

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	i
LEMBARAN PERSETUJUAN TUGAS AKHIR.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
LEMBAR PERSEMBAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I	
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Pengenalan Masalah.....	1
1.1.1 Informasi Pendukung Masalah.....	4
1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain.....	7
1.1.3 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi.....	10
1.1.4 Tujuan.....	10
1.2 Solusi.....	10
1.2.1 Karakteristik Produk.....	10
1.2.2 Usulan Solusi.....	12
1.2.3 Analisis Usulan Solusi.....	25
1.2.4 Solusi yang Dipilih.....	28
BAB II	
SPESIFIKASI.....	29
2.1 Spesifikasi Produk.....	29
2.1.1 Memiliki kemampuan untuk melakukan pembacaan Konsentrasi polutan sebagai input.....	30
2.1.2 Alat mampu menyaring partikel halus dan gas mencapai 70%.....	35
2.1.3 Memