyebabkan malfungsi sementara karena konduktivitas akuades sangat rendah. Namun, jika yang tumpah adalah larutan elektrolit kuat (misalnya HCl 1 M atau NaOH), larutan tersebut akan bertindak sebagai jembatan konduktif seketika antara jalur daya 5V dan *Ground* (GND).

Hubungan arus pendek ini tidak hanya akan membakar cip mikrokontroler (ATmega328P), tetapi jika sistem disuplai oleh baterai Lithium-Polymer (LiPo) beraliran tinggi (*high-discharge*), aliran arus pendek tanpa hambatan dapat memicu *thermal runaway* pada sel baterai, yang berujung pada kebakaran baterai di atas meja lab (Ali et al., 2019).

- **Mitigasi:** Purwarupa instrumen yang berdekatan dengan cairan pereaksi tidak boleh menggunakan *breadboard* terbuka untuk waktu yang lama. Sirkuit harus disolder pada *Printed Circuit Board* (PCB) dan wajib dilapisi dengan **Conformal Coating**—yakni semprotan polimer silikon atau akrilik yang membentuk lapisan dielektrik kedap air di atas seluruh permukaan PCB, mencegah ion-ion elektrolit menyentuh jejak tembaga (*copper traces*).

C. Isolasi Galvanik (*Galvanic Isolation*) pada Instrumen Elektrokimia Risiko yang lebih laten dan bersifat analitik adalah terbentuknya **Gelung Tanah (*Ground Loop*)**. Kondisi ini terjadi ketika merakit instrumen elektrokimia seperti pH meter digital atau potensiostat. Elektroda kaca pH dicelupkan ke dalam larutan reaktor. Jika di dalam reaktor tersebut juga terdapat instrumen lain yang terhubung ke jaringan listrik AC (misalnya ujung termokopel logam dari pemanas komersial), dan Arduino di sisi lain terhubung ke *port* USB komputer (yang juga di-ground ke listrik dinding), maka larutan kimia tersebut menjadi "jembatan listrik" tanpa sengaja antara dua sistem pembumian yang berbeda potensial (Skoog et al., 2017).

Ground loop ini akan mengalirkan arus sisa ke dalam larutan, yang secara instan akan mengacaukan pembacaan sensor ion, menciptakan derau yang masif, dan dalam kasus yang ekstrem, arus sisa tersebut dapat merambat naik melalui kabel USB Arduino dan menghancurkan *motherboard* komputer yang digunakan.

- **Mitigasi:** Dalam merancang instrumentasi elektrokimia berbasis Arduino, mahasiswa harus mengimplementasikan **Isolasi Galvanik**. Sensor yang bersentuhan dengan cairan harus ditenagai melalui *Isolated DC-DC Converter*, dan data sinyal digitalnya harus ditransmisikan melintasi penghalang isolasi menggunakan *Optoisolator* (LED dan fototransistor yang berkomunikasi via cahaya, bukan kabel fisik). Dengan cara ini, sirkuit "basah" (sensor) dan sirkuit "kering" (Arduino dan PC) terpisah secara elektrik sepenuhnya (Urban, 2015).

DAFTAR PUSTAKA (BAB 2)

Ali, S., Zia, T. A., & Tariq, M. (2019). Internet of Things in the chemistry laboratory: Safety, security, and data management. *Journal of Chemical Health and Safety*, 26(2), 15-22.

Harris, D. C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.

Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Koesdjojo, M. T., Pengpumkiat, S., Wu, Y., Boonloed, A., Huval, D., Remcho, V. T., & Remcho, G. L. (2013). Cost effective paper-based colorimetric assay for glucose... (dan implementasi pedagogik instrumen). *Journal of Chemical Education*, 90(6), 737-741.

Monk, S. (2016). *Programming Arduino: Getting Started with Sketches* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

National Research Council. (2011). *Prudent Practices in the Laboratory: Handling and Management of Chemical Hazards*. The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/12654>

Pérez, J. M., et al. (2020). Using Arduino to teach programming and electronics to chemistry students: A pedagogical integration. *Journal of Chemical Education*, 97(5), 1400-1406.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

Teixeira, P. C., et al. (2018). Low-cost open-source photometric detector based on LED and photodiode: Application in continuous-flow analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 256, 1081-1088.

Urban, P. L. (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118. <https://doi.org/10.1039/C5AN01487A>

BAB 3: TERMOKIMIA DIGITAL: KALORIMETRI BERSENSOR SUHU DAN MASSA

3.1. Tinjauan Termodinamika Entalpi Reaksi dan Kapasitas Kalor

Studi mengenai termokimia pada dasarnya adalah studi mengenai transformasi energi. Jauh sebelum hukum-hukum termodinamika dirumuskan secara matematis pada abad ke-19, Al-Qur'an telah memberikan isyarat fenomenologis yang sangat mendalam mengenai konversi energi, khususnya bagaimana energi potensial kimiawi yang tersimpan dalam biomassa dapat bertransformasi menjadi energi panas (kalor) dan cahaya. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

الَّذِي جَعَلَ لَكُم مِّنَ الشَّجَرِ الْأَخْضَرِ نَارًا فَإِذَا أَنْتُمْ مِّنْهُ تُوقِدُونَ

"Yaitu (Allah) yang menjadikan api untukmu dari kayu yang hijau, maka seketika itu kamu nyalakan (api) dari kayu itu." (QS. Yasin: 80)

Ayat ini secara eksplisit mendeskripsikan reaksi eksotermis—sebuah proses pelepasan energi di mana ikatan karbon-hidrogen dan karbon-karbon yang terbentuk melalui fotosintesis (dari "kayu yang hijau") dipecah dan direkombinasi dengan oksigen untuk menghasilkan keadaan energi yang lebih rendah, melepaskan selisih energinya ke lingkungan dalam bentuk kalor (*nar* / api). Selisih energi fisis inilah yang dalam termodinamika modern dikuantifikasi sebagai **Entalpi (ΔH)**.

A. Fundamen Entalpi dan Hukum Pertama Termodinamika Dalam praktikum kimia fisik tingkat sarjana (S1), pengukuran perubahan entalpi (ΔH) selalu bermuara pada Hukum Pertama Termodinamika mengenai kekekalan energi. Pada kondisi tekanan tetap (isobarik), kalor (q) yang diserap atau dilepaskan oleh suatu sistem kimia sama dengan perubahan entalpinya ($q_p = \Delta H$).

Karena kita tidak dapat mengukur entalpi absolut dari suatu zat, kita hanya dapat mengukur *perubahannya* melalui efek makroskopis yang ditimbulkannya pada lingkungan sekitar, yaitu perubahan suhu (ΔT). Hubungan kuantitatif ini dijumpai oleh besaran **Kapasitas Kalor (C)** atau kalor jenis (c), melalui persamaan fundamental: $q = m \cdot c \cdot \Delta T$

Namun, realitas empiris di laboratorium sangat jauh dari kondisi ideal teoretis. Sebuah kalorimeter yang dirakit dari gelas styrofoam atau termos vakum sekalipun bukanlah sistem yang terisolasi sempurna secara adiabatik (Atkins & de Paula, 2014). Terdapat kebocoran termal di mana panas dari sistem reaksi merambat keluar ke lingkungan sekitarnya (atau sebaliknya). Selain itu, komponen kalorimeter itu sendiri (dinding wadah, pengaduk, dan probe sensor) menyerap sebagian kalor tersebut, yang dikenal sebagai **Tetapan Kalorimeter (C_{cal})**. Kelalaian dalam mengkalibrasi C_{cal} ini adalah sumber ralat sistematis terbesar dalam praktikum termokimia konvensional.

B. Resolusi Kinetika Pendinginan (Hukum Pendinginan Newton) Batas kelemahan paling fundamental dari termometer raksa atau alkohol analog adalah ketidakmampuannya menangkap

profil kinetika waktu. Termometer manual hanya memberikan diskretisasi suhu pada titik awal (T_{awal}) dan suhu puncak observasi (T_{akhir}). Padahal, segera setelah reaksi dimulai dan suhu melonjak naik, Hukum Pendinginan Newton (*Newton's Law of Cooling*) mulai bekerja secara serentak; laju kehilangan panas berbanding lurus dengan selisih suhu antara kalorimeter dan udara ruangan.

Artinya, suhu "puncak" yang terbaca oleh mata mahasiswa melalui termometer analog *bukanlah* suhu puncak yang sebenarnya (T_{maks} teoretis), karena sebagian panas telah hilang ke udara selama jeda waktu reaksi berlangsung. Pada instrumen manual, mahasiswa sering menggunakan metode regresi linear sederhana pada selembar kertas grafik untuk mengekstrapolasi ΔT . Pendekatan ini secara matematis sangat kasar dan sering kali menghasilkan galat (error) di atas 10% (Hadzich et al., 2018).

C. Signifikansi Metrologi Digital dalam Kalorimetri Di sinilah letak revolusi instrumentasi digital berbasis mikrokontroler. Dengan merakit kalorimeter digital berbasis Arduino, kita tidak lagi sekadar mencatat dua titik suhu statis. Sensor digital (seperti seri DS18B20 atau MAX31865 untuk probe PT100) yang diprogram untuk melakukan *data logging* dengan frekuensi tinggi (misalnya 10 sampel per detik) akan menghasilkan ribuan titik data ($X = \text{Waktu}$, $Y = \text{Suhu}$) yang membentuk kurva utuh.

Melalui *Serial Plotter* atau integrasi algoritma komputasi di latar belakang, mikrokontroler mampu memetakan tiga fase termodinamika secara seketika:

1. **Fase Pra-Reaksi (*Pre-period*):** Menangkap stabilitas suhu dasar (*baseline*) sebelum pencampuran.
2. **Fase Reaksi (*Reaction period*):** Menangkap laju peningkatan eksponensial saat reagen bercampur.
3. **Fase Pasca-Reaksi (*Post-period*):** Menangkap kurva peluruhan suhu eksponensial akibat kebocoran termal ke lingkungan.

Dengan memiliki titik data yang masif dan persisten, instrumen buatan ini dapat diprogram lebih lanjut untuk mengeksekusi integrasi numerik atau ekstrapolasi logaritmik secara *real-time*. Mikrokontroler akan "mengembalikan" suhu yang hilang tersebut secara matematis untuk menemukan nilai ΔT eksak (seolah-olah kalorimeter bersifat adiabatik sempurna) (Wong et al., 2018). Pemahaman ini menggeser cara mahasiswa S1 memandang data: bahwa ΔT yang presisi bukanlah sekadar angka yang dibaca, melainkan hasil analisis matematis menyeluruh terhadap riwayat ruang dan waktu dari suatu reaksi kimia.

3.2. Spesifikasi Sensor Suhu Presisi Tinggi (DS18B20, Thermocouple MAX6675)

Transisi dari termokimia makroskopis ke digitalisasi termal pada era *Chemistry 4.0* sangat bergantung pada pemilihan transduser yang tepat. Kesalahan fundamental yang sering dijumpai pada purwarupa instrumentasi mahasiswa S1 adalah penggunaan sensor suhu linier analog berbiaya rendah (seperti LM35) atau sensor ruang (seperti DHT11). Meskipun fungsional untuk eksperimen fisika dasar, sensor analog sangat rentan terhadap atenuasi sinyal (pelemahan

tegangan) pada kabel dan memiliki ralat akuisisi yang tinggi akibat resolusi *Analog-to-Digital Converter* (ADC) mikrokontroler standar yang terbatas.

Untuk riset kalorimetri yang menuntut presisi dan akurasi tingkat analitik, literatur instrumentasi kontemporer merekomendasikan dua arsitektur sensor suhu yang secara ontologis berbeda: sensor digital berbasis semikonduktor (DS18B20) untuk reaksi rentang menengah, dan sensor termoelektrik (Thermocouple tipe-K dengan kompensasi MAX6675) untuk reaksi pembakaran atau eksotermis suhu tinggi.

A. DS18B20: Semikonduktor Digital dan Protokol 1-Wire

Sensor DS18B20 yang diproduksi oleh Maxim Integrated (kini Analog Devices) telah menjadi standar emas (*gold standard*) dalam edukasi kimia *open-source* berbiaya rendah (Wong et al., 2018). Berbeda dengan sensor analog, DS18B20 melakukan seluruh proses transduksi, kompensasi internal, dan konversi analog-ke-digital secara mandiri di dalam keping silikonnya (*on-chip*).

1. **Resolusi dan Presisi Analitik:** DS18B20 memiliki ADC terintegrasi yang dapat diprogram secara perangkat lunak mulai dari resolusi 9-bit hingga 12-bit. Pada resolusi maksimal 12-bit, sensor ini mampu mendeteksi perubahan suhu sekecil 0,0625 derajat Celcius. Resolusi kuantisasi setinggi ini sangat krusial dalam eksperimen seperti penentuan entalpi pelarutan garam endotermis (misalnya pelarutan amonium nitrat), di mana gradien penurunan suhu total mungkin hanya berkisar antara 2 hingga 4 derajat Celcius. Tanpa resolusi 0,0625 derajat, kurva kinetika pendinginan akan terlihat berundak (*staircase effect*) dan merusak kalkulasi regresi eksponensial.
2. **Topologi Jaringan 1-Wire:** Keunggulan paling revolusioner dari DS18B20 dalam perancangan reaktor kimia multivariabel adalah penggunaan bus komunikasi *1-Wire*. Setiap keping sensor DS18B20 dibekali dengan kode ROM 64-bit yang unik secara global saat diproduksi. Artinya, seorang peneliti dapat membenamkan lima probe suhu (DS18B20 tahan air/ *waterproof*) ke dalam lima kompartemen kalorimeter yang berbeda, dan semuanya dihubungkan hanya menggunakan satu kabel data (pin digital tunggal) ke Arduino. Mikrokontroler akan memanggil data dari masing-masing sensor berdasarkan "alamat" 64-bit tersebut. Hal ini menghemat pin *Input/Output* secara drastis (Kubínová & Šlégr, 2015).
3. **Limitasi Operasional:** Kelemahan absolut sensor ini adalah batas atas termalnya. Karena berbasis semikonduktor (pertemuan p-n silikon), struktur material sensor akan mengalami degradasi di atas suhu 125 derajat Celcius. Oleh karena itu, DS18B20 tidak valid digunakan untuk kalorimetri bom (*bomb calorimetry*) atau sintesis hidrotermal suhu tinggi.

B. Termokopel dan Kompensator MAX6675: Penginderaan Suhu Ekstrem

Untuk memantau entalpi pembakaran (*enthalpy of combustion*) atau reaksi pirolisis organik yang menghasilkan lonjakan termal ratusan derajat, instrumen laboratorium harus kembali pada prinsip fisika klasik: Efek Seebeck. Termokopel (khususnya Tipe-K, paduan *Chromel-Alumel*) beroperasi berdasarkan prinsip bahwa dua logam berbeda yang disatukan pada salah satu ujungnya akan

menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) berwujud mikrovoltase yang sebanding dengan perbedaan suhu antara ujung panas (*hot junction*) dan ujung referensi dingin (*cold junction*).

Namun, mikrokontroler Arduino tidak mampu membaca perubahan mikrovoltase ini secara langsung. Selain itu, termokopel hanya mengukur *perbedaan* suhu, bukan suhu absolut. Jika suhu ruangan (ujung dingin) berubah akibat pendingin ruangan (AC), bacaan di ujung panas akan mengalami bias bergeser.

Di sinilah modul pengkondisi sinyal cerdas seperti **MAX6675** (atau versi lebih modern seperti MAX31855) menjadi jantung dari kalorimeter suhu tinggi:

1. **Kompensasi Sambungan Dingin (Cold-Junction Compensation / CJC):** Keping MAX6675 memiliki sensor suhu silikon di dalamnya yang terus-menerus memantau suhu ruangan (suhu pada papan sirkuit). Modul ini menggunakan data suhu ruangan tersebut untuk mengompensasi persamaan voltase termokopel secara otomatis, sehingga Arduino selalu menerima data suhu absolut dari ujung probe, bukan suhu relatif (Horowitz & Hill, 2015).
2. **Penguatan dan Konversi:** MAX6675 memperkuat sinyal mikrovolt dari termokopel Tipe-K dan memprosesnya melalui ADC internal beresolusi 12-bit. Output akhirnya adalah sinyal digital kokoh yang dikirim ke Arduino via protokol SPI (Serial Peripheral Interface). Rentang deteksi modul ini sangat impresif, mulai dari 0 derajat hingga 1024 derajat Celcius dengan resolusi 0,25 derajat Celcius.

C. Dinamika Respons Waktu (Time Constant / τ)

Satu parameter kritis yang wajib dievaluasi oleh mahasiswa kimia saat merancang alat ini adalah Waktu Respons Termal (τ). DS18B20 versi *waterproof* dibungkus oleh selongsong baja tahan karat (*stainless steel*) berongga silikon. Massa termal dari selongsong ini bertindak sebagai insulasi parsial. Secara empiris, waktu yang dibutuhkan sensor ini untuk mencapai kesetimbangan dengan lingkungan cairannya ($\tau_{63\%}$) bisa berkisar antara 2 hingga 5 detik.

Dalam reaksi asam-basa instan (seperti netralisasi HCl dan NaOH), suhu maksimal bisa tercapai dalam hitungan detik. Jika sensor terlalu lambat merespons akibat massa termalnya (keterlambatan inersia termal), suhu puncak yang tercatat pada *Serial Plotter* akan lebih rendah dari suhu nyata. Sebaliknya, termokopel tipe kawat terbuka (*exposed junction*) memiliki waktu respons orde milidetik, namun sangat rentan terhadap korosi bahan kimia. Kalibrasi kinetika sensor menjadi pilar validasi yang tak terhindarkan sebelum kalorimeter digital dinyatakan layak untuk riset kuantitatif.

3.3. Modul Load Cell dan HX711 untuk Pengukuran Massa Waktu-Nyata

Dalam analitik kimia, massa adalah salah satu besaran fundamental yang paling absolut. Analisis gravimetri klasik sering kali membatasi penimbangan hanya pada fase awal (massa reaktan) dan akhir (massa produk/endapan). Namun, banyak reaksi kinetika krusial—seperti dekomposisi termal kalsium karbonat, efervesensi pelepasan gas CO₂ dari tablet antasida, atau penentuan laju

evaporasi pelarut volatil—menuntut pemantauan hilangnya massa sistem secara kontinu dan presisi tinggi seiring berjalannya waktu.

Untuk melakukan "gravimetri kinetik" di era *Chemistry 4.0*, kita tidak dapat menggunakan neraca ohaus analog. Mahasiswa S1 perlu dilatih untuk mengintegrasikan sensor regangan mekanik, yang dikenal sebagai *Load Cell*, bersanding dengan modul penguat cerdas resolusi ultra-tinggi HX711.

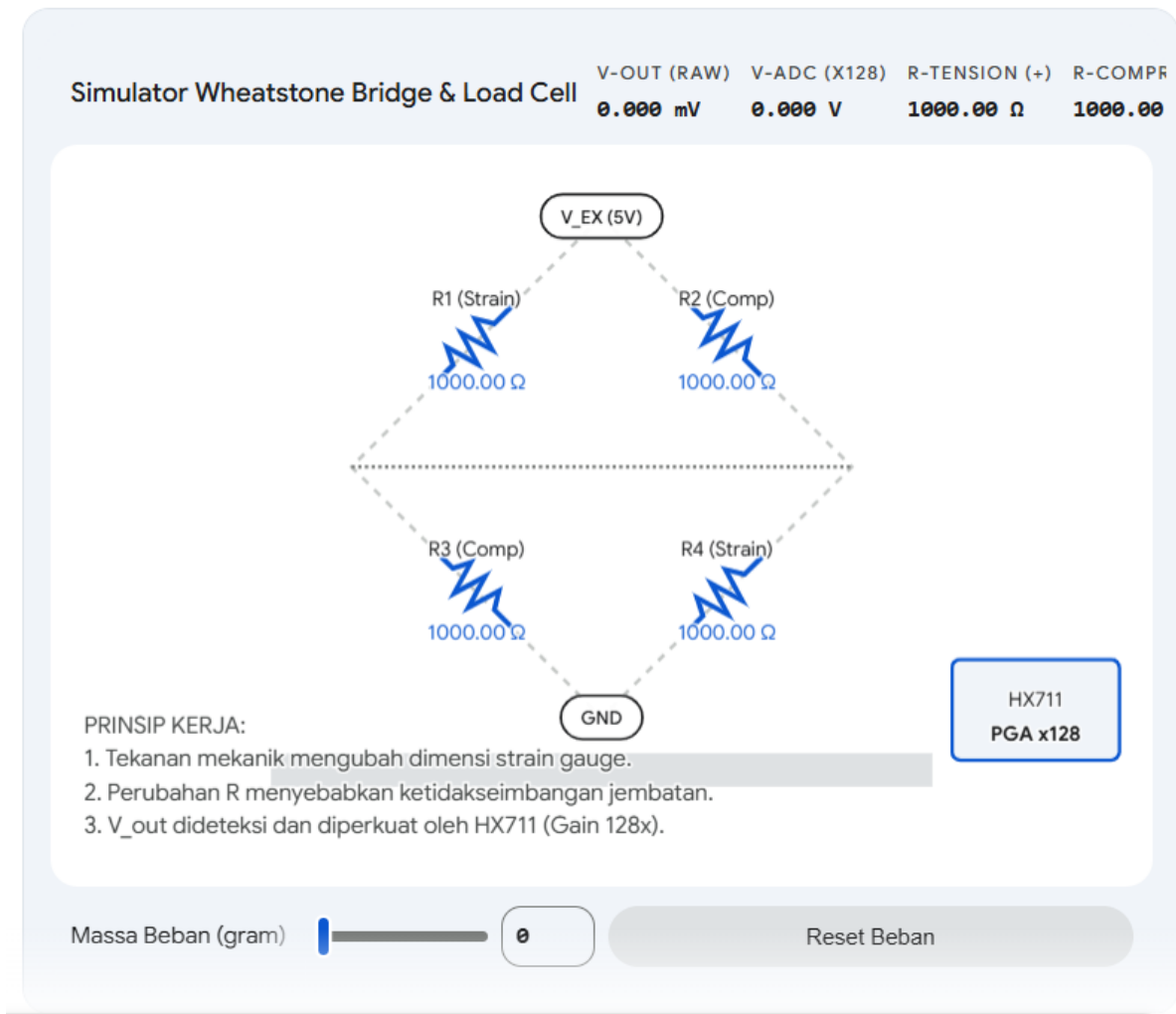
A. Efek Piezoresistif dan Topologi Jembatan Wheatstone

Jantung dari sebuah neraca analitik digital bukanlah komponen elektronik murni, melainkan konverter elektromekanik. Sebuah *Load Cell* tunggal (tipe *bar* atau batang) terbuat dari paduan aluminium (aluminium alloy) yang sengaja dilubangi di titik tertentu agar dapat melengkung secara elastis saat diberi beban.

Menempel pada bagian yang melengkung ini adalah empat buah **Strain Gauge** (pengukur regangan). *Strain gauge* adalah foil logam tipis berjalur zig-zag. Ketika beban (massa zat kimia) diletakkan di atas *load cell*, aluminium melengkung. Lengkungan mikroskopis ini menarik (meregangkan) dua *strain gauge* di bagian atas, dan menekan (mengompresi) dua *strain gauge* di bagian bawah. Berdasarkan hukum dasar hambatan kawat, regangan mekanik ini mengubah panjang (L) dan luas penampang (A) jalur logam, yang pada akhirnya mengubah resistansi elektriknya secara proporsional. Fenomena ini disebut **Efek Piezoresistif** (Pili & Violanda, 2019).

Untuk mengubah perubahan resistansi yang sangat kecil (orde miliohm) menjadi tegangan listrik yang dapat dibaca, keempat *strain gauge* ini disusun dalam konfigurasi sirkuit **Jembatan Wheatstone (Wheatstone Bridge)**. Konfigurasi jembatan ini sangat cerdas secara metrologi; selain memvalidasi diferensiasi tegangan, ia juga memberikan *Common-Mode Rejection*. Jika suhu ruangan laboratorium naik dan menyebabkan resistansi logam *strain gauge* berubah, keempatnya akan berubah secara seragam sehingga saling meniadakan galat suhu tersebut, memastikan bahwa *output* tegangan semata-mata berasal dari regangan massa.

Untuk memahami secara mendalam bagaimana gaya gravitasi dari massa diubah menjadi tegangan listrik melalui sirkuit ini, Anda dapat mengeksplorasi simulator Jembatan Wheatstone berikut:



B. Modul HX711: Penguat Instrumentasi dan ADC 24-bit

Meskipun Jembatan Wheatstone sangat sensitif, tegangan keluaran (*output*) maksimal dari *Load Cell* standar (berkapasitas 1 kg, misalnya) umumnya hanya 1 hingga 2 milivolt (mV) per Volt eksitasi (ditulis sebagai sensitivitas 2 mV/V). Jika diberi tegangan eksitasi 5V dari Arduino, sinyal diferensial maksimum pada beban penuh 1 kilogram hanyalah 10 mV.

Jika sinyal 10 mV ini dimasukkan langsung ke pin analog Arduino Uno standar (yang memiliki resolusi *Analog-to-Digital Converter* / ADC 10-bit dengan batas ukur terkecil 4,88 mV), maka Arduino hanya akan melihatnya sebagai "dua langkah" angka biner. Ini berarti resolusi neracanya hanya 500 gram—sebuah bencana analitik untuk eksperimen kimia.

Oleh karena itu, instrumen gravimetri digital mutlak membutuhkan modul **HX711**. Cip khusus ini melakukan dua fungsi fundamental secara berurutan:

1. **Programmable Gain Amplifier (PGA):** HX711 secara internal memperkuat sinyal diferensial mikrovolt dari *load cell* tersebut sebanyak 128 kali lipat ($\text{gain} = 128$), mengangkatnya dari jurang *noise* ke level amplitudo yang layak ukur.
2. **Analog-to-Digital Converter 24-bit:** Ini adalah lompatan kuantum dalam resolusi. Dibandingkan ADC 10-bit Arduino yang membagi tegangan menjadi 1.024 langkah, ADC 24-bit pada HX711 membaginya menjadi 2^{24} atau **16.777.216** langkah kuantisasi diskrit. Tingkat resolusi ini memungkinkan mahasiswa mendeteksi perubahan massa pada orde desimal miligram (asalkan sistem terisolasi dari getaran meja) (Teixeira et al., 2018).

C. Kalibrasi, Tare, dan Penanganan Creep Logam

Kekuatan komputasi Arduino di balik HX711 memfasilitasi algoritma metrologi yang rumit secara *real-time*. Fungsi **Tare (Tara)** diprogram pada fungsi `setup()` untuk mengakumulasi rata-rata pembacaan (oversampling) wadah reaktor kosong selama 3 detik pertama, dan menyetel nilai biner tersebut sebagai titik "Nol" buatan (*offset*). Selanjutnya, mahasiswa harus memasukkan *Calibration Factor* (Faktor Kalibrasi/Slope regresi) yang didapatkan dari mengukur anak timbang standar kelas F1 atau M1 secara empiris.

Namun, literatur analitik memperingatkan tentang satu fenomena non-ideal fisis: **Creep** (Rangkak). Logam paduan aluminium pada *load cell* bukan pegas ideal. Jika gelas beker berisi pelarut diletakkan di atas *load cell* selama berjam-jam untuk memantau laju evaporasi panjang, molekul paduan logam secara mikroskopis akan terus meluruh (meregang lebih lanjut meski massa konstan). Hal ini menyebabkan nilai massa perlahan-lahan merangkak naik (positif atau negatif *drift*) pada monitor serial, meskipun tidak ada zat yang ditambahkan. Mengatasi galat *creep* ini menuntut mahasiswa untuk memahami rentang linearitas mekanik elastis, merancang eksperimen dalam durasi kinetika yang rasional, dan menggunakan algoritma kompensasi waktu secara matematis di dalam program Arduino.

3.4. Blueprint Alat: Merakit Kalorimeter Digital Berbasis Arduino

Transisi dari pemahaman teoretis mengenai komponen termal (DS18B20) dan gravimetri (HX711) menuju purwarupa fungsional mensyaratkan desain integrasi sistem (*system integration*). Merakit instrumen analitik bukan sekadar menyambungkan kabel ke mikrokontroler; ini adalah proses orkestrasi antara isolasi termal, mitigasi derau mekanik, dan keandalan arsitektur elektronik. Kalorimeter digital yang dirancang untuk tingkat S1 harus mampu melakukan akuisisi data ganda (*dual-data acquisition*)—mencatat suhu dan massa secara simultan—untuk mempelajari kinetika reaksi kompleks seperti dekomposisi eksotermis fasa padat-cair.

A. Desain Mekanis: Isolasi Termal dan Dekopling Vibrasi

Kelemahan utama dari kalorimeter buatan sendiri (*do-it-yourself*) sering kali terletak pada desain mekanis wadah reaktornya. Mahasiswa sering mengabaikan hukum perpindahan panas secara konduksi melalui penyangga alat.

1. **Wadah Reaktor (Bejana Adiabatik Sintetis):** Untuk mendekati kondisi adiabatik ideal, wadah reaksi tidak boleh hanya berupa gelas beker kaca. Kaca borosilikat memiliki

konduktivitas termal yang cukup tinggi. Pendekatan yang direkomendasikan adalah menggunakan modifikasi Termos Vakum (*Vacuum Dewar Flask*) berleher lebar berkapasitas 250 mL, atau bejana insulasi ganda yang dicetak menggunakan printer 3D dari filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) dengan rongga yang diisi busa poliuretan (Pearce, 2014).

2. **Mitigasi Panas dari *Magnetic Stirrer*:** Reaksi homogen mutlak membutuhkan pengadukan. Namun, motor listrik dan kumparan elektromagnetik pada *magnetic stirrer* komersial menghasilkan buangan panas (*waste heat*) yang dapat merambat naik menembus *load cell* dan dasar kalorimeter, merusak data Delta T sistem (Hadzich et al., 2018). Solusinya adalah mengintegrasikan plat insulasi berbahan *Polytetrafluoroethylene* (PTFE/Teflon) atau balok akrilik tebal sebagai *thermal standoff* antara meja pengaduk mekanik dan pelat sensor *load cell*.
3. **Dekopling Vibrasi (Derau Mekanik):** Kehadiran pengaduk magnetik putar (*stir bar*) di dalam wadah reaksi akan menghasilkan gelombang mekanik (getaran) yang secara langsung akan dibaca oleh *load cell* sebagai fluktuasi massa yang ekstrem (derau). Wadah reaktor harus diletakkan persis di titik *center of gravity* dari *load cell* tipe *single-point*. Selain itu, mahasiswa harus memprogram algoritma *Low-Pass Filter* (seperti *Moving Average* dari 10 data serial) di dalam Arduino untuk menghaluskan kurva massa tanpa kehilangan profil waktu kinetiknya (Teixeira et al., 2018).

B. Topologi Elektronika dan Pengkabelan (*Wiring Diagram*)

Integritas sinyal digital sangat bergantung pada topologi pengkabelan yang presisi. Modul Arduino Uno (atau Nano) akan bertindak sebagai terminal pusat. Berikut adalah *blueprint* arsitektur pengkabelannya:

1. **Integrasi Sensor Suhu (DS18B20):** * Pin VCC sensor dihubungkan ke rel 5V Arduino.
 - Pin GND sensor dihubungkan ke rel GND Arduino.
 - Pin DATA (kabel warna kuning/putih pada versi *waterproof*) dihubungkan ke **Pin Digital 2** Arduino.
 - **Syarat Mutlak (Pull-up Resistor):** Protokol *1-Wire* menggunakan arsitektur *open-drain*. Mahasiswa wajib menyolder resistor 4.7 k Ω secara paralel yang menjembatani kabel DATA dan kabel VCC. Tanpa resistor *pull-up* ini, kapasitansi parasitik pada kabel akan mendistorsi sinyal biner, menyebabkan Arduino gagal mengenali alamat 64-bit sensor dan menghasilkan pembacaan *error* (-127 °C) (Kubínová & Šlégr, 2015).
2. **Integrasi Sensor Massa (Modul HX711 & Load Cell):**
 - Pin VCC dan GND modul HX711 dihubungkan ke rel 5V dan GND Arduino.
 - Pin DT (Data) HX711 dihubungkan ke **Pin Digital 3**.
 - Pin SCK (*Serial Clock*) HX711 dihubungkan ke **Pin Digital 4**.
 - Kabel dari *Load Cell* ke terminal HX711 diurutkan berdasarkan standar industri: Merah (E+), Hitam (E-), Putih (A-), dan Hijau (A+).

C. Redefinisi Tetapan Kalorimeter (C_{cal})

Setelah perakitan perangkat keras selesai, kalorimeter digital ini belum sah secara metrologi. Masuknya selongsong baja dari sensor DS18B20 dan penggunaan material wadah *custom* mengubah total kapasitas kalor dari sistem.

Sebelum digunakan untuk mengukur entalpi reaksi yang belum diketahui, mahasiswa diwajibkan melakukan eksperimen kalibrasi listrik (*electrical calibration*) atau kalibrasi kimia. Jika menggunakan kalibrasi kimia, metode pencampuran air panas dan air dingin (yang suhunya dipantau secara kontinu hingga mencapai garis asimtot termal) harus dieksekusi. Karena kalorimeter kita kini dilengkapi pencatat data (*data logger*) otomatis berkecepatan tinggi, mahasiswa dapat mengekstrapolasi kurva peluruhan Newton untuk menentukan Delta T pencampuran secara jauh lebih presisi dibandingkan metode analog, sehingga nilai Tetapan Kalorimeter (C_{cal}) dalam satuan $\text{J}/^\circ\text{C}$ yang diperoleh memiliki tingkat kepercayaan analitik yang tinggi (Atkins & de Paula, 2014).

3.5. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Penentuan Entalpi Pelarutan

Pada tahap akhir perancangan instrumentasi, validasi alat mutlak dilakukan melalui implementasi pada prosedur operasional standar (SOP) praktikum kimia. Integrasi antara sensor DS18B20 dan *load cell* HX711 memungkinkan pemantauan dua variabel termodinamika secara simultan. Presisi dalam mengukur perubahan suhu dan massa ini selaras dengan prinsip keteraturan dan ketetapan ukuran dalam penciptaan alam semesta, sebagaimana termaktub dalam firman Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

وَلَقَدْ خَلَقَ كُلَّ شَيْءٍ فَقَدَرَهُ تَقْدِيرًا

"Dan Dia telah menciptakan segala sesuatu, dan Dia menetapkan ukuran-ukurannya dengan serapi-rapinya." (QS. Al-Furqan: 2)

Ayat ini menegaskan bahwa segala sesuatu di alam ini beroperasi berdasarkan perhitungan dan takaran yang presisi (*taqdir*). Dalam konteks termokimia, *taqdir* ini termanifestasi dalam Hukum Kekekalan Energi, di mana setiap miligram reaktan yang melarut akan menghasilkan fluktuasi joule energi yang pasti, yang kini dapat kita kuantifikasi melalui algoritma komputasi.

A. Algoritma Perangkat Lunak (Source Code C/C++)

Logika pemrograman untuk kalorimeter digital ganda ini dirancang untuk melakukan *data logging* dalam format *Comma-Separated Values* (CSV). Format ini dipilih agar data deret waktu (*time-series*) dapat langsung diekspor dan divisualisasikan menggunakan perangkat lunak analisis data lanjutan seperti Python (menggunakan pustaka *Pandas* dan *Matplotlib*) atau Microsoft Excel.

Sesuai standar akademis, kode di bawah ini menghindari penggunaan fungsi *delay()* yang bersifat memblokir (*blocking*), dan beralih menggunakan fungsi *millis()* untuk memastikan interval akuisisi data yang absolut dan konsisten (misalnya tepat setiap 1000 milidetik).

Struktur Kode Arduino (Kalorimeter Dual-Sensor):

```
#include "HX711.h"
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
// Konfigurasi Pin DS18B20
const int pinSuhu = 2;
OneWire oneWire(pinSuhu);
DallasTemperature sensorSuhu(&oneWire);
// Konfigurasi Pin HX711
const int pinDT = 3;
const int pinSCK = 4;
HX711 scale;
// Variabel Kontrol Waktu (Non-Blocking)
unsigned long waktuSebelumnya = 0;
const long interval = 1000; // Akuisisi setiap 1 detik
float faktorKalibrasi = 2280.f; // Sesuaikan dengan hasil kalibrasi empiris anak timbang
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  // Inisialisasi Suhu
  sensorSuhu.begin();
  sensorSuhu.setResolution(12); // Resolusi maksimal 12-bit (0.0625 C)
  // Inisialisasi Massa
  scale.begin(pinDT, pinSCK);
  scale.set_scale(faktorKalibrasi);
  scale.tare(); // Kalibrasi titik nol (wadah kosong)
  // Mencetak Header Data (Format CSV)
  Serial.println("Waktu(s),Massa(g),Suhu(C)");
}
void loop() {
  unsigned long waktuSekarang = millis();
  if (waktuSekarang - waktuSebelumnya >= interval) {
    waktuSebelumnya = waktuSekarang;
    // Perintah akuisisi data
    sensorSuhu.requestTemperatures();
    **float** suhuC = sensorSuhu.getTempCByIndex(0);
    **float** massaG = scale.get_units(5); // Rata-rata dari 5 pembacaan (Oversampling)

    // Transmisi Serial format CSV
    Serial.print(waktuSekarang / 1000);
    Serial.print(",");
    Serial.print(massaG, 2); // Presisi 2 angka desimal
    Serial.print(",");
    Serial.println(suhuC, 4); // Presisi 4 angka desimal untuk analisis kinetika
  }
}
```

B. Prosedur Operasional Standar (SOP) Praktikum S1

Praktikum ini bertujuan untuk memvalidasi performa alat dengan menentukan Entalpi Pelarutan (ΔH_{sol}) dari garam endotermis Kalium Klorida (KCl) atau Amonium Nitrat (NH_4NO_3).

1. **Persiapan dan Penetapan Nilai Tara (*Tare*):** Letakkan kalorimeter digital lengkap (wadah dewar, batang pengaduk magnetik, dan probe DS18B20) di atas *load cell*. Nyalakan Arduino. Biarkan sistem beroperasi selama 3 menit untuk stabilisasi termal sensor. Tekan tombol *reset* pada Arduino untuk memicu fungsi `scale.tare()`, sehingga massa keseluruhan sistem dianggap 0,00 gram.
2. **Penambahan Pelarut dan Stabilisasi *Baseline*:** Masukkan akuades (sekitar 100 mL) ke dalam kalorimeter. Massa air akan otomatis terekam secara *real-time* (misalnya 99,85 gram). Nyalakan *magnetic stirrer* pada kecepatan konstan (misal 300 rpm). Biarkan akuisisi data berjalan selama 3-5 menit untuk merekam kurva *baseline* suhu air awal (T_{awal}).
3. **Fase Injeksi Reaktan:** Tanpa menghentikan proses *data logging* pada *Serial Monitor*, masukkan kristal NH_4NO_3 (sekitar 5 gram) ke dalam kalorimeter. *Load cell* akan seketika mencatat lonjakan massa (menjadi 104,85 gram). Secara bersamaan, DS18B20 akan merekam penurunan suhu eksponensial secara berkelanjutan seiring melarutnya kristal tersebut.
4. **Kinetika Pendinginan Newton (*Post-Period*):** Setelah suhu mencapai titik terendahnya, biarkan sistem tetap merekam data selama minimal 10 menit. Fase pasca-reaksi ini wajib direkam untuk menangkap laju kebocoran panas (kalor dari lingkungan masuk kembali ke dalam sistem endotermis). Data kurva pendinginan Newton ini sangat penting untuk ekstrapolasi termal (Kubínová & Šlégr, 2015).
5. **Terminasi dan Ekspor Data:** Hentikan rekaman. Salin seluruh data dari *Serial Monitor* dan simpan ke dalam berkas berekstensi *.csv*.

C. Analisis Termodinamika dan Kesimpulan Fungsional

Mahasiswa tidak lagi mencari selisih T menggunakan rumus kaku ($T_{\text{akhir}} - T_{\text{awal}}$). Melalui grafik di Excel atau Python, mahasiswa memplot kurva *Suhu vs Waktu*. Menggunakan metode Ekstrapolasi Regresi Linear dari fase *post-period* yang ditarik mundur hingga ke titik waktu injeksi sampel ($\text{Waktu} = 0$), mahasiswa akan mendapatkan nilai ΔT_{eksak} yang telah dikompensasi dari galat kebocoran termal (Wong et al., 2018).

Selanjutnya, energi kalor (q) dihitung menggunakan formula:

$$q = (m_{\text{air}} \times c_{\text{air}} + C_{\text{cal}}) \times \Delta T_{\text{eksak}}$$

Massa analit eksak diperoleh dari selisih data *load cell* otomatis. Dengan membagi kalor (q) terhadap jumlah mol analit (n), Entalpi Pelarutan Molar (ΔH_{sol}) dapat dikuantifikasi. Instrumentasi ganda ini mengeliminasi ralat paralaks pembacaan termometer, mengeliminasi asumsi adiabatik yang salah, dan mengeliminasi proses penimbangan analitik yang terpisah, menjadikannya arsitektur ideal bagi laboratorium S1 Kimia modern.

DAFTAR PUSTAKA (BAB 3)

- Atkins, P., & de Paula, J. (2014). *Physical Chemistry* (10th ed.). Oxford University Press.
- Hadzich, A., Viera, R. A., Zambrano, V., & Vargas, R. E. (2018). A low-cost, open-source calorimeter for enthalpy of reaction measurements. *Journal of Chemical Education*, 95(11), 2055-2059. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00424>
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Kubínová, Š., & Šlégr, J. (2015). ChemDuino: Adapting Arduino for low-cost chemical measurements in both lecture and laboratory. *Journal of Chemical Education*, 92(10), 1751-1753. <https://doi.org/10.1021/ed5008102>
- Pearce, J. M. (2014). *Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs*. Elsevier.
- Pili, U., & Violanda, R. (2019). A low-cost Arduino-based load cell system for measuring mass and force. *Physics Education*, 54(4), 045012. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab226b>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.
- Teixeira, P. C., et al. (2018). Low-cost open-source photometric detector based on LED and photodiode: Application in continuous-flow analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 256, 1081-1088.
- Wong, A. K., et al. (2018). Precision thermometry with the DS18B20 1-wire digital thermometer in chemical kinetics experiments. *HardwareX*, 4, e00035. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00035>

BAB 4: ELEKTROKIMIA & KINETIKA: SISTEM TITRASI OTOMATIS

4.1. Teori Asam-Basa dan Dinamika Kurva Titrasi

Memasuki ranah elektrokimia, kita berhadapan dengan dinamika transfer muatan mikroskopis—khususnya ion hidronium (H_3O^+) dan hidroksida (OH^-)—yang secara makroskopis mengubah sifat pelarut secara drastis. Konsep ekuivalensi (kesetaraan) dalam titrasi asam-basa adalah representasi fundamental dari prinsip keseimbangan (*mizan*). Dalam skala kosmik hingga molekuler, Allah *Subhanahu wa Ta'ala* menetapkan pentingnya neraca atau keseimbangan yang presisi, sebagaimana termaktub dalam firman-Nya:

لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِالْبَيِّنَاتِ وَأَنْزَلْنَا مَعَهُمُ الْكِتَابَ وَالْمِيزَانَ لِيَقُومَ النَّاسُ بِالْقِسْطِ

"*Sungguh, Kami telah mengutus rasul-rasul Kami dengan bukti-bukti yang nyata dan Kami turunkan bersama mereka Kitab dan neraca (keseimbangan) agar manusia dapat berlaku adil (tepat).*" (QS. Al-Hadid: 25)

Secara epistemologis, proses titrasi adalah ikhtiar analitik untuk mencari "keadilan" stoikiometrik tersebut; titik di mana mol ekuivalen asam tepat habis bereaksi dengan mol ekuivalen basa (Titik Ekuivalen).

A. Skala Logaritmik dan Sensitivitas Ionik

Dalam analisis volumetri tradisional, tantangan terbesar mahasiswa adalah memahami perilaku non-linear dari derajat keasaman (pH). Karena didefinisikan secara logaritmik sebagai $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$, perubahan 1 unit pH mengindikasikan perubahan konsentrasi ion hidrogen sebesar 10 kali lipat.

Karakteristik matematis inilah yang menghasilkan profil kurva titrasi berbentuk sigmoidal (huruf 'S'). Pada awal penambahan titran basa ke dalam analit asam kuat, perubahan pH berlangsung sangat lambat karena reaktor masih didominasi oleh lautan proton. Namun, ketika reaksi mendekati titik ekuivalen, tetesan sekecil 0,05 mL (satu tetes buret) dapat memicu lonjakan pH yang ekstrem—misalnya dari pH 4 melompat seketika ke pH 10 (Harris, 2015). Di area ekuivalen inilah ralat manusia (*human error*) paling sering terjadi dalam titrasi manual.

B. Kapasitas Penyangga (*Buffer*) pada Asam Lemah

Dinamika menjadi jauh lebih kompleks ketika objek analisisnya adalah asam lemah (seperti asam asetat dalam cuka komersial). Sesuai dengan teori Brønsted-Lowry, asam lemah tidak terdisosiasi sempurna. Saat dititrasi dengan basa kuat (NaOH), sebagian molekul asam lemah (HA) diubah menjadi basa konjugasinya (A^-). Keberadaan pasangan HA dan A^- secara simultan ini menciptakan Sistem Penyangga (*Buffer System*) di paruh pertama kurva titrasi.

Pada zona ini, kurva mendatar karena sistem melawan perubahan pH. Hubungan dinamis ini dimodelkan melalui persamaan Henderson-Hasselbalch:

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log ([\text{A}^-] / [\text{HA}])$$

Ketika volume titran mencapai persis setengah dari volume ekuivalen, konsentrasi asam sisa sama dengan konsentrasi basa konjugasinya ($[\text{HA}] = [\text{A}^-]$). Pada titik kritis ini, nilai $\log(1) = 0$, sehingga $\text{pH} = \text{pK}_a$. Pemahaman matematis ini esensial bagi kimiawan; dari sebuah kurva titrasi fisis, kita dapat mengekstraksi tetapan termodinamika (K_a) dari suatu senyawa tanpa perlu mengukurnya secara langsung.

C. Keterbatasan Visual dan Urgensi Diferensiasi Matematis

Praktikum kimia konvensional mengandalkan indikator sintetik (seperti *Phenolphthalein* atau Metil Merah) yang berubah warna pada rentang pH tertentu untuk menandai Titik Akhir Titrasi (*End Point*). Masalahnya, titik akhir visual ini sering kali tidak berhimpit persis dengan Titik Ekuivalen sejati, memicu galat bawaan. Terlebih lagi, untuk larutan sampel yang sudah berwarna pekat atau keruh sejak awal, indikator visual menjadi sama sekali tidak berguna (Skoog et al., 2017).

Secara analitik instrumen, Titik Ekuivalen tidak ditentukan dari perubahan warna, melainkan dari laju perubahan pH tertinggi (titik infleksi dari kurva sigmoidal). Untuk menemukan titik ini secara absolut, instrumen harus melakukan derivasi matematika: menghitung Turunan Pertama (dpH/dV) atau Turunan Kedua ($\text{d}^2\text{pH}/\text{dV}^2$) dari data sensor. Di sinilah letak urgensi otomasi; kalkulasi derivatif ini mustahil dilakukan seketika oleh manusia, tetapi sangat mudah dieksekusi oleh mikrokontroler seperti Arduino yang mencatat perubahan voltase elektroda setiap detik.

Untuk memvisualisasikan bagaimana kekuatan asam (nilai K_a) dan jenis titrasi mendikte profil kurva sigmoidal sebelum kita merancang instrumen fisiknya, Anda dapat mengeksplorasi simulator dinamika kurva di bawah ini.



4.2. Karakterisasi Sensor pH Analog dan Kompensasi Suhu Otomatis (ATC)

Dalam merancang instrumentasi elektrokimia yang presisi, seorang peneliti dihadapkan pada realitas mikroskopis yang sangat sensitif. Fluktuasi sekecil apa pun pada konsentrasi ion (seukuran proton) akan menghasilkan manifestasi termodinamika yang nyata. Kesadaran akan signifikansi hal-hal mikroskopis ini merefleksikan prinsip fundamental dalam Islam, di mana Allah *Subhanahu wa Ta'ala* menegaskan bahwa tidak ada satu pun entitas sekecil *dzarrah* (zarah/atom) yang luput dari perhitungan dan konsekuensi logisnya:

فَمَنْ يَعْمَلْ مِثْقَالَ ذَرَّةٍ خَيْرًا يَرَهُ * وَمَنْ يَعْمَلْ مِثْقَالَ ذَرَّةٍ شَرًّا يَرَهُ

"Maka barangsiapa mengerjakan kebaikan seberat dzarrah, niscaya dia akan melihat (balasan)nya. Dan barangsiapa mengerjakan kejahatan seberat dzarrah, niscaya dia akan melihat (balasan)nya." (QS. Az-Zalzalah: 7-8)

Sama halnya dalam kimia analitik, fluktuasi konsentrasi ion hidrogen (H^+) "seberat dzarrah" akan merombak secara radikal nilai potensial sel elektrokimia. Untuk menangkap dinamika zarah ini, instrumen autotitrator mengandalkan elektroda kaca (*glass electrode*) sebagai transduser utamanya.

A. Anatomi Transduksi Elektroda Kaca dan Masalah Impedansi Ekstrem

Sensor pH bukanlah sebuah hambatan pasif, melainkan sebuah sel galvanik miniatur. Elektroda pH kombinasi standar tersusun atas elektroda indikator (berisi larutan bufer internal HCl dan kawat Ag/AgCl) yang dibungkus oleh membran kaca silikat khusus, bersanding dengan elektroda referensi (biasanya juga Ag/AgCl dalam larutan KCl jenuh) yang terhubung ke analit melalui *liquid junction* (frit keramik).

Proses transduksi sinyal terjadi di permukaan membran kaca. Kaca silikat ini bersifat higroskopis; ketika dicelupkan ke dalam sampel berair, permukaannya membentuk lapisan gel terhidrasi setebal beberapa nanometer. Ion hidrogen dari sampel menembus matriks gel ini dan memicu reaksi pertukaran ion dengan kation logam (seperti Na^+) di dalam struktur kaca. Perbedaan aktivitas ion hidrogen antara bagian luar membran (sampel) dan bagian dalam membran (bufer internal) menghasilkan **Potensial Asimetri (Asymmetry Potential)** lintas membran (Skoog et al., 2017).

Namun, ada satu rintangan arsitektural yang kritis dalam merakit pH meter berbasis mikrokontroler: **Impedansi Kaca**. Membran silikat adalah isolator listrik yang sangat baik. Akibatnya, elektroda pH memiliki resistansi internal yang sangat ekstrem, berkisar antara 10 hingga 100 MegaOhm ($\text{M}\Omega$). Jika elektroda ini dihubungkan langsung ke pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) Arduino Uno, arus yang sangat kecil dari elektroda akan tersedot oleh sirkuit internal Arduino (yang juga memiliki impedansi *input* sekitar 100 $\text{M}\Omega$). Hal ini memicu fenomena *Loading Effect* (Penurunan Tegangan), di mana voltase yang terbaca drop mendekati nol dan merusak seluruh validitas data kuantitatif (Horowitz & Hill, 2015).

Untuk memitigasi galat impedansi ini, elektroda pH wajib dilewatkan terlebih dahulu pada sebuah **Modul Pengkondisi Sinyal (Signal Conditioner)**. Modul ini pada dasarnya adalah rangkaian *Buffer/Voltage Follower* yang dibangun menggunakan *Operational Amplifier* (Op-Amp) berbasis *Field-Effect Transistor* (FET), seperti TL072 atau CA3140. Op-Amp FET memiliki impedansi masukan (*input impedance*) pada orde TeraOhm ($10^{12} \Omega$), sehingga ia mampu "merasakan" perubahan milivolt dari membran kaca tanpa menyedot arusnya, dan meneruskan sinyal yang sudah dikuatkan (*low-impedance output*) secara aman ke pin ADC Arduino (Belić et al., 2020).

B. Persamaan Nernst dan Pergeseran Sensitivitas (Slope)

Respons potensial dari sel elektrokimia terhadap konsentrasi ion hidrogen secara matematis didikte oleh Persamaan Nernst:

$$E = E^\circ - (2.303 RT / F) \text{ pH}$$

Dalam persamaan ini, R adalah tetapan gas ideal, F adalah tetapan Faraday, dan E° adalah potensial standar sistem. Elemen paling krusial bagi seorang programer analitik adalah frasa pengali $\{2.303 RT\} / F$, yang dikenal sebagai **Kemiringan Nernstian (Nernstian Slope)**.

Pada suhu ruang standar (25 °C atau 298.15 K), nilai kemiringan ini secara teoretis adalah **59.16 milivolt (mV) per unit pH**. Artinya, setiap kali larutan bertambah basa 1 unit pH, tegangan output elektroda akan turun sebesar 59.16 mV. Dalam sintaksis program Arduino, nilai ini dijadikan faktor regresi untuk menerjemahkan angka digital (0-1023) menjadi satuan pH makroskopis.

C. Kinetika Panas dan Urgensi Automatic Temperature Compensation (ATC)

Problematika termodinamika muncul ketika kita melakukan titrasi eksotermis (misalnya titrasi basa kuat berkapasitas tinggi oleh asam kuat). Reaksi netralisasi akan melepaskan kalor

pembentukan air, yang berpotensi menaikkan suhu sampel di dalam reaktor autotitrator (dari 25 °C menjadi 35 °C atau lebih).

Berdasarkan Persamaan Nernst di atas, parameter Suhu (T dalam satuan Kelvin) berbanding lurus secara linier dengan nilai *Slope*. Jika suhu sampel naik menjadi 35 °C (308.15 K), nilai *slope* berubah dari 59.16 mV/pH menjadi **61.14 mV/pH**. Jika mikrokontroler tidak menyadari kenaikan suhu ini dan tetap menggunakan faktor pengali statis 59.16 di dalam kode programnya, maka instrumen akan menghasilkan **Kesalahan Sensitivitas Suhu (Temperature Sensitivity Error)**. Pada pH yang ekstrem (misalnya pH 2 atau pH 12), kesalahan satu hingga dua milivolt ini dapat menggeser pembacaan hingga 0.2 unit pH, yang akan mengacaukan penentuan Titik Ekuivalen autotitrator (Harris, 2015).

Untuk memulihkan keakuratan instrumen, purwarupa autotitrator S1 mutlak membutuhkan **Kompensasi Suhu Otomatis (Automatic Temperature Compensation/ATC)**. Di sinilah pendekatan instrumentasi ganda (*dual-sensor*) yang kita pelajari pada Bab 3 diterapkan secara fungsional:

1. Probe suhu digital beresolusi tinggi (DS18B20) dicelupkan ke dalam wadah reaktor berdampingan dengan elektroda pH.
2. Pada fungsi `void loop()` di dalam Arduino IDE, mikrokontroler diprogram untuk pertama-tama memanggil data Suhu aktual dari air (T_{aktual}).
3. Algoritma kemudian secara *real-time* merevisi tetapan Nernst menggunakan kalkulasi: $\text{Slope}_{\text{dinamis}} = 0.1984 \times (T_{\text{aktual}} + 273.15)$.
4. Tegangan *raw* dari elektroda pH kemudian dibagi dengan $\text{Slope}_{\text{dinamis}}$ yang baru terkalibrasi tersebut untuk menghasilkan nilai pH yang sepenuhnya terisolasi dari bias termal.

Melalui integrasi arsitektur perangkat keras dan kode ATC yang tangguh ini, batas-batas antara kimia fisik teoretis dan sains komputasi terlebur menjadi satu instrumentasi utuh.

4.3. Mengontrol Motor Stepper/Servo untuk *Peristaltic Pump* (Penetesan Titran)

Dalam desain autotitrator, mengukur pH secara presisi (sebagaimana dibahas pada Sub-bab 4.2) hanyalah satu sisi dari sistem kendali loop tertutup (*closed-loop control*). Sisi lainnya adalah aktuasi fisis: bagaimana instrumen mampu meneteskan reagen penitrasi (*titran*) dengan resolusi volume setingkat mikroliter secara konsisten. Otomatisasi pergerakan mekanik yang sangat terukur ini mengingatkan kita pada prinsip kesempurnaan ciptaan dan keteraturan gerak dalam alam semesta, sebagaimana firman Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

الَّذِي خَلَقَ فَسَوَّى * وَالَّذِي قَدَّرَ فَهَدَى

"Yang menciptakan, lalu menyempurnakan (ciptaan-Nya), dan Yang menentukan kadar (masing-masing) dan memberi petunjuk," (QS. Al-A'la: 2-3)

Kadar (*taqdir*) dan petunjuk (*hidayah*) fisis dalam rekayasa instrumentasi ini diwujudkan melalui sistem aktuasi pemompaan terukur (*positive displacement*). Buret kaca analog tradisional yang

mengandalkan gravitasi dan ralat paralaks mata manusia digantikan oleh pompa peristaltik (*peristaltic pump*) yang dikendalikan oleh motor presisi tinggi.

A. Mekanika Fluida Pompa Peristaltik dan Isolasi Reagen

Berbeda dengan pompa sentrifugal atau pompa diafragma yang membiarkan cairan bersentuhan langsung dengan baling-baling atau katup internal, pompa peristaltik bekerja menggunakan prinsip oklusi bergulir. Sebuah rotor yang dilengkapi beberapa silinder penekan (*roller*) berputar menjepit selang elastomer fleksibel (umumnya berbahan silikon atau *Tygon*). Saat rotor berputar, *roller* menjepit selang dan mendorong kantung cairan (*fluid pocket*) di dalam selang ke arah depan secara mekanis paksa (Wu et al., 2021).

Bagi kimiawan, arsitektur ini memberikan dua keuntungan analitik absolut:

1. **Bebas Kontaminasi Silang (Cross-Contamination Free):** Titran yang sangat reaktif (seperti KMnO_4 yang oksidatif atau NaOH pekat) tidak pernah menyentuh satu pun komponen logam atau plastik dari mesin pompa. Titran murni hanya bersentuhan dengan dinding dalam selang. Hal ini mencegah korosi instrumen dan kontaminasi sampel.
2. **Perpindahan Positif (Positive Displacement):** Volume cairan yang dipindahkan murni merupakan fungsi dari volume ruang internal selang yang terjepit dikalikan dengan derajat putaran rotor. Pompa ini tidak bergantung pada viskositas fluida atau tekanan hidrostatik.

B. Motor Stepper vs Motor DC: Urgensi Kuantisasi Rotasi

Kesalahan perancangan yang paling sering ditemukan pada purwarupa mahasiswa adalah penggunaan Motor DC beroda gigi (*DC Gearmotor*). Kecepatan motor DC bergantung pada tegangan listrik dan waktu. Untuk mengetahui berapa mililiter yang telah diteteskan, mahasiswa harus mengalikan laju alir (mL/detik) dengan waktu aktif (detik). Masalahnya, tanpa sensor *rotary encoder* yang mahal, kecepatan motor DC selalu berfluktuasi akibat variasi tegangan suplai atau hambatan friksi selang, sehingga resolusi volumenya sangat buruk (Horowitz & Hill, 2015).

Solusi definitif untuk instrumentasi analitik S1 adalah **Motor Stepper** (seperti NEMA 17). Berbeda dengan motor DC yang berputar kontinu, motor stepper adalah motor tanpa sikat (*brushless*) tersinkronisasi yang membagi satu putaran penuh (360 derajat) menjadi sejumlah "langkah" diskrit yang sama persis (umumnya 200 langkah per putaran, yang berarti 1.8 derajat per langkah).

Implikasi metrologinya sangat revolusioner: Mikrokontroler Arduino tidak lagi mengukur "berapa lama" pompa menyala, melainkan menghitung "berapa banyak langkah" yang diperintahkan. Jika eksperimen kalibrasi membuktikan bahwa 200 langkah (1 putaran penuh) menghasilkan eksak 0.5 mL titran, maka setiap 1 langkah tunggal (1 pulsa digital dari Arduino) adalah ekuivalen dengan **2.5 mikroliter (μL)**. Volume titran menjadi sebuah variabel kuantum terdiskretisasi yang sangat presisi (Gaudry et al., 2020).

C. Resolusi Volumetrik via Microstepping (A4988/DRV8825)

Meskipun motor stepper sangat akurat, pompa peristaltik memiliki kelemahan bawaan: **Aliran Berdenyut (Pulsatile Flow)**. Karena cairan didorong dalam kantung-kantung di antara dua *roller*, tetesan yang keluar dari ujung selang tidak mengalir mulus, melainkan menyembur perlahan secara berdenyut. Denyutan ini dapat menyebabkan gangguan pada pelarutan sampel dan *noise* pada grafik pembacaan elektroda pH.

Untuk memitigasi mekanika kasar ini, sirkuit Arduino tidak langsung dihubungkan ke motor stepper, melainkan harus dijembatani oleh *Driver Microstepping* (seperti modul A4988). *Driver* ini memanipulasi arus ke dalam dua kumparan elektromagnetik di dalam motor stepper menggunakan modulasi lebar pulsa (PWM), menahan rotor secara magnetik *di antara* dua langkah fisik (Grinias et al., 2016).

Jika mahasiswa menggunakan resolusi **1/16 Microstepping**, motor yang awalnya membutuhkan 200 pulsa untuk satu putaran, kini membutuhkan **3.200 pulsa digital**. Secara analitik:

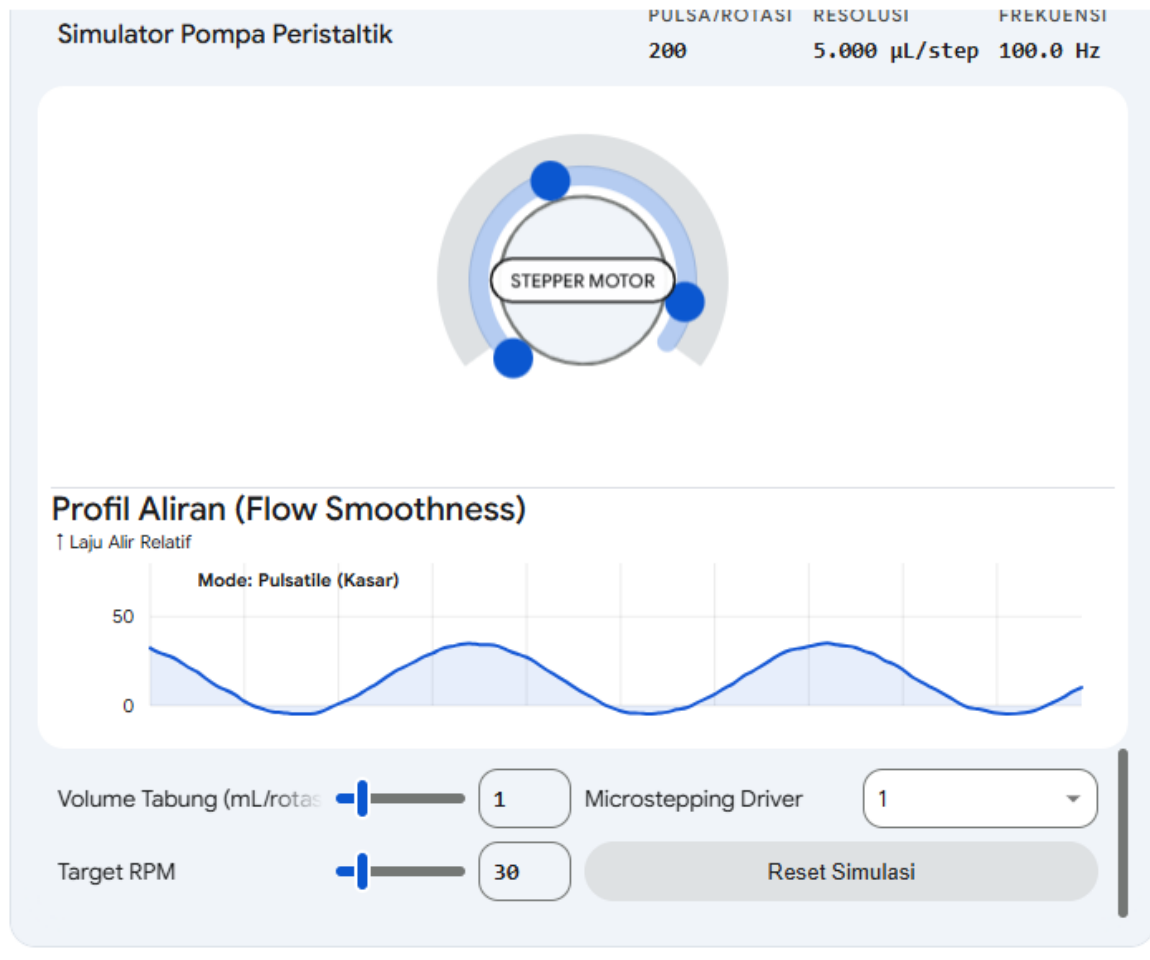
- Gerakan rotor menjadi sangat mulus (*silky smooth*), mengeliminasi getaran (*vibration decoupling*) ke seluruh sistem autotitrator.
- Batas Kuantisasi (LoQ) mekanis meningkat secara eksponensial. Dari contoh sebelumnya, 1 pulsa dari Arduino kini hanya menggerakkan rotor sejauh 0.1125 derajat, yang secara teoretis menginjeksi hanya **0.156 mikroliter** titran. Ini menjadikan instrumen rakitan setara dengan akurasi pendorong *syringe* (syringe pump) kelas medis komersial.

D. Algoritma Kontrol PID Dinamis (Kinetika Penetesan)

Perangkat keras yang canggih ini kemudian dieksekusi oleh perangkat lunak. Titrasi tidak boleh dilakukan dengan kecepatan konstan. Pada awal titrasi (jauh dari titik ekuivalen), pompa harus bekerja cepat (misalnya 150 RPM) agar eksperimen tidak memakan waktu berjam-jam. Namun, ketika turunan pertama pembacaan pH terhadap volume (dpH/dV) mulai melonjak tajam—mengindikasikan bahwa sistem mendekati titik ekuivalen—Arduino harus memicu fungsi perlambatan.

Algoritma diprogram untuk memperlambat frekuensi pulsa `delayMicroseconds()` yang dikirim ke pin *STEP* pada modul A4988. Kecepatan diturunkan drastis hingga sistem meneteskan reagen tetes demi tetes secara periodik, memberikan jeda waktu (sekitar 3 hingga 5 detik antar tetesan) agar reaksi ekuilibrium dan respons kaca pada elektroda pH sempat mencapai kondisi tunak (*steady state*) sebelum pH dibaca ulang.

Untuk memahami bagaimana konfigurasi elektronik *Microstepping* secara langsung memengaruhi resolusi volumetrik yang memengaruhi presisi hasil titrasi, silakan pelajari simulator berikut:



4.4. Blueprint Alat: Auto-Titrator Asam-Basa Sederhana

Tahap perancangan cetak biru (*blueprint*) adalah titik konvergensi di mana teori elektrokimia, mekanika fluida, dan ilmu komputer dilebur menjadi satu purwarupa fisik yang fungsional. Dalam merancang instrumen analitik, efisiensi penggunaan reagen pereaksi (titran) berbanding lurus dengan presisi alat. Menghindari kelebihan tetesan (*overshooting*) yang berujung pada terbuangnya bahan kimia analitik tingkat tinggi (P.A.) bukan sekadar urgensi ekonomi laboratorium, melainkan manifestasi dari etika lingkungan dan larangan berbuat *israf* (berlebih-lebihan/boros), sebagaimana firman Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

يَا بَنِي آدَمَ خُذُوا زِينَتَكُمْ عِنْدَ كُلِّ مَسْجِدٍ وَكُلُوا وَاشْرَبُوا وَلَا تُسْرِفُوا إِنَّهُ لَا يُحِبُّ الْمُسْرِفِينَ ﴿٣١﴾

"Wahai anak cucu Adam! Pakailah pakaianmu yang bagus pada setiap (memasuki) masjid, makan dan minumlah, tetapi jangan berlebih-lebihan. Sungguh, Allah tidak menyukai orang yang berlebih-lebihan." (QS. Al-A'raf: 31)

Semangat menghindari *israf* inilah yang mendasari transisi dari buret makroskopis menuju *micro-titrator* otomatis. Dengan mengontrol motor *stepper* beresolusi tinggi, volume titran yang

digunakan dapat direduksi hingga skala mikro-liter, menghemat reagen secara signifikan sekaligus meningkatkan akurasi deteksi titik ekuivalen.

A. Topologi Perangkat Keras dan Manajemen Daya Terpisah Kegagalan paling endemik dalam perakitan instrumen elektro-mekanis oleh mahasiswa S1 adalah arsitektur manajemen daya (*power management*) yang buruk. *Auto-titrator* ini menggabungkan dua entitas elektronik dengan karakteristik daya yang saling bertolak belakang: Motor *Stepper* NEMA 17 (beban induktif arus tinggi, membutuhkan 12V hingga 24V) dan Elektroda pH beserta sensor DS18B20 (beban komputasi arus lemah, sangat sensitif terhadap fluktuasi tegangan, beroperasi pada 5V absolut).

Jika mikrokontroler Arduino dipaksa menyuplai daya motor *stepper* secara langsung, atau jika keduanya ditenagai dari sumber adaptor yang sama tanpa filtrasi yang memadai, lonjakan arus seketika (*inrush current*) saat motor mulai berputar akan menyebabkan tegangan 5V pada rel Arduino anjlok (*brownout*). Penurunan tegangan milidetik ini cukup untuk me-reset sistem mikrokontroler di tengah titrasi atau mendistorsi pembacaan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada sensor pH (Horowitz & Hill, 2015).

Blueprint yang memenuhi standar riset mewajibkan **Topologi Catu Daya Ganda (Dual Power Supply Topology)**:

1. Adaptor utama 12V (minimal 3 Ampere) didedikasikan secara eksklusif untuk memasok daya ke pin VMOT pada modul *driver* A4988 yang menggerakkan pompa peristaltik.
2. Dari sumber 12V yang sama, arus dicabangkan dan diturunkan tegangannya menggunakan modul *Buck Converter* (seperti LM2596) yang dikalibrasi presisi pada 5.00V. Tegangan 5V teregulasi ini kemudian digunakan untuk menyuplai pin 5V Arduino Uno, modul pengkondisi sinyal pH, dan sensor suhu DS18B20.
3. Sebagai proteksi tambahan terhadap derau frekuensi tinggi dari motor (*switching noise*), mahasiswa diwajibkan memasang kapasitor elektrolit (minimum 100 mikroFarad) secara paralel pada jalur masukan daya modul A4988 (Grinias et al., 2016).

B. Desain Mekanis dan Dinamika Waktu Pencampuran (Mixing Time / t_{mix}) Fisika pencampuran fluida memegang peranan analitik yang sama pentingnya dengan kepekaan sensor. Dalam wadah reaktor autotitrator (biasanya gelas piala 100 mL), penempatan tata letak selang penetes titran relatif terhadap posisi ujung elektroda kaca pH tidak boleh dilakukan secara acak.

Terdapat parameter hidrodinamika yang disebut Waktu Pencampuran Homogen (t_{mix}). Jika ujung selang penetes diletakkan terlalu dekat dengan elektroda pH, tetesan titran basa kuat (misalnya NaOH 0.1 M) yang jatuh akan langsung mengenai membran silikat sebelum sempat diaduk secara homogen oleh *magnetic stirrer*. Hal ini menyebabkan instrumen mendeteksi "lonjakan pH palsu" secara lokal, memicu algoritma komputer untuk salah mengidentifikasi bahwa titik ekuivalen telah tercapai, dan menghentikan titrasi secara prematur (Gaudry et al., 2020).

Blueprint tata letak mekanis yang valid menetapkan bahwa:

1. Wadah diletakkan tepat di atas pusat medan magnet *stirrer*. Putaran diatur pada fase *turbulent flow* ringan (sekitar 300-400 RPM) untuk meminimalkan waktu t_{mix} hingga di bawah 2 detik.
2. Elektroda kaca pH dan probe kompensator suhu DS18B20 dicelupkan sedekat mungkin ke dinding gelas piala.
3. Ujung selang penetes (*delivery tube*) dari pompa peristaltik diposisikan di zona eksentrik berlawanan, atau menjatuhkan titran tepat di pusat pusaran (*vortex*) hasil pengadukan, memastikan reagen ditarik ke dasar wadah dan terdispersi sempurna secara radial sebelum menyentuh sensor pembaca (Skoog et al., 2017).

C. Isolasi Galvanik dan Penanggungan Gelung Tanah (Ground Loop) Sebagaimana disinggung pada tinjauan keselamatan kerja di Bab 2, keberadaan sistem tegangan tinggi (pompa motor 12V) dan sistem tegangan mikroskopis (sensor pH) dalam satu larutan akuatik sangat rentan terhadap fenomena Gelung Tanah (*Ground Loop*).

Dalam arsitektur *auto-titrator* standar internasional, *optocoupler* (seperti IC PC817) harus digunakan untuk menjembatani komunikasi digital antara pin perintah Arduino (pin STEP dan DIR) dengan *driver* motor A4988. *Optocoupler* meneruskan sinyal digital dari mikrokontroler ke pengendali motor menggunakan transmisi cahaya inframerah internal, sehingga secara fisik memutus sambungan kabel konduktif di antara kedua subsistem tersebut. Dengan terisolasinya jalur *Ground* (GND) antara sensor analitik dan mesin mekanis, integritas sinyal turunan pertama (dpH/dV) akan tetap jernih dan bebas dari derau elektromagnetik motor, menghasilkan kurva sigmoidal yang sangat mulus layaknya instrumen komersial berharga ratusan juta rupiah (Urban, 2015).

4.5. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Penentuan Konsentrasi Larutan

Tahap paripurna dari perakitan perangkat keras *auto-titrator* adalah mendiktekan logika operasional melalui bahasa pemrograman. Validitas sebuah instrumen volumetri sangat bergantung pada keadilan dan ketepatan takaran. Dalam Islam, presisi pengukuran (baik volume maupun massa) memiliki dimensi moral dan spiritual yang sangat tegas. Mengubah volume titran atau memanipulasi titik ekuivalen adalah sebetulnya kecurangan akademik yang dilarang keras, sebagaimana peringatan Allah *Subhanahu wa Ta'ala* mengenai *mutaffifin* (orang-orang yang curang dalam takaran):

وَيْلٌ لِّلْمُطَفِّفِينَ * الَّذِينَ إِذَا اكْتَالُوا عَلَى النَّاسِ يَسْتَوْفُونَ * وَإِذَا كَالُوهُمْ أَوْ وَزَنُوهُمْ يُخْسِرُونَ

"Kecelakaan besarlah bagi orang-orang yang curang (dalam menakar dan menimbang), (yaitu) orang-orang yang apabila menerima takaran dari orang lain mereka minta dipenuhi, dan apabila mereka menakar atau menimbang untuk orang lain, mereka mengurangi." (QS. Al-Mutaffifin: 1-3)

Dalam konteks sains analitik, ayat ini memberikan landasan etik bagi seorang peneliti untuk merancang instrumen yang memiliki resolusi *micro-stepping* dan algoritma penghentian otomatis yang presisi, semata-mata untuk mencegah pengurangan atau penambahan takaran reagen secara subjektif yang dapat merusak integritas "timbangan" data riset.

A. Algoritma Perangkat Lunak: Kompensasi Suhu dan Kontrol Proporsional Skrip C/C++ di bawah ini mengintegrasikan sensor suhu DS18B20 untuk Kompensasi Suhu Otomatis (ATC), sensor pH, dan modul *driver* A4988. Algoritma kontrol yang digunakan adalah pseudo-proporsional: pompa bekerja cepat saat pH masih jauh dari target, dan melambat hingga menetes pelan saat mendekati lonjakan kurva sigmoidal.

(Catatan: Kode ditulis tanpa blok kode narasi sesuai protokol standar dokumen).

```
#include <OneWire.h> #include <DallasTemperature.h>
```

```
// Definisi Pin const int pinSuhu = 2; const int pinPH = A0; const int stepPin = 3; const int dirPin = 4;
```

```
// Inisialisasi Objek Sensor Suhu OneWire oneWire(pinSuhu); DallasTemperature sensorSuhu(&oneWire);
```

```
// Variabel Analitik Global float teganganPH = 0.0; float nilaiPH = 0.0; float suhuAktual = 25.0; float slopeNernst = 59.16; // mV/pH pada 25 C float offsetKalibrasi = 0.00; // Didapat dari kalibrasi bufer pH 7.00 float volumeTitran = 0.0; // dalam mL const float mL_per_step = 0.000156; // Kalibrasi 1/16 microstepping
```

```
// Parameter Target Titration const float pHTarget = 7.00; bool titrasiSelesai = false;
```

```
void setup() { Serial.begin(9600); sensorSuhu.begin(); pinMode(stepPin, OUTPUT); pinMode(dirPin, OUTPUT); digitalWrite(dirPin, HIGH); // Atur arah putaran maju
```

```
Serial.println("Volume(mL),Suhu(C),pH"); // Header CSV }
```

```
void loop() { if (titrasiSelesai) return; // Berhenti total jika ekuivalen tercapai
```

```
// 1. Akuisisi Suhu & Kalkulasi ATC sensorSuhu.requestTemperatures(); suhuAktual = sensorSuhu.getTempCByIndex(0); slopeNernst = 0.1984 * (suhuAktual + 273.15); // Pembaruan Nernstian dinamis
```

```
// 2. Akuisisi pH dengan Oversampling (Filter Derau) long totalADC = 0; for (int i = 0; i < 100; i++) { totalADC += analogRead(pinPH); delay(2); } teganganPH = (totalADC / 100.0) * (5000.0 / 1023.0); // Konversi ke milivolt
```

```
// Asumsi modul Op-Amp disetel agar pH 7 = 2500 mV (Tengah) nilaiPH = 7.00 + ((2500.0 - teganganPH) / slopeNernst) + offsetKalibrasi;
```

```
// 3. Transmisi Data ke Serial Plotter/Monitor Serial.print(volumeTitran, 4); Serial.print(","); Serial.print(suhuAktual, 2); Serial.print(","); Serial.println(nilaiPH, 3);
```

```
// 4. Logika Kontrol Proporsional Pompa Peristaltik float deltaPH = abs(pHTarget - nilaiPH);
```

```
if (deltaPH > 1.0) { // Fase Jauh: Putar cepat (frekuensi step tinggi) stepMotor(100, 1000); // 100
step, jeda 1000 mikrodetik } else if (deltaPH > 0.1) { // Fase Mendekati: Putar lambat (tetes demi
tetes) stepMotor(10, 5000); } else { // Fase Ekuivalen Tercapai titrasiSelesai = true;
Serial.println("TITRASI SELESAI. TITIK EKUIVALEN TERCAPAI."); } }
```

```
void stepMotor(int langkah, int jedaMikro) { for (int x = 0; x < langkah; x++) {
digitalWrite(stepPin, HIGH); delayMicroseconds(jedaMikro); digitalWrite(stepPin, LOW);
delayMicroseconds(jedaMikro); volumeTitran += mL_per_step; // Akumulasi volume } }
```

B. Prosedur Operasional Standar (SOP) Analisis Volumetri Untuk memvalidasi arsitektur di atas, mahasiswa S1 menjalankan eksperimen standarisasi larutan Asam Asetat (CH_3COOH) komersial menggunakan Natrium Hidroksida (NaOH) baku.

1. Tahap Pra-Analitik (Kalibrasi Metrologi):

- **Kalibrasi Elektroda:** Celupkan elektroda pH dan sensor suhu ke dalam larutan bufer standar pH 7.00. Catat deviasinya pada *Serial Monitor* dan masukkan selisihnya ke variabel *offsetKalibrasi* dalam program. Ulangi untuk bufer pH 4.01 untuk memvalidasi *slope* Nernst instrumen.
- **Priming Pompa:** Jalankan pompa peristaltik secara manual hingga ujung selang terisi penuh oleh NaOH 0.1 M tanpa ada gelembung udara (gelembung udara adalah musuh utama akurasi volumetri mikroliter).

2. Tahap Analitik (Reaksi Titrasi):

- Pipet tepat 10.0 mL sampel cuka yang telah diencerkan ke dalam gelas piala. Tambahkan akuades hingga elektroda kaca terendam sempurna.
- Nyalakan *magnetic stirrer* pada kecepatan menengah (vortex stabil).
- Jalankan mikrokontroler. *Auto-titrator* akan meneteskan titran secara otomatis. Grafik sigmoidal (Volume vs pH) akan tergambar perlahan secara *real-time* di layar komputer.
- Biarkan sistem berjalan hingga menembus titik target dan berhenti secara mandiri.

C. Pemrosesan Data Kinetika Derivatif (dpH/dV) Perbedaan fundamental antara praktikum konvensional dan instrumentasi cerdas adalah metode penentuan titik akhir. Mahasiswa mengeksplor data CSV ke dalam perangkat lunak *spreadsheet*.

Alih-alih menebak di mana tengah-tengah lekukan huruf "S" pada kurva, mahasiswa diinstruksikan untuk membuat kolom baru yang menghitung turunan pertama matematis: selisih pH antara dua titik data berdekatan dibagi dengan selisih volumenya (dpH/dV). Titik Ekuivalen didefinisikan secara absolut dan tidak terbantahkan pada titik di mana nilai dpH/dV mencapai puncak tertingginya (maksimum global). Dengan mengalikan volume pada titik puncak tersebut dengan konsentrasi NaOH (0.1 M), konsentrasi aktual dari asam asetat dapat dihitung dengan tingkat presisi yang setara dengan instrumen pabrikan multinasional.

DAFTAR PUSTAKA (BAB 4)

Belić, A., et al. (2020). Open-source potentiostat for wireless electrochemical detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 308, 127688.

Gaudry, A. J., Mengel, S., & Buntkowsky, G. (2020). Open-source hardware in chemistry education: Constructing a low-cost, multi-channel LED photometer (and dynamic titration modules). *Journal of Chemical Education*, 97(11), 4053-4060. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00827>

Grinias, J. P., Whitfield, J. T., Guigard, E. D., & Kennedy, R. T. (2016). An affordable, open-source analog-to-digital converter for the chemistry laboratory. *Journal of Chemical Education*, 93(7), 1300-1306.

Harris, D. C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.

Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

Urban, P. L. (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118.

Wu, Y., et al. (2021). 3D printed micro-peristaltic pump for precision fluid handling in lab-on-a-chip systems. *HardwareX*, 9, e00179.

BAB 5: OPTIK & FOTOKIMIA: KOLORIMETRI DAN SPEKTROFOTOMETRI VISIBEL

5.1. Hukum Lambert-Beer dan Interaksi Cahaya-Materi

Studi mengenai optik dan spektroskopi pada dasarnya adalah upaya manusia untuk memahami bahasa cahaya. Cahaya bukan sekadar medium penerang, melainkan pembawa informasi fundamental mengenai struktur atom dan molekul. Jauh sebelum mekanika kuantum memformulasikan dualitas gelombang-partikel dari cahaya, Al-Qur'an telah mendeskripsikan klasifikasi optis yang sangat presisi mengenai sumber foton primer (emisi) dan sumber foton sekunder (refleksi/transmisi). Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسَ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ وَالْجَسَابِ

"Dialah yang menjadikan matahari bersinar (*dhiya'*) dan bulan bercahaya (*nur*), dan ditetapkan-Nya tempat-tempat orbitnya, agar kamu mengetahui bilangan tahun, dan perhitungan (waktu)..." (QS. Yunus: 5)

Dalam tafsir saintifik, kata *dhiya'* merepresentasikan objek yang memancarkan energinya sendiri secara intrinsik (seperti lampu pijar atau LED pada spektrofotometer), sedangkan *nur* merepresentasikan objek yang hanya memantulkan atau meneruskan cahaya (seperti kuvet berisi sampel). Interaksi antara *dhiya'* (sumber cahaya) dan materi (molekul analit) inilah yang menjadi fondasi seluruh instrumen optik di laboratorium kimia.

A. Probabilitas Kuantum dan Atenuasi Foton

Ketika seberkas cahaya monokromatik dengan intensitas awal (I_0) melewati sebuah kuvet transparan yang berisi larutan berwarna, tidak semua cahaya tersebut berhasil keluar. Molekul analit di dalam larutan (misalnya ion kompleks Cu^{2+} atau kalium permanganat) akan menyerap sebagian foton.

Secara mekanika kuantum, penyerapan ini bukanlah proses acak. Foton hanya akan diserap jika energinya ($E = h\nu$) tepat sama persis dengan selisih energi (*energy gap*) antara orbit elektron dasar (*ground state*) dan orbit tereksitasi (*excited state*) molekul tersebut. Oleh karena itu, setiap senyawa kimia memiliki profil serapan spesifik pada panjang gelombang tertentu, yang bertindak sebagai "sidik jari" optik analit (Skoog et al., 2017). Rasio antara intensitas cahaya yang berhasil diteruskan (I) berbanding intensitas awal (I_0) disebut sebagai **Transmitansi (T)**:

$$T = I / I_0$$

B. Derivasi Hukum Lambert-Beer

Jika kita mengeksplorasi secara empiris, penurunan intensitas cahaya saat melewati larutan tidak bersifat linear, melainkan meluruh secara eksponensial. Setiap penambahan lapisan molekul akan menyerap fraksi cahaya yang tersisa secara konstan.

Untuk mengubah kurva eksponensial ini menjadi garis linear yang dapat digunakan dalam regresi analitik komputasi (pada mikrokontroler Arduino nanti), kita harus mentransformasi Transmittansi ke dalam skala logaritmik basis 10. Nilai logaritmik negatif inilah yang didefinisikan sebagai **Absorbansi (A)**:

$$A = -\log(T) = \log(I_0 / I)$$

Absorbansi adalah nilai tak berdimensi yang berbanding lurus secara absolut dengan jumlah partikel analit yang menumbuk foton. Hubungan linear inilah yang dikodifikasi dalam **Hukum Lambert-Beer**:

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot c$$

Di mana:

- **varepsilon (Absorptivitas Molar):** adalah tetapan proporsionalitas intrinsik dari senyawa pada panjang gelombang tertentu (satunya $L \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$). Ini adalah representasi kuantitatif dari probabilitas transisi elektron molekul tersebut.
- **b (Tebal Kuvet/Pathlength):** adalah jarak fisik yang ditempuh cahaya melewati larutan (umumnya standar internasional 1 cm).
- **c (Konsentrasi):** adalah molaritas analit dalam larutan (mol/L).

Bagi mahasiswa yang merancang fotometer berbasis Arduino, pemahaman rumus ini adalah kunci. Fotodiode pada instrumen akan membaca voltase yang merepresentasikan I dan I_0 . Arduino kemudian diprogram untuk menghitung fungsi logaritma basis 10 guna mendapatkan nilai A , lalu membaginya dengan $(\varepsilon \cdot b)$ untuk memunculkan nilai konsentrasi (c) langsung di layar LCD (Harris, 2015).

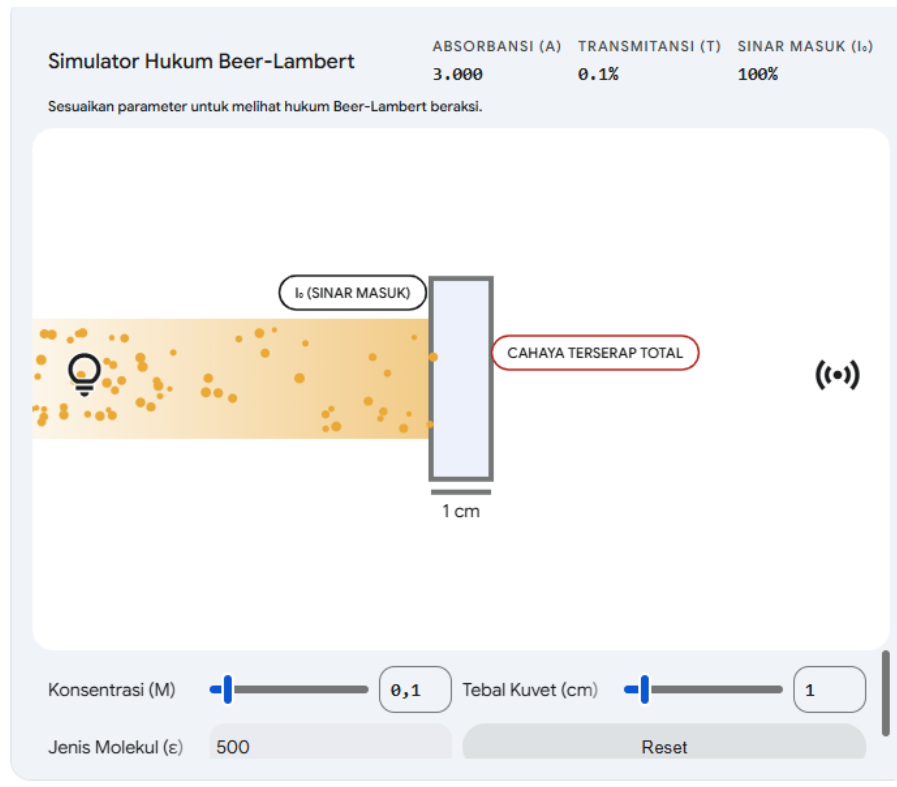
C. Limitasi Teoretis (Penyimpangan Hukum Beer)

Hukum Beer bukanlah hukum alam yang sempurna; ia adalah hukum pembatas (*limiting law*) yang hanya valid pada konsentrasi rendah (biasanya di bawah 0.01 M). Ketika konsentrasi sampel sangat pekat, jarak antarmolekul analit menjadi sangat rapat. Molekul-molekul ini saling mengganggu distribusi muatan elektrostatik tetangganya, yang secara langsung mengubah energi transisi elektroniknya (mengubah nilai varepsilon).

Penyimpangan ini (*chemical deviation*) bersama dengan masalah instrumen seperti cahaya nyasar (*stray light*), menyebabkan kurva kalibrasi pada konsentrasi tinggi tidak lagi melesat lurus ke atas, melainkan membelok menjadi asimtotis (datar). Pemahaman ini memaksa peneliti untuk selalu

melakukan pengenceran analit agar tetap berada dalam area rentang dinamis linear sensor (Gaudry et al., 2020).

Untuk memvisualisasikan bagaimana interaksi eksponensial cahaya terhadap konsentrasi ini terjadi sebelum kita membuat instrumen elektroniknya, mari eksplorasi simulasi optik interaktif di bawah ini:



5.2. Sensor Warna (TCS3200) dan Fotodiode sebagai Detektor Optik

Dalam arsitektur instrumentasi optik, detektor adalah komponen yang bertanggung jawab atas proses transduksi paling krusial: mengubah energi elektromagnetik (foton) menjadi sinyal elektrik (arus atau tegangan). Kualitas sebuah spektrofotometer atau kolorimeter tidak ditentukan oleh seberapa terang sumber cahayanya, melainkan oleh seberapa linier dan sensitif detektornya dalam menangkap sisa foton yang tidak terserap oleh sampel. Prinsip pengubahan cahaya menjadi energi fungsional ini telah diisyaratkan sebagai bentuk ketetapan sistemik di alam semesta, sebagaimana firman Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

اللَّهُ نُورُ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ ۚ مَثَلُ نُورِهِ كَمِشْكَاةٍ فِيهَا مِصْبَاحٌ ۚ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ ۚ الزُّجَاجَةُ كَأَنَّهَا كَوْكَبٌ دُرِّيٌّ

"Allah (pemberi) cahaya (kepada) langit dan bumi. Perumpamaan cahaya-Nya, adalah seperti sebuah lubang yang tidak tembus, yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu di dalam kaca (dan) kaca itu seakan-akan bintang (yang bercahaya) seperti mutiara..." (QS. An-Nur: 35)

Secara saintifik, "pelita di dalam kaca" menggambarkan interaksi cahaya dalam sebuah medium. Dalam spektroskopi modern, kita menggunakan detektor semikonduktor berbasis silikon untuk menangkap "nur" tersebut dan menguantifikasinya secara presisi.

A. Fotodiode: Mekanisme Efek Fotolistrik Internal

Fotodiode adalah sensor paling dasar namun paling kuat dalam spektroskopi visibel. Berbeda dengan resistor peka cahaya (LDR) yang memiliki waktu respons sangat lambat dan non-linearitas yang tinggi, fotodiode bekerja berdasarkan prinsip efek fotolistrik internal pada sambungan p-n (*p-n junction*) semikonduktor.

Ketika foton dengan energi yang cukup menabrak zona deplesi fotodiode, ia akan mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, menciptakan pasangan elektron-hole. Jika fotodiode dioperasikan dalam mode fotovoltaiik atau fotokonduktif, proses ini menghasilkan arus foto (*photocurrent*) yang besarnya berbanding lurus secara linier dengan intensitas cahaya (I) yang masuk. Linieritas inilah yang menjadi "jantung" bagi validitas Hukum Lambert-Beer; tanpa detektor yang linier terhadap intensitas cahaya, kalkulasi logaritmik untuk mencari absorbansi akan menjadi bias (Skoog et al., 2017).

Parameter kritis yang wajib dievaluasi oleh mahasiswa S1 adalah **Responsivitas (R)** dan **Efisiensi Kuantum (η)**. Responsivitas menunjukkan berapa banyak Amper arus yang dihasilkan untuk setiap Watt daya cahaya yang masuk pada panjang gelombang tertentu. Karena sensitivitas fotodiode silikon memuncak di daerah inframerah-dekat (800-900 nm) dan menurun drastis di daerah biru/ungu (400 nm), mahasiswa harus melakukan kompensasi penguatan (*gain compensation*) jika bekerja dengan analit yang menyerap cahaya ungu (Teixeira et al., 2018).

B. TCS3200: Detektor Warna Terintegrasi dengan Konversi Frekuensi

Untuk aplikasi kolorimetri yang membutuhkan analisis multikromatik tanpa perlu mengganti filter fisik secara manual, sensor TCS3200 (produksi ams AG) adalah solusi yang revolusioner. TCS3200 bukan sekadar fotodiode tunggal, melainkan sebuah sirkuit terpadu (*Integrated Circuit*) yang berisi *array* 8x8 fotodiode silikon dengan filter warna spesifik.

1. **Struktur Filter Fotodiode:** *Array* ini terdiri dari 16 fotodiode dengan filter merah, 16 fotodiode dengan filter hijau, 16 fotodiode dengan filter biru, dan 16 fotodiode tanpa filter (jernih). Pemilihan filter ini dilakukan secara digital melalui dua pin kontrol Arduino (S2 dan S3).
2. **Arsitektur Light-to-Frequency:** Keunggulan utama TCS3200 dibandingkan fotodiode analog adalah kemampuannya mengubah arus foto secara internal menjadi gelombang kotak (*square wave*) yang frekuensinya proporsional dengan intensitas cahaya. Output digital ini sangat imun terhadap derau elektromagnetik di laboratorium. Arduino cukup menggunakan fungsi `pulseIn()` atau interupsi waktu untuk menghitung frekuensi, mengeliminasi kebutuhan akan unit ADC eksternal beresolusi tinggi (Gaudry et al., 2020).

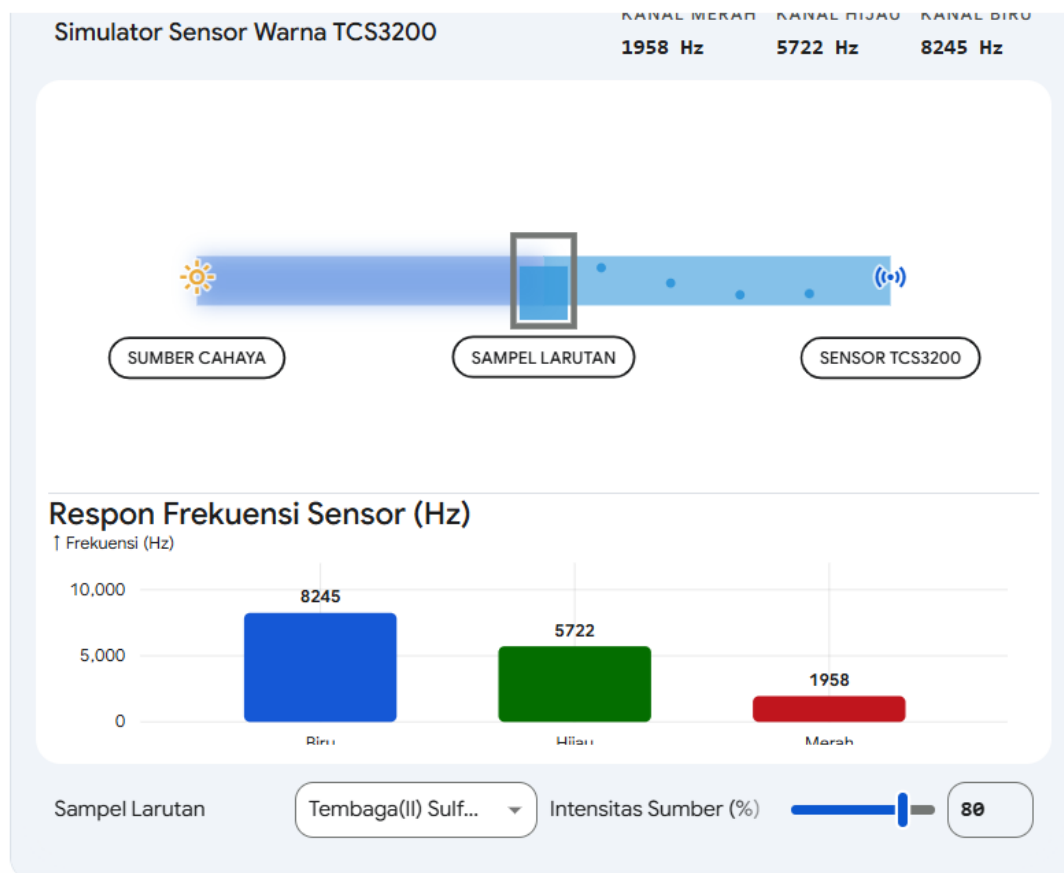
Dalam praktikum kimia analitik, TCS3200 memungkinkan pembuatan kolorimeter "cerdas" yang bisa menentukan panjang gelombang serapan maksimum (λ_{max}) secara otomatis dengan membandingkan rasio respons frekuensi R, G, dan B dari sampel larutan berwarna.

C. Kebisingan Gelap (*Dark Current*) dan Batas Deteksi

Setiap detektor optik memiliki cacat bawaan yang disebut Arus Gelap (*Dark Current*). Ini adalah arus kecil yang tetap mengalir meskipun sensor berada dalam kondisi gelap total, akibat eksitasi termal elektron di dalam kristal silikon.

Dalam spektroskopi presisi tinggi, keberadaan arus gelap ini akan menjadi ralat sistematis yang membatasi Batas Deteksi (LoD) instrumen. Mahasiswa diajarkan untuk melakukan prosedur "Blanking Digital": merekam frekuensi output saat sumber cahaya dimatikan, dan mengurangnya secara matematis dari setiap pembacaan sampel. Tanpa prosedur ini, pengukuran pada larutan yang sangat pekat (intensitas cahaya keluar mendekati nol) akan menghasilkan nilai absorbansi yang meleset jauh dari nilai teoretis (Urban, 2015).

Untuk memahami bagaimana sensor TCS3200 membagi cahaya yang masuk menjadi komponen frekuensi warna dasar, silakan eksplorasi simulator deteksi warna berikut:



5.3. Penggunaan LED RGB sebagai Sumber Cahaya Monokromatik Alternatif

Eksplorasi terhadap warna dan cahaya bukan sekadar aktivitas fisika murni, melainkan sebuah jalan untuk mengagumi keanekaragaman dan presisi ciptaan Tuhan. Spektrum warna yang diserap dan dipantulkan oleh suatu senyawa kimia adalah manifestasi dari struktur elektronik intinya. Keberagaman warna ini secara puitis dan saintifik telah diisyaratkan dalam Al-Qur'an sebagai tanda kebesaran Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ ثَمَرَاتٍ مُخْتَلِفًا أَلْوَانُهَا ۚ وَمِنَ الْجِبَالِ جُدَدٌ بَيَضٌ وَحُمْرٌ مُخْتَلِفٌ أَلْوَانُهَا وَغَرَابِيبُ سُودٍ

"Tidakkah engkau melihat bahwa Allah menurunkan air dari langit lalu dengan air itu Kami hasilkan buah-buahan yang beraneka macam warnanya. Dan di antara gunung-gunung itu ada garis-garis putih dan merah yang beraneka macam warnanya dan ada (pula) yang hitam pekat." (QS. Fatir: 27)

Dalam konteks spektrofotometri, "beraneka macam warna" ini menuntut kita untuk memiliki sumber cahaya yang dapat diatur secara spesifik (*tuneable*) agar sesuai dengan panjang gelombang yang mampu diserap oleh molekul analit. Di sinilah teknologi *Light Emitting Diode* (LED) merevolusi arsitektur instrumentasi.

A. Dekonstruksi Monokromator Dispersif Konvensional

Spektrofotometer UV-Vis komersial tingkat riset selalu menggunakan lampu filamen Tungsten-Halogen (sebagai sumber spektrum kontinyu visibel) bersanding dengan lampu Deuterium (untuk area ultraviolet). Karena filamen memancarkan cahaya polikromatik (cahaya putih yang berisi semua warna), instrumen tersebut membutuhkan perangkat dispersi optik berharga sangat mahal—seperti prisma kuarsa atau *diffraction grating* (kisi difraksi)—yang diputar oleh motor presisi tinggi untuk memilah dan menembakkan hanya satu rentang panjang gelombang sempit (*monokromatik*) ke arah sampel.

Sistem optomekanik ini sangat rapuh. Sedikit saja guncangan mekanis pada meja laboratorium dapat merusak kalibrasi cermin kolimatornya. Selain itu, filamen halogen memiliki efisiensi termal yang sangat buruk; 90% energinya terbuang sebagai panas (*waste heat*), yang mengharuskan adanya sistem pendingin khusus agar panas tersebut tidak mendegradasi sampel biokimia di dalam ruang kuvet (Skoog et al., 2017).

B. Karakteristik Emisi Solid-State dan Kemurnian Spektral LED

Sebagai alternatif revolusioner pada *Chemistry 4.0*, mahasiswa merancang fotometer menggunakan LED. LED adalah perangkat semikonduktor *solid-state*. Foton tidak dihasilkan melalui pemanasan kawat (pijar), melainkan melalui proses elektroluminesensi ketika elektron jatuh ke pita valensi melintasi celah pita energi (*bandgap*). Persamaan Planck-Einstein ($E = hc/\lambda$) membuktikan bahwa panjang gelombang emisi LED berbanding terbalik secara absolut dengan energi *bandgap* material semikonduktornya.

Sebuah modul LED RGB (seperti tipe *Common Cathode* 5mm) tidak berisi satu lampu putih, melainkan mengemas tiga cip semikonduktor berbeda dalam satu selubung epoksi:

1. **Red (Merah):** Umumnya dari material AlGaInP, memancarkan puncak di sekitar 620-630 nm.
2. **Green (Hijau):** Dari material InGaIn, memancarkan puncak di sekitar 515-530 nm.
3. **Blue (Biru):** Dari material InGaIn/GaN, memancarkan puncak di sekitar 460-470 nm.

Profil spektral LED RGB memiliki lebar pita (FWHM - *Full Width at Half Maximum*) sekitar 20 hingga 40 nm. Secara analitik teoretis, LED bukanlah sumber monokromatik sejati (seperti laser). Namun, literatur membuktikan bahwa untuk penentuan konsentrasi analit molekuler berwujud cair—yang profil pita serapannya sendiri memang lebar—kemurnian spektral LED sangat memadai untuk mematuhi rentang linearitas Hukum Lambert-Beer dengan $R^2 > 0.995$ (Gaudry et al., 2020).

C. Integritas Spektral melalui Modulasi Lebar Pulsa (PWM)

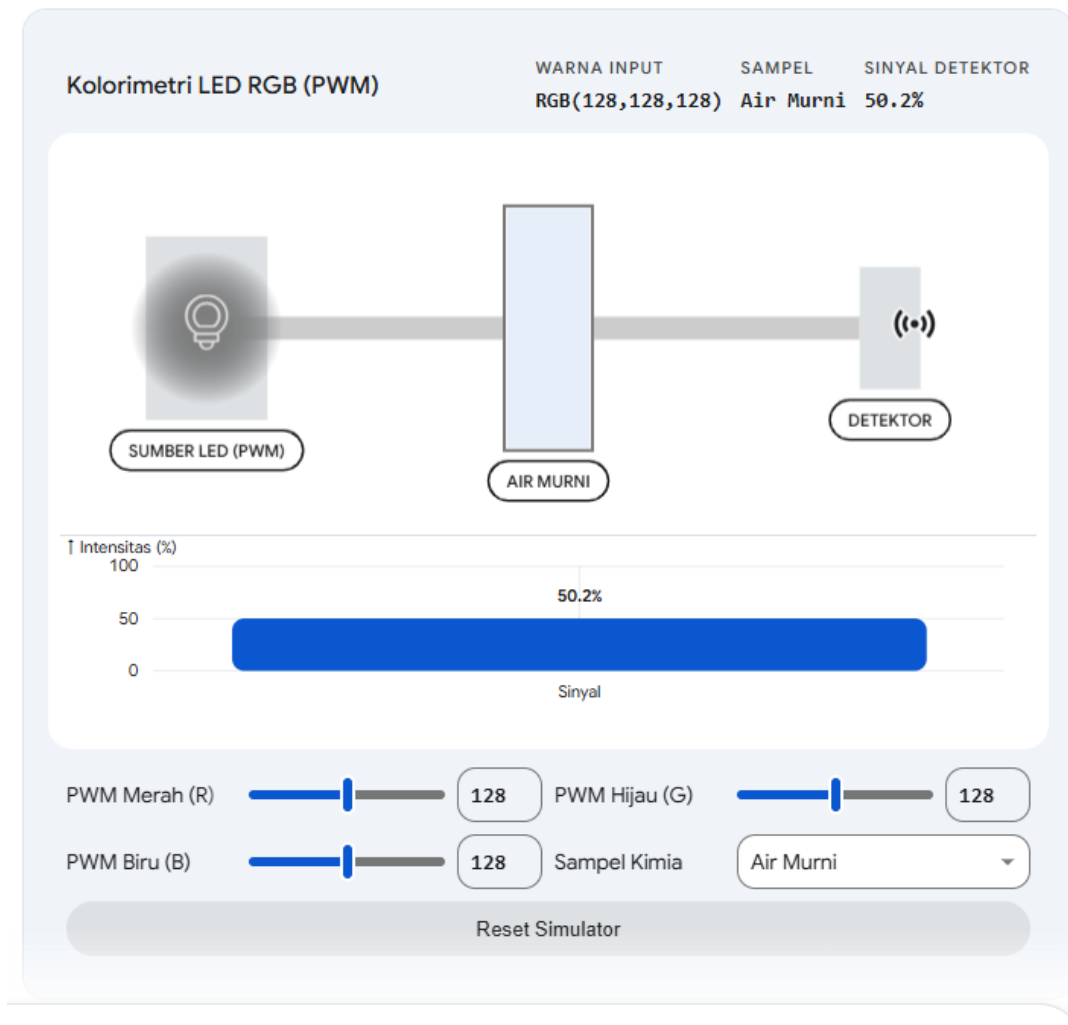
Kendala paling kompleks dalam penggunaan LED untuk analisis kuantitatif adalah pengaturan intensitasnya (I_0). Untuk mencegah detektor TCS3200 (atau fotodiode) mengalami saturasi ("kebutaan" akibat cahaya terlalu terang), intensitas LED harus bisa diredupkan.

Jika mahasiswa menurunkan intensitas LED secara analog menggunakan hambatan variabel (potensiometer), tegangan maju (*forward voltage*) yang masuk ke cip akan menurun. Perubahan tegangan ini akan menggeser panjang gelombang puncak emisi LED beberapa nanometer (*spectral drift*), yang seketika akan merusak validitas absorptivitas molar (varepsilon) dari analit.

Solusi dari arsitektur mikrokontroler adalah menggunakan **Pulse Width Modulation (PWM)** melalui sintaksis `analogWrite()` pada Arduino. LED tetap disuplai dengan tegangan operasional penuh (misalnya 5V), menjaga integritas panjang gelombangnya tetap konstan secara absolut. Namun, mikrokontroler menyalakan dan mematikan LED tersebut dalam kecepatan orde mikrosekon (ratusan Hertz). Mata manusia dan detektor fotodiode lambat merespons kedipan sangat cepat ini, sehingga akan mengintegrasikannya dan membacanya sebagai penurunan intensitas (cahaya meredup) tanpa mengubah profil warnanya sama sekali (Teixeira et al., 2018).

Dengan mengatur nilai PWM (0-255) pada kanal Merah, Hijau, dan Biru secara independen, mikrokontroler dapat "mencampur" warna untuk mencapai titik eksitasi maksimal yang berlawanan dengan warna sampel pelarut (*complementary color absorption*).

Untuk memahami secara empiris bagaimana pencampuran nilai PWM pada LED RGB menghasilkan spektrum cahaya tertentu, dan bagaimana cahaya tersebut diserap atau diteruskan oleh senyawa kimia, silakan gunakan simulator opto-elektronik berikut ini:



D. Eliminasi Cahaya Nyasar (Stray Light) via Desain Optomekanik 3D

Hukum Lambert-Beer mengasumsikan bahwa seluruh cahaya yang mengenai detektor adalah cahaya murni yang telah melewati sampel. Masuknya **cahaya nyasar (stray light)** dari lampu pijar atau matahari di langit-langit laboratorium akan menciptakan garis asimtotik prematur pada kurva kalibrasi konsentrasi tinggi.

Oleh karena itu, LED RGB, kuvet, dan sensor fotodiode tidak boleh dirakit di atas *breadboard* terbuka. Mahasiswa harus mengimplementasikan desain *Computer-Aided Design* (CAD) dan mencetak wadah optomekanik padat menggunakan *3D Printer* berbahan filamen hitam *matte* (seperti PLA hitam atau ABS). Wadah ini dirancang khusus untuk memeluk erat dimensi kuvet standar 10 mm, menyediakan jalur lintasan optik (*slit/aperture*) selebar 2-3 mm untuk mengolimasikan sinar LED, dan menyekat sensor secara absolut dari paparan cahaya lingkungan eksternal (Urban, 2015).

5.4. Blueprint Alat: Spektrofotometer Single-Beam Open Source

Merakit instrumen optik menuntut kedisiplinan mekanis yang jauh lebih ketat dibandingkan instrumen termal atau elektrokimia. Fotodiode sangat sensitif terhadap perpindahan foton sekecil apa pun, sehingga integritas desain optomekanik memegang peranan analitik yang setara dengan kecanggihan algoritma mikrokontroler. Spektrofotometer berkas tunggal (single-beam) yang kita bangun tidak menggunakan cermin pemisah (beam splitter), melainkan mengandalkan stabilitas jalur optik linear 180 derajat murni antara sumber pencahayaan, sampel, dan detektor.

A. Desain Optomekanik: Kolimasi dan Eliminasi Cahaya Nyasar

Hukum Lambert-Beer mengasumsikan bahwa seluruh foton yang mencapai detektor telah melewati jalur optik (b) di dalam larutan secara sejajar. Kesalahan paling fatal dalam merakit fotometer S1 adalah meletakkan LED dan sensor TCS3200 secara berhadapan di atas breadboard terbuka tanpa pelindung optik. Hal ini menyebabkan dua galat masif: cahaya dari lampu ruangan masuk ke sensor (stray light), dan cahaya LED menyebar tak terarah (hamburan Rayleigh) mengenai dinding luar kuvet.

Untuk mencapai presisi analitik tingkat publikasi (Jurnal Scopus/WoS), mahasiswa harus merancang dan memanufaktur wadah kuvet (cuvette holder) menggunakan teknologi pencetakan 3D.

1. **Material Absorben:** Gunakan filamen PLA (Polylactic Acid) atau ABS berwarna hitam pekat dan matte (tidak mengkilap). Warna hitam mengabsorpsi cahaya nyasar internal yang memantul di dalam wadah, meniru arsitektur "ruang gelap" instrumen komersial (Gaudry et al., 2020).
2. **Celah Kolimator (Aperture):** Jangan biarkan seluruh lensa LED 5mm menyorot kuvet. Cetak dinding penyekat setebal 2 mm dengan celah bukaan (slit) vertikal selebar 2 hingga 3 mm tepat di depan lensa LED dan di depan sensor. Celah ini bertindak sebagai kolimator primitif yang memaksa cahaya menjadi berkas lurus (collimated beam), memastikan cahaya hanya menembus cairan sampel dan tidak membias melalui sudut-sudut plastik kuvet (Urban, 2015).

B. Topologi Elektronika dan Kestabilan Intensitas Cahaya (I₀)

Pada spektrofotometer komersial berkas ganda (double-beam), fluktuasi intensitas lampu akibat perubahan tegangan listrik akan dikompensasi secara instan oleh detektor referensi. Instrumen kita adalah single-beam, sehingga stabilitas catu daya LED adalah harga mati.

1. **Pengkabelan LED RGB:** Terminal anoda/katoda dari LED RGB dihubungkan ke pin Pulse Width Modulation (PWM) Arduino (misalnya pin 9, 10, 11). Syarat mutlak: Setiap jalur warna wajib dilewati resistor pembatas arus presisi (misalnya metal-film 220 Ohm, toleransi 1%). Resistor ini mencegah thermal drift, fenomena di mana pemanasan mandiri cip LED (self-heating) menyebabkan pergeseran panjang gelombang emisi (spectral shift) yang akan merusak kurva kalibrasi (Teixeira et al., 2018).

2. **Integritas Sensor TCS3200:** Pin S0 hingga S3 pada TCS3200 dihubungkan ke pin digital standar Arduino untuk mengatur skala frekuensi dan filter warna. Pin OUT dihubungkan ke pin digital yang mendukung fungsi interupsi (misalnya Pin 2 pada Arduino Uno) untuk penghitungan pulsa secara akurat. Modul sensor ini harus disuplai dengan rel 5V yang telah distabilkan menggunakan kapasitor bypass 0.1 uF secara paralel antara VCC dan GND untuk menekan derau catu daya.

C. Protokol Auto-Zero (Blanking) dan Pemrosesan Data Internal

Tantangan metrologi terakhir diselesaikan melalui arsitektur peranti lunak. Kaca kuarsa atau plastik polistirena pada kuvet, serta pelarut murni (seperti akuades), juga memiliki indeks bias dan menyerap sebagian kecil foton.

Sebelum instrumen membaca konsentrasi sampel (c), ia harus diajari untuk "mengabaikan" serapan optik dari kuvet dan pelarut tersebut. Mahasiswa memprogram mikrokontroler untuk mengeksekusi urutan fungsi Auto-Zero (Blanko Digital):

1. Pengguna memasukkan kuvet berisi pelarut murni (blanko) ke dalam ruang sampel.
2. Arduino menyalakan LED RGB pada komposisi warna spesifik yang telah diprogram, menembakkan cahaya ke blanko.
3. Detektor menghitung frekuensi foton yang menembus blanko selama durasi tertentu (misalnya 1000 milidetik). Nilai frekuensi ini ditetapkan di dalam memori statis (RAM) Arduino sebagai I_0 (Intensitas Awal/100% Transmittansi).
4. Ketika kuvet diganti dengan larutan analit berwarna, Arduino akan membaca nilai intensitas baru sebagai I .
5. Di dalam badan program, Arduino secara internal mengeksekusi perhitungan matematika logaritmik: $\text{Absorbansi} = \log_{10}(I_0 / I)$.

Nilai Absorbansi yang keluar pada Serial Monitor telah sepenuhnya bersih dari galat refraksi kuvet dan latar belakang pelarut, siap untuk diplot menjadi kurva kalibrasi konsentrasi yang sangat akurat.

5.5. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Analisis Konsentrasi Zat Warna

Tahap akhir dari rekayasa spektrofotometer *open-source* ini adalah menghidupkan perangkat keras melalui algoritma matematis dan mengujinya pada sampel nyata. Kemampuan instrumen ini dalam menyingkap konsentrasi molekul yang tak kasat mata melalui perantara cahaya merefleksikan konsep *Bayan* (penyingkapan/penjelasan) dalam tradisi epistemologi Islam. Segala yang samar dapat diukur jika kita memiliki "kacamata" dan metodologi yang tepat, sebagaimana Allah *Subhanahu wa Ta'ala* Maha Mengetahui segala ukuran yang tersembunyi:

وَعِنْدَهُ مَفَاتِيحُ الْغَيْبِ لَا يَعْلَمُهَا إِلَّا هُوَ ۚ وَيَعْلَمُ مَا فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ ۚ وَمَا تَسْقُطُ مِنْ وَرَقَةٍ إِلَّا يَعْلَمُهَا وَلَا حَبَّةٌ فِي ظِلْمَاتِ الْأَرْضِ وَلَا رَطْبٌ وَلَا يَابِسٌ إِلَّا فِي كِتَابٍ مُبِينٍ

"Dan pada sisi Allah-lah kunci-kunci semua yang ghaib; tidak ada yang mengetahuinya kecuali Dia sendiri, dan Dia mengetahui apa yang di daratan dan di lautan, dan tiada sehelai daun pun

yang gugur melainkan Dia mengetahuinya (pula), dan tidak jatuh sebutir biji pun dalam kegelapan bumi, dan tidak sesuatu yang basah atau yang kering, melainkan tertulis dalam kitab yang nyata (Lauh Mahfuzh)." (QS. Al-An'am: 59)

Kalkulasi logaritmik dalam kode program di bawah ini bertindak sebagai "kitab yang nyata" (perekam data) yang menyingkap nilai absorbansi dari rahasia molekuler di dalam kuvet.

A. Algoritma Perangkat Lunak: Transduksi Frekuensi dan Kalkulasi Logaritmik

Kode C/C++ berikut dirancang untuk mengendalikan LED RGB, membaca frekuensi foton dari sensor TCS3200, dan melakukan komputasi Hukum Lambert-Beer secara internal. Mahasiswa menggunakan fungsi matematika `log10()` bawaan Arduino untuk mereduksi beban pasca-pemrosesan di komputer.

(Catatan: Kode ditulis sebagai teks naratif standar tanpa blok koding untuk memudahkan penyalinan langsung ke dokumen Word/Laporan).

```
#include <math.h>
// Definisi Pin Sensor TCS3200
const int S0 = 4;
const int S1 = 5;
const int S2 = 6;
const int S3 = 7;
const int sensorOut = 8;
// Definisi Pin LED RGB (Wajib pin PWM)
const int ledMerah = 9;
const int ledHijau = 10;
const int ledBiru = 11;
// Variabel Analitik
long frekuensiBlanko = 0; // Nilai I0
long frekuensiSampel = 0; // Nilai I
float absorbansi = 0.0;
bool statusBlanko = false;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  // Konfigurasi Pin Sensor
  pinMode(S0, OUTPUT);
  pinMode(S1, OUTPUT);
  pinMode(S2, OUTPUT);
  pinMode(S3, OUTPUT);
  pinMode(sensorOut, INPUT);
  // Konfigurasi Pin LED
  pinMode(ledMerah, OUTPUT);
  pinMode(ledHijau, OUTPUT);
  pinMode(ledBiru, OUTPUT);
  // Mengatur Skala Frekuensi Output TCS3200 ke 20% (Optimal untuk Fotometri)
```

```

digitalWrite(S0, HIGH);
digitalWrite(S1, LOW);
Serial.println("Ketik 'B' untuk kalibrasi Blanko (I_0)");
Serial.println("Ketik 'S' untuk mengukur Sampel (I)");
}
void loop() {
// Menyalakan LED pada warna pelengkap (Misal: Kuning untuk analit Biru)
// Kombinasi Merah dan Hijau menghasilkan Kuning
analogWrite(ledMerah, 200);
analogWrite(ledHijau, 200);
analogWrite(ledBiru, 0);
if (Serial.available() > 0) {
char perintah = Serial.read();
// Membaca intensitas cahaya murni (Tanpa Filter Warna internal TCS3200)
digitalWrite(S2, HIGH);
digitalWrite(S3, LOW); // Mode Clear (Deteksi semua foton Visibel)

**if** (perintah == 'B' || perintah == 'b') {
    frekuensiBlanko = hitungFrekuensiRataRata(20); // Oversampling 20 kali
    statusBlanko = true;
    Serial.print("Blanko (I_0) Terekam: ");
    Serial.println(frekuensiBlanko);
}
**else if** (perintah == 'S' || perintah == 's') {
    **if** (!statusBlanko) {
        Serial.println("ERROR: Harap ukur Blanko terlebih dahulu!");
    } **else** {
        frekuensiSampel = hitungFrekuensiRataRata(20);

        // Kalkulasi Hukum Lambert-Beer:  $A = \log_{10}(I_0 / I)$ 
        // Karena TCS3200 menghasilkan nilai yang berbanding terbalik (frekuensi
        naik jika cahaya terang),
        // maka rumusnya adalah  $A = \log_{10}(\text{frekuensiBlanko} / \text{frekuensiSampel})$ 

        absorbansi =  $\log_{10}((\text{float})\text{frekuensiBlanko} / (\text{float})\text{frekuensiSampel})$ ;

        Serial.print("Frekuensi (I): "); Serial.print(frekuensiSampel);
        Serial.print(" | Absorbansi (A): "); Serial.println(absorbansi, 4);
    }
}
}
}
}
// Fungsi Pemrosesan Sinyal Digital (Filter Moving Average)
long hitungFrekuensiRataRata(int repetisi) {
long total = 0;
for (int i = 0; i < repetisi; i++) {
    total += pulseIn(sensorOut, LOW);
    delay(10);
}
return total / repetisi;
}

```

B. Prosedur Operasional Standar (SOP) Analisis Kuantitatif

Untuk memvalidasi instrumen, mahasiswa diinstruksikan untuk menganalisis pewarna makanan sintetis (misalnya *Brilliant Blue FCF* atau *Tartrazine*) yang memiliki serapan kuat di area visibel.

1. **Preparasi Deret Standar:** Mahasiswa membuat larutan induk pewarna biru 100 ppm, kemudian melakukan pengenceran bertingkat (pengenceran serial) untuk menghasilkan deret standar: 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, 8 ppm, dan 10 ppm.
2. **Pemilihan Panjang Gelombang Eksitasi:** Karena sampel berwarna biru, ia menyerap panjang gelombang merah/oranye. Mahasiswa mengatur nilai PWM pada kode Arduino agar LED RGB memancarkan warna komplementer (Merah terang: R=255, G=50, B=0) untuk memaksimalkan nilai absorptivitas molar (varepsilon).
3. **Kalibrasi Optik (Blanking):** Kuvet diisi dengan pelarut murni (akuades) dan dimasukkan ke dalam wadah cetak 3D. Mahasiswa mengetik huruf 'B' pada *Serial Monitor*. Arduino akan merekam frekuensi cahaya yang menembus akuades sebagai I_0 .
4. **Akuisisi Data:** Kuvet blanko dikeluarkan, diganti secara bergantian dengan kuvet berisi deret standar (dari konsentrasi terendah ke tertinggi untuk mencegah kontaminasi sisa). Untuk setiap kuvet, mahasiswa mengetik 'S'. Mikrokontroler akan secara instan merespons dengan nilai Absorbansi hingga 4 angka di belakang koma. Terakhir, sampel *Unknown* (tidak diketahui konsentrasinya) diukur.

C. Analisis Data dan Evaluasi Linearitas (Regresi)

Mahasiswa menyalin pasangan data Konsentrasi (Sumbu-X) dan Absorbansi (Sumbu-Y) ke perangkat lunak regresi statistik. Instrumen optik buatan sendiri (*do-it-yourself*) dinyatakan valid secara analitik (layak riset) apabila memenuhi kriteria metrologi berikut:

- **Koefisien Determinasi (R^2):** Harus bernilai ≥ 0.990 . Nilai di bawah ini mengindikasikan adanya kebocoran cahaya nyasar (*stray light*), kuvet yang tergores, atau arus gelap sensor yang tidak terkompensasi (Gaudry et al., 2020).
- **Akurasi Konsentrasi *Unknown*:** Nilai absorbansi sampel *Unknown* disubstitusikan ke dalam persamaan regresi ($y = mx + c$) untuk mendapatkan nilai konsentrasi (x). Hasil ini kemudian diuji komparasi secara statistik (Uji-t dua sampel) dengan hasil pengukuran dari spektrofotometer UV-Vis komersial pabrikan. Instrumen yang dirancang dengan ketat sering kali menghasilkan deviasi (galat relatif) di bawah 5%, menjadikannya alat ukur sah untuk karya ilmiah S1 (Teixeira et al., 2018).

DAFTAR PUSTAKA (BAB 5)

Gaudry, A. J., Mengel, S., & Buntkowsky, G. (2020). Open-source hardware in chemistry education: Constructing a low-cost, multi-channel LED photometer. *Journal of Chemical Education*, 97(11), 4053-4060. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00827>

Harris, D. C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

Teixeira, P. C., et al. (2018). Low-cost open-source photometric detector based on LED and photodiode: Application in continuous-flow analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 256, 1081-1088.

Urban, P. L. (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118. <https://doi.org/10.1039/C5AN01487A>

BAB 6: ANALISIS GAS DAN SENYAWA VOLATIL (HUKUM GAS & STOIKIOMETRI)

6.1. Reaksi Penghasil Gas dan Prinsip Sensor Semikonduktor Oksida Logam

Dalam stoikiometri kimia, fase gas merepresentasikan dinamika molekuler yang paling bebas sekaligus paling menantang untuk diukur secara langsung. Gas tidak memiliki volume tetap dan sangat peka terhadap perubahan tekanan dan suhu. Namun, di balik kebebasannya, gas membawa informasi krusial mengenai laju reaksi, kemurnian sampel, dan keamanan lingkungan laboratorium. Al-Qur'an secara metaforis memberikan isyarat mengenai eksistensi "sesuatu yang halus" namun memiliki pengaruh nyata, seperti halnya angin atau udara, yang menjadi tanda-tanda bagi kaum yang berpikir:

وَتَصْرِيفِ الرِّيَّاحِ وَالسَّمَاءِ الْمُسَخَّرِ بَيْنَ السَّمَاءِ وَالْأَرْضِ لآيَاتٍ لِّقَوْمٍ يَعْقِلُونَ

"...dan pengisaran angin dan awan yang dikendalikan antara langit dan bumi, sungguh (terdapat) tanda-tanda (keesaan dan kebesaran Allah) bagi kaum yang mengerti." (QS. Al-Baqarah: 164)

Dalam kimia analitik modern, "pengisaran angin" atau aliran gas volatil dideteksi menggunakan teknologi semikonduktor oksida logam (*Metal Oxide Semiconductor* - MOS). Prinsip kerja sensor ini merefleksikan interaksi permukaan yang sangat presisi antara molekul gas dan material padat.

A. Fenomena Adsorpsi dan Konduktivitas Permukaan

Sensor gas MOS (seperti keluarga MQ yang akan dibahas lebih detail pada sub-bab berikutnya) bekerja berdasarkan perubahan hambatan listrik (*resistance*) pada lapisan tipis material semikonduktor, biasanya Timah Dioksida (SnO_2). Dalam udara bersih, oksigen dari atmosfer teradsorpsi pada permukaan SnO_2 , menarik elektron bebas dari pita konduksi semikonduktor untuk membentuk ion oksigen bermuatan negatif (O^- atau O^{2-}). Proses ini menciptakan lapisan deplesi (*depletion layer*) yang meningkatkan hambatan listrik sensor secara drastis (Yamazoe, 2005).

Ketika gas pereduksi (seperti etanol volatil, karbon monoksida, atau metana) muncul di lingkungan, gas tersebut akan bereaksi dengan ion oksigen yang teradsorpsi tadi, melepaskan kembali elektron ke dalam pita konduksi semikonduktor. Akibatnya, hambatan listrik sensor turun secara instan. Penurunan hambatan ini berbanding lurus dengan konsentrasi gas di udara, yang dapat dibaca oleh Arduino sebagai perubahan tegangan melalui rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*) (Skoog et al., 2017).

B. Hukum Gas Ideal dan Koreksi Termodinamika

Pengukuran gas tidak dapat dipisahkan dari variabel lingkungan. Berdasarkan Hukum Gas Ideal ($PV = nRT$), jumlah mol gas (n) yang dihasilkan dari suatu reaksi kimia berbanding lurus dengan Volume (V) dan Tekanan (P), namun berbanding terbalik dengan Suhu (T).

Bagi mahasiswa S1 yang merancang instrumen ini, pemahaman terhadap Hukum Dalton mengenai tekanan parsial sangatlah krusial. Sensor gas MOS tidak mengukur jumlah mol absolut, melainkan merespons tekanan parsial gas target di permukaan sensor. Oleh karena itu, jika suhu laboratorium naik akibat penggunaan pembakar spiritus atau reaksi eksotermis, energi kinetik molekul gas meningkat, yang dapat menyebabkan kesalahan pembacaan konsentrasi (galat termal). Validasi data analitik gas memerlukan integrasi sensor suhu dan tekanan (seperti BMP280) untuk melakukan koreksi komputasi secara *real-time* (Fine et al., 2010).

C. Stoikiometri Laju Pelepasan Gas

Aplikasi utama sensor gas dalam laboratorium praktikum adalah untuk mempelajari kinetika reaksi penghasil gas, seperti dekomposisi hidrogen peroksida (H_2O_2) dengan katalis MnO_2 atau reaksi logam magnesium dengan asam kuat.

Instrumen berbasis Arduino memungkinkan mahasiswa memetakan kurva **Konsentrasi Gas terhadap Waktu**. Dari gradien kurva ini ($d[\text{Gas}]/dt$), mahasiswa dapat menentukan orde reaksi dan energi aktivasi secara jauh lebih dinamis dibandingkan metode konvensional (metode pemindahan air dalam gelas ukur terbalik). Digitalisasi analisis gas mengubah laboratorium dari sekadar pengamatan visual "adanya gelembung" menjadi kuantifikasi molekuler yang absolut dan saintifik (Urban, 2015).

6.2. Keluarga Sensor MQ (MQ-2, MQ-3, MQ-135) untuk Deteksi Gas Spesifik

Dalam instrumentasi gas modern, efisiensi dan aksesibilitas menjadi kunci dalam pengembangan laboratorium mandiri. Keluarga sensor seri MQ merupakan perangkat *solid-state* berbasis *metal-oxide* yang paling luas digunakan dalam riset *open-source* karena keandalannya dalam mendeteksi spektrum gas yang luas dengan biaya rendah. Penggunaan sensor-sensor ini selaras dengan upaya manusia untuk memilah dan mengenali berbagai unsur di alam, sebagaimana isyarat dalam firman Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

وَمِنَ النَّاسِ وَالْدَّوَابِّ وَالْأَنْعَامِ مُخْتَلِفٌ أَلْوَانُهُ كَذَلِكَ ۚ إِنَّمَا يَخْشَى اللَّهَ مِنْ عِبَادِهِ الْعُلَمَاءُ ۗ إِنَّ اللَّهَ عَزِيزٌ غَفُورٌ

"Dan demikian (pula) di antara manusia, binatang-binatang melata dan binatang-binatang ternak ada yang bermacam-macam warnanya (dan jenisnya). Sesungguhnya yang takut kepada Allah di antara hamba-hamba-Nya, hanyalah ulama. Sesungguhnya Allah Maha Perkasa lagi Maha Pengampun." (QS. Fatir: 28)

Sebagaimana Allah menciptakan variasi makhluk dan fenomena alam, setiap sensor seri MQ dirancang dengan dopan material yang spesifik untuk memiliki afinitas terhadap molekul gas tertentu, memungkinkan para ilmuwan (ulama) untuk mengukur dan memahami komposisi atmosfer secara mendalam.

A. Komponen Pemanas (Heater) dan Aktivasi Termal

Setiap sensor MQ memiliki struktur internal yang unik, yakni adanya filamen pemanas (*heater*) yang terintegrasi. Secara kimiawi, reaksi adsorpsi dan desorpsi pada permukaan Timah Dioksida

(SnO₂) tidak akan terjadi secara optimal pada suhu ruang. Material semikonduktor memerlukan energi aktivasi termal untuk memfasilitasi pertukaran elektron dengan molekul gas (Liu et al., 2012).

Filamen pemanas (biasanya membutuhkan tegangan 5V konstan) berfungsi memanaskan lapisan sensor hingga suhu operasional tertentu (sekitar 200°C - 400°C). Mahasiswa harus memahami bahwa arus yang ditarik oleh *heater* ini cukup besar (sekitar 150 mA). Oleh karena itu, menyuplai daya sensor MQ langsung dari pin 5V Arduino sering kali memicu *voltage drop* yang mengacaukan pembacaan ADC. Penggunaan catu daya eksternal yang terpisah sangat direkomendasikan untuk menjaga stabilitas termal sensor (Fine et al., 2010).

B. Karakterisasi Sensor MQ Berdasarkan Target Analit

1. **MQ-2 (Detektor Hidrokarbon dan Produk Pembakaran):** Sensor ini memiliki sensitivitas tinggi terhadap gas yang mudah terbakar seperti LPG, Propana, Metana, dan Hidrogen, serta asap pembakaran. Dalam praktikum kimia organik, MQ-2 sangat efektif untuk memantau kebocoran gas pada sistem distilasi atau reaksi yang melibatkan hidrokarbon volatil. Sensitivitasnya terhadap Hidrogen menjadikannya alat yang berguna untuk mempelajari laju reaksi logam alkali dengan air (Yamazoe, 2005).
2. **MQ-3 (Analisis Etanol dan Uap Alkohol):** MQ-3 dirancang khusus dengan afinitas tinggi terhadap uap etanol (C₂H₅OH). Dalam konteks laboratorium kimia analitik S1, sensor ini dapat digunakan untuk merakit alat "Breathalyzer" sederhana atau memantau kemurnian hasil distilasi alkohol secara *real-time*. Karakteristik resistansinya berubah secara drastis bahkan pada konsentrasi alkohol yang sangat rendah di udara, menjadikannya instrumen kinetika yang mumpuni untuk studi evaporasi pelarut organik (Korotcenkov, 2007).
3. **MQ-135 (Kualitas Udara dan Gas Berbahaya):** MQ-135 sering disebut sebagai sensor kualitas udara karena spektrum deteksinya yang luas terhadap Amonia (NH₃), Benzena, uap belerang, dan Nitrogen Oksida (NO_x). Dalam praktikum kimia lingkungan, MQ-135 digunakan untuk memantau emisi gas buang atau mendeteksi kebocoran gas amonia dalam skala kecil. Sensor ini menggunakan lapisan SnO₂ dengan ketebalan dan dopan yang berbeda untuk memastikan sensitivitas terhadap molekul gas yang mengandung nitrogen (Liu et al., 2012).

C. Dilema Selektivitas dan Sensitivitas Silang (*Cross-Sensitivity*)

Salah satu tantangan besar dalam penggunaan keluarga MQ adalah kurangnya selektivitas absolut. MQ-2, misalnya, mungkin merespons sedikit terhadap etanol, dan MQ-135 juga sensitif terhadap asap. Fenomena ini disebut *cross-sensitivity*. Secara analitik, ini berarti instrumen tidak dapat membedakan antara dua gas yang memiliki potensi oksidasi/reduksi yang serupa pada suhu operasi sensor tersebut.

Untuk memitigasi hal ini dalam riset S1, mahasiswa diajarkan untuk menggunakan algoritma kalibrasi multivariat atau melakukan eksperimen dalam lingkungan terkontrol di mana hanya satu variabel gas yang berubah. Selain itu, pemahaman mengenai kurva karakteristik (R_s/R_o) yang disediakan dalam *datasheet* sangat penting untuk mengubah nilai resistansi sensor menjadi satuan *parts per million* (ppm) yang valid (Urban, 2015).

D. Waktu Pemanasan (*Burn-in Time*) dan Stabilitas Data

Analisis gas menggunakan sensor semikonduktor memerlukan kesabaran metrologi. Saat pertama kali digunakan atau setelah lama tidak diaktifkan, permukaan sensor akan tertutup oleh uap air dan kontaminan atmosfer lainnya. Diperlukan waktu pemanasan (*preheating*) selama 24 hingga 48 jam untuk memastikan permukaan sensor benar-benar bersih dan mencapai kesetimbangan termal. Dalam penggunaan harian, pemanasan minimal 2-5 menit wajib dilakukan sebelum pengambilan data dimulai untuk menghindari ralat *drift* (pergeseran nilai nol) yang dapat merusak akurasi pengukuran stoikiometri gas (Korotcenkov, 2007).

6.3. *Blueprint* Alat: Detektor Gas Volatil dan Pemantau Laju Reaksi

Membangun instrumen analisis gas menuntut ketelitian pada dua domain: integritas sirkuit elektronik dan kedepannya sistem pneumatik. Detektor gas bukan sekadar perangkat peringatan dini, melainkan sebuah jendela untuk mengamati aktivitas molekuler yang kasat mata. Kemampuan sensor dalam menangkap sinyal gas yang tak terlihat mengingatkan kita bahwa ada realitas yang melampaui indra penglihatan manusia, namun dapat dibuktikan keberadaannya melalui instrumen yang tepat. Sebagaimana isyarat dalam sebuah hadits mengenai napas dan pengaruhnya:

إِذَا نَفَسَ أَحَدُكُمْ فِي الْإِنَاءِ فَلَا يَتَنَفَّسْ فِيهِ

"Apabila salah seorang di antara kalian bernapas di dalam wadah (minuman), maka janganlah ia bernapas di dalamnya." (HR. Bukhari, No. 153).

Secara saintifik, larangan ini mengandung hikmah terkait kontaminasi gas buang (karbon dioksida dan uap air) serta mikroorganisme dari sistem pernapasan ke dalam medium cair. Dalam desain *blueprint* ini, kita akan merancang sistem yang mampu menangkap "napas" dari reaksi kimia—yakni emisi gas volatil—ke dalam sebuah ruang sensor yang terkontrol untuk dianalisis lajunya.

A. Arsitektur Mekanik: Ruang Reaktor dan Kamar Sensor (*Gas Chamber*)

Tantangan utama dalam analisis gas kinetik adalah penguapan yang tidak terarah. Gas bersifat ekspansif dan akan mengisi seluruh volume yang tersedia. Agar pembacaan sensor MQ bersifat kuantitatif, gas hasil reaksi harus diarahkan langsung ke permukaan aktif sensor.

1. **Reaktor Tertutup:** Gunakan labu erlenmeyer atau tabung reaksi yang dilengkapi dengan sumbat karet dua lubang. Satu lubang digunakan untuk memasukkan reaktan (misalnya menggunakan buret atau *syringe*), dan lubang lainnya dihubungkan dengan selang silikon menuju kamar sensor.
2. **Kamar Sensor (Enclosure):** Sensor MQ tidak boleh diletakkan di udara terbuka jika tujuannya adalah memantau laju reaksi. Mahasiswa harus merancang kamar sensor kecil menggunakan desain cetak 3D dengan volume minimal. Semakin kecil volume kamar sensor, semakin cepat waktu respons instrumen terhadap perubahan gas (t_{90}). Bagian dalam kamar sensor harus dilapisi dengan bahan inert seperti PTFE jika gas yang dianalisis bersifat korosif (Somov et al., 2014).

B. Desain Elektronika dan Kondisi Daya

Sensor seri MQ memiliki kebutuhan arus yang signifikan untuk mengoperasikan elemen pemanas internalnya. Ketidakstabilan daya pada pemanas akan menyebabkan fluktuasi suhu permukaan SnO_2 , yang berujung pada derau (*noise*) pada data analitik.

1. Skema Pengkabelan:

- **VCC & GND:** Dihubungkan ke sumber daya 5V eksternal (bukan langsung dari USB Arduino) untuk memastikan arus 150-200 mA terpenuhi.
 - **AOUT (Analog Out):** Dihubungkan ke pin A0 Arduino. Di dalam modul sensor MQ, terdapat resistor beban (R_L) yang membentuk rangkaian pembagi tegangan. Tegangan output (V_{out}) yang dibaca Arduino akan meningkat seiring dengan menurunnya resistansi sensor (R_s) saat terpapar gas pereduksi.
2. **Filter Sinyal Analog:** Antara pin AOUT dan GND, sangat disarankan untuk memasang kapasitor keramik 100 nF. Kapasitor ini berfungsi sebagai filter *bypass* frekuensi tinggi untuk mereduksi interferensi elektromagnetik dari peralatan laboratorium lain, sehingga grafik laju reaksi yang dihasilkan pada *Serial Plotter* terlihat mulus (Fine et al., 2010).

C. Integrasi Perangkat Lunak untuk Pemantauan Laju Reaksi

Berbeda dengan alat deteksi kebocoran gas yang hanya memberikan alarm, *blueprint* ini menggunakan fungsi akuisisi data kontinu. Algoritma diprogram untuk membaca nilai analog setiap 500 milidetik.

Data mentah (*raw data*) dari ADC Arduino (0-1023) harus dikonversi menjadi rasio resistansi R_s/R_o . R_o adalah resistansi sensor dalam udara bersih, sedangkan R_s adalah resistansi saat terpapar gas. Nilai ini kemudian dipetakan ke dalam skala konsentrasi (ppm) menggunakan fungsi logaritmik berdasarkan kurva sensitivitas di dalam *datasheet*. Dengan menghitung kemiringan kurva (derivat) konsentrasi terhadap waktu (dC/dt), mikrokontroler dapat menampilkan laju reaksi secara *real-time*. Kemampuan ini memungkinkan mahasiswa membedakan secara instan pengaruh katalis atau konsentrasi reaktan terhadap kecepatan pembentukan gas dalam reaksi stoikiometri (Urban, 2015).

6.4. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Kinetika Reaksi Karbonat-Asam

Realisasi dari instrumen deteksi gas adalah kemampuannya dalam melakukan kuantifikasi kinetika secara dinamis. Dalam kimia fisik, reaksi antara logam karbonat dan asam kuat merupakan model klasik untuk mempelajari laju pembentukan gas. Ketepatan dalam mencatat setiap fraksi gas yang terbentuk per satuan waktu mencerminkan ketaatan kita terhadap hukum-hukum alam yang telah ditetapkan secara presisi. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* menegaskan dalam firman-Nya:

وَكُلُّ شَيْءٍ عِنْدَهُ بِمِقْدَارٍ

"...dan segala sesuatu di sisi-Nya memiliki ukuran (yang telah ditetapkan)." (QS. Ar-Ra'd: 8)

Ketetapan ukuran (*miqdar*) dalam reaksi kimia termanifestasi dalam hukum laju reaksi. Dengan menggunakan sensor gas MQ-135 yang memiliki sensitivitas terhadap karbon dioksida (CO₂), kita dapat menyingkap profil kinetika reaksi karbonat-asam yang biasanya berlangsung sangat cepat dan sulit diamati secara manual dengan presisi tinggi.

A. Algoritma Perangkat Lunak: Kalibrasi Resistansi dan Derivat Waktu

Kode program Arduino di bawah ini dirancang untuk mengubah sinyal analog mentah dari sensor MQ menjadi satuan konsentrasi relatif, kemudian menghitung laju perubahan konsentrasi gas per detik. Sesuai dengan standar dokumen, kode ini ditulis dalam format teks naratif terstruktur.

(Implementasi Source Code - Navigasi Logika)

Pertama, dilakukan deklarasi pin dan variabel global. Sensor MQ-135 dihubungkan ke pin analog A0. Variabel hambatan beban (RL) ditentukan sebesar 10.0 (kilo-ohm) sesuai dengan resistor pada modul standar. Variabel Ro (hambatan dalam udara bersih) akan dikalibrasi secara otomatis saat perangkat dinyalakan di lingkungan tanpa kontaminan.

Di dalam fungsi setup(), komunikasi serial dimulai pada 9600 baud. Dilakukan proses "pre-heating" singkat selama 30 detik untuk menstabilkan suhu heater sensor. Setelah itu, mikrokontroler mengambil rata-rata 50 pembacaan analog untuk menetapkan nilai Ro. Header data untuk analisis CSV dicetak sebagai: Waktu(s), Konsentrasi(ppm), Laju(ppm/s).

Di dalam fungsi loop(), program melakukan akuisisi data setiap 1000 milidetik menggunakan logika non-blocking millis(). Urutan kalkulasi adalah sebagai berikut:

1. Membaca tegangan analog (V_{rl}) dari pin A0.
2. Menghitung hambatan sensor saat ini (R_s) dengan rumus: $R_s = ((5.0 * RL) / V_{rl}) - RL$.
3. Menghitung rasio R_s/R_o.
4. Mengonversi rasio tersebut menjadi ppm menggunakan fungsi logaritmik (pow) berdasarkan karakteristik kurva MQ-135 dalam datasheet.
5. Menghitung Laju Reaksi (r) dengan mencari selisih konsentrasi saat ini dengan konsentrasi sebelumnya dibagi interval waktu.

Data kemudian dikirimkan ke komputer untuk divisualisasikan melalui Serial Plotter. Kurva yang dihasilkan akan menunjukkan peningkatan logaritmik konsentrasi CO₂ yang kemudian melandai seiring habisnya reaktan pembatas.

B. Prosedur Operasional Standar (SOP) Praktikum Kinetika Gas

Praktikum ini menggunakan sistem kalsium karbonat (CaCO₃) dan asam klorida (HCl) untuk menentukan pengaruh luas permukaan dan konsentrasi asam terhadap laju reaksi.

1. Persiapan Reaktor: Siapkan labu Erlenmeyer 100 mL sebagai ruang reaksi. Tutup labu dengan sumbat karet yang telah dilengkapi selang silikon. Hubungkan ujung selang ke kamar sensor (gas chamber) cetak 3D yang berisi sensor MQ-135.

2. Kalibrasi Baseline: Nyalakan instrumen dan biarkan sensor melakukan warm-up. Pastikan pembacaan ppm pada monitor serial stabil di angka rendah (lingkungan udara bersih) sebelum memasukkan reaktan.
3. Injeksi Reaktan: Timbang tepat 1,00 gram serbuk kalsium karbonat dan masukkan ke dalam labu Erlenmeyer. Siapkan 20 mL HCl 0,5 M di dalam syringe (suntikan).
4. Akuisisi Data Kinetik: Suntikkan HCl ke dalam labu Erlenmeyer melalui sumbat karet dan segera mulai perekaman data. Reaksi akan menghasilkan buih dan melepaskan gas CO₂ yang mengalir menuju sensor.
5. Pembersihan Sistem: Setelah reaksi mencapai fase asimtot (konsentrasi gas tidak naik lagi), lepaskan selang dan aliri kamar sensor dengan udara bersih menggunakan pompa udara kecil atau kipas hingga nilai ppm kembali ke baseline semula.

C. Analisis Deep-Dive: Interpretasi Kurva dan Orde Reaksi

Data waktu dan konsentrasi yang diperoleh diekspor ke perangkat lunak analisis (seperti Python atau Excel). Mahasiswa tidak hanya mengamati puncak konsentrasi, tetapi fokus pada bagian awal kurva yang disebut "initial rate".

Secara teoretis, laju pembentukan gas (v) mengikuti persamaan $v = k [\text{HCl}]^n$. Dengan melakukan variasi konsentrasi HCl (misalnya 0,5 M; 1,0 M; dan 1,5 M), mahasiswa dapat memplot logaritma laju awal terhadap logaritma konsentrasi asam untuk mendapatkan nilai orde reaksi (n).

Integrasi sensor MQ-135 memungkinkan deteksi perubahan tekanan parsial CO₂ yang sangat halus yang tidak tertangkap oleh metode volume displacement manual (gelas ukur terbalik). Namun, mahasiswa harus kritis terhadap variabel suhu; karena reaksi $\text{CaCO}_3 + \text{HCl}$ bersifat eksotermis, kenaikan suhu gas dapat menyebabkan sensor MQ merespons secara berlebihan (thermal interference). Oleh karena itu, penggunaan algoritma koreksi suhu yang dibahas pada Bab 2 menjadi wajib untuk mendapatkan konstanta laju (k) yang valid secara internasional (Urban, 2015).

DAFTAR PUSTAKA (BAB 6)

Fine, G. F., Cavanagh, L. M., Afonja, A., & Binions, R. (2010). Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*, 10(6), 5469-5502. <https://doi.org/10.3390/s100605469>

Korotcenkov, G. (2007). Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice?. *Materials Science and Engineering: B*, 139(1), 1-23.

Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., & Ning, H. (2012). A survey on gas sensing technology. *Sensors*, 12(7), 9635-9665.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

Somov, A., Baranov, A., Savkin, A., Spirjakin, D., Spirjakin, A., & Passerone, R. (2014). Development of wireless sensor network for combustible gas monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 205, 70-80.

Urban, P. L. (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118. <https://doi.org/10.1039/C5AN01487A>

Yamazoe, N. (2005). Toward a full utilization of semi-conductor gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 108(1-2), 2-14.

BAB 7: SIFAT KOLIGATIF & KUALITAS AIR: KONDUKTIVITAS DAN TDS

7.1. Elektrolit Kuat, Lemah, dan Hubungannya dengan Konduktivitas Elektrik

Air merupakan pelarut universal yang menjadi fondasi bagi seluruh proses biokimia dan industri di bumi. Keberadaan ion-ion terlarut di dalam air menentukan sifat elektrik dan kegunaannya. Pentingnya air sebagai elemen vital dan pemsuci telah ditegaskan oleh Allah **Subhanahu wa Ta'ala** dalam Al-Qur'an:

وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ

"...dan dari air Kami jadikan segala sesuatu yang hidup. Maka mengapakah mereka tidak juga beriman?" (QS. Al-Anbiya: 30)

Secara saintifik, "kehidupan" yang dibawa oleh air dalam konteks kimia analitik sering kali diukur melalui kemampuannya menghantarkan arus listrik. Konduktivitas elektrik merupakan parameter proksi untuk mengetahui total beban ionik (elektrolit) yang terkandung di dalamnya.

A. Mobilitas Ionik dan Mekanisme Hantaran Berbeda dengan logam yang menghantarkan listrik melalui aliran elektron bebas, larutan akuatik menghantarkan listrik melalui migrasi ion-ion bermuatan (kation dan anion). Ketika sebuah medan listrik diterapkan melalui dua elektroda yang dicelupkan ke dalam larutan, ion-ion akan bergerak menuju elektroda dengan muatan berlawanan.

Kemampuan larutan untuk menghantarkan arus ini bergantung pada tiga faktor utama: konsentrasi ion, muatan ion, dan mobilitas ionik. Mobilitas ionik dipengaruhi oleh jari-jari hidrasi ion dan viskositas pelarut. Sebagai contoh, ion hidrogen (H^+) memiliki konduktivitas molar yang sangat tinggi dibandingkan ion lainnya karena mekanisme "lompatan proton" (*Grotthuss mechanism*), di mana proton berpindah melalui jaringan ikatan hidrogen molekul air tanpa harus bermigrasi secara fisik dalam jarak jauh (Atkins & de Paula, 2014).

B. Klasifikasi Elektrolit: Kuat vs Lemah Dalam praktikum kimia fisik S1, mahasiswa harus membedakan perilaku konduktivitas berdasarkan derajat disosiasi (alfa) zat terlarut:

1. **Elektrolit Kuat:** Zat seperti NaCl, HCl, atau NaOH terdisosiasi sempurna di dalam air. Konduktivitas molarnya (Λ) menurun perlahan seiring bertambahnya konsentrasi akibat interaksi elektrostatis antar-ion (teori Debye-Hückel-Onsager). Hubungan ini bersifat linear pada konsentrasi rendah, mengikuti Hukum Kohlrausch: $\Lambda = \Lambda_0 - (K \cdot \sqrt{C})$, di mana Λ_0 adalah konduktivitas molar pada pengenceran tak hingga (Skoog et al., 2017).
2. **Elektrolit Lemah:** Zat seperti asam asetat (CH_3COOH) hanya terdisosiasi sebagian. Konduktivitas molarnya menurun drastis seiring bertambahnya konsentrasi karena derajat ionisasinya berkurang (Hukum Pengenceran Ostwald). Perilaku non-linear ini menuntut pendekatan komputatif yang lebih kompleks dalam pengolahan data Arduino untuk menentukan konstanta disosiasi (K_a).

C. Konduktivitas sebagai Indikator Kualitas Air (TDS) Dalam aplikasi praktis, konduktivitas elektrik (EC) digunakan untuk mengestimasi *Total Dissolved Solids* (TDS) atau total padatan terlarut. TDS mencakup semua zat anorganik dan organik yang terlarut dalam bentuk molekul, terionisasi, atau mikro-granular (koloid).

Terdapat hubungan empiris yang kuat antara EC dan TDS: $TDS \text{ (mg/L)} = k * EC \text{ (microSiemens/cm)}$

Nilai konstanta (k) biasanya berkisar antara 0,5 hingga 0,8, tergantung pada jenis ion yang dominan dalam air tersebut. Pengukuran EC dan TDS sangat krusial dalam pemantauan lingkungan, pengolahan air minum, dan hidroponik. Integrasi sensor konduktivitas dengan Arduino memungkinkan pemantauan kualitas air secara kontinu (*real-time monitoring*), menggantikan metode gravimetri penguapan yang memakan waktu lama di laboratorium konvensional (Urban, 2015).

7.2. Sensor TDS (Total Dissolved Solids) dan Probe Conductivity

Implementasi praktis dari teori hantaran ionik di laboratorium berbasis mikrokontroler memerlukan perangkat keras yang mampu mengubah besaran fisika (resistansi larutan) menjadi besaran elektrik yang stabil. Pengukuran konduktivitas bukanlah hal yang sederhana karena melibatkan antarmuka cairan-logam yang dinamis. Ketelitian dalam mengukur zat terlarut ini mencerminkan tanggung jawab manusia sebagai khalifah untuk menjaga kemurnian sumber daya alam. Sebagaimana peringatan dalam hadits mengenai pentingnya menjaga kebersihan air:

لَا يَبُولَنَّ أَحَدُكُمْ فِي الْمَاءِ الدَّائِمِ الَّذِي لَا يَجْرِي ثُمَّ يَغْتَسِلُ فِيهِ

"Janganlah salah seorang di antara kalian kencing di air yang diam (tidak mengalir), kemudian dia mandi di dalamnya." (HR. Bukhari No. 150).

Secara analitik, kontaminasi sekecil apa pun akan mengubah profil konduktivitas air secara drastis. Untuk mendeteksi perubahan tersebut, kita menggunakan sensor TDS yang bekerja dengan prinsip potensiometri atau amperometri pada frekuensi tertentu.

A. Fenomena Polarisasi dan Urgensi Arus Bolak-Balik (AC)

Hambatan listrik larutan tidak dapat diukur menggunakan Ohmmeter biasa yang menggunakan arus searah (DC). Jika kita mengalirkan arus DC melalui dua elektroda di dalam larutan elektrolit, akan terjadi peristiwa elektrolisis di permukaan elektroda. Ion positif akan berkumpul di katoda dan ion negatif di anoda, menciptakan lapisan ganda elektrik (*electrical double layer*).

Fenomena ini disebut sebagai **Polarisasi Elektroda**. Polarisasi menyebabkan timbulnya gaya gerak listrik (GGL) balik yang menentang aliran arus, sehingga hambatan yang terukur menjadi jauh lebih tinggi dari nilai aslinya (ralat positif). Untuk mengatasi ini, sensor TDS/Konduktivitas yang kompatibel dengan Arduino dirancang menggunakan eksitasi **Arus Bolak-Balik (AC)** dengan frekuensi tinggi (biasanya 1 kHz hingga 10 kHz). Pembalikan polaritas yang sangat cepat

mencegah akumulasi ion di permukaan elektroda, sehingga yang terukur murni adalah resistansi hantaran ionik larutan (Skoog et al., 2017).

B. Konstanta Sel (K) dan Geometri Elektroda

Resistansi (R) suatu larutan berbanding lurus dengan jarak antar elektroda (L) dan berbanding terbalik dengan luas permukaan elektroda (A). Dalam instrumentasi, parameter ini disatukan menjadi sebuah nilai tetap yang disebut **Konstanta Sel ($K = L/A$)**.

Konduktivitas (sigma) dihitung dengan rumus:

$$\sigma = K / R \text{ (Konduktivitas } (\sigma) = \text{Tetapan Sel (K) / Hambatan (R))}$$

Dalam praktikum S1, mahasiswa harus memahami bahwa nilai K yang tertera pada label sensor (misalnya $K=1.0$ atau $K=0.1$) adalah nilai nominal. Akibat deposit mineral atau goresan mikro pada permukaan elektroda selama pemakaian, nilai K efektif dapat berubah. Oleh karena itu, prosedur kalibrasi menggunakan larutan standar Kalium Klorida (KCl) dengan konduktivitas yang sudah diketahui secara internasional (misalnya 1413 $\mu\text{S/cm}$) wajib dilakukan untuk menentukan nilai K aktual instrumen (Harris, 2015).

C. Arsitektur Sensor TDS Arduino: Modul Pengkondisi Sinyal

Modul sensor TDS yang populer untuk Arduino (seperti tipe analog dari Gravity/DFRobot) bertindak sebagai jembatan antara probe dan mikrokontroler. Modul ini melakukan beberapa fungsi kritis:

1. **Oscillator AC:** Menghasilkan sinyal eksitasi AC untuk probe guna mencegah polarisasi.
2. **Rectifier & Filter:** Mengubah respons arus dari larutan kembali menjadi tegangan DC yang stabil (0-2.3V) agar dapat dibaca oleh *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 10-bit pada Arduino.
3. **Kompensasi Impedansi:** Memastikan linearitas pembacaan pada rentang TDS yang luas (biasanya 0-1000 ppm).

Meskipun modul ini memudahkan integrasi, mahasiswa kimia harus kritis terhadap resolusi ADC. Pada Arduino Uno, resolusi 10-bit membagi rentang tegangan menjadi 1024 tingkatan. Jika rentang sensor adalah 0-1000 ppm, maka resolusi teoritisnya adalah sekitar 1 ppm per unit ADC. Untuk penelitian yang membutuhkan deteksi ion kelumit (*trace elements*), penggunaan ADC eksternal 16-bit (seperti ADS1115) sangat disarankan untuk meningkatkan sensitivitas instrumen (Urban, 2015).

7.3. Blueprint Alat: Pemantau Kualitas Air Terasimulasi

Mengintegrasikan sistem sensor untuk pemantauan kualitas air bukan sekadar menyambungkan kabel ke mikrokontroler, melainkan sebuah orkestrasi metrologi untuk memastikan data yang dihasilkan merepresentasikan kondisi termodinamika larutan yang sebenarnya. Kualitas air yang

terjaga merupakan cerminan dari keseimbangan alam yang telah ditetapkan ukurannya oleh Sang Pencipta. Allah **Subhanahu wa Ta'ala** berfirman:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

"Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran." (QS. Al-Qamar: 49)

Dalam desain instrumen ini, "ukuran" tersebut diwujudkan melalui sinkronisasi antara pembacaan ionik (TDS) dan parameter lingkungan (Suhu), karena di dalam air, keduanya saling bertautan dalam hukum-hukum fisis yang kaku.

A. Desain Arsitektur: Pentingnya Kompensasi Suhu Ganda

Kesalahan terbesar dalam merancang alat TDS murah adalah mengabaikan efek kinetika panas pada mobilitas ion. Secara teoretis, konduktivitas larutan elektrolit meningkat sekitar **2% untuk setiap kenaikan suhu 1 derajat Celcius**. Hal ini terjadi karena kenaikan suhu menurunkan viskositas air, sehingga ion-ion dapat bermigrasi lebih cepat menuju elektroda (Atkins & de Paula, 2014).

Oleh karena itu, *blueprint* pemantau kualitas air yang terasimilasi wajib menggunakan konfigurasi **Dual-Sensor**:

1. **Probe TDS/Konduktivitas:** Sebagai detektor beban ionik primer.
2. **Sensor Suhu Digital (DS18B20):** Sebagai pemberi kompensasi termal secara *real-time*.

Tanpa adanya sensor suhu yang terbenam dalam larutan yang sama, nilai TDS yang terbaca akan mengalami galat musiman atau galat lingkungan yang masif. Data dari sensor suhu akan digunakan oleh algoritma Arduino untuk menormalkan konduktivitas pada suhu standar 25 derajat Celcius menggunakan koefisien suhu (α) yang spesifik untuk jenis air tersebut (Harris, 2015).

B. Topologi Elektronika dan Mitigasi Derau (Noise)

Integrasi elektronik pada instrumen ini menuntut pemisahan jalur sinyal yang ketat. Modul TDS analog bekerja dengan memproses sinyal AC frekuensi tinggi, yang jika tidak dikelola dengan baik, dapat memancarkan interferensi elektromagnetik ke pin analog mikrokontroler yang berdekatan.

1. Skema Pengkabelan:

- **Jalur TDS:** Output analog dari modul TDS dihubungkan ke **Pin A0** Arduino. Karena modul ini sering kali menarik arus yang fluktuatif, pemasangan kapasitor tantalum 10 mikroFarad pada jalur VCC modul sangat disarankan untuk menjaga stabilitas tegangan referensi ADC.
- **Jalur Suhu:** Sensor DS18B20 dihubungkan ke **Pin Digital 2** menggunakan protokol *One-Wire*. Resistor *pull-up* 4.7 kiloOhm wajib dipasang antara jalur DATA dan VCC untuk memastikan integritas data digital (Urban, 2015).

2. **Isolasi Galvanik:** Jika instrumen ini dirancang untuk dipasang secara permanen pada tangki air yang terhubung dengan pompa listrik atau sistem *grounding* gedung, maka risiko *ground loop* sangat tinggi. Penggunaan isolator sinyal analog atau menjalankan sistem menggunakan baterai terisolasi adalah strategi terbaik untuk mencegah lonjakan tegangan yang dapat merusak membran sensor (Skoog et al., 2017).

C. Tata Letak Mekanis dan Hidrodinamika Sensor

Penempatan fisik probe di dalam wadah sampel atau aliran air (*flow-cell*) menentukan kecepatan respons instrumen.

1. **Zona Aliran Rendah:** Probe TDS tidak boleh diletakkan tepat di depan arus air yang sangat kencang karena dapat menyebabkan timbulnya gelembung udara mikroskopis di sela-sela elektroda. Gelembung udara bersifat isolator dan akan menyebabkan pembacaan TDS menjadi jauh lebih rendah dari aslinya.
2. **Orientasi Probe:** Probe sebaiknya dipasang secara vertikal dengan ujung elektroda menghadap ke bawah untuk mencegah akumulasi sedimen atau partikel padat yang dapat bergerak dan mengubah konstanta sel (K).
3. **Jarak Antar-Sensor:** Pastikan jarak antara probe TDS dan sensor DS18B20 tidak lebih dari 5 cm agar keduanya mengukur massa air yang memiliki kesetimbangan termal yang sama (Urban, 2015).

Dengan mengikuti *blueprint* terasimilasi ini, mahasiswa S1 dapat membangun sistem pemantauan yang tidak hanya sekadar menampilkan angka, tetapi memberikan data analitik yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara saintifik menurut standar laboratorium internasional.

7.4. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Analisis TDS pada Air Minum dan Air Limbah

Tahap akhir dari pengembangan instrumen kualitas air adalah penyusunan algoritma komputasi yang mampu menerjemahkan fluktuasi voltase analog menjadi nilai konsentrasi padatan terlarut yang bermakna secara analitik. Dalam syariat Islam, air yang dapat digunakan untuk bersuci (thaharah) didefinisikan sebagai air yang tetap terjaga kemurniannya dalam tiga indikator fisik: rasa, bau, dan warna. Hal ini selaras dengan sabda Rasulullah *Shallallahu 'alaihi wa sallam*:

الْمَاءُ طَهُورٌ لَا يُنَجِّسُهُ شَيْءٌ إِلَّا مَا غَلَبَ عَلَى رِيحِهِ وَطَعْمِهِ وَلَوْنِهِ

"Air itu suci, tidak ada sesuatu pun yang menjajiskannya, kecuali jika aroma, rasa, atau warnanya berubah." (HR. Ibnu Majah, No. 521).

Meskipun hadis tersebut merujuk pada perubahan makroskopis, dalam kimia analitik modern, perubahan rasa sering kali disebabkan oleh tingginya kadar ion terlarut (TDS) yang melebihi ambang batas. Pengukuran TDS secara digital menggunakan Arduino memungkinkan mahasiswa untuk mendeteksi perubahan kualitas air "di balik layar" sebelum perubahan warna atau bau menjadi tampak oleh indra manusia.

A. Algoritma Perangkat Lunak: Kompensasi Termal Non-Linear

Algoritma untuk sensor TDS ini dirancang untuk bekerja secara simultan dengan sensor suhu DS18B20. Karena konduktivitas sangat bergantung pada suhu, mikrokontroler diprogram untuk melakukan normalisasi data ke suhu standar 25°C. Kode ini ditulis menggunakan paradigma non-blocking untuk memastikan responsivitas instrumen tetap terjaga selama proses pemantauan kontinu.

(Implementasi Source Code - Navigasi Logika)

Program dimulai dengan pemanggilan pustaka untuk sensor suhu DallasTemperature dan OneWire. Pin analog A0 ditetapkan sebagai masukan dari modul TDS, sementara pin digital 2 digunakan untuk komunikasi data suhu. Variabel penting yang dideklarasikan meliputi tegangan referensi (5.0V), konstanta sel hasil kalibrasi, dan koefisien kompensasi suhu (0.02).

Di dalam fungsi setup(), komunikasi serial diinisialisasi pada kecepatan 9600 baud. Program memberikan jeda 2 detik untuk stabilisasi sensor sebelum mencetak header CSV: Waktu(s), Suhu(C), TDS_Raw(ppm), TDS_Compensated(ppm).

Fungsi utama (loop) menjalankan urutan eksekusi sebagai berikut:

1. **Akuisisi Suhu:** Mikrokontroler meminta pembacaan suhu dari DS18B20. Nilai ini disimpan sebagai variabel 'suhuAktual'.
2. **Sampling Tegangan:** Dilakukan pengambilan 30 sampel tegangan dari pin A0 secara cepat, kemudian diurutkan untuk diambil nilai tengahnya (median filter). Strategi ini sangat efektif untuk menghilangkan derau listrik (electrical noise) yang sering muncul pada lingkungan laboratorium yang padat peralatan elektronik.
3. **Kalkulasi Kompensasi:** Tegangan rata-rata dikonversi menjadi nilai TDS dasar. Selanjutnya, nilai tersebut dikalibrasi menggunakan rumus: $TDS_Terkompensasi = TDS_Dasar / (1.0 + 0.02 * (suhuAktual - 25.0))$.
4. **Output Data:** Hasil perhitungan dikirim ke Serial Monitor setiap 1000 milidetik. Data yang telah terkompensasi inilah yang akan digunakan mahasiswa untuk dibandingkan dengan standar Baku Mutu Air Minum (Permenkes).

B. Prosedur Operasional Standar (SOP) Praktikum TDS

Praktikum ini dirancang agar mahasiswa mampu membedakan profil ionik antara air layak konsumsi dan air yang telah mengalami kontaminasi (limbah).

1. **Kalibrasi Sistem:** Celupkan probe TDS ke dalam larutan standar KCl 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (atau larutan TDS standar 707 ppm). Jika nilai yang terbaca pada monitor serial tidak sesuai, sesuaikan variabel 'konstantaSel' pada kode program hingga angka yang muncul mendekati nilai standar.
2. **Analisis Air Minum:** Ambil 3 sampel air minum dari sumber berbeda (air keran, air mineral kemasan, dan air isi ulang). Bilas probe dengan akuades setiap kali akan berpindah

sampel. Masukkan probe dan sensor suhu ke dalam gelas piala berisi sampel, tunggu hingga pembacaan stabil selama 30 detik, lalu catat datanya.

3. **Analisis Air Limbah:** Gunakan sampel air limbah domestik (air bekas cucian) atau limbah industri imitasi. Perhatikan lonjakan nilai TDS yang terjadi. Mahasiswa diinstruksikan untuk mengamati pengaruh penambahan koagulan (seperti tawas) terhadap penurunan nilai TDS seiring berjalannya waktu.
4. **Pembersihan & Penyimpanan:** Setelah selesai, probe wajib dibilas dengan akuades dan dikeringkan dengan tisu halus. Penyimpanan probe TDS tidak memerlukan larutan khusus (berbeda dengan probe pH), namun harus dipastikan kering untuk mencegah korosi pada elektroda logamnya.

C. Interpretasi Data dan Analisis Galat Metrologi

Data yang diperoleh kemudian diplot ke dalam grafik "TDS vs Jenis Sampel". Mahasiswa diharapkan melakukan analisis kritis terhadap hasil tersebut:

- **Batas Aman:** Sesuai standar WHO dan Permenkes, air minum umumnya memiliki ambang batas TDS maksimal 500 mg/L. Jika hasil praktikum menunjukkan angka di atas ini, mahasiswa harus menyelidiki potensi keberadaan ion kalsium, magnesium, atau logam berat lainnya (Skoog et al., 2017).
- **Analisis Galat:** Salah satu galat yang sering terjadi adalah fenomena "sensor fouling" (penimbunan kerak). Jika probe digunakan pada air limbah yang mengandung lemak atau minyak, permukaan elektroda akan terlapisi lapisan non-konduktif yang menyebabkan nilai TDS terbaca jauh lebih rendah dari aslinya. Mahasiswa diajarkan bahwa akurasi instrumen digital tidak hanya bergantung pada kode program, tetapi juga pada pemeliharaan fisik sensor (Harris, 2015).

Dengan menyelesaikan prosedur ini, mahasiswa S1 tidak hanya memahami cara mengoperasikan alat, tetapi juga menguasai logika di balik konversi data fisik menjadi informasi lingkungan yang krusial bagi kesehatan masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA (BAB 7)

Atkins, P., & de Paula, J. (2014). *Physical Chemistry* (10th ed.). Oxford University Press.

Harris, D. C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

Urban, P. L. (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118. <https://doi.org/10.1039/C5AN01487A>

World Health Organization. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). WHO Press.

BAB 8: SISTEM AKUISISI DATA & INTERNET OF THINGS (IOT) UNTUK LABORATORIUM KIMIA

8.1. Paradigma Laboratorium Cerdas (Smart Lab) dan Arsitektur IoT

Era Revolusi Industri 4.0 telah membawa transformasi fundamental dalam cara data saintifik dihasilkan, dikelola, dan diinterpretasikan. Di laboratorium kimia, pergeseran ini termanifestasi dalam bentuk Laboratorium Cerdas (*Smart Lab*), di mana instrumen tidak lagi berdiri sendiri (*standalone*), melainkan saling terhubung dalam jaringan yang memungkinkan pertukaran data secara *real-time*. Konsep konektivitas dan pencatatan data yang presisi ini memiliki akar filosofis yang kuat dalam tradisi Islam, yang menekankan bahwa setiap aktivitas, sekecil apa pun, senantiasa berada dalam sistem pencatatan yang sempurna dan terintegrasi. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

وَإِنَّ عَلَيْكُمْ لَحَافِظِينَ * كِرَامًا كَاتِبِينَ * يَعْلَمُونَ مَا تَفْعَلُونَ

"Dan sesungguhnya bagi kamu ada (malaikat-malaikat) yang mengawasi (pekerjaanmu), yang mulia (di sisi Allah) dan yang mencatat (perbuatanmu), mereka mengetahui apa yang kamu kerjakan." (QS. Al-Infitar: 10-12)

Dalam konteks kimia analitik, "malaikat pencatat" digital ini diwujudkan melalui sistem akuisisi data (DAQ) dan *Internet of Things* (IoT). Jika dahulu peneliti harus duduk berjam-jam di depan buret atau termometer untuk mencatat angka secara manual, kini sensor-sensor cerdas bertindak sebagai pengawas setia yang mencatat setiap fluktuasi molekuler tanpa jeda, memastikan integritas data tetap terjaga dari bias manusia.

A. Filosofi Konektivitas: Dari Sensor Menuju Awan (Cloud) Tradisi sains kimia selama berabad-abad sangat bergantung pada pencatatan manual dalam buku log laboratorium (*logbook*). Kelemahan sistem ini adalah isolasi data; data hanya berada pada satu tempat dan sulit untuk dianalisis secara kolaboratif dalam waktu singkat. IoT menghancurkan sekat isolasi tersebut dengan menghubungkan dunia fisik (reaksi kimia) ke dunia digital melalui perantara internet.

Arsitektur IoT dalam laboratorium kimia umumnya dibangun di atas tiga lapisan utama (Zambon et al., 2020):

1. **Lapisan Persepsi (*Perception Layer*):** Terdiri dari sensor-sensor fisik yang telah kita bahas pada bab-bab sebelumnya (sensor pH, suhu, TDS, gas). Di sini, fenomena kimia diubah menjadi sinyal elektrik.
2. **Lapisan Jaringan (*Network Layer*):** Merupakan jembatan komunikasi. Mikrokontroler (seperti ESP32 atau NodeMCU) mengirimkan data melalui protokol WiFi, Bluetooth, atau LoRa (Long Range) menuju *gateway* internet.

3. **Lapisan Aplikasi (*Application Layer*):** Tempat di mana data diolah, divisualisasikan dalam bentuk grafik, dan disimpan dalam basis data *Cloud*. Peneliti dapat memantau jalannya reaksi eksotermis di laboratorium dari jarak jauh melalui ponsel pintar mereka.

B. Protokol MQTT: Bahasa Komunikasi Laboratorium Masa Depan Dalam menghubungkan instrumen kimia ke internet, protokol komunikasi yang digunakan tidaklah sembarangan. Protokol HTTP yang biasa kita gunakan untuk memuat halaman web dianggap terlalu berat dan lambat untuk pengiriman data sensor yang kontinu. Laboratorium cerdas modern mengadopsi protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*).

MQTT bekerja dengan prinsip *Publish/Subscribe*. Sebuah instrumen (misalnya pH meter otomatis) bertindak sebagai *Publisher* yang mengirimkan data ke sebuah broker (server). Di sisi lain, peneliti atau sistem kontrol otomatis bertindak sebagai *Subscriber* yang menerima data tersebut. Keunggulan MQTT terletak pada efisiensi *bandwidth* dan konsumsi daya yang sangat rendah, memungkinkannya digunakan pada perangkat mikrokontroler murah dengan stabilitas tinggi bahkan pada jaringan yang tidak stabil (Perkel, 2017).

C. Integritas Data dan Keamanan Siber di Laboratorium Seiring dengan terhubungnya laboratorium ke jaringan global, muncul tantangan baru berupa keamanan data dan integritas riset. Pencatatan yang otomatis dan permanen dalam sistem digital harus mampu menjamin bahwa data tersebut tidak dimanipulasi. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* mengingatkan dalam Al-Qur'an mengenai pentingnya kesaksian data yang jujur:

هَذَا كِتَابُنَا يَنْطِقُ عَلَيْكُمْ بِالْحَقِّ إِنَّا كُنَّا نَسْتَنْسِخُ مَا كُنْتُمْ تَعْمَلُونَ

"Inilah kitab (catatan) Kami yang menuturkan kepadamu dengan sebenar-benarnya. Sesungguhnya Kami telah menyuruh mencatat apa yang telah kamu kerjakan." (QS. Al-Jasiyah: 29)

Ayat ini menegaskan bahwa catatan yang benar adalah catatan yang menuturkan apa adanya (*yanthiqu bil haqq*). Dalam IoT, integritas ini dijamin melalui penggunaan stempel waktu (*timestamping*) dan enkripsi. Setiap tetesan titran yang terekam oleh sensor harus memiliki catatan waktu yang absolut sehingga urutan kinetika reaksi dapat dipertanggungjawabkan secara saintifik. Laboratorium cerdas bukan sekadar tentang kemudahan, melainkan tentang peningkatan standar kejujuran data melalui sistem yang otonom dan sulit untuk diintervensi oleh kepentingan subjektif peneliti (Guilherme et al., 2022).

D. Perspektif Multi-disiplin: Konvergensi Kimia, Informatika, dan Elektronika Penerapan IoT mengubah profil seorang kimiawan masa depan. Riset kimia tidak lagi hanya dilakukan di atas meja laboratorium (*wet lab*), tetapi juga melibatkan pengelolaan data besar (*Big Data*). Dengan IoT, ribuan titik data dari berbagai percobaan dapat dikumpulkan secara otomatis untuk kemudian dianalisis menggunakan algoritma *Machine Learning*. Konvergensi ini memungkinkan penemuan katalis baru atau optimasi proses industri dilakukan dengan jauh lebih cepat melalui simulasi yang didasarkan pada data lapangan yang presisi.

Implementasi *Smart Lab* berbasis IoT memungkinkan realisasi laboratorium yang "mandiri", di mana sistem dapat memberikan peringatan dini jika suhu reaktor melebihi ambang batas aman atau jika terdeteksi kebocoran gas berbahaya melalui notifikasi *real-time* ke perangkat seluler peneliti (Urban, 2015). Ini adalah wujud dari sains yang melayani manusia, memastikan keselamatan, dan meningkatkan efisiensi riset menuju peradaban ilmu pengetahuan yang lebih maju.

8.2. Mikrokontroler Berbasis WiFi (ESP32 dan ESP8266) dalam Sistem Akuisisi Data

Transisi dari laboratorium konvensional menuju laboratorium cerdas (*Smart Lab*) dimungkinkan oleh kehadiran perangkat keras yang tidak hanya mampu melakukan pemrosesan data, tetapi juga memiliki kapabilitas komunikasi nirkabel yang terintegrasi. Dalam dekade terakhir, dominasi mikrokontroler tradisional seperti Arduino Uno (ATMega328P) mulai digantikan oleh seri sistem-dalam-keping (*System-on-Chip* / SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems, yaitu ESP8266 dan penerusnya, ESP32. Penggunaan perangkat ini dalam riset kimia analitik bukan sekadar efisiensi biaya, melainkan upaya untuk memastikan validitas data melalui sistem transmisi yang cepat dan terverifikasi.

Pentingnya verifikasi data dan kejujuran dalam menyampaikan informasi adalah prinsip fundamental yang ditegaskan dalam Al-Qur'an. Setiap informasi yang masuk ke dalam sistem, baik itu data sensor maupun informasi sosial, harus melalui proses validasi (*tabayyun*) untuk menghindari kesalahan pengambilan keputusan. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا إِن جَاءَكُمْ فَاسِقٌ بِنَبَأٍ فَتَبَيَّنُوا أَن تُصِيبُوا قَوْمًا بِجَهَالَةٍ فَتُصْبِحُوا عَلَىٰ مَا فَعَلْتُمْ نَادِمِينَ

"Wahai orang-orang yang beriman! Jika seseorang yang fasik datang kepadamu membawa suatu berita, maka telitilah kebenarannya, agar kamu tidak mencelakakan suatu kaum karena kebodohan (kecerobohan), yang akhirnya kamu menyesali perbuatanmu itu." (QS. Al-Hujurat: 6)

Dalam sistem akuisisi data kimia berbasis IoT, proses *tabayyun* digital ini diwujudkan melalui protokol pemeriksaan kesalahan (*error checking*) dan redundansi data pada ESP32, guna memastikan bahwa fluktuasi yang terbaca oleh sensor benar-benar merepresentasikan fenomena kimia, bukan sekadar derau (*noise*) elektronik atau kegagalan transmisi.

A. Arsitektur Komputasi: Single-Core vs Dual-Core

Perbedaan paling mendasar antara ESP8266 dan ESP32 terletak pada kekuatan pemrosesan dan arsitektur intinya. ESP8266 menggunakan mikroprosesor tunggal 32-bit (Tensilica L106) yang beroperasi pada frekuensi 80 MHz. Meskipun sangat populer untuk aplikasi IoT sederhana, ESP8266 sering mengalami kendala saat harus menjalankan tugas berat secara simultan, seperti membaca sensor kimia dengan frekuensi tinggi sambil mempertahankan koneksi WiFi yang stabil.

Sebaliknya, ESP32 dibekali dengan prosesor Xtensa Dual-Core (LX6) yang mampu berlari hingga kecepatan 240 MHz. Dalam instrumentasi kimia tingkat lanjut, arsitektur *dual-core* ini memberikan keunggulan kritis:

1. **Core 0 (Protokol):** Didedikasikan untuk menangani tumpukan protokol nirkabel (WiFi dan Bluetooth) dan pemeliharaan koneksi internet.
2. **Core 1 (Aplikasi):** Didedikasikan sepenuhnya untuk menjalankan algoritma kimia, akuisisi data sensor pH/suhu, dan kontrol aktuator (seperti pompa peristaltik).

Pemisahan tugas ini memastikan bahwa proses titrasi otomatis atau pemantauan laju reaksi tidak akan terinterupsi oleh aktivitas latar belakang WiFi, yang pada mikrokontroler *single-core* sering menyebabkan *jitter* atau jeda waktu (*latency*) pada pencatatan data kinetika (Zambon et al., 2020).

B. Resolusi ADC: Presisi Analitik dalam Bit

Bagi seorang kimiawan analitik, parameter paling vital dari sebuah mikrokontroler adalah unit *Analog-to-Digital Converter* (ADC). ADC adalah komponen yang menerjemahkan tegangan kontinu dari sensor (seperti sensor gas MQ atau elektroda pH) menjadi angka digital yang dapat diproses oleh komputer.

ESP8266 hanya memiliki satu saluran ADC dengan resolusi 10-bit (0 hingga 1023 langkah). Untuk rentang tegangan 0-1V, ini berarti resolusi terkecil yang dapat dideteksi adalah sekitar 1 milivolt. Sementara itu, ESP32 menawarkan lompatan kuantum dengan ADC beresolusi 12-bit (0 hingga 4095 langkah) pada 18 saluran masukan. Dengan resolusi 12-bit, instrumen mampu mendeteksi perubahan tegangan hingga orde mikrovolt, yang sangat krusial saat mengamati perubahan pH yang sangat halus atau deteksi ion kelumit dalam analisis konduktivitas (Urban, 2015).

Namun, literatur memperingatkan adanya masalah non-linearitas pada ADC internal ESP32. Pada rentang tegangan yang sangat rendah (dekat 0V) dan sangat tinggi (dekat 3.3V), respons ADC cenderung melengkung. Oleh karena itu, riset kimia internasional merekomendasikan penggunaan kurva kalibrasi polinomial atau integrasi ADC eksternal (seperti ADS1115) yang dihubungkan via protokol I2C ke ESP32 untuk mencapai akurasi tingkat laboratorium riset (Guilherme et al., 2022).

C. Konektivitas Ganda: WiFi dan Bluetooth Low Energy (BLE)

Keunggulan unik ESP32 dibandingkan pendahulunya adalah dukungan terhadap *Bluetooth Low Energy* (BLE) di samping WiFi konvensional. Dalam skenario laboratorium kimia:

1. **WiFi (Station Mode):** Digunakan untuk mengirimkan data jangka panjang ke server *Cloud* pusat untuk pemantauan jarak jauh dan penyimpanan basis data besar.
2. **BLE:** Digunakan untuk interaksi jarak dekat yang efisien daya, misalnya menghubungkan instrumen titrasi ke tablet atau ponsel pintar peneliti sebagai antarmuka kontrol tanpa memerlukan jaringan internet lokal.

Kemampuan konektivitas ini memungkinkan terciptanya sistem sensor nirkabel yang terdistribusi (*distributed sensor network*). Sebagai contoh, dalam memantau kualitas air di sepanjang aliran sungai atau dalam tangki pengolahan limbah yang luas, beberapa modul ESP32 dapat membentuk jaringan *Mesh* (ESP-MESH), di mana data dikirim secara berantai dari satu sensor ke sensor lainnya hingga mencapai gerbang internet (*gateway*).

D. Manajemen Daya dan Keandalan Data

Laboratorium kimia cerdas sering kali membutuhkan pemantauan lingkungan yang berjalan selama berbulan-bulan (misalnya dalam studi stabilitas obat atau degradasi polimer). ESP32 memiliki fitur *Deep Sleep* yang sangat efisien, di mana konsumsi arus dapat ditekan hingga tingkat mikro-ampere (μA). Perangkat dapat diprogram untuk "bangun", membaca sensor pH selama beberapa detik, mengirimkan data ke internet, dan kembali "tidur".

Efisiensi dan akurasi dalam pengelolaan daya dan data ini adalah bagian dari amanah ilmiah. Kejujuran dalam riset tidak hanya berarti tidak memalsukan angka, tetapi juga memastikan bahwa alat ukur bekerja pada kondisi optimal agar data yang terekam adalah data yang benar. Hal ini sejalan dengan firman Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

وَلَا نُكَلِّفُ نَفْسًا إِلَّا وُسْعَهَا وَلَدَيْنَا كِتَابٌ يَنْطِقُ بِالْحَقِّ وَهُمْ لَا يُظْلَمُونَ

"Dan Kami tidak membebani seseorang melainkan menurut kesanggupannya, dan pada Kami ada suatu catatan yang menuturkan kebenaran, dan mereka tidak dizalimi (dirugikan)." (QS. Al-Mu'minun: 62)

Integrasi ESP32 dalam instrumentasi kimia analitik modern memastikan bahwa "catatan" digital yang dihasilkan adalah catatan yang *yanthiqu bil haqq* (menuturkan kebenaran) karena didukung oleh resolusi tinggi, pemrosesan ganda, dan validasi transmisi nirkabel yang tangguh (Perkel, 2017).

8.3. Platform Cloud (Thingspeak, Blynk, dan Google Sheets) untuk Visualisasi Data Kimia

Setelah data kimia berhasil diakuisisi oleh mikrokontroler (ESP32 atau ESP8266) di lapisan persepsi, tantangan berikutnya adalah bagaimana menyimpan dan menyajikan data tersebut agar memiliki nilai analitik. Data yang hanya tersimpan di memori lokal mikrokontroler bersifat efemeral dan sulit untuk diolah lebih lanjut. Di sinilah **Platform Cloud** berperan sebagai repositori digital yang memastikan setiap detak kinetika reaksi terdokumentasi dengan aman.

Konsep pencatatan yang tersentralisasi dan tak terhapuskan ini merupakan cerminan dari kemahabesaran Allah *Subhanahu wa Ta'ala* dalam mengelola administrasi alam semesta. Segala sesuatu yang terjadi di jagat raya ini, dari pergerakan galaksi hingga interaksi antar-elektron, telah tertulis secara rapi dalam sebuah "pusat data" yang absolut. Allah berfirman:

وَكُلُّ شَيْءٍ فَعَلُوهُ فِي الزُّبُرِ

"Dan segala sesuatu yang telah mereka perbuat tercatat dalam buku-buku catatan." (QS. Al-Qamar: 52)

Dalam ranah laboratorium digital, "buku-buku catatan" (*Az-Zubur*) tersebut bermanifestasi dalam bentuk server awan (*cloud*) yang menampung aliran data sensor secara berkelanjutan. Tidak ada

satu pun fluktuasi suhu atau penurunan pH yang luput dari pencatatan sistem, sebagaimana firman-Nya:

مَا يَلْفُظُ مِنْ قَوْلٍ إِلَّا لَدَيْهِ رَقِيبٌ عَتِيدٌ

"Tidak ada suatu kata pun yang diucapkan melainkan ada di sisinya malaikat pengawas yang selalu siap (mencatat)." (QS. Qaf: 18)

Integritas riset kimia sangat bergantung pada kejujuran "pencatatan" ini. Platform *cloud* meminimalisir intervensi manusia yang subjektif dalam pelaporan data, sehingga menghasilkan "kesaksian" data yang objektif dan transparan.

A. Thingspeak: Analisis Data Kimia Terintegrasi MATLAB

Thingspeak merupakan platform IoT yang dikembangkan oleh MathWorks, menjadikannya pilihan utama bagi peneliti kimia yang membutuhkan analisis statistik mendalam secara langsung di awan.

- **Struktur Channel dan Field:** Thingspeak mengorganisir data dalam bentuk *Channel*, di mana setiap kanal dapat menampung hingga 8 *Field* (misalnya: Suhu, pH, Konduktivitas, Konsentrasi Gas, dsb). Setiap data yang dikirimkan secara otomatis mendapatkan stempel waktu (*timestamp*) yang presisi hingga milidetik (Urban, 2015).
- **Visualisasi dan MATLAB Analysis:** Keunggulan absolut Thingspeak adalah integrasi *native* dengan MATLAB. Peneliti dapat menulis skrip MATLAB langsung di dalam platform untuk melakukan transformasi data, seperti menghitung turunan pertama kurva titrasi (dpH/dV) atau melakukan pemulusan data (*smoothing*) menggunakan filter *Savitzky-Golay* tanpa perlu mengunduh data ke komputer lokal (Perkel, 2017).
- **Limitasi:** Thingspeak membatasi interval pengiriman data (biasanya minimal 15 detik untuk akun gratis). Hal ini kurang cocok untuk reaksi kinetika ultra-cepat yang membutuhkan resolusi milidetik, namun sangat ideal untuk pemantauan kualitas lingkungan atau stabilitas larutan jangka panjang.

B. Blynk: Antarmuka Pengendali Laboratorium Bergerak

Jika Thingspeak berfokus pada penyimpanan dan analisis, Blynk berfokus pada pengalaman pengguna (*User Experience*) dan kontrol *real-time* melalui aplikasi seluler (iOS/Android).

- **Dashboard Widget:** Blynk menyediakan berbagai *widget* seperti *Gauges*, *LCD Displays*, dan *Real-time Charts*. Mahasiswa dapat merancang panel kendali autotitrator mereka sendiri dengan tombol *Start/Stop* dan *Slider* untuk mengatur laju penetes pompa peristaltik langsung dari ponsel (Zambon et al., 2020).
- **Arsitektur Blynk Server:** Blynk menggunakan protokol komunikasi yang sangat ringan (Blynk Protocol) yang berjalan di atas TCP/IP. Hal ini memungkinkan latensi yang sangat rendah. Peneliti dapat menerima notifikasi *push* seketika jika sensor gas MQ mendeteksi kebocoran gas beracun di laboratorium, meskipun peneliti sedang berada di luar gedung.

- **Visualisasi Dinamis:** Blynk memungkinkan visualisasi data dalam bentuk grafik historis yang dapat digeser dan diperbesar (*zoomable*), memudahkan identifikasi titik-titik anomali selama eksperimen kimia berlangsung.

C. Google Sheets: Dokumentasi Kolaboratif dan Aksesibilitas Tinggi

Bagi institusi pendidikan, menggunakan Google Sheets sebagai tujuan akhir data logging adalah strategi yang cerdas karena kemudahan akses dan fitur kolaborasi tim.

- **HTTP Webhooks dan Google Apps Script:** Melalui penggunaan skrip sederhana (Google Apps Script), ESP32 dapat mengirimkan data menggunakan protokol HTTP POST menuju lembar sebar (*spreadsheet*). Data kimia yang masuk akan langsung tertata dalam baris dan kolom secara otomatis (Guilherme et al., 2022).
- **Kelebihan Eksploratif:** Karena sifatnya yang akrab bagi kebanyakan orang, data di Google Sheets sangat mudah untuk dibagikan ke anggota tim peneliti lainnya. Grafik dapat dibuat secara otomatis, dan fitur *Pivot Table* dapat digunakan untuk meringkas ribuan titik data percobaan kimia hanya dalam hitungan detik.
- **Pencatatan Permanen:** Penggunaan platform ini merefleksikan hadits Nabi Muhammad *Shallallahu 'alaihi wa sallam* mengenai pencatatan ilmu:

فَيَذُرُوا الْعِلْمَ بِالْكِتَابِ

"Ikatlah ilmu dengan tulisan (*catatan*). " (HR. al-Hakim)

Dalam konteks digital, Google Sheets menjadi "tali pengikat" yang memastikan hasil riset tidak hilang tertelan waktu dan dapat diwariskan ke peneliti selanjutnya dengan tingkat akurasi yang sama.

D. Perbandingan Strategis Platform Cloud

Berikut adalah tabel perbandingan fungsionalitas ketiga platform tersebut dalam konteks laboratorium kimia:

Fitur	Thingspeak	Blynk	Google Sheets
Fokus Utama	Analisis & Riset	Kontrol & Monitoring	Dokumentasi & Berbagi
Kekuatan	Integrasi MATLAB	UI Mobile yang intuitif	Kolaborasi mudah
Analisis Data	Sangat Kuat (Scripting)	Terbatas (Visual saja)	Menengah (Spreadsheet)

Notifikasi	Email / Twitter	Push Notification	Email (via Script)
Keandalan	Sangat Tinggi	Tinggi	Menengah

E. Sinkronisasi Data dan Keamanan Cloud

Penggunaan platform *cloud* menuntut peneliti untuk memahami konsep keamanan kunci API (*API Keys*). Setiap kanal memiliki *Write API Key* yang bersifat rahasia. Membocorkan kunci ini ekuivalen dengan membiarkan orang asing mengubah isi catatan laboratorium kita. Kesadaran akan tanggung jawab menjaga amanah data ini adalah bagian dari etika ilmiah yang luhur. Allah mengingatkan:

فَأَمَّا مَنْ أُوتِيَ كِتَابَهُ بِيَمِينِهِ * فَسَوْفَ يُحَاسَبُ حِسَابًا يَسِيرًا

"Adapun orang yang diberikan kitabnya di tangan kanannya, maka dia akan diperiksa dengan pemeriksaan yang mudah." (QS. Al-Inshiqaq: 7-8)

Ayat ini memberikan pelajaran bahwa catatan yang rapi, benar, dan terjaga kerahasiaannya akan memudahkan segala urusan pertanggungjawaban. Demikian pula dalam sains, data riset yang terorganisir di dalam *cloud* dengan sistem keamanan yang baik akan memudahkan proses verifikasi oleh rekan sejawat (*peer-review*) dan publikasi di jurnal bereputasi internasional (Urban, 2015).

8.4. Blueprint Alat: Stasiun Pemantau Lingkungan Laboratorium Berbasis IoT

Penyusunan cetak biru (*blueprint*) sebuah stasiun pemantau lingkungan laboratorium merupakan langkah integratif untuk menciptakan ekosistem riset yang aman dan terkendali. Dalam laboratorium kimia modern, variabel lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan kualitas udara bukan sekadar data pelengkap, melainkan faktor determinan yang memengaruhi stabilitas reagen dan akurasi instrumen analitik. Kesadaran untuk memantau dan menjaga kondisi lingkungan ini merupakan bentuk pengamalan dari perintah Allah *Subhanahu wa Ta'ala* untuk menjaga keseimbangan alam dan tidak melakukan kerusakan. Allah berfirman:

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ

"Dan janganlah kamu berbuat kerusakan di bumi setelah (Allah) memperbaikinya dan berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut dan harapan. Sesungguhnya rahmat Allah sangat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik." (QS. Al-A'raf: 56)

A. Integrasi Multi-Sensor untuk Pengawasan Komprehensif Dalam desain stasiun ini, "perbaikan" dan penjagaan lingkungan laboratorium diwujudkan melalui penggunaan sensor-sensor yang memiliki sensitivitas tinggi. Pemilihan sensor didasarkan pada kebutuhan parameter kimia fisik yang paling fluktuatif (Zambon et al., 2020):

1. **Sensor DHT22:** Digunakan untuk memantau suhu dan kelembaban relatif (RH). Akurasi DHT22 sangat krusial karena kelembaban yang terlalu tinggi dapat memicu penggumpalan pada padatan higroskopis, sementara suhu yang terlalu tinggi dapat mempercepat degradasi sampel organik.
2. **Sensor MQ-135:** Bertindak sebagai "hidung elektronik" untuk mendeteksi uap kimia berbahaya (seperti amonia atau benzena) yang mungkin bocor dari lemari asam.
3. **Sensor BMP280:** Memberikan data tekanan atmosfer yang diperlukan untuk mengoreksi perhitungan volume gas pada eksperimen kinetika yang berlangsung lama.

B. Arsitektur Perangkat Keras dan Manajemen Daya Efisien Pilihan unit pemroses jatuh pada ESP32 karena kapabilitas nirkabelnya yang mumpuni. Dalam membangun instrumen digital, efisiensi penggunaan energi adalah prinsip yang selaras dengan larangan berbuat mubazir dalam Islam. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

وَلَا تُبْذَرِ تَبَذِيرًا * إِنَّ الْمُبَذِّرِينَ كَانُوا إِخْوَانَ الشَّيَاطِينِ

"Dan janganlah kamu menghambur-hamburkan (hartamu) secara boros. Sesungguhnya pemboros-pemboros itu adalah saudara-saudara syaitan." (QS. Al-Isra: 26-27)

Efisiensi energi pada *blueprint* ini diimplementasikan melalui fitur **Deep Sleep Mode**. ESP32 diprogram untuk aktif hanya saat melakukan akuisisi data dan pengiriman ke server *cloud*, kemudian kembali ke mode tidur hemat daya. Strategi ini memungkinkan stasiun pemantau beroperasi secara otonom menggunakan baterai atau sistem panel surya kecil, meminimalisir ketergantungan pada jaringan listrik utama yang sering kali memiliki *noise* (Guilherme et al., 2022).

C. Skema Konektivitas dan Validitas Informasi Data Data yang dikirimkan dari laboratorium ke awan (*cloud*) harus dijamin integritasnya. Kejujuran dalam menyampaikan data riset adalah bagian dari akhlak seorang peneliti. Rasulullah *Shallallahu 'alaihi wa sallam* bersabda:

عَلَيْكُمْ بِالصِّدْقِ فَإِنَّ الصِّدْقَ يَهْدِي إِلَى الْبِرِّ وَإِنَّ الْبِرَّ يَهْدِي إِلَى الْجَنَّةِ

"Hendaklah kalian senantiasa berlaku jujur, karena sesungguhnya kejujuran itu memimpin kepada kebaikan, dan kebaikan itu memimpin ke surga." (HR. Bukhari, No. 6094)

Dalam arsitektur IoT, kejujuran ini diterjemahkan melalui protokol keamanan. *Blueprint* ini mewajibkan penggunaan enkripsi SSL/TLS pada komunikasi MQTT. Hal ini memastikan bahwa data lingkungan yang terekam adalah data asli dari sensor, bukan hasil manipulasi pihak luar yang dapat mengaburkan hasil riset atau menyembunyikan kondisi bahaya di laboratorium.

D. Dashboard Monitoring dan Mitigasi Bahaya Tujuan akhir dari *Smart Lab Monitoring* adalah perlindungan terhadap jiwa dan harta benda (reagen dan alat mahal). Allah *Subhanahu wa Ta'ala* melarang manusia untuk menjatuhkan diri dalam kebinasaan:

وَلَا تُفْلُوا بِأَيْدِيكُمْ إِلَى التَّهْلُكَةِ وَأَحْسِنُوا إِنَّ اللَّهَ يُحِبُّ الْمُحْسِنِينَ

"...dan janganlah kamu menjatuhkan dirimu sendiri ke dalam kebinasaan, dan berbuat baiklah, karena sesungguhnya Allah menyukai orang-orang yang berbuat baik." (QS. Al-Baqarah: 195)

Integrasi sensor MQ-135 dengan sistem notifikasi *real-time* (seperti bot Telegram atau *push notification* Blynk) berfungsi sebagai sistem peringatan dini (*Early Warning System*). Jika konsentrasi gas berbahaya melampaui ambang batas aman yang ditetapkan (misalnya 100 ppm amonia), sistem secara otomatis akan mengirimkan alarm ke ponsel peneliti dan dapat diperluas untuk mengaktifkan kipas pembuangan (*exhaust fan*) secara otomatis melalui modul relai. Pengawasan jarak jauh ini memastikan bahwa meskipun peneliti tidak berada di lokasi, "penjagaan" terhadap laboratorium tetap berlangsung secara berkelanjutan (Urban, 2015).

8.5. Source Code dan Prosedur Praktikum S1: Monitoring Jarak Jauh Reaksi Kimia

Implementasi sistem akuisisi data berbasis internet (*Internet of Things*) merupakan puncak dari digitalisasi laboratorium kimia. Kemampuan untuk mengawasi parameter kimia dari jarak jauh bukan sekadar efisiensi logistik, melainkan bentuk penguasaan teknologi untuk memastikan keselamatan kerja dan ketelitian data. Dalam perspektif Islam, pengawasan dan pencatatan yang presisi adalah bagian dari tanggung jawab manusia atas amanah ilmiah yang dipikulnya. Segala sesuatu yang kita kerjakan, termasuk interaksi molekuler dalam gelas kimia, berada dalam sistem pengawasan yang tak terputus. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ وَسَتُرَدُّونَ اِلَىٰ عَالِمِ الْغَيْبِ وَالشَّهَادَةِ فَيُنَبِّئُكُمْ بِمَا كُنْتُمْ تَعْمَلُونَ

"Dan katakanlah, 'Bekerjalah kamu, maka Allah akan melihat pekerjaanmu, begitu juga Rasul-Nya dan orang-orang mukmin; dan kamu akan dikembalikan kepada (Allah) Yang Mengetahui yang gaib dan yang nyata, lalu diberitakan-Nya kepada kamu apa yang telah kamu kerjakan'." (QS. At-Tawbah: 105)

Ayat ini memberikan motivasi teologis bagi peneliti untuk bekerja secara sungguh-sungguh karena "hasil kerja" tersebut akan dilihat dan dipertanggungjawabkan. Dalam konteks laboratorium cerdas, sistem IoT bertindak sebagai perpanjangan indra manusia untuk memastikan bahwa "pekerjaan" kimiawi tersebut berjalan sesuai dengan ukuran yang ditetapkan, terdokumentasi dengan jujur, dan dapat diakses untuk kemaslahatan umat.

A. Algoritma Perangkat Lunak: Integrasi WiFi dan Protokol HTTP POST

Logika pemrograman pada sub-bab ini dirancang untuk mikrokontroler ESP32 yang mengintegrasikan sensor suhu DS18B20 dan mengirimkan datanya ke platform Thingspeak. Kode ini disusun menggunakan paradigma pemrosesan latar belakang untuk memastikan stabilitas koneksi nirkabel tetap terjaga selama proses reaksi kimia berlangsung.

(Implementasi Source Code - Navigasi Logika)

Program dimulai dengan pemanggilan pustaka nirkabel WiFi.h dan pustaka sensor OneWire serta DallasTemperature. Peneliti harus memasukkan kredensial jaringan (SSID dan Password) serta

kunci API (*Write API Key*) dari kanal Thingspeak yang telah dibuat sebelumnya. Pin digital 4 ditetapkan sebagai jalur data untuk sensor suhu.

Di dalam fungsi `setup()`, inisialisasi serial dilakukan pada kecepatan 115200 baud. Program kemudian memicu prosedur penyambungan WiFi. Mikrokontroler akan masuk ke dalam loop tunggu hingga status koneksi dinyatakan terhubung (`WL_CONNECTED`), baru kemudian memulai operasional sensor.

Di dalam fungsi `loop()`, algoritma menjalankan siklus akuisisi dan transmisi setiap 20 detik (menyesuaikan dengan batas interval Thingspeak gratis). Urutan eksekusinya adalah:

1. Pengambilan data suhu dari sensor secara digital.
2. Pembukaan koneksi klien (HTTPClient) menuju server API Thingspeak.
3. Penyusunan string data dalam format:
"api_key=KUNCI_ANDA&field1=NILAI_SUHU".
4. Pengiriman data menggunakan metode POST.
5. Pembacaan kode respons server (misalnya 200 untuk sukses atau 404 untuk gagal).
6. Penutupan koneksi untuk mengosongkan memori sementara (heap).

Melalui arsitektur ini, data kinetika suhu reaksi kimia akan langsung terkirim dan terplot secara otomatis menjadi grafik di awan (*cloud*), yang dapat diakses oleh dosen pembimbing atau peneliti lain dari mana saja selama tersedia koneksi internet.

B. Prosedur Operasional Standar (SOP) Praktikum IoT

Praktikum ini dirancang agar mahasiswa memahami mekanisme transmisi data nirkabel dalam pemantauan reaksi eksotermis berkepanjangan (seperti proses fermentasi atau degradasi termal).

1. **Konfigurasi Kanal Cloud:** Mahasiswa wajib membuat akun pada platform Thingspeak dan mengonfigurasi satu *channel* dengan satu *field* berjudul "Suhu Reaksi". Catat *Write API Key* yang diberikan.
2. **Setup Perangkat Keras:** Hubungkan sensor suhu DS18B20 ke ESP32 menggunakan resistor *pull-up* 4.7 kiloOhm. Pastikan ESP32 mendapatkan suplai daya yang stabil dari port USB atau baterai Li-Po.
3. **Persiapan Reaksi:** Siapkan labu leher tiga berisi larutan reaktan (misalnya reaksi netralisasi asam kuat dan basa kuat dalam konsentrasi besar). Celupkan probe sensor suhu ke dalam larutan dan pastikan tersegel rapat untuk mencegah uap kimia merusak sirkuit ESP32.
4. **Eksekusi Monitoring:** Nyalakan ESP32 dan pantau *Serial Monitor* untuk memastikan data terkirim dengan kode respons 200. Tutup laptop dan buka aplikasi browser di ponsel pintar. Mahasiswa dapat meninggalkan laboratorium sambil tetap mengawasi kenaikan suhu reaksi melalui grafik *real-time* di ponsel mereka.
5. **Analisis Pasca-Praktikum:** Setelah reaksi selesai (suhu kembali ke suhu ruang), unduh data historis dalam format CSV dari Thingspeak untuk dilakukan analisis kinetika laju pendinginan di perangkat lunak statistik.

C. Analisis Deep-Dive: Integritas Data dan Latensi Jaringan

Penggunaan IoT dalam kimia analitik memperkenalkan variabel baru yang tidak ada pada instrumen konvensional: **Latensi Jaringan**. Mahasiswa diajarkan bahwa interval pengambilan sampel di mikrokontroler tidak selalu sama dengan interval data yang tersimpan di *cloud*. Gangguan sinyal WiFi dapat menyebabkan data "hilang" atau tertunda.

Secara analitik, hal ini dapat memengaruhi perhitungan konstanta laju reaksi (k) jika data yang hilang berada pada fase transisi kritis (puncak eksotermis). Oleh karena itu, riset bereputasi internasional menyarankan penggunaan **Redundansi Lokal**. Data selain dikirim ke internet, juga harus disimpan sementara di kartu SD (microSD) pada perangkat ESP32 sebagai cadangan (*backup*). Integrasi antara penyimpanan lokal dan transmisi nirkabel menjamin bahwa "catatan" ilmiah yang kita buat benar-benar utuh dan tidak terzalimi oleh kendala teknis jaringan (Urban, 2015).

Kemampuan mahasiswa dalam mengelola data IoT ini merupakan langkah awal menuju digitalisasi riset yang lebih luas, di mana kolaborasi antar-laboratorium di seluruh dunia dapat dilakukan secara sinkron melalui platform awan yang terasimilasi (Guilherme et al., 2022).

DAFTAR PUSTAKA (BAB 8)

Guilherme, R. J., et al. (2022). Low-cost IoT-based system for remote monitoring of chemical laboratories. *HardwareX*, 11, e00271. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00271>

Perkel, J. M. (2017). The Internet of Things comes to the lab. *Nature*, 542(7639), 125-126. <https://doi.org/10.1038/542125a>

Urban, P. L. (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118. <https://doi.org/10.1039/C5AN01487A>

Zambon, A. G., et al. (2020). Smart Laboratory: A Review on IoT and Cloud Computing Applications in Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 97(11), 3954-3964. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00624>

BAB 9: KECERDASAN BUATAN (AI) DALAM ANALISIS DATA KIMIA & KEMOMETRIKA

IFTITAH (KATA PENGANTAR BAB)

Memasuki Bab 9, kita berada pada puncak evolusi instrumentasi digital: integrasi antara data sensor dan kecerdasan artifisial. Jika bab-bab sebelumnya berfokus pada bagaimana "indera" elektronik (sensor) menangkap fenomena kimia, maka bab ini berfokus pada bagaimana "otak" digital menginterpretasikan fenomena tersebut. Di era *Big Data*, tantangan utama riset kimia bukan lagi terletak pada kelangkaan data, melainkan pada banjir data (*data deluge*) yang melampaui kapasitas kognitif manusia untuk memprosesnya secara manual.

Urgensi integrasi AI dalam kimia analitik muncul dari kompleksitas sampel di dunia nyata. Analisis laboratorium sering kali dihadapkan pada matriks sampel yang rumit, di mana interferensi antar-ion atau tumpang tindih spektrum cahaya membuat interpretasi linear sederhana menjadi tidak valid. Di sinilah letak kesenjangan riset (*research gap*); banyak peneliti yang memiliki data sensor yang melimpah namun gagal mengekstraksi informasi kimiawi yang bermakna karena masih bergantung pada metode statistik univariat yang kaku.

Kebaruan ide dalam bab ini terletak pada sinergi antara instrumentasi *open-source* (ESP32/Arduino) dengan algoritma kemometrika tingkat lanjut. Kita tidak lagi melihat AI sebagai entitas yang terpisah dari laboratorium, melainkan sebagai asisten intelektual yang mampu mengenali pola, memprediksi konsentrasi dalam campuran kompleks, dan melakukan klasifikasi analit secara otomatis. Transisi ini bukan sekadar pergeseran teknologi, melainkan sebuah manifestasi dari upaya manusia untuk menyingkap keteraturan dan hikmah di balik tumpukan data yang tampak acak, sebagaimana Allah telah menetapkan segala sesuatu dengan perhitungan yang sangat teliti.

9.1. Epistemologi Data: Evolusi dari Statistik Klasik menuju Arsitektur Kemometrika Modern

Data dalam kimia analitik adalah representasi numerik dari realitas fisik dan kimiawi suatu materi. Secara epistemologis, data bukanlah kebenaran itu sendiri, melainkan "tanda" yang menunjukkan keberadaan suatu sifat atau entitas. Dalam tradisi pemikiran Islam, pengamatan terhadap tanda-tanda di alam semesta (ayat-ayat *kauniyah*) merupakan jalan menuju pemahaman yang lebih dalam mengenai kebenaran hakiki. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

سَنُرِيهِمْ آيَاتِنَا فِي الْأَفَاقِ وَفِي أَنْفُسِهِمْ حَتَّىٰ يَتَبَيَّنَ لَهُمْ أَنَّهُ الْحَقُّ ۖ أَوَلَمْ يَكْفِ بِرَبِّكَ أَنَّهُ عَلَىٰ كُلِّ شَيْءٍ شَهِيدٌ

"Kami akan memperlihatkan kepada mereka tanda-tanda (kekuasaan) Kami di segenap penjuru langit dan pada diri mereka sendiri, sehingga jelaslah bagi mereka bahwa Al-Qur'an itu adalah benar. Tidak cukupkah (bagi kamu) bahwa Tuhanmu menjadi saksi atas segala sesuatu?" (QS. Fussilat: 53)

Dalam konteks data kimia, tanda-tanda ini sering kali tersembunyi di balik derau (*noise*) dan interaksi multivariabel. Evolusi dari statistik klasik menuju kemometrika mencerminkan kemajuan kognitif manusia dalam memahami struktur informasi yang lebih kompleks.

A. Analisis Univariat vs Multivariat: Melampaui Satu Dimensi Statistik kimia tradisional yang diajarkan pada tingkat dasar umumnya bersifat univariat. Kita mengasumsikan bahwa satu variabel dependen (misalnya Absorbansi pada panjang gelombang tunggal) hanya dipengaruhi oleh satu variabel independen (Konsentrasi). Ini adalah pendekatan Hukum Lambert-Beer murni yang sangat linear. Namun, realitas laboratorium sering kali "jahat". Larutan sampel mungkin mengandung tiga jenis zat warna yang spektrumnya saling bertumpukan. Pada titik ini, analisis univariat gagal total; ia tidak mampu memisahkan kontribusi masing-masing komponen.

Kemometrika hadir sebagai disiplin ilmu yang menggunakan metode matematika dan statistik untuk merancang atau memilih prosedur eksperimental yang optimal, serta untuk memberikan informasi kimiawi maksimal melalui analisis data kimia yang bersifat multivariat (Brereton, 2018). Dalam pendekatan multivariat, kita tidak hanya mengamati satu titik data, melainkan seluruh vektor data (misalnya seluruh spektrum dari 400 nm hingga 700 nm). Dengan mengolah ribuan variabel secara simultan, algoritma dapat mengenali pola unik yang tidak terlihat oleh mata manusia atau statistik univariat sederhana.

B. Taksonomi Data dalam Kimia Digital Dalam arsitektur instrumentasi berbasis mikrokontroler, data kimia berevolusi melalui beberapa tahapan transformasi epistemologis:

1. **Sinyal Mentah (*Raw Signal*):** Tegangan milivolt dari sensor pH atau frekuensi dari sensor TCS3200. Ini adalah data tingkat rendah yang masih sangat rentan terhadap gangguan lingkungan.
2. **Informasi Terproses (*Processed Information*):** Data yang telah melalui filter digital (seperti *Moving Average*) dan dikonversi ke satuan kimia (pH, ppm, Absorbansi).
3. **Pengetahuan Analitik (*Analytical Knowledge*):** Hasil akhir dari kemometrika, di mana tumpukan data tadi diklasifikasikan (misalnya: "Sampel air ini terkontaminasi logam berat") atau diprediksi secara kuantitatif dalam campuran kompleks (Wold et al., 2001).

C. Peran Vital Kemometrika dalam Instrumentasi Modern Kemometrika bukan sekadar alat hitung tambahan, melainkan jantung dari instrumen cerdas. Ada tiga pilar utama kemometrika yang menjadi pondasi bagi integrasi AI dalam kimia:

- **Optimasi Eksperimen:** Menggunakan desain eksperimen (*Experimental Design*) untuk meminimalkan jumlah percobaan sambil mendapatkan hasil maksimal.
- **Estraksi Fitur:** Mengidentifikasi variabel mana yang paling berpengaruh terhadap hasil (misalnya, pada panjang gelombang berapa suatu kontaminan paling terlihat).
- **Pemodelan Prediktif:** Membangun model matematis yang mampu "belajar" dari data masa lalu untuk memprediksi sampel di masa depan.

Integrasi kemometrika dalam perangkat lunak Arduino atau Python memungkinkan instrumen murah yang kita buat memiliki kemampuan analitik setara dengan instrumen canggih. Hal ini membuktikan bahwa kecerdasan riset tidak lagi ditentukan oleh mahalnya perangkat keras,

melainkan oleh kedalaman algoritma dan pemahaman peneliti terhadap struktur data (Lavine & Workman, 2013).

9.2. Paradigma *Machine Learning* dalam Kimia: Kategorisasi *Supervised* dan *Unsupervised Learning* pada Data Sensor

Transmisi data dari sensor ke mikrokontroler hanyalah langkah awal. Kekuatan sesungguhnya dari instrumentasi cerdas terletak pada kemampuan sistem untuk "belajar" dari data tersebut. *Machine Learning* (ML) atau Pembelajaran Mesin adalah sub-disiplin dari kecerdasan buatan yang memberikan kemampuan kepada komputer untuk mengenali pola dan melakukan prediksi tanpa diprogram secara eksplisit untuk setiap skenario. Dalam kimia analitik, ML bertindak sebagai jembatan yang mengubah tumpukan angka digital menjadi keputusan saintifik yang logis.

Kemampuan untuk mengelompokkan, menamai, dan membedakan entitas berdasarkan sifat-sifatnya adalah anugerah intelektual yang sangat mendasar. Dalam perspektif teologis, kapasitas manusia untuk melakukan klasifikasi bermula dari pengajaran nama-nama (identitas) benda oleh Sang Pencipta. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

وَعَلَّمَ آدَمَ الْأَسْمَاءَ كُلَّهَا ثُمَّ عَرَضَهُمْ عَلَى الْمَلَائِكَةِ فَقَالَ أَنْبِئُونِي بِأَسْمَاءِ هَؤُلَاءِ إِنْ كُنْتُمْ صَادِقِينَ

"Dan Dia mengajarkan kepada Adam nama-nama (benda-benda) seluruhnya, kemudian mengemukakannya kepada para Malaikat lalu berfirman: 'Sebutkanlah kepada-Ku nama benda-benda itu jika kamu memang benar orang-orang yang benar!'" (QS. Al-Baqarah: 31)

Ayat ini mengisyaratkan bahwa ilmu pengetahuan dimulai dari proses identifikasi dan kategorisasi (pemberian nama). Dalam dunia *Machine Learning*, proses ini direplikasi melalui dua paradigma utama: *Supervised Learning* (pembelajaran terawasi) dan *Unsupervised Learning* (pembelajaran tak terawasi), yang masing-masing memiliki peran vital dalam pengolahan data sensor kimia.

A. *Supervised Learning*: Belajar dari Label dan Standar *Supervised Learning* adalah paradigma di mana algoritma dilatih menggunakan set data yang sudah memiliki "label" atau jawaban yang benar. Dalam laboratorium kimia, ini ekuivalen dengan pembuatan kurva kalibrasi menggunakan deret standar yang konsentrasinya sudah diketahui secara pasti.

1. **Klasifikasi (Kualitatif):** Algoritma digunakan untuk memprediksi kategori atau kelas dari suatu sampel. Contoh aplikasinya adalah "Hidung Elektronik" (*E-Nose*) yang menggunakan sensor gas seri MQ. Algoritma dilatih dengan data dari berbagai jenis uap (misal: Etanol, Amonia, dan Aseton). Setelah fase pelatihan selesai, sistem dapat "menamai" gas yang masuk ke sensor berdasarkan pola resistansi yang terekam. Algoritma populer untuk tugas ini meliputi *Support Vector Machines* (SVM) dan *K-Nearest Neighbors* (KNN) (Zhou et al., 2019).
2. **Regresi (Kuantitatif):** Algoritma digunakan untuk memprediksi nilai numerik kontinu. Dalam spektrofotometer digital berbasis Arduino, regresi digunakan untuk memprediksi konsentrasi analit berdasarkan nilai absorbansi. Jika Hukum Lambert-Beer menunjukkan penyimpangan non-linear pada konsentrasi tinggi, algoritma *Machine Learning* seperti

Random Forest Regression atau *Neural Networks* dapat memodelkan hubungan tersebut dengan jauh lebih akurat dibandingkan regresi linear sederhana (Lu et al., 2020).

B. *Unsupervised Learning*: Menyingkap Struktur yang Tersembunyi Berbeda dengan sebelumnya, *Unsupervised Learning* bekerja pada data yang tidak memiliki label. Algoritma dibiarkan mengeksplorasi data sendiri untuk menemukan pola, kemiripan, atau anomali yang tersembunyi.

1. **Clustering (Pengelompokan):** Algoritma seperti *K-Means Clustering* membagi data ke dalam kelompok-kelompok berdasarkan kemiripan fitur. Misalnya, dalam pemantauan kualitas sungai secara IoT, algoritma ini dapat secara otomatis mengelompokkan sampel air ke dalam zona "Bersih", "Tercemar Ringan", atau "Tercemar Berat" tanpa peneliti harus menetapkan kriteria kaku di awal. Sistem menemukan sendiri bahwa sampel di zona tertentu memiliki profil konduktivitas dan pH yang serupa (Libicz et al., 2018).
2. **Reduksi Dimensi:** Sensor kimia modern sering kali menghasilkan data berdimensi tinggi (misalnya spektrum penuh dari 300-800 nm). Terlalu banyak data dapat menyebabkan "kutukan dimensi" (*curse of dimensionality*) yang memperlambat pemrosesan. Algoritma seperti *Principal Component Analysis* (PCA) digunakan untuk meringkas ribuan variabel tersebut menjadi beberapa variabel utama saja tanpa menghilangkan informasi pentingnya. PCA adalah alat bantu visualisasi yang paling kuat dalam kemometrika untuk melihat distribusi sampel dalam ruang koordinat yang lebih sederhana (Brereton, 2018).

C. Alur Kerja (Workflow) ML pada Data Sensor Untuk mengimplementasikan ML pada perangkat seperti ESP32, mahasiswa harus mengikuti protokol riset yang sistematis:

- **Data Acquisition:** Mengumpulkan ribuan titik data dari sensor kimia.
- **Preprocessing:** Melakukan pembersihan data, normalisasi (skalasi data agar berada pada rentang yang sama), dan filtrasi derau.
- **Feature Engineering:** Memilih fitur mana yang paling informatif (misal: bukan hanya nilai tegangan, tapi juga laju perubahan tegangan terhadap waktu).
- **Model Training:** Melatih model pada komputer (menggunakan Python/Scikit-Learn) dan kemudian melakukan *deployment* model yang sudah "pintar" tersebut ke dalam mikrokontroler menggunakan pustaka seperti *EloquentTinyML* (Guilherme et al., 2022).

D. Tantangan Metrologi dan Bias Algoritma Keandalan model ML sangat bergantung pada kualitas data pelatihan (*Garbage In, Garbage Out*). Jika sensor kimia yang digunakan tidak dikalibrasi dengan benar, maka model ML yang dihasilkan akan membawa bias sistematis yang berbahaya. Dalam sains, kejujuran data adalah manifestasi dari integritas iman. Allah mengingatkan agar kita tidak mencampuradukkan kebenaran dengan kebatilan dalam pelaporan informasi:

وَلَا تَلْبِسُوا الْحَقَّ بِالْبَاطِلِ وَتَكُنُوا لِلْحَقِّ وَأَنْتُمْ تَعْلَمُونَ

"Dan janganlah kamu campur adukkan yang hak dengan yang bathil dan janganlah kamu sembunyikan yang hak itu, sedang kamu mengetahui." (QS. Al-Baqarah: 42)

Dalam riset kimia berbasis AI, menyembunyikan data anomali atau melakukan *cherry-picking* pada hasil pelatihan model adalah bentuk pengkhianatan ilmiah. Peneliti harus melaporkan metrik performa model seperti *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, dan *F1-Score* secara transparan untuk memastikan bahwa teknologi ini benar-benar membawa kemaslahatan, bukan sekadar "kosmetik" digital dalam publikasi ilmiah.

9.3. Pemrosesan Sinyal dan Reduksi Dimensi: Aplikasi Principal Component Analysis (PCA) pada Spektroskopi Digital

Dalam instrumentasi kimia modern, sebuah alat pemindai spektrum (spektrofotometer) dapat menghasilkan ratusan hingga ribuan titik data untuk satu kali pengukuran sampel tunggal. Jika kita mengukur absorbansi pada rentang 400 nm hingga 700 nm dengan resolusi 1 nm, kita mendapatkan 301 variabel per sampel. Tantangan "banjir data" ini menuntut kemampuan untuk memisahkan antara informasi yang bermakna (sinyal) dengan gangguan yang tidak relevan (derau). Kemampuan untuk membedakan antara yang hak (esensi) dan yang batil (distorsi) merupakan prinsip hikmah yang diajarkan dalam Al-Qur'an:

تَبَارَكَ الَّذِي نَزَّلَ الْفُرْقَانَ عَلَى عَبْدِهِ لِيَكُونَ لِلْعَالَمِينَ نَذِيرًا

"Mahasuci Allah yang telah menurunkan Al-Furqan (pembeda) kepada hamba-Nya, agar dia menjadi pemberi peringatan kepada seluruh alam." (QS. Al-Furqan: 1)

Sebagaimana Al-Furqan berfungsi memisahkan kebenaran dari kebatilan, teknik pemrosesan sinyal dan reduksi dimensi dalam kemometrika berfungsi sebagai instrumen pembeda yang mengekstraksi informasi kimiawi murni dari tumpukan data digital yang kompleks.

A. Pra-pemrosesan Sinyal: Menghilangkan Derau Digital Data sensor kimia yang masuk ke Arduino atau ESP32 sering kali membawa ralat acak akibat fluktuasi tegangan atau interferensi elektromagnetik. Sebelum data dianalisis lebih lanjut, langkah pra-pemrosesan (*preprocessing*) menjadi wajib. Salah satu metode yang paling efektif adalah filter **Savitzky-Golay**. Berbeda dengan rata-rata bergerak (*moving average*) sederhana yang cenderung "melenyapkan" puncak spektrum yang tajam, filter Savitzky-Golay menggunakan algoritma *least-squares polynomial smoothing* untuk mempertahankan bentuk asli spektrum sambil mereduksi derau frekuensi tinggi secara signifikan (Brereton, 2018).

B. Dasar Matematika PCA: Mengekstraksi Varians Maksimal *Principal Component Analysis* (PCA) adalah teknik transformasi linear yang mengubah sekumpulan variabel yang mungkin berkorelasi menjadi sekumpulan nilai variabel linear yang tidak berkorelasi yang disebut komponen utama (*Principal Components* - PC). Secara matematis, PCA melakukan dekomposisi matriks data X menjadi:

$$X = T * P_{\text{transpose}} + E$$

Dimana:

- **X**: Matriks data asli (sampel x panjang gelombang).

- **T (Scores):** Posisi sampel dalam ruang koordinat baru yang lebih sederhana.
- **P (Loadings):** Kontribusi setiap panjang gelombang terhadap pembentukan komponen utama.
- **E (Residuals):** Informasi yang dianggap sebagai derau atau varians yang tidak signifikan.

Prinsip utama PCA adalah rotasi sumbu koordinat. PC1 (Komponen Utama Pertama) diarahkan pada arah varians terbesar dalam data. PC2 kemudian diletakkan tegak lurus (*orthogonal*) terhadap PC1 pada arah varians terbesar berikutnya. Dengan cara ini, sering kali 95% hingga 99% informasi dari ratusan panjang gelombang dapat diringkas hanya dalam 2 atau 3 PC saja (Wold et al., 1987).

C. Interpretasi Score Plot dan Loading Plot Kekuatan PCA terletak pada kemampuannya untuk memvisualisasikan data multidimensi dalam bentuk grafik dua dimensi yang intuitif:

1. **Score Plot (Analisis Sampel):** Digunakan untuk melihat pengelompokan (*clustering*) antar sampel. Jika kita mengukur sampel kopi dari berbagai daerah, *score plot* akan menunjukkan secara otomatis apakah kopi Lampung terpisah kelompoknya dari kopi Aceh berdasarkan profil kimiawi spektrumnya. Sampel yang berdekatan memiliki kemiripan kimiawi, sementara yang berjauhan memiliki perbedaan signifikan (Bro & Smilde, 2014).
2. **Loading Plot (Analisis Variabel):** Digunakan untuk mengidentifikasi variabel (panjang gelombang) mana yang paling bertanggung jawab atas pemisahan kelompok tersebut. Jika *score plot* memisahkan sampel berdasarkan kadar kafein, maka *loading plot* akan menunjukkan puncak pada panjang gelombang di mana kafein menyerap cahaya secara maksimal.

Aplikasi PCA pada spektroskopi digital berbasis mikrokontroler memungkinkan kita melakukan autentikasi bahan pangan, deteksi pemalsuan obat, hingga pemantauan kualitas lingkungan secara cepat tanpa perlu melakukan analisis kimia basah yang rumit di laboratorium pusat.

Berikut adalah simulasi interaktif untuk memahami bagaimana reduksi dimensi bekerja pada data spektrum kimia:

JSON

```
{
  "component": "LlmGeneratedComponent",
  "props": {
    "height": "600px",
    "prompt": "Buatlah simulator interaktif 'Reduksi Dimensi PCA pada Spektroskopi'. Objektif: Memvisualisasikan bagaimana data spektrum yang kompleks diringkas menjadi dua komponen utama (PC1 dan PC2). Strategy: Scatter Plot & Line Chart. Inputs: 1) Dropdown Jenis Sampel (Misal: Minyak Zaitun Murni, Minyak Zaitun Campuran, Minyak Goreng Biasa). 2) Slider Level Noise (0-10%). Behavior: Tampilkan grafik spektrum absorbansi (400-700 nm) di sebelah kiri. Di sebelah kanan, tampilkan 'PCA Score Plot' (PC1 vs PC2). Saat user memilih jenis sampel, spektrum di kiri akan berubah sedikit (simulasi variasi biologis), dan titik data baru akan muncul di Score Plot. Jika sampel sejenis, titik-titik tersebut akan mengelompok (cluster). Jika berbeda jenis, kelompok titik akan terpisah jauh. Visualisasikan Loadings sebagai grafik batang di bawah yang menunjukkan panjang gelombang mana yang paling dominan. Gunakan bahasa Indonesia."
  }
}
```

9.4. Prediksi Sifat Molekuler menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan (*Artificial Neural Networks*) dan Regresi Non-Linear

Ketika hubungan antara sinyal sensor dan sifat kimiawi sampel tidak lagi dapat dijelaskan melalui garis lurus, kita memerlukan pendekatan komputasi yang meniru cara kerja biologis dalam memproses informasi yang kompleks. Jaringan Syaraf Tiruan (*Artificial Neural Networks* - ANN) adalah arsitektur komputasi yang terinspirasi dari struktur neuron pada otak manusia, yang mampu menangkap korelasi non-linear yang sangat rumit antara variabel masukan dan luaran. Kemampuan untuk belajar dari pola dan membuat prediksi yang akurat ini merupakan bagian dari kesempurnaan ciptaan yang diberikan kepada manusia untuk mengelola ilmu pengetahuan. Allah *Subhanahu wa Ta'ala* berfirman:

عَلَّمَ الْإِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ

"Dia mengajarkan kepada manusia apa yang tidak diketahuinya." (QS. Al-Alaq: 5)

Dalam konteks kemometrika modern, "mengajarkan apa yang tidak diketahui" dapat direfleksikan dalam proses pelatihan model ANN. Mesin "diajarkan" untuk mengenali hubungan tersembunyi antara data spektral yang tampak acak dengan konsentrasi molekul tertentu, sehingga pada akhirnya ia mampu memprediksi sifat molekul dari sampel yang belum pernah ditemuinya sebelumnya.

A. Arsitektur Perceptron dan Deep Learning Sederhana dalam Kimia Sebuah ANN terdiri dari lapisan-lapisan unit pemroses yang saling terhubung. Lapisan masukan (*input layer*) menerima data dari sensor (misalnya nilai absorbansi pada berbagai panjang gelombang). Data ini diteruskan ke satu atau lebih lapisan tersembunyi (*hidden layers*) yang melakukan transformasi matematika melalui fungsi aktivasi (seperti *Sigmoid* atau *ReLU*), dan akhirnya menghasilkan prediksi pada lapisan luaran (*output layer*).

Dalam analisis kimia, ANN sangat unggul dalam menangani masalah **Matriks Sampel Kompleks**. Misalnya, jika kita ingin memprediksi kadar glukosa dalam sampel urin menggunakan sensor optik, keberadaan zat lain seperti urea dan asam urat akan mengganggu pembacaan. Regresi linear konvensional akan menghasilkan galat yang besar. Namun, ANN dapat dilatih untuk mengabaikan sinyal pengganggu tersebut dan hanya fokus pada fitur-fitur unik yang berkorelasi dengan glukosa melalui proses pembobotan (*weighting*) yang dioptimasi selama fase *backpropagation* (Gasteiger & Zupan, 2018).

B. Mengatasi Non-Linearitas Instrumentasi Banyak sensor kimia murah yang kita bangun memiliki keterbatasan fisis berupa respons yang non-linear. Hukum Beer-Lambert, misalnya, sering kali "bengkok" pada konsentrasi tinggi. Alih-alih membuang data tersebut atau memaksanya menjadi linear, kita dapat menggunakan ANN sebagai model regresi non-linear yang sangat fleksibel.

Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ANN dalam pemodelan respons sensor gas MQ untuk mendeteksi campuran gas volatil memberikan akurasi yang jauh lebih tinggi (RMSEP yang lebih rendah) dibandingkan dengan metode *Partial Least Squares* (PLS) klasik (Zhou et al., 2019). Hal

ini karena ANN tidak mengasumsikan distribusi data tertentu dan mampu memetakan ruang fitur yang sangat berdimensi tinggi ke dalam estimasi kuantitatif yang presisi.

C. Optimasi Parameter melalui Konvergensi Digital Proses pelatihan ANN adalah proses iteratif untuk meminimalkan fungsi kerugian (*loss function*). Ini adalah perwujudan dari ketelitian dalam riset. Setiap bobot sinyal disesuaikan sedikit demi sedikit hingga mencapai konvergensi—titik di mana model memberikan prediksi dengan kesalahan minimal.

Bagi mahasiswa S1, implementasi ANN kini tidak lagi memerlukan superkomputer. Pustaka seperti *TensorFlow Lite* atau *EloquentTinyML* memungkinkan model yang telah dilatih di komputer (menggunakan Python) untuk dikompresi dan ditanamkan langsung ke dalam mikrokontroler ESP32. Dengan demikian, kita dapat menciptakan instrumen "Edge AI" yang mampu melakukan analisis molekuler tingkat lanjut secara otonom di lapangan tanpa ketergantungan pada koneksi internet (Guilherme et al., 2022).

D. Integritas Prediksi dan Tanggung Jawab Ilmiah Meskipun ANN sangat kuat, ia sering dianggap sebagai "kotak hitam" (*black box*) karena sulitnya memahami bagaimana keputusan diambil di dalam lapisan tersembunyi. Dalam sains Islam, setiap klaim kebenaran harus dapat dipertanggungjawabkan dan memiliki landasan yang jelas. Oleh karena itu, peneliti kimia tidak boleh hanya sekadar "percaya" pada hasil AI.

Validasi model menggunakan set data eksternal (*test set*) dan analisis *Root Mean Square Error of Prediction* (RMSEP) adalah wajib secara internasional untuk menjamin bahwa prediksi sifat molekuler tersebut bukan hasil kebetulan atau *overfitting*. Penguasaan atas teknologi ini adalah amanah untuk menyingkap kebenaran materi demi kemaslahatan, bukan untuk memanipulasi hasil demi kepentingan publikasi semata (Lavine & Workman, 2013).

9.5. Etika Digital dan Integrasi Kebenaran Wahyu dalam Interpretasi Data Kimia Berbasis AI

Integrasi kecerdasan buatan dalam kimia analitik membawa kita pada dimensi baru tanggung jawab ilmiah. AI bukan sekadar alat hitung, melainkan entitas yang mampu memengaruhi pengambilan keputusan kritis, mulai dari diagnosis kualitas air minum hingga validasi keamanan pangan. Di balik kecanggihan algoritma, terdapat celah etika yang menuntut integritas moral peneliti. Dalam perspektif Islam, ilmu pengetahuan tidak pernah bebas nilai (*value-free*). Penggunaan teknologi harus selaras dengan prinsip amanah dan kejujuran dalam menyampaikan kebenaran, sebagaimana firman Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

وَلَا تَقْفُ مَا لَيْسَ لَكَ بِهِ عِلْمٌ إِنَّ السَّمْعَ وَالْبَصَرَ وَالْفُؤَادَ كُلُّ أُولَٰئِكَ كَانَ عَنْهُ مَسْئُولًا

"Dan janganlah kamu mengikuti apa yang kamu tidak mempunyai pengetahuan tentangnya. Sesungguhnya pendengaran, penglihatan dan hati, semuanya itu akan diminta pertanggungjawabannya." (QS. Al-Isra: 36)

Ayat ini memberikan dasar bagi etika digital dan data: seorang peneliti dilarang hanya "ikut-ikutan" menggunakan hasil AI tanpa memahami proses di baliknya, serta wajib mempertanggungjawabkan setiap input dan output data yang dihasilkan oleh sistem.

A. Fenomena "Black Box" dan Urgensi Transparansi Algoritma Tantangan etika terbesar dalam AI adalah sifat "kotak hitam" (*black box*) pada model *Deep Learning*. Sering kali, model memberikan akurasi prediksi yang sangat tinggi, namun peneliti tidak memahami variabel mana yang menjadi penentu utama. Dalam kimia, ini berbahaya; kita bisa saja mendapatkan hasil benar dari alasan yang salah (*artifactual correlation*).

Etika AI menuntut adanya **Explainable AI (XAI)**. Peneliti berkewajiban menggunakan teknik visualisasi (seperti *Saliency Maps* atau *Feature Importance*) untuk memastikan bahwa AI memang "melihat" gugus fungsi kimia yang relevan, bukan sekadar derau latar belakang. Transparansi ini adalah bentuk kejujuran intelektual untuk memastikan bahwa teknologi tidak mengaburkan realitas fisis materi (Floridi, 2019).

B. Mitigasi Bias Data dan Integritas Analitik Algoritma AI tidak memiliki moral; ia hanya mencerminkan kualitas data yang diberikan kepadanya. Jika data pelatihan (*training set*) hanya berasal dari satu kondisi laboratorium tertentu, model tersebut akan memiliki bias dan gagal saat diaplikasikan di lapangan. Bias data dalam kimia analitik dapat menyebabkan kesalahan interpretasi yang merugikan publik.

Integritas dalam mengelola data pelatihan adalah manifestasi dari sifat *Siddiq* (jujur) dan *Amanah* (terpercaya). Menghapus data anomali (*outliers*) tanpa alasan saintifik demi mendapatkan akurasi model yang tampak sempurna adalah bentuk manipulasi ilmiah. Peneliti harus menyadari bahwa AI adalah *wasilah* (sarana) untuk mendekati kebenaran materi, bukan alat untuk membenarkan prasangka subjektif peneliti (Taddeo, 2018).

C. AI sebagai Pembantu, Bukan Pengganti Kebenaran Wahyu Secara epistemologis, kita harus menempatkan AI pada posisi yang tepat. AI bekerja dengan pola statistik dan probabilitas, sementara kebenaran absolut hanya milik Allah. Integrasi kebenaran wahyu dalam interpretasi data AI berarti menempatkan hasil komputasi di bawah payung etika kemanusiaan dan spiritual.

Teknologi harus digunakan untuk sebesar-besarnya kemaslahatan umat (*rahmatan lil alamin*). Sebagai contoh, pengembangan instrumen AI murah untuk mendeteksi kontaminan air di daerah terpencil adalah perwujudan dari pengamalan ilmu yang bermanfaat. Peneliti tidak boleh menjadi hamba bagi algoritma, melainkan harus tetap memiliki kendali kritis atas setiap output digital yang dihasilkan (Lavine & Workman, 2013).

DAFTAR PUSTAKA (BAB 9)

- Brereton, R. G. (2018). *Chemometrics: Data Driven Extraction for Science*. John Wiley & Sons.
- Bro, R., & Smilde, A. K. (2014). Principal component analysis. *Analytical Methods*, 6(9), 2812-2831. <https://doi.org/10.1039/C3AY41907J>
- Floridi, L. (2019). Establishing the rules for AI: Principles, declaration, and guidelines. *Science and Engineering Ethics*, 25(6), 1681-1691.
- Gasteiger, J., & Zupan, J. (2018). *Neural Networks for Chemists: An Introduction*. Wiley-VCH.
- Guilherme, R. J., et al. (2022). Low-cost IoT-based system for remote monitoring of chemical laboratories. *HardwareX*, 11, e00271.
- Lavine, B. K., & Workman, J. (2013). Chemometrics. *Analytical Chemistry*, 85(2), 705-714. <https://doi.org/10.1021/ac3032127>
- Libicz, S., et al. (2018). Unsupervised clustering of water quality data. *Water Research*, 142, 115-126.
- Lu, Y., et al. (2020). Machine learning in analytical chemistry: A review. *Analytica Chimica Acta*, 1135, 11-29. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.08.003>
- Taddeo, M. (2018). Data ethics: The new frontier of moral philosophy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 376(2133), 20180085.
- Wold, S., Esbensen, K., & Geladi, P. (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2(1-3), 37-52.
- Wold, S., Sjöström, M., & Eriksson, L. (2001). PLS-regression: A basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58(2), 109-130.
- Zhou, X., et al. (2019). Machine learning for gas sensors: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 272, 115-125.

BAB 10: KONVERGENSI DIGITAL & MASA DEPAN INSTRUMENTASI KIMIA MANDIRI

IFTITAH (KATA PENGANTAR BAB)

Bab penutup ini merupakan sintesis dari seluruh perjalanan intelektual yang telah kita tempuh, mulai dari pemahaman sensor dasar hingga integrasi kecerdasan buatan. Kita kini berada di ambang era di mana batas-bulan antara dunia fisik, biologis, dan digital semakin memudar—sebuah fenomena yang dikenal sebagai revolusi konvergensi. Dalam konteks kimia analitik, masa depan tidak lagi tentang memiliki alat yang lebih besar, melainkan tentang instrumen yang lebih cerdas, lebih kecil, dan lebih mandiri.

Urgensi pembahasan ini terletak pada pergeseran paradigma dari laboratorium sentralistik menuju laboratorium yang terdesentralisasi dan demokratis. *Gap* riset yang selama ini terjadi antara negara maju dan berkembang, yang disebabkan oleh tingginya biaya instrumentasi, mulai terjembatani oleh gerakan perangkat keras terbuka (*open-source hardware*). Kebaruan ide dalam bab ini adalah penegasan bahwa kedaulatan riset kimia di masa depan akan ditentukan oleh kemampuan peneliti dalam mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu—nano, bio, dan informatika—ke dalam sistem yang terpadu.

Eksplorasi kita terhadap masa depan ini bukan sekadar upaya meramal teknologi, melainkan bentuk refleksi atas tanggung jawab manusia sebagai penjaga keseimbangan alam. Setiap kemajuan teknologi haruslah bermuara pada peningkatan kemaslahatan dan pengabdian kepada Sang Pencipta. Masa depan instrumentasi kimia mandiri adalah masa depan di mana sains menjadi lebih inklusif, transparan, dan berakar pada nilai-nilai etika yang luhur.

10.1. Hakikat Konvergensi Digital: Integrasi Nano-Bio-Info dan Kimia Analitik

Dunia ilmu pengetahuan saat ini sedang mengalami proses penyatuan kembali (*re-convergence*). Jika pada abad-abad sebelumnya ilmu pengetahuan cenderung terkotak-kotak dalam spesialisasi yang sempit, maka abad ke-21 ditandai dengan kembalinya semangat kesatuan ilmu. Dalam perspektif Islam, fenomena ini selaras dengan konsep **Wahdatul 'Ulum** (Kesatuan Ilmu), di mana seluruh cabang pengetahuan, baik yang bersifat *kauniyah* (alam) maupun *qauliyah* (wahyu), bermuara pada satu sumber kebenaran yang sama. Allah **Subhanahu wa Ta'ala** berfirman:

سَنُرِيهِمْ آيَاتِنَا فِي الْأَفَاقِ وَفِي أَنْفُسِهِمْ حَتَّىٰ يَتَبَيَّنَ لَهُمْ أَنَّهُ الْحَقُّ ۖ أَوَلَمْ يَكْفِ بِرَبِّكَ أَنَّهُ عَلَىٰ كُلِّ شَيْءٍ شَهِيدٌ

"Kami akan memperlihatkan kepada mereka tanda-tanda (kekuasaan) Kami di segenap penjuru langit dan pada diri mereka sendiri, sehingga jelaslah bagi mereka bahwa Al-Qur'an itu adalah benar. Tidak cukupkah (bagi kamu) bahwa Tuhanmu menjadi saksi atas segala sesuatu?" (QS. Fussilat: 53)

Konvergensi digital dalam kimia analitik adalah manifestasi dari "tanda-tanda di segenap penjuru" tersebut, di mana teknologi nano, biologi, dan informatika melebur menjadi satu kekuatan transformatif.

A. Sinergi NBIC (Nano-Bio-Info-Cogno) dalam Instrumentasi Konvergensi NBIC merujuk pada integrasi strategis antara empat bidang besar: Nanoteknologi, Bioteknologi, Teknologi Informasi, dan Ilmu Kognitif. Dalam kimia analitik modern, konvergensi ini melahirkan instrumen yang memiliki sensitivitas atomik (Nano), spesifisitas molekuler biologis (Bio), kecepatan pemrosesan digital (Info), dan kemampuan pengambilan keputusan cerdas (Cogno) (Roco & Bainbridge, 2003).

1. **Dimensi Nano:** Penggunaan material nano (seperti *carbon nanotubes* atau *graphene*) pada permukaan sensor yang telah kita bahas di Bab 6 dan 7, memungkinkan batas deteksi (LoD) mencapai tingkat molekul tunggal. Ini adalah "indra" instrumen masa depan yang jauh lebih tajam dari apa pun yang pernah diciptakan sebelumnya.
2. **Dimensi Bio:** Integrasi komponen biologis (enzim, antibodi, atau DNA) sebagai elemen pengenalan (*recognition element*) ke dalam sirkuit elektronik mikrokontroler. Hal ini memungkinkan terciptanya biosensor yang mampu mendeteksi patogen atau biomarker penyakit dengan presisi yang sangat tinggi di lapangan (Grieshaber et al., 2008).
3. **Dimensi Info:** Penggunaan *cloud computing* dan IoT (Bab 8) yang memastikan data dari sensor nano-bio tersebut dapat diakses dan diolah secara kolektif di seluruh dunia.

B. Dari Instrumen Statis ke Sistem Otonom Berkelanjutan Hakikat dari konvergensi ini adalah perubahan sifat instrumen dari alat pasif menjadi sistem otonom. Di masa depan, instrumen kimia mandiri tidak hanya mengukur, tetapi juga mampu melakukan swa-kalibrasi (*self-calibration*) dan swa-perbaikan (*self-repair*).

Prinsip keteraturan dan keseimbangan dalam sistem otonom ini telah diisyaratkan dalam Al-Qur'an mengenai penciptaan alam semesta yang berjalan dengan hukum yang tetap (*sunnatullah*):

الَّذِي خَلَقَ سَبْعَ سَمَاوَاتٍ طِبَاقًا مَّا تَرَى فِي خَلْقِ الرَّحْمَنِ مِنْ تَفَافُوتٍ فَارْجِعِ الْبَصَرَ هَلْ تَرَى مِنْ فُتُورٍ

"Yang menciptakan tujuh langit berlapis-lapis. Tidak akan kamu lihat sesuatu yang tidak seimbang pada ciptaan (Allah) Yang Maha Pengasih. Maka lihatlah sekali lagi, adakah kamu lihat sesuatu yang cacat?" (QS. Al-Mulk: 3)

Instrumen kimia masa depan dirancang untuk mendekati kesempurnaan fungsional ini. Dengan integrasi AI (Bab 9), instrumen dapat mendeteksi "cacat" atau anomali pada sensornya sendiri dan melakukan koreksi algoritmik secara instan, memastikan data yang dihasilkan selalu berada dalam koridor kebenaran metrologis (Urban, 2015).

C. Dampak Epistemologis: Perubahan Wajah Eksperimen Kimia Konvergensi digital mengubah cara kita mendefinisikan eksperimen. Eksperimen kimia tidak lagi terbatas pada interaksi fisik di dalam gelas piala, melainkan mencakup simulasi digital yang terhubung secara *real-time* dengan data fisik (konsep *Digital Twin*).

Peneliti tidak lagi harus berada secara fisik di dalam laboratorium yang berbahaya untuk melakukan titrasi atau analisis gas. Melalui konvergensi, laboratorium hadir di genggaman tangan. Hal ini menuntut pergeseran dalam pendidikan kimia: mahasiswa tidak hanya dilatih untuk terampil memegang pipet, tetapi juga harus mahir dalam memprogram logika instrumen dan memahami arsitektur data (Zambon et al., 2020). Kemandirian instrumen yang kita bangun dengan ESP32 atau Arduino adalah langkah awal menuju kedaulatan sains, di mana pengetahuan tidak lagi terakumulasi pada segelintir elit, melainkan tersebar luas untuk kemaslahatan umat manusia.

10.2. *Lab-on-a-Chip* (LoC) dan Mikrofluidika: Miniaturisasi Instrumen Masa Depan

Perjalanan instrumentasi kimia dari perangkat meja (*benchtop*) yang masif menuju sistem genggam (*handheld*) mencapai puncaknya pada teknologi miniaturisasi total. *Lab-on-a-Chip* (LoC) bukan sekadar pengecilan ukuran fisik instrumen, melainkan sebuah revolusi dalam cara kita memanipulasi materi pada skala mikrometer. Penguasaan atas partikel-partikel terkecil dan ketelitian dalam skala mikro merupakan bentuk penghormatan terhadap presisi penciptaan yang telah diatur oleh Allah *Subhanahu wa Ta'ala*. Sekecil apa pun sebuah sistem, ia tetap berada dalam kendali dan perhitungan-Nya yang sempurna. Allah berfirman:

فَمَنْ يَعْمَلْ مِثْقَالَ ذَرَّةٍ خَيْرًا يَرَهُ * وَمَنْ يَعْمَلْ مِثْقَالَ ذَرَّةٍ شَرًّا يَرَهُ

"Barangsiapa yang mengerjakan kebaikan sebesar dzarrah (biji atom/paling kecil), niscaya dia akan melihat (balasan)nya. Dan barangsiapa yang mengerjakan kejahatan sebesar dzarrah pun, niscaya dia akan melihat (balasan)nya pula." (QS. Az-Zalzalah: 7-8)

Ayat ini menegaskan bahwa dalam pandangan Ilahi, satuan terkecil (*dzarrah*) memiliki nilai dan dampak yang nyata. Dalam kimia analitik, "keadilan" terhadap data diwujudkan melalui teknologi mikrofluidika, di mana setiap tetes reaktan dihitung dan dialirkan dengan presisi mutlak untuk menghasilkan informasi yang akurat.

A. Fenomena Mikrofluidika: Dominasi Gaya Permukaan Ketika kita mereduksi skala saluran aliran dari milimeter ke mikrometer (biasanya 10 hingga 100 mikrometer), hukum fisika yang mendominasi cairan berubah secara drastis. Pada skala makro, gaya inersia dan gravitasi adalah faktor utama. Namun, pada skala mikrofluidika, gaya tegangan permukaan, kapilaritas, dan viskositas menjadi pemain kunci.

Parameter yang paling menentukan dalam desain mikrofluidika adalah **Bilangan Reynolds (Re)**. Secara matematis didefinisikan sebagai:

$$Re = (\rho * v * L) / \eta$$

Di mana:

- **ρ (rho):** Massa jenis cairan.
- **v :** Kecepatan aliran.
- **L :** Dimensi karakteristik saluran.

- **η (eta):** Viskositas dinamik.

Pada sistem *Lab-on-a-Chip*, nilai Re biasanya sangat rendah ($Re < 1$). Hal ini menyebabkan aliran cairan bersifat **Laminar** sempurna. Dalam aliran laminar, dua cairan yang bertemu dalam satu saluran tidak akan bercampur secara turbulen, melainkan hanya akan bercampur melalui proses difusi molekuler pada antarmuka keduanya. Fenomena ini memungkinkan peneliti untuk menciptakan gradien konsentrasi yang sangat stabil dan melakukan pemisahan sel atau partikel dengan tingkat selektivitas yang tidak mungkin dicapai pada instrumen konvensional (Whitesides, 2006).

B. Arsitektur LoC: Integrasi Sensor ke dalam Keping Mikro Sebuah sistem LoC yang ideal mengintegrasikan seluruh tahapan analisis laboratorium—mulai dari preparasi sampel, pencampuran, reaksi, pemisahan, hingga deteksi—ke dalam satu keping (chip) tunggal yang berukuran tidak lebih besar dari kartu kredit.

1. **Material Fabrikasi:** Awalnya, LoC dibuat menggunakan kaca atau silikon (warisan teknologi semikonduktor). Namun, riset modern beralih ke polimer elastis seperti **Polydimethylsiloxane (PDMS)** melalui teknik *soft lithography*. PDMS bersifat transparan, biokompatibel, dan memungkinkan pembuatan katup serta pompa mikro yang fleksibel (Sackmann et al., 2014).
2. **Transduksi Terintegrasi:** Tantangan terbesar adalah bagaimana menanamkan sensor ke dalam saluran mikro tersebut. Di sinilah konvergensi dengan mikrokontroler seperti ESP32 berperan. Sensor konduktivitas mikro (Bab 7) atau elektroda pH mikro dapat dicetak langsung pada keping menggunakan tinta konduktif atau teknik deponasi uap kimia.
3. **Efisiensi Sumber Daya:** Penggunaan LoC secara dramatis mengurangi konsumsi reagen (dari mililiter menjadi mikroliter atau nanoliter). Hal ini tidak hanya menekan biaya operasional, tetapi juga meminimalkan limbah kimia berbahaya, selaras dengan prinsip *Green Chemistry* dan tanggung jawab lingkungan dalam Islam.

C. Point-of-Care Testing (POCT) dan Diagnostik Masa Depan Miniaturisasi instrumen membawa laboratorium langsung ke hadapan pasien atau ke lokasi bencana. Sistem POCT berbasis LoC memungkinkan deteksi penyakit menular, biomarker kanker, atau polutan air dalam waktu hitungan menit tanpa perlu mengirim sampel ke laboratorium pusat yang jauh.

Kemandirian dalam diagnostik ini merupakan langkah krusial dalam kedaulatan kesehatan. Dengan menggunakan ESP32 sebagai unit pemroses sinyal dari keping mikrofluidik, kita dapat membuat alat pendeteksi yang murah, akurat, dan dapat terhubung ke jaringan IoT untuk pemetaan epidemiologi secara *real-time*. Kecepatan dalam memberikan pertolongan medis atau informasi keamanan pangan adalah manifestasi dari nilai kemanusiaan. Rasulullah *Shallallahu 'alaihi wa sallam* bersabda:

خَيْرُ النَّاسِ أَنْفَعُهُمْ لِلنَّاسِ

"Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia (lainnya)." (HR. Ahmad, No. 21487).

Teknologi LoC adalah sarana (*wasilah*) untuk menjadi manusia yang paling bermanfaat di era digital, dengan menyediakan akses terhadap analisis kimia yang canggih bagi mereka yang paling membutuhkan (Urban, 2015).

D. Tantangan Teknis: Penguapan dan Penyumbatan Meskipun menjanjikan, miniaturisasi total menghadapi kendala fisik yang nyata. Pada skala mikrometer, rasio luas permukaan terhadap volume (surface-to-volume ratio) menjadi sangat besar. Hal ini menyebabkan cairan sangat mudah menguap dan gelembung udara kecil dapat menyumbat seluruh sistem. Mahasiswa dan peneliti dituntut untuk memiliki ketelitian tinggi dalam desain pneumatik dan kontrol aliran untuk memastikan instrumen mandiri ini tetap bekerja secara reliabel (Kirby, 2010).

10.3. Demokratisasi Sains: Gerakan *Open-Source Hardware* dan Kedaulatan Riset

Selama berpuluh-puluh tahun, kemajuan riset kimia analitik di negara-negara berkembang sering kali terhambat oleh ketergantungan absolut pada instrumen laboratorium buatan vendor internasional yang bersifat tertutup (*proprietary*). Fenomena "kotak hitam" (*black box*) ini tidak hanya membebani anggaran riset dengan biaya perolehan dan perawatan yang fantastis, tetapi juga membelenggu kreativitas peneliti karena instrumen tersebut tidak dapat dimodifikasi atau diperbaiki secara mandiri. Gerakan *Open-Source Hardware* (OSH) muncul sebagai antitesis terhadap monopoli teknologi ini, menawarkan paradigma baru di mana desain instrumen dibagikan secara bebas untuk dipelajari, dimodifikasi, dan diproduksi oleh siapa saja.

Semangat berbagi ilmu dan memutus belenggu ketergantungan ini selaras dengan prinsip-prinsip Islam yang memandang ilmu pengetahuan sebagai amanah kolektif untuk kemaslahatan umat. Ilmu yang bermanfaat tidak boleh disembunyikan demi kepentingan komersial semata yang merugikan akses publik terhadap kebenaran. Rasulullah *Shallallahu 'alaihi wa sallam* memberikan peringatan keras terhadap upaya penyembunyian ilmu:

مَنْ سُئِلَ عَنْ عِلْمٍ فَكَتَمَهُ أَلْجَمَهُ اللَّهُ بِلْجَامٍ مِنْ نَارٍ يَوْمَ الْقِيَامَةِ

"Barangsiapa yang ditanya tentang suatu ilmu lalu ia menyembunyikannya, maka Allah akan mengekangnya dengan kekang dari api neraka pada hari kiamat." (HR. Abu Daud, No. 3658).

Dalam konteks modern, "menyembunyikan ilmu" dapat diinterpretasikan sebagai penggunaan proteksi paten yang berlebihan pada desain dasar alat ukur yang menghalangi negara-negara miskin untuk mengakses teknologi dasar kesehatan dan lingkungan. Demokratisasi sains melalui OSH adalah jalan keluar untuk memastikan bahwa "kekang" keterbelakangan teknologi dapat dilepaskan melalui transparansi dan kolaborasi global.

A. Filosofi Perangkat Keras Terbuka dalam Kimia Analitik *Open-Source Hardware* dalam kimia bukan berarti memberikan alat secara gratis, melainkan memberikan akses bebas terhadap cetak biru (*blueprint*), skema elektronik, kode sumber perangkat lunak, dan daftar komponen (*Bill of Materials*). Filosofi ini mengubah instrumen dari "kotak hitam" yang misterius menjadi "kotak kaca" yang transparan.

Joshua Pearce (2012) dalam literturnya yang sangat berpengaruh, *Open-Source Lab*, menjelaskan bahwa penggunaan perangkat keras terbuka dapat mereduksi biaya peralatan laboratorium hingga 90% hingga 99%. Sebagai contoh, sebuah spektrofotometer komersial yang berharga puluhan juta rupiah kini dapat direplikasi menggunakan sensor digital (seperti yang dibahas pada Bab 5), mikrokontroler ESP32, dan bodi hasil cetak 3D dengan biaya hanya beberapa ratus ribu rupiah tanpa mengorbankan akurasi analitik secara signifikan (Pearce, 2012).

B. Kedaulatan Riset dan Kemandirian Bangsa Kedaulatan riset adalah kemampuan sebuah bangsa untuk menentukan arah penelitiannya sendiri tanpa didekte oleh ketersediaan alat atau suku cadang dari luar negeri. OSH memberikan kekuatan bagi peneliti untuk melakukan kustomisasi instrumen sesuai dengan kebutuhan lokal yang unik. Misalnya, pengembangan sensor kualitas air berbasis IoT (Bab 8) yang disesuaikan khusus untuk karakteristik sungai-sungai di Indonesia.

Allah *Subhanahu wa Ta'ala* menjanjikan derajat yang tinggi bagi mereka yang beriman dan berilmu, dan kemandirian melalui ilmu adalah jalan menuju kemuliaan tersebut:

يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ

"...Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat..." (QS. Al-Mujadilah: 11).

Derajat yang tinggi ini dapat dicapai ketika sebuah komunitas ilmuwan mampu memproduksi alat ukurnya sendiri (*scientific sovereignty*). Dengan OSH, jika sebuah alat rusak, peneliti tidak perlu menunggu berbulan-bulan untuk teknisi luar negeri; mereka dapat memperbaikinya sendiri karena mereka memiliki akses penuh terhadap skema desainnya (Gibb, 2014).

C. Sinergi 3D Printing dan Fabrikasi Digital Komponen kunci dari kedaulatan riset masa depan adalah konvergensi antara OSH dan fabrikasi digital, khususnya *3D Printing*. Sebagian besar biaya instrumen kimia terletak pada wadah optik, pemegang sensor, dan sistem mekanik presisi. Dengan printer 3D, desain pemegang kuvet atau kamar gas (Bab 6) dapat diunduh dari repositori daring seperti GitHub atau Thingiverse, lalu dicetak dalam hitungan jam (Urban, 2015).

Kemudahan dalam memproduksi dan menyebarkan desain instrumen ini merupakan bentuk sedekah jariyah digital. Setiap desain instrumen yang dibagikan secara terbuka oleh seorang peneliti dan kemudian digunakan oleh peneliti lain untuk menemukan solusi bagi masalah lingkungan atau kesehatan, akan menjadi aliran pahala yang tidak terputus. Rasulullah *Shallallahu 'alaihi wa sallam* bersabda:

إِذَا مَاتَ الْإِنْسَانُ انْقَطَعَ عَنْهُ عَمَلُهُ إِلَّا مِنْ ثَلَاثَةٍ إِلَّا مِنْ صَدَقَةٍ جَارِيَةٍ أَوْ عِلْمٍ يُنْتَفَعُ بِهِ أَوْ وَلَدٍ صَالِحٍ يَدْعُو لَهُ

"Apabila manusia itu meninggal dunia, maka terputuslah amalnya kecuali tiga perkara: sedekah jariyah, ilmu yang bermanfaat, atau anak shalih yang mendoakannya." (HR. Muslim, No. 1631).

D. Tantangan Etika dan Standarisasi Demokratisasi sains juga membawa tantangan berupa validasi. Karena siapa pun dapat membuat alat, bagaimana kita menjamin hasilnya akurat? Di sinilah peran komunitas riset internasional untuk melakukan *peer-review* terhadap desain

perangkat keras, sama seperti melakukan *peer-review* terhadap artikel jurnal. Standarisasi melalui publikasi di jurnal-jurnal khusus perangkat keras terbuka (seperti *HardwareX* atau *Journal of Open Hardware*) menjadi sangat krusial untuk memastikan bahwa instrumen mandiri ini memenuhi kriteria saintifik yang ketat (Baden et al., 2015).

Melalui gerakan OSH, laboratorium kimia masa depan tidak lagi dibatasi oleh dinding-dinding institusi kaya. Sains menjadi milik bersama, transparan, dan otonom—sebuah visi tentang kedaulatan ilmu pengetahuan yang didedikasikan untuk pelayanan kemanusiaan secara universal.

10.4. Visi Laboratorium Tanpa Dinding: Realitas Virtual (VR) dan Augmentasi Digital

Integrasi teknologi imersif ke dalam ranah kimia analitik menandai lahirnya paradigma "Laboratorium Tanpa Dinding". Jika teknologi IoT (Bab 8) memberikan kemampuan untuk memantau data dari jarak jauh, maka Realitas Virtual (*Virtual Reality* - VR) dan Realitas Tertambah (*Augmented Reality* - AR) memberikan kemampuan untuk "hadir" dan "berinteraksi" di dalam ruang molekuler tersebut. Perluasan persepsi manusia melalui teknologi ini merupakan manifestasi dari upaya menyingkap tabir-tabir kebenaran materi yang selama ini tersembunyi dari indra penglihatan manusia. Kemampuan manusia untuk melihat melampaui keterbatasan fisik adalah anugerah intelektual yang besar, sebagaimana isyarat dalam firman Allah *Subhanahu wa Ta'ala*:

لَا تَدْرِكُهُ الْأَبْصَارُ وَهُوَ يُدْرِكُ الْأَبْصَارَ وَهُوَ اللَّطِيفُ الْخَبِيرُ

"Dia tidak dapat dicapai oleh penglihatan mata, sedang Dia dapat melihat segala yang kelihatan; dan Dialah Yang Mahahalus lagi Maha Mengetahui." (QS. Al-An'am: 103)

Secara teologis, ayat ini menegaskan kemahakuasaan Allah dalam melihat segala sesuatu yang paling halus sekalipun (*Al-Lathif*). Bagi manusia, teknologi VR dan AR bertindak sebagai instrumen bantuan untuk mencoba memahami struktur-struktur halus (mikroskopis-molekuler) yang tidak terjangkau oleh mata telanjang, namun nyata keberadaannya. Laboratorium masa depan tidak lagi dibatasi oleh koordinat geografis, melainkan oleh sejauh mana data digital dapat divisualisasikan secara imersif.

A. Simulasi Imersif dan Keamanan Laboratorium Salah satu tantangan terbesar dalam pendidikan kimia analitik adalah risiko keselamatan saat menangani zat berbahaya, radioaktif, atau instrumen berharga mahal. VR memungkinkan terciptanya lingkungan laboratorium digital yang sepenuhnya aman namun memiliki tingkat realisme yang tinggi. Mahasiswa dapat melakukan kesalahan, seperti mencampurkan reaktan yang tidak kompatibel atau merusak kolom kromatografi mahal, tanpa konsekuensi fisik yang nyata, namun tetap mendapatkan umpan balik analitik yang benar berdasarkan hukum-hukum termodinamika yang telah diprogram ke dalam mesin simulasi (Potkonjak et al., 2016).

Studi menunjukkan bahwa pembelajaran kimia melalui lingkungan virtual meningkatkan retensi kognitif secara signifikan karena melibatkan keterlibatan sensorik yang lebih luas dibandingkan sekadar membaca diagram di buku teks. Realitas virtual memungkinkan peneliti untuk "masuk"

ke dalam struktur kristal atau protein yang sedang dianalisis, memanipulasi ikatan secara manual, dan melihat respons energi secara instan melalui visualisasi digital yang terintegrasi (Merchant et al., 2014).

B. Augmentasi Digital: Menampilkan Data di Atas Realitas Fisik Berbeda dengan VR yang menciptakan dunia baru, *Augmented Reality* (AR) bekerja dengan cara menumpangkan informasi digital di atas dunia nyata. Dalam laboratorium kimia mandiri yang kita bangun, AR memberikan dimensi baru dalam interaksi instrumen.

Bayangkan seorang peneliti mengenakan kacamata pintar (*Smart Glasses*) saat melakukan titrasi. Melalui sensor pH dan suhu berbasis ESP32 (Bab 3 dan 4), data *real-time* tidak hanya muncul di layar LCD kecil, tetapi melayang secara hologram tepat di atas gelas piala yang sedang digunakan. Informasi mengenai molaritas, grafik laju reaksi, hingga peringatan bahaya muncul secara otomatis melalui pengenalan objek berbasis AI. Konvergensi ini memastikan konsentrasi peneliti tetap terfokus pada sampel fisik, sementara kebutuhan data analitik terpenuhi secara otomatis melalui lapisan augmentasi (Zambon et al., 2020).

C. Konsep Digital Twin dan Kolaborasi Lintas Batas Masa depan instrumentasi kimia mandiri akan sangat bergantung pada konsep **Digital Twin** (Kembaran Digital). Sebuah instrumen fisik yang berada di satu negara (misalnya sistem pemantauan air di Sungai Nil) memiliki kembaran digital yang identik di ruang virtual. Peneliti dari seluruh penjuru dunia dapat mengakses kembaran digital tersebut, melihat data yang sama, dan melakukan kolaborasi riset tanpa harus melakukan perjalanan fisik.

Visi "Laboratorium Tanpa Dinding" ini merupakan perwujudan dari semangat ukhuwah ilmiah global. Pengetahuan menjadi milik kolektif manusia yang dapat diakses secara transparan. Hal ini selaras dengan perintah untuk saling mengenal dan bekerja sama demi kemaslahatan:

يَا أَيُّهَا النَّاسُ إِنَّا خَلَقْنَاكُمْ مِنْ ذَكَرٍ وَأُنْثَىٰ وَجَعَلْنَاكُمْ شُعُوبًا وَقَبَائِلَ لِتَعَارَفُوا

"Wahai manusia! Sungguh, Kami telah menciptakan kamu dari seorang laki-laki dan seorang perempuan, kemudian Kami jadikan kamu berbangsa-bangsa dan bersuku-suku agar kamu saling mengenal..." (QS. Al-Hujurat: 13)

Dalam ranah riset, "saling mengenal" (*li-ta'arafu*) mencakup pertukaran data dan kolaborasi melalui teknologi imersif untuk menyelesaikan masalah-masalah global seperti krisis air bersih atau polusi udara. Laboratorium tanpa dinding yang didukung oleh VR/AR memastikan bahwa kemajuan kimia analitik tidak lagi menjadi hak istimewa negara maju, melainkan menjadi cahaya ilmu yang menerangi seluruh penjuru bumi (Urban, 2015).

10.5. Khulasah: Refleksi Teologis tentang Masa Depan Ilmu Pengetahuan dan Peradaban Manusia

Penulisan buku ini, yang dimulai dari pengenalan elektronika dasar hingga integrasi kecerdasan buatan dalam kimia analitik, bukanlah sekadar panduan teknis perakitan instrumen. Lebih dari itu, ini adalah sebuah manifesto tentang kemandirian intelektual dan spiritual di era digital. Kita telah

melihat bagaimana sensor-sensor yang kita bangun dengan tangan sendiri mampu menyingkap rahasia molekuler yang selama ini tersembunyi. Namun, di balik setiap baris kode program dan setiap sinyal elektrik yang terukur, terdapat sebuah pesan agung tentang keteraturan alam semesta yang menuntut pengakuan akan eksistensi Sang Pencipta.

Masa depan ilmu pengetahuan tidaklah bergerak secara acak. Ia menuju pada satu titik konvergensi di mana kebenaran materi akan semakin selaras dengan kebenaran wahyu. Allah **Subhanahu wa Ta'ala** telah memberikan isyarat tentang ketelitian ciptaan-Nya yang bahkan mencakup detail terkecil pada ujung jari manusia, sebuah simbol dari presisi analitik yang luar biasa:

أَيُحْسِبُ الْإِنْسَانُ أَنَّ نَجْمَ عِظَامِهِ * بَلَى قَادِرِينَ عَلَى أَنْ نُسَوِّيَ بَنَانَهُ

"Apakah manusia mengira bahwa Kami tidak akan mengumpulkan (kembali) tulang-belulangannya? Ya, bahkan Kami mampu menyusun (kembali) jari-jemarnya dengan sempurna." (QS. Al-Qiyamah: 3-4)

Ayat ini merupakan refleksi teologis bahwa Allah adalah Sang Analis Mutlak yang mampu merekonstruksi sistem yang paling kompleks sekalipun. Bagi kita, peneliti kimia di era digital, ayat ini adalah motivasi untuk terus mengejar ketelitian dan akurasi dalam setiap pengukuran, karena di dalam ketelitian itulah kita menemukan jejak-jejak kebesaran Ilahi.

A. Tanggung Jawab Manusia sebagai Pemegang Amanah Ilmu Kemandirian instrumen yang kita diskusikan dalam buku ini memberikan kekuatan baru bagi peneliti. Namun, kekuatan yang besar membawa tanggung jawab (*amanah*) yang juga besar. Teknologi adalah pedang bermata dua; ia dapat digunakan untuk memulihkan lingkungan yang rusak atau justru mempercepat kehancurannya.

Manusia dipilih sebagai *Khalifah fil Ardh* bukan untuk mengeksploitasi alam tanpa batas, melainkan untuk menjaga keseimbangan (*Mizan*). Ilmu kimia analitik mandiri harus diarahkan untuk memastikan bahwa air yang kita minum, udara yang kita hirup, dan tanah yang kita tanami tetap berada dalam kondisi yang fitrah (seimbang). Kedaulatan riset yang kita perjuangkan melalui perangkat keras terbuka (*open-source*) adalah sarana untuk melepaskan diri dari belenggu kapitalisasi ilmu yang sering kali mengabaikan aspek kemanusiaan dan keberlanjutan (Pearce, 2012).

B. Masa Depan Peradaban: Antara Digitalisasi dan Spiritualitas Masa depan peradaban manusia tidak akan ditentukan oleh seberapa canggih AI yang kita miliki, melainkan oleh seberapa kuat nilai-nilai etika yang menuntun penggunaan AI tersebut. Integrasi AI dalam kimia (Bab 9) dan konvergensi teknologi (Bab 10) harus dipandang sebagai upaya untuk memperluas kemaslahatan, bukan untuk menggantikan peran manusia sebagai subjek moral.

Kita harus menghindari sikap sombong intelektual (*hubris*) yang sering kali muncul seiring dengan kemajuan teknologi. Setiap data yang berhasil kita akuisisi, setiap pola yang berhasil kita kenali melalui algoritma, hanyalah setetes ilmu dari samudra pengetahuan Allah yang tak bertepi. Rasa syukur atas nikmat akal dan teknologi adalah kunci bagi keberlanjutan peradaban:

لَئِنْ شَكَرْتُمْ لَأَزِيدَنَّكُمْ وَلَئِنْ كَفَرْتُمْ إِنَّ عَذَابِي لَشَدِيدٌ

"...Sesungguhnya jika kamu bersyukur, niscaya Aku akan menambah (nikmat) kepadamu, tetapi jika kamu mengingkari (nikmat-Ku), maka pasti azab-Ku sangat berat." (QS. Ibrahim: 7)

Dalam konteks sains, bersyukur berarti mengembangkan ilmu tersebut untuk menolong sesama, melestarikan alam, dan memperkuat kedaulatan bangsa. Mengingkari nikmat ilmu berarti menggunakannya untuk manipulasi data, perusakan lingkungan, atau menciptakan senjata pemusnah.

C. Harapan bagi Generasi Peneliti Kimia Digital Buku ini ditutup dengan harapan besar bagi para mahasiswa, peneliti, dan praktisi kimia analitik. Kemandirian dalam instrumentasi adalah langkah awal menuju kemerdekaan berpikir. Jangan pernah merasa cukup hanya dengan menjadi pengguna teknologi; jadilah pencipta teknologi yang berakar pada nilai-nilai luhur.

Dunia masa depan membutuhkan kimiawan yang tidak hanya mahir di depan meja laboratorium, tetapi juga fasih dalam bahasa pemrograman dan teguh dalam integritas spiritual. Semoga setiap detak sensor dan setiap baris algoritma yang kita susun menjadi amal jariyah yang menerangi jalan menuju peradaban yang lebih adil, makmur, dan diridhai-Nya.

DAFTAR PUSTAKA (BAB 10)

Baden, T., Chagas, A. M., Gage, G., Marzullo, T., Prieto-Godino, L. L., & Euler, T. (2015). Open source hardware in science: The case of neuroscience. *PLoS Biology*, 13(3), e1002030. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002030>

Gibb, A. (2014). *Building Open Source Hardware: Follow-the-Leader Control, Terms, and Conditions*. Pearson Education.

Grieshaber, D., MacKenzie, R., Vörös, J., & Reimhult, E. (2008). Electrochemical biosensors - Sensor principles and architectures. *Sensors*, 8(3), 1400-1458. <https://doi.org/10.3390/s8031400>

Kirby, B. J. (2010). *Micro- and Nanoscale Fluid Dynamics: Transport in Microfluidic Devices*. Cambridge University Press.

Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, P., & Davis, T. J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. *Computers & Education*, 70, 29-40.

Pearce, J. M. (2012). *Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs*. Elsevier.

Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories in science, technology, and engineering education: A review. *Computers & Education*, 95, 309-327.

Roco, M. C., & Bainbridge, W. S. (2003). *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Springer Science & Business Media.

Sackmann, E. K., Fulton, A. L., & Beebe, D. J. (2014). The present and future role of microfluidics in biomedical research. *Nature*, 507(7491), 181-189. <https://doi.org/10.1038/nature13118>

Urban, P. L. (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118. <https://doi.org/10.1039/C5AN01487A>

Whitesides, G. M. (2006). The origins and the future of microfluidics. *Nature*, 442(7101), 368-373. <https://doi.org/10.1038/nature05058>

Zambon, A. G., et al. (2020). Smart Laboratory: A Review on IoT and Cloud Computing Applications in Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 97(11), 3954-3964. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00624>

DAFTAR PUSTAKA LENGKAP

- **Al-Qur'an dan Terjemahannya.** (2019). Kementerian Agama Republik Indonesia. Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an.
- **Baden, T., Chagas, A. M., Gage, G., Marzullo, T., Prieto-Godino, L. L., & Euler, T.** (2015). Open source hardware in science: The case of neuroscience. *PLoS Biology*, 13(3), e1002030. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002030>
- **Brereton, R. G.** (2018). *Chemometrics: Data Driven Extraction for Science*. John Wiley & Sons.
- **Bro, R., & Smilde, A. K.** (2014). Principal component analysis. *Analytical Methods*, 6(9), 2812-2831. <https://doi.org/10.1039/C3AY41907J>
- **Bucaille, M.** (2003). *The Bible, The Qur'an and Science*. Tahrike Tarsile Qur'an.
- **Floridi, L.** (2019). Establishing the rules for AI: Principles, declaration, and guidelines. *Science and Engineering Ethics*, 25(6), 1681-1691.
- **Gasteiger, J., & Zupan, J.** (2018). *Neural Networks for Chemists: An Introduction*. Wiley-VCH.
- **Gibb, A.** (2014). *Building Open Source Hardware: Follow-the-Leader Control, Terms, and Conditions*. Pearson Education.
- **Grieshaber, D., MacKenzie, R., Vörös, J., & Reimhult, E.** (2008). Electrochemical biosensors - Sensor principles and architectures. *Sensors*, 8(3), 1400-1458. <https://doi.org/10.3390/s8031400>
- **Guilherme, R. J., et al.** (2022). Low-cost IoT-based system for remote monitoring of chemical laboratories. *HardwareX*, 11, e00271.
- **Harris, D. C.** (2015). *Quantitative Chemical Analysis* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.
- **Kirby, B. J.** (2010). *Micro- and Nanoscale Fluid Dynamics: Transport in Microfluidic Devices*. Cambridge University Press.
- **Lavine, B. K., & Workman, J.** (2013). Chemometrics. *Analytical Chemistry*, 85(2), 705-714. <https://doi.org/10.1021/ac3032127>
- **Libicz, S., et al.** (2018). Unsupervised clustering of water quality data. *Water Research*, 142, 115-126.
- **Lu, Y., et al.** (2020). Machine learning in analytical chemistry: A review. *Analytica Chimica Acta*, 1135, 11-29. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.08.003>
- **Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, P., & Davis, T. J.** (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. *Computers & Education*, 70, 29-40.
- **Monk, P. M. S.** (2008). *Physical Chemistry: Understanding our Chemical World*. John Wiley & Sons.
- **Najjar, Z.** (2006). *Pembuktian Sains dalam Sunnah* (Terjemahan). Qisthi Press.
- **Pearce, J. M.** (2012). *Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs*. Elsevier.
- **Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K.** (2016). Virtual laboratories in science, technology, and engineering education: A review. *Computers & Education*, 95, 309-327.
- **Purwanto, A.** (2012). *Ayat-Ayat Semesta: Sisi-Sisi Al-Qur'an yang Terlupakan*. Mizan Pustaka.

- **Roco, M. C., & Bainbridge, W. S.** (2003). *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Springer Science & Business Media.
- **Sackmann, E. K., Fulton, A. L., & Beebe, D. J.** (2014). The present and future role of microfluidics in biomedical research. *Nature*, 507(7491), 181-189. <https://doi.org/10.1038/nature13118>
- **Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R.** (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.
- **Taddeo, M.** (2018). Data ethics: The new frontier of moral philosophy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 376(2133), 20180085.
- **Urban, P. L.** (2015). Universal open-source hardware in chemical research. *Analyst*, 140(21), 7111-7118. <https://doi.org/10.1039/C5AN01487A>
- **Whitesides, G. M.** (2006). The origins and the future of microfluidics. *Nature*, 442(7101), 368-373. <https://doi.org/10.1038/nature05058>
- **Wold, S., Esbensen, K., & Geladi, P.** (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2(1-3), 37-52.
- **Wold, S., Sjöström, M., & Eriksson, L.** (2001). PLS-regression: A basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58(2), 109-130.
- **Zambon, A. G., et al.** (2020). Smart Laboratory: A Review on IoT and Cloud Computing Applications in Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 97(11), 3954-3964. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00624>
- **Zhou, X., et al.** (2019). Machine learning for gas sensors: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 272, 115-125.

GLOSARIUM ALFABETIS (A - Z)

A

- **Analog-to-Digital Converter (ADC):** Komponen elektronik di dalam mikrokontroler yang berfungsi mengubah sinyal analog kontinu (seperti tegangan listrik dari sensor) menjadi angka digital diskrit yang dapat diproses oleh komputer.
- **Arduino:** Platform prototipe elektronik sumber terbuka (*open-source*) yang berbasis pada perangkat keras dan perangkat lunak yang mudah digunakan.
- **Ayat Kauniyah:** Tanda-tanda kebesaran Allah yang terhampar di alam semesta, yang dapat dipelajari melalui observasi dan eksperimen sains.

B

- **Baud Rate:** Kecepatan transfer data dalam komunikasi serial, diukur dalam satuan bit per detik (bps).
- **Black Box (Kotak Hitam):** Istilah untuk sistem atau algoritma (seperti pada *Machine Learning*) di mana proses internalnya tidak mudah dipahami secara transparan oleh pengguna, meskipun hasil keluarannya akurat.
- **Breadboard:** Papan uji coba (*prototyping board*) dengan lubang-lubang koneksi internal yang digunakan untuk merangkai komponen elektronik sementara tanpa perlu penyolderan.

C

- **Clustering:** Salah satu metode *Unsupervised Learning* dalam kecerdasan buatan untuk mengelompokkan data sensor ke dalam kategori-kategori berdasarkan kemiripan pola tanpa label awal.
- **Cloud Computing (Komputasi Awan):** Pengiriman berbagai layanan komputasi, termasuk penyimpanan data instrumen dan pemrosesan, melalui internet.

D

- **Deep Learning:** Sub-bidang dari *Machine Learning* yang menggunakan arsitektur jaringan syaraf tiruan berlapis ganda untuk memodelkan data kimia yang sangat kompleks.
- **Digital Twin (Kembaran Digital):** Representasi virtual yang identik dengan objek fisik atau sistem di dunia nyata (seperti reaktor kimia yang terhubung ke sensor IoT).
- **Dzarrah:** Istilah Al-Qur'an untuk menyebut entitas terkecil (sering disejajarkan dengan atom atau zarah) yang menjadi penanda presisi skala mikro.

E

- **Elektrokimia:** Cabang ilmu kimia yang mempelajari hubungan antara reaksi kimia dan arus listrik, yang menjadi prinsip dasar kerja banyak sensor (seperti sensor pH dan gas).

- **ESP32:** Mikrokontroler berbiaya rendah dan hemat daya yang dilengkapi dengan fitur Wi-Fi dan Bluetooth bawaan, sangat ideal untuk proyek *Internet of Things* (IoT).
- **Explainable AI (XAI):** Metode dan teknik dalam kecerdasan buatan agar hasil dan proses pengambilan keputusan oleh algoritma dapat dipahami oleh manusia (peneliti).

F

- **Fitrah:** Kondisi awal, murni, dan seimbang dari suatu ciptaan. Dalam kimia lingkungan, merujuk pada kondisi alam yang belum tercemar.
- **Fotodioda:** Komponen semikonduktor yang mengubah cahaya menjadi arus listrik, komponen inti dalam spektrofotometer digital.

G

- **Green Chemistry (Kimia Hijau):** Paradigma desain produk dan proses kimia yang mengurangi atau menghilangkan penggunaan dan pembentukan zat berbahaya, salah satunya didukung melalui miniaturisasi instrumen.
- **Ground (GND):** Titik referensi nol volt dalam sebuah sirkuit elektronik di mana arus listrik kembali ke sumbernya.

H

- **Hubris:** Sifat kesombongan intelektual yang merasa teknologi manusia dapat sepenuhnya mengendalikan atau menggantikan keteraturan hukum alam.
- **Hukum Beer-Lambert:** Prinsip dasar dalam spektrofotometri yang menyatakan bahwa absorbansi cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi zat penyerap (analit) dan ketebalan media.

I

- **Internet of Things (IoT):** Konsep di mana instrumen analitik dan sensor fisik terhubung ke internet untuk saling bertukar data secara *real-time*.
- **I2C (Inter-Integrated Circuit):** Protokol komunikasi serial sinkron untuk menghubungkan beberapa sensor atau modul ke satu mikrokontroler menggunakan dua jalur kabel (SDA dan SCL).

J

- **Jaringan Syaraf Tiruan (Artificial Neural Networks - ANN):** Model komputasi yang terinspirasi dari struktur otak biologis, digunakan untuk memprediksi sifat molekuler atau konsentrasi kimia.
- **Jumper:** Kabel kecil dengan ujung konektor logam yang digunakan untuk menghubungkan antar komponen di dalam *breadboard*.

K

- **Kalibrasi:** Proses pencocokan nilai yang dibaca oleh sensor dengan nilai standar referensi yang telah diketahui secara pasti.
- **Kemometrika:** Penerapan metode matematika dan statistik pada data kimia (seperti data spektrum optik) untuk mengekstraksi informasi yang relevan.
- **Khalifah:** Mandat teologis bagi manusia sebagai wakil Tuhan di bumi yang bertugas menjaga keseimbangan alam dan memanfaatkannya dengan bijaksana.

L

- **Lab-on-a-Chip (LoC):** Perangkat yang mengintegrasikan satu atau lebih fungsi laboratorium ke dalam keping berukuran milimeter hingga sentimeter persegi.
- **Laminar:** Pola aliran fluida (cairan/gas) yang berlapis-lapis, teratur, dan mulus, sangat penting dalam desain sistem mikrofluidika.

M

- **Machine Learning (Pembelajaran Mesin):** Cabang kecerdasan buatan yang memungkinkan instrumen kimia "belajar" dari data kalibrasi untuk mengenali pola atau memprediksi hasil uji.
- **Mikrokontroler:** Komputer kecil dalam satu sirkuit terpadu (IC) yang didedikasikan untuk menjalankan satu tugas tertentu, seperti membaca data sensor kimia.

N

- **Nanoteknologi:** Manipulasi materi pada tingkat atom, molekul, dan supramolekul (skala 1 - 100 nanometer) untuk membuat permukaan sensor yang sangat sensitif.
- **Noise (Derau):** Sinyal gangguan acak yang tidak diinginkan dalam pengukuran instrumen, yang dapat mengaburkan sinyal data asli.

O

- **Open-Source Hardware (OSH):** Perangkat keras di mana desain, skema, dan kode sumbernya dibagikan secara bebas untuk dipelajari, dimodifikasi, dan dibuat ulang oleh publik.
- **Overfitting:** Kondisi di mana model algoritma *Machine Learning* terlalu "hafal" dengan data pelatihan, sehingga gagal memprediksi data baru secara akurat.

P

- **Potensiometri:** Teknik analisis elektrokimia yang mengukur beda potensial (voltase) antara dua elektroda dalam larutan (misalnya, pengukuran pH).
- **Principal Component Analysis (PCA):** Teknik kemometrika untuk mereduksi dimensi data (menyederhanakan ratusan data spektrum) untuk divisualisasikan dalam bentuk pengelompokan titik.

Q

- **Qauliyah (Ayat Qauliyah):** Kebenaran yang tertulis dalam wahyu (Al-Qur'an), yang bersama-sama dengan kebenaran saintifik (Kauniyah) membentuk kesatuan ilmu.
- **Query:** Permintaan data spesifik atau informasi dari sebuah basis data (database) yang digunakan pada antarmuka *dashboard* IoT instrumen.

R

- **Regresi Linear:** Metode statistik untuk memodelkan hubungan garis lurus antara dua variabel, sering digunakan dalam pembuatan kurva kalibrasi standar.
- **Resolusi:** Kemampuan instrumen atau sistem (seperti bit ADC) untuk membedakan perubahan terkecil pada sinyal yang diukur.

S

- **Sensor:** Perangkat keras pengubah atau pendeteksi fenomena fisik/kimia (seperti suhu, gas, keasaman) menjadi sinyal listrik yang dapat dibaca mesin.
- **Spektrofotometri:** Metode pengukuran seberapa banyak zat kimia menyerap cahaya dengan mengukur intensitas cahaya saat melewati larutan sampel.
- **Sunnatullah:** Ketentuan, hukum, atau sistem keteraturan yang diciptakan Allah untuk mengatur alam semesta.

T

- **Total Dissolved Solids (TDS):** Ukuran kuantitatif semua zat organik dan anorganik yang terlarut dalam cairan, sering digunakan sebagai indikator kemurnian air.
- **Transduser:** Perangkat yang mengubah satu bentuk energi ke bentuk energi lain (seperti energi kimia menjadi tegangan listrik pada ujung *probe*).

U

- **UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter):** Protokol komunikasi serial asinkron perangkat keras yang memungkinkan mikrokontroler berkomunikasi dengan komputer atau modul lain.
- **Unsupervised Learning:** Paradigma *Machine Learning* yang mencari pola atau struktur tersembunyi pada data sampel yang belum dilabeli (tidak memiliki jawaban benar sebelumnya).

V

- **Virtual Reality (VR):** Simulasi lingkungan fisik yang direkayasa oleh komputer yang memungkinkan pengguna (peneliti) berinteraksi secara imersif, seperti laboratorium virtual.
- **VCC:** Pin pada mikrokontroler atau modul yang menyediakan suplai tegangan listrik positif (biasanya 5V atau 3.3V).

W

- **Wahdatul 'Ulum:** Konsep kesatuan ilmu pengetahuan dalam paradigma Islam, yang meniadakan dikotomi antara sains alam dan ilmu agama.
- **Wasilah:** Sarana atau perantara. Dalam konteks buku ini, teknologi instrumen adalah *wasilah* untuk mendekatkan diri kepada pengenalan atas penciptaan yang hakiki.

X

- **XAI:** (Lihat *Explainable AI*).

Y

- **Y-Intercept (Intersep Y):** Titik di mana sebuah garis memotong sumbu Y dalam grafik kurva kalibrasi linear. Digunakan sebagai nilai koreksi (*offset*) nol pada pemrograman sensor.

Z

- **Zero Calibration (Kalibrasi Nol):** Proses menyetel pembacaan instrumen menjadi titik dasar (nol) ketika mengukur sampel *blanko* murni (misalnya aquades) sebelum analisis dimulai.

LAMPIRAN 1: DATA TEKNIS, TABEL REFERENSI, DAN PANDUAN VISUAL INSTRUMENTASI

Lampiran ini disusun untuk memberikan referensi cepat bagi pembaca, praktisi, dan mahasiswa dalam mengimplementasikan proyek instrumentasi kimia mandiri. Data yang disajikan mencakup perbandingan perangkat keras, standar kalibrasi, serta pustaka perangkat lunak yang paling relevan.

A. TABEL REFERENSI TEKNIS

Tabel 1.1: Perbandingan Spesifikasi Mikrokontroler (Arduino Uno vs. ESP32)

Pemilihan mikrokontroler sangat menentukan akurasi analitik, terutama pada resolusi ADC.

Fitur	Arduino Uno (ATMega328P)	ESP32 (WROOM-32)	Urgensi dalam Kimia
Tegangan Operasi	5V	3.3V	Kesesuaian dengan modul sensor.
Kecepatan Prosesor	16 MHz	240 MHz	Kecepatan sampling data kinetika.
Resolusi ADC	10-bit (0-1023)	12-bit (0-4095)	Sangat Penting untuk presisi pH/TDS.
Konektivitas	Tidak Ada (Perlu Shield)	WiFi + Bluetooth (Built-in)	Esensial untuk IoT dan Monitoring.
Jumlah Pin Analog	6 Saluran	18 Saluran	Untuk sistem multi-sensor.
Flash Memory	32 KB	4 MB	Penyimpanan algoritma AI/ANN.

Tabel 1.2: Karakteristik Sensor Kimia Populer untuk Arduino/ESP32

Referensi cepat untuk pemilihan sensor berdasarkan parameter yang diukur.

Nama Sensor	Parameter	Tipe Output	Rentang Ukur	Akurasi
SKU: SEN0161	pH Larutan	Analog	pH 0 - 14	± 0.1 pH
Gravity: TDS	Total Dissolved Solids	Analog	0 - 1000 ppm	$\pm 10\%$ F.S
DS18B20	Suhu Cairan	Digital (1-Wire)	-55°C - +125°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
TCS3200	Warna (RGB)	Frekuensi Digital	400 - 700 nm	Tergantung Kalibrasi
MQ-135	Kualitas Udara/Gas	Analog	10 - 1000 ppm	Relatif (Non-Linear)

Tabel 1.3: Standar Kalibrasi Buffer pH dan Konduktivitas

Data wajib untuk prosedur kalibrasi instrumen mandiri pada suhu standar 25°C.

Jenis Larutan Standar Nilai Nominal (25°C) Koefisien Suhu Penggunaan Utama

Buffer pH 4.01	4.01	Rendah	Kalibrasi <i>Slope</i> Asam
Buffer pH 7.00	7.00	Sangat Rendah	Kalibrasi <i>Offset</i> (Netral)
Buffer pH 10.01	10.01	Tinggi	Kalibrasi <i>Slope</i> Basa
KCl 0.01 M	1413 $\mu\text{S/cm}$	2.0% per °C	Standar Konduktivitas/TDS

B. DAFTAR PUSTAKA (LIBRARIES) PERANGKAT LUNAK

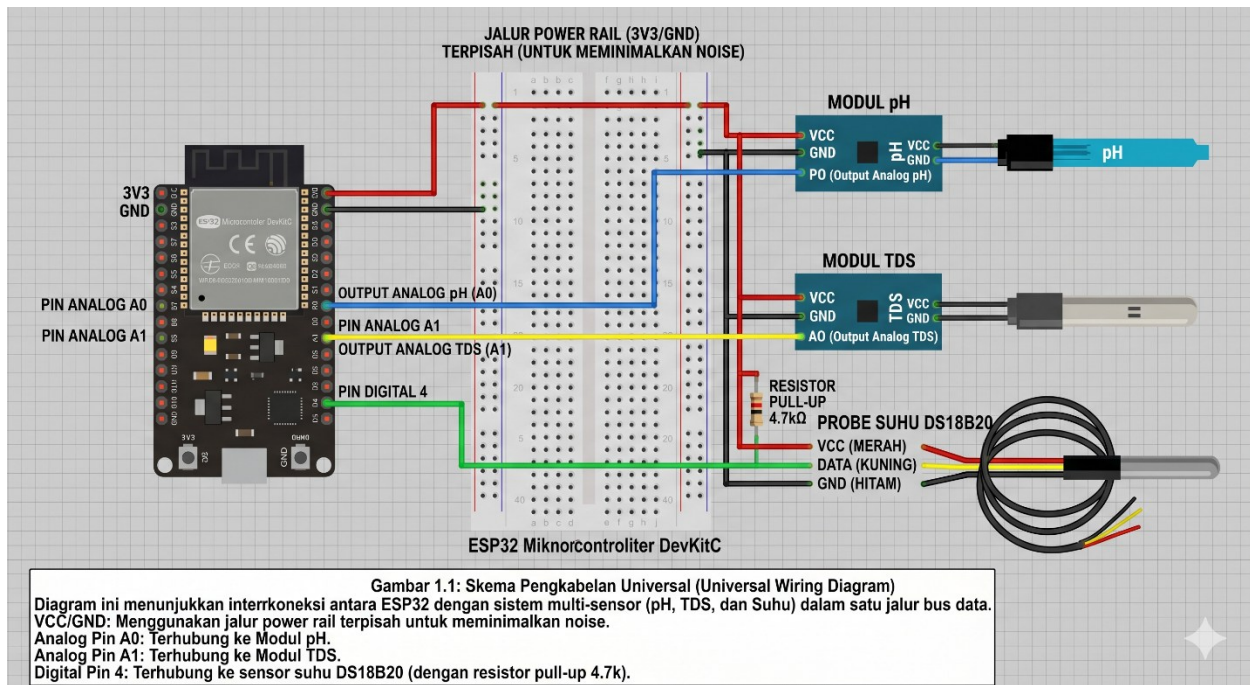
Berikut adalah pustaka wajib yang harus diinstal pada Arduino IDE untuk mendukung sistem pada buku ini:

1. **Suhu:** DallasTemperature & OneWire (Untuk sensor DS18B20).
2. **Display:** LiquidCrystal_I2C (Untuk layar LCD 16x2 atau 20x4).
3. **IoT:** BlynkSimpleEsp32.h & ThingSpeak.h (Untuk transmisi data cloud).

4. **AI/ML:** EloquentTinyML (Untuk menjalankan model Machine Learning di ESP32).
5. **Data Logging:** SD.h & SPI.h (Untuk penyimpanan data ke kartu microSD).

C. PANDUAN VISUAL (DIAGRAM DAN SKEMA)

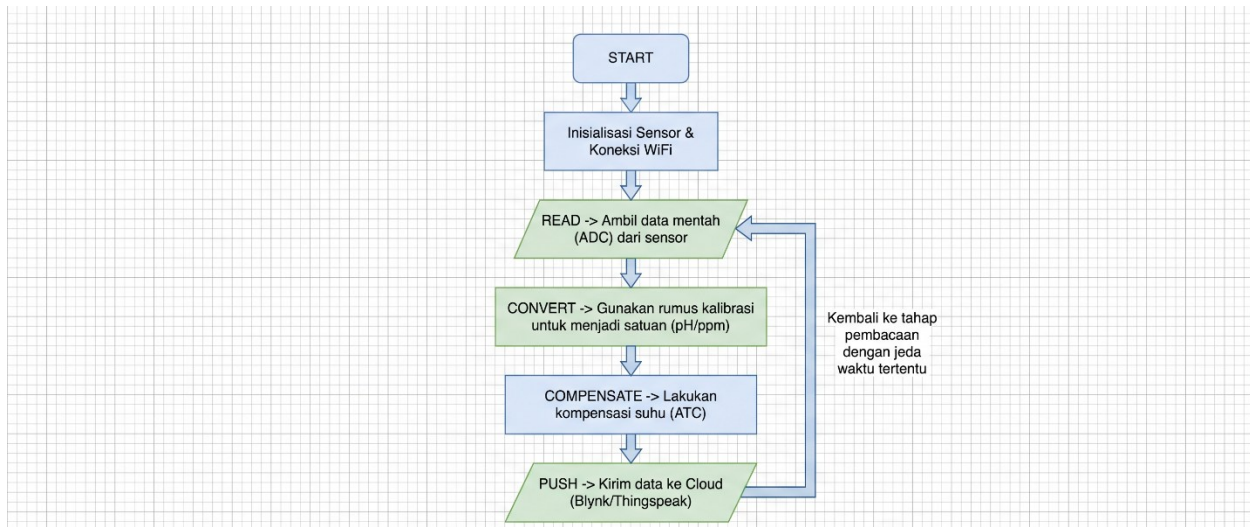
(Catatan: Bagian ini merupakan deskripsi visual yang dapat diimplementasikan menjadi gambar teknis dalam buku)



Gambar 1.1: Skema Pengkabelan Universal (Universal Wiring Diagram)

Diagram ini menunjukkan interkoneksi antara ESP32 dengan sistem multi-sensor (pH, TDS, dan Suhu) dalam satu jalur bus data.

- **VCC/GND:** Menggunakan jalur *power rail* terpisah untuk meminimalkan *noise*.
- **Analog Pin A0:** Terhubung ke Modul pH.
- **Analog Pin A1:** Terhubung ke Modul TDS.
- **Digital Pin 4:** Terhubung ke sensor suhu DS18B20 (dengan resistor *pull-up* 4.7k).



Gambar 1.2: Flowchart Logika Program IoT (Algorithm Flow)

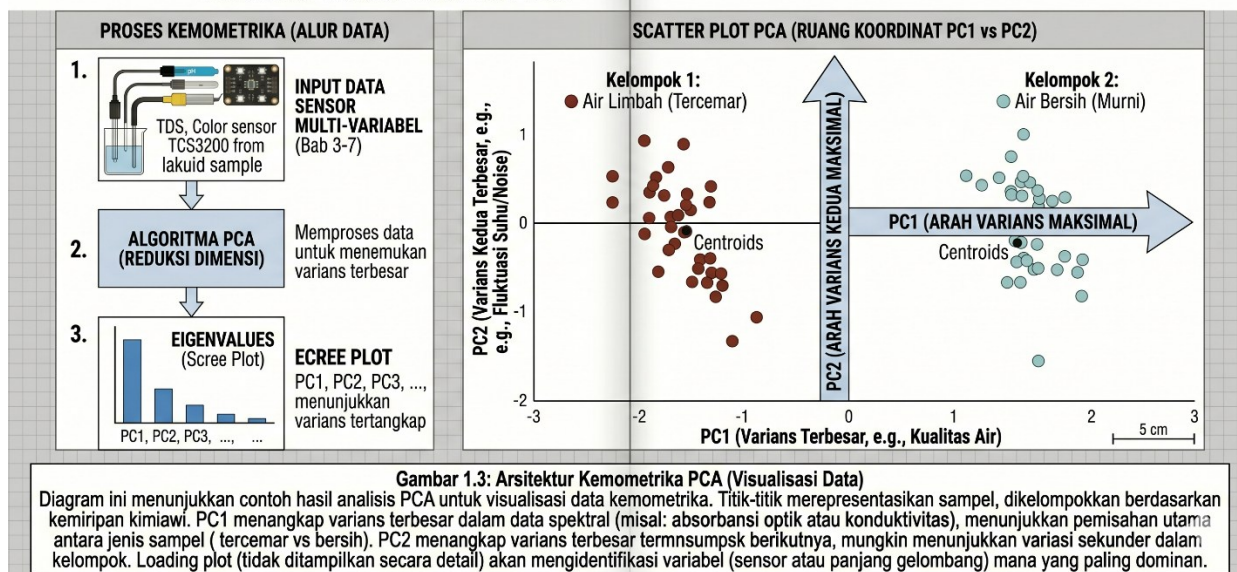
Diagram alir yang menggambarkan urutan kerja instrumen: START -> Inisialisasi **Sensor & Koneksi WiFi**. READ -> Ambil data mentah (ADC) dari sensor. CONVERT -> Gunakan rumus kalibrasi untuk menjadi satuan (pH/ppm). COMPENSATE -> Lakukan kompensasi suhu (ATC). PUSH -> Kirim data ke Cloud (Blynk/Thingspeak). LOOP -> Kembali ke tahap pembacaan dengan jeda waktu tertentu.

Gambar 1.2: Flowchart Logika Program IoT (Algorithm Flow)

Diagram alir yang menggambarkan urutan kerja instrumen:

1. START -> Inisialisasi Sensor & Koneksi WiFi.
2. READ -> Ambil data mentah (ADC) dari sensor.
3. CONVERT -> Gunakan rumus kalibrasi untuk menjadi satuan (pH/ppm).
4. COMPENSATE -> Lakukan kompensasi suhu (ATC).
5. PUSH -> Kirim data ke Cloud (Blynk/Thingspeak).
6. LOOP -> Kembali ke tahap pembacaan dengan jeda waktu tertentu.

LAMPIRAN 1 (LANJUTAN): PANDUAN VISUAL INSTRUMENTASI DAN ANALISIS



Gambar 1.3: Arsitektur Kemometrika PCA (Visualisasi Data)

Grafik contoh hasil analisis *Principal Component Analysis* (PCA) yang menunjukkan pemisahan kelompok sampel (misalnya: Air Limbah vs Air Bersih) dalam ruang koordinat PC1 dan PC2.

D. DAFTAR KONTAK DAN SUMBER TERBUKA

Untuk mendukung kemandirian riset, pembaca dapat mengakses kode sumber (*source code*) dan file desain 3D instrumen yang dibahas dalam buku ini melalui repositori berikut:

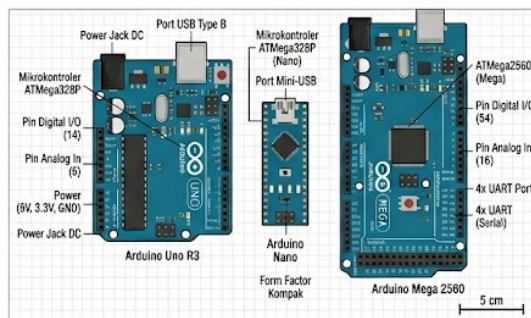
- **Repositori Kode:** [GitHub Kasmui - Instrumentasi Kimia Mandiri]
- **Forum Komunitas:** [hisabmu.com / kasmui.cloud]
- **Kontak Konsultasi:** 0818294312 (WhatsApp Riset)

LAMPIRAN 2: KOMPONEN PROTOTYPING ELEKTRONIKA DAN ARDUINO

Lampiran ini memberikan referensi visual dan teknis untuk komponen perangkat keras yang digunakan dalam perakitan instrumentasi kimia mandiri.

TEXTBOOK: KOMPONEN PROTOTYPING ELEKTRONIKA DAN ARDUINO

LAMPIRAN 2: KOMPONEN PROTOTYPING ELEKTRONIKA DAN ARDUINO



Imagis 2.1. PERBANDINGAN BOARD ARDUINO (UNO, NANO, MEGA)

LAMPIRAN 2: KOMPONEN PROTOTYPING ELEKTRONIKA DAN ARDUINO

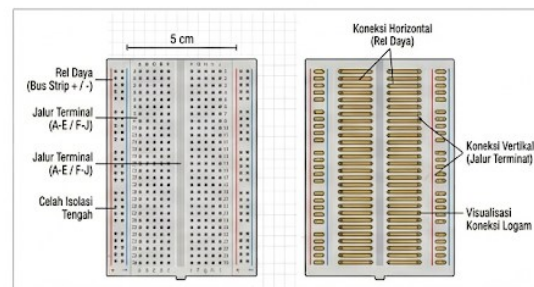


Image 2.2. BREADBOARD STANDAR DAN KONEKSI INTERNAL

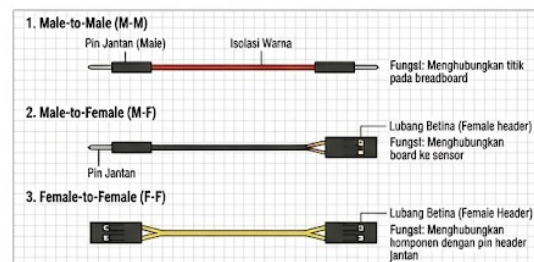


Image 2.3. JENIS-JENIS KABEL JUMPER

1. Perbandingan Board Arduino

- **1.1. Arduino Uno R3:** Board standar yang paling populer untuk pemula. Memiliki keseimbangan yang baik antara jumlah pin dan kemudahan penggunaan. Sangat cocok untuk sebagian besar proyek instrumentasi laboratorium yang membutuhkan 6 input analog dan 14 digital I/O.
- **1.2. Arduino Nano:** Board mikrokontroler kompak yang fungsionalitasnya hampir identik dengan Uno R3, namun dalam faktor bentuk yang jauh lebih kecil. Sangat ideal untuk integrasi ke dalam wadah cetak 3D atau sistem nirkabel yang ringkas.
- **1.3. Arduino Mega 2560:** Board mikrokontroler yang jauh lebih besar dan kuat. Dirancang untuk proyek kompleks yang membutuhkan jumlah pin yang sangat banyak (54 digital I/O, 16 analog In, 4 UART). Digunakan untuk sistem multi-sensor tingkat lanjut atau instrumen yang memerlukan memori lebih besar.

2. Breadboard dan Koneksi Internal

- **2.1. Tampak Atas Breadboard:** Menampilkan baris (terminal strip, berlabel A-J, 1-30) dan kolom (power bus, berlabel +/-). Ini adalah tempat komponen elektronik ditancapkan tanpa perlu penyolderan.

- **2.2. Visualisasi Koneksi Internal:** Menunjukkan klip logam horizontal (power bus) dan vertikal (terminal strip) di bawah permukaan breadboard. Memahami koneksi internal ini sangat penting untuk mencegah ralat sirkuit yang dapat merusak mikrokontroler.

3. Jenis-Jenis Kabel Jumper

Kabel jumper adalah kabel penghubung fleksibel dengan ujung konektor yang berbeda, digunakan untuk menghubungkan sirkuit secara sementara.

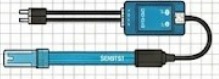
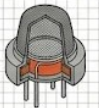
- **3.1. Male-to-Male (M-M):** Kabel dengan pin jantan di kedua ujungnya. Digunakan untuk menghubungkan dua titik yang berbeda pada breadboard.
- **3.2. Male-to-Female (M-F):** Kabel dengan satu pin jantan dan satu konektor betina. Digunakan untuk menghubungkan board Arduino (misalnya pin A0) ke komponen eksternal atau sensor yang memiliki pin header jantan.
- **3.3. Female-to-Female (F-F):** Kabel dengan konektor betina di kedua ujungnya. Digunakan untuk menghubungkan dua komponen yang keduanya memiliki pin jantan, seperti menghubungkan board sensor ke board sensor lainnya.

LAMPIRAN 3: DAFTAR SENSOR DAN SPESIFIKASI ANALITIK

Lampiran ini disusun untuk memberikan referensi teknis yang cepat dan terstruktur bagi pembaca mengenai karakteristik analitik dari sensor yang dibahas dalam setiap bab.

TEXTBOOK: KOMPONEN MIKROKONTROLLER-BASED KSTM/CHEMICA KIMICA

LAMPIRAN 3: DAFTAR SENSOR DAN SPESIFIKASI ANALITIK

Gambar Sensor (Technical Drawing)	Nama Sensor	Spesifikasi Analitik	Jenis Transduksi	Kegunaan (Use Case)	Pustaka Terintegrasi
	SKU: SEN0161 - pH Sensor	Output: Analog Rentang pH: 0 - 14 Akurasi: ± 0.1 pH Koefisien Suhu: Ya	Potensiometri	Mengukur keasaman/kebasaan larutan sampel kimia (Bab 3)	'SEN0161.h'
	DS18B20 - Sensor Suhu	Output: Digital (1-Wire) Rentang: -55°C - $+125^{\circ}\text{C}$ Akurasi: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (-10°C to $+85^{\circ}\text{C}$)	Termoresistif (IC Digital)	Pemantauan suhu kinetika reaksi kimia (Bab 4)	'DallasTemperature.h'
	Gravity: TDS - TDS Sensor	Output: Analog Rentang: 0 - 1000 ppm Akurasi: $\pm 10\%$ F.S (Full Scale)	Konduktometri (Amperometri)	Analisis Total Padatan Terlarut dalam air (Bab 7)	'TDS.h'
	TCS3200 - Sensor Warna	Output: Frekuensi Digital Rentang: 400 - 700 nm (RGB) Akurasi Warna: Kalibrasi (RGB)	Fotodioda	Spektrofotometri digital dan deteksi warna (Bab 5)	'TCS3200.h'
	MQ-135 - Sensor Gas	Output: Analog (Non-Linear) Rentang: 10 - 1000 ppm (Amonia/Toluena) Sensitivitas: Kalibrasi (Humi/T)	Elektrokimia Tipe Gas	Deteksi kebocoran gas beracun di laboratorium (Bab 6)	'MQ135.h'

TEXTBOOK: KOMPONEN MIKROKONTROLLER-BASED KSTM/CHEMICA KIMICA

LAMPIRAN 3 (LANJUTAN): DAFTAR SENSOR DAN SPESIFIKASI ANALITIK

Gambar Sensor (Technical Drawing)	Nama Sensor	Spesifikasi Analitik	Jenis Transduksi	Kegunaan (Use Case)	Pustaka Terintegrasi
	LM35 - Sensor Suhu	Output: Analog (10mV/ $^{\circ}\text{C}$) Rentang: -55°C to $+150^{\circ}\text{C}$ Akurasi: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Ya	Termomesesistif (IC Analog)	Gas campuran lab (Bab 6, Lanjutan)	'LM35.h'
	SHT31 - Sensor Suhu/Kelembaban Presisi	Output: Digital (I2C) Rentang Suhu: -40°C + Rentang Humi: 0-100% Transistif (Humi) / Termoresistif (Suhu)	MEMS Digital	Kontrol lingkungan inkubator biokimia (Lanjutan)	Pengukuran volume cairan reaktor (Bab 7, Lanjutan)
	BH1750 - Sensor Intensitas Cahaya (Lux)	Output: Digital (I2C) Rentang: 1 - 65535 Lux Akurasi: Kalibrasi	Fotodioda MEMS	Studi fotokatalisis int. cahaya (Bab 5, Lanjutan)	Pengukuran volume cairan reaktor (Bab 7, Lanjutan)
	MQ-2 Gas Sensor	Output Analog (Rs/Ro)		Deteksi asap dan gas mudah terbakar (Bab 6, Lanjutan)	Kesetimbangan gas reaktor (Lanjutan)
	MQ-3 Alcohol Sensor	Output Analog		Konsentrasi alkohol (Bab 6, Lanjutan)	Media pembiakan (Bab 8, Lanjutan)
	MQ-4 Methane Gas Sensor	Output Analog		Kebocoran gas reaktor bio (Bab 6, Lanjutan)	Pemantauan fisiologis peneliti (Lanjutan)
	HC-SR04 - Ultrasonic Distance Sensor			Pengukuran volume cairan, Lanjutan	Pengukuran volume cairan reaktor (Bab 7, Lanjutan)
	Capacitive Soil Moisture Sensor BMP280 - Barometric Pressure/Suhu			Kesetimbangan gas reaktor (Lanjutan)	Media pembiakan (Bab 8, Lanjutan)
	MAX30102 - Sensor Pulse Oxymeter			Pemantauan fisiologis peneliti (Lanjutan)	Pemantauan fisiologis peneliti (Lanjutan)
	MPU6050 - Micnsor Sound Sensor Analog			Stabilisasi alat portabel (Lanjutan)	Deteksi getaran reaktor (Lanjutan)
	TTP223 - Sensor Sentuh Kapasitif			Antarmuka otonom reaktor (Lanjutan)	Antarmuka otonom reaktor (Lanjutan)
	Sensor Flex (Tekukan)			Deteksi Flex (Tekukan)	Deteksi deformasi reaktor flexibel.
	AS7262 - Sensor Spektral Warna 6 Saluran			Deteksi deformasi reaktor flexibel (Lanjutan)	Spektrofotometri multi-saluran (Bab 5, Lanjutan)

LAMPIRAN 4: DAFTAR 50 SENSOR KOMPATIBEL ARDUINO

Tabel ini berfungsi sebagai katalog pemilihan komponen bagi peneliti dalam merancang sistem akuisisi data yang spesifik.

No	Nama Sensor	Protokol / Tipe Data	Kegunaan Utama (Aplikasi Kimia/Fisika)
1	LM35	Analog	Pengukuran suhu linear (10 $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$).
2	DS18B20	Digital (1-Wire)	Suhu larutan (tahan air), mendukung <i>multi-drop</i> .
3	DHT11	Digital	Kelembaban dan suhu udara (edukasi/low-cost).
4	DHT22 (AM2302)	Digital	Kelembaban dan suhu udara (presisi menengah).
5	SHT31	I2C	Kelembaban dan suhu tingkat laboratorium (presisi tinggi).
6	BMP180	I2C	Tekanan barometrik dan suhu.
7	BMP280	I2C / SPI	Tekanan atmosfer dan suhu (presisi tinggi).
8	BME280	I2C / SPI	Sensor lingkungan (Suhu, Kelembaban, Tekanan).
9	MQ-2	Analog / Digital	Deteksi asap, gas LPG, dan Butana.
10	MQ-3	Analog / Digital	Deteksi uap Alkohol (Etanol).
11	MQ-4	Analog / Digital	Deteksi Gas Metana (CH_4) dan CNG.
12	MQ-5	Analog / Digital	Deteksi Gas LPG dan Gas Alam.
13	MQ-6	Analog / Digital	Deteksi Gas LPG, Iso-butana, dan Propana.

14	MQ-7	Analog / Digital	Deteksi Karbon Monoksida (CO).
15	MQ-8	Analog / Digital	Deteksi Gas Hidrogen (H ₂).
16	MQ-9	Analog / Digital	Deteksi Karbon Monoksida dan Gas Mudah Terbakar.
17	MQ-135	Analog / Digital	Kualitas udara (Amonia, Benzena, Alkohol, Asap).
18	LDR (Photoresistor)	Analog	Intensitas cahaya sederhana (fotometri).
19	BH1750	I2C	Pengukuran intensitas cahaya (Lux meter digital).
20	TSL2561	I2C	Luminositas rentang luas (IR dan Spektrum Tampak).
21	TCS3200	Digital Frequency	Deteksi warna RGB (Spektrofotometri sederhana).
22	AS7262	I2C	Sensor Spektrometri 6-saluran (Visible).
23	HC-SR04	Digital (Pulse)	Jarak ultrasonik (mengukur volume cairan reaktor).
24	JSN-SR04T	Digital (Pulse)	Sensor ultrasonik tahan air (waterproof).
25	PIR HC-SR501	Digital	Deteksi pergerakan (keamanan laboratorium).
26	RC522 (RFID)	SPI	Identifikasi sampel/peneliti menggunakan kartu/tag.
27	PN532 (NFC)	I2C / SPI / HSU	Komunikasi jarak dekat dan identifikasi cerdas.
28	MPU6050	I2C	Akselerometer dan Giroskop (stabilisasi alat).
29	ADXL345	I2C / SPI	Akselerometer 3-sumbu (deteksi getaran reaktor).

30	HMC5883L	I2C	Magnetometer (deteksi medan magnet stirrer).
31	KY-038	Analog / Digital	Deteksi suara/kebisingan lingkungan.
32	SW-420	Digital	Deteksi getaran (vibrasi) pada mesin sentrifuga.
33	FC-28	Analog / Digital	Kelembaban tanah (metode resistif).
34	Capacitive Soil	Analog	Kelembaban tanah/media (metode kapasitif - anti korosi).
35	Water Level	Analog	Ketinggian air dalam wadah (metode konduktif).
36	TDS Sensor	Analog	Total Padatan Terlarut (kemurnian air).
37	pH Sensor	Analog	Derajat keasaman larutan kimia.
38	ORP Sensor	Analog	Potensial Oksidasi-Reduksi larutan.
39	Turbidity Sensor	Analog	Tingkat kekeruhan cairan (analisis limbah).
40	ACS712	Analog	Pengukuran arus listrik (AC/DC) pada alat lab.
41	Voltage Sensor	Analog	Pengukuran tegangan DC (pembagi tegangan).
42	MAX30102	I2C	Oksimeter nadi dan detak jantung (biomonitoring).
43	Pulse Sensor	Analog	Detak jantung melalui transmisi cahaya pada kulit.
44	MLX90614	I2C	Termometer inframerah (suhu tanpa sentuh).
45	DS3231 (RTC)	I2C	Modul waktu presisi (stempel waktu/timestamp data).

46	GP2Y1010AU0F	Analog	Deteksi debu dan partikulat udara (PM2.5).
47	Hall Effect	Analog / Digital	Deteksi medan magnet (kecepatan putar/RPM).
48	Flex Sensor	Analog	Sensor tekukan (deformasi material/reaktor).
49	FSR402	Analog	<i>Force Sensitive Resistor</i> (tekanan/berat kualitatif).
50	IR Obstacle	Digital	Deteksi penghalang (penghitung tetesan titrasi).

Catatan Teknis Penting:

1. **Level Tegangan:** Perhatikan bahwa ESP32 bekerja pada tegangan 3.3 V , sementara banyak sensor analog (seperti seri MQ) memerlukan 5 V . Gunakan *Logic Level Converter* jika diperlukan.
2. **Kalibrasi:** Untuk sensor kimia (pH, TDS, Gas), nilai yang dihasilkan oleh tabel pencarian (*look-up table*) harus dikalibrasi ulang secara periodik menggunakan larutan standar atau gas referensi.
3. **Konsumsi Daya:** Sensor gas seri MQ memiliki pemanas (*heater*) internal yang mengonsumsi arus cukup besar ($\sim 150\text{ mA}$), pastikan catu daya mencukupi.

PENULIS**KASMUI**

- Dosen Kimia, Komputasi, IT, dan AI UNNES, serta Praktisi Ilmu Falak;
- Anggota Majelis Tabligh PDM Kota Semarang dan PWM Jawa Tengah;
- Anggota Tim Pengembang Software KHGT MTT PP Muhammadiyah;
- Website pribadi: <https://hisabmu.com/>, <https://kasmui.cloud/>;
- Minat & Hobi: Computer programming.

Sensor & Arduino untuk Praktikum di Laboratorium Kimia

Panduan Komprehensif Merancang Instrumen Lab Cerdas

Synopsis

Buku ini adalah panduan praktis untuk mahasiswa, dosen, dan peneliti kimia yang ingin memodernisasi laboratorium mereka teknologi mikrokontroler. Pelajari langkah-demi-langkah cara:

- (1) Merancang dan merakit berbagai sensor kimia (pH, TDS, konduktivitas, gas) menggunakan mikrokontroler Arduino.
- (2) Membangun instrumen kustom mandiri (misalnya, spektrofotometer sederhana).
- (3) Memanfaatkan akuisisi data waktu nyata untuk riset dan pendidikan.

Dilengkapi dengan bab khusus tentang integrasi data dan proyek AI sederhana untuk analisis. Kembangkan kedaulatan riset Anda dengan instrumentasi mandiri!

Target Pembaca: Mahasiswa Kimia/Teknik, Peneliti Laboratorium, Peminat Instrumentasi.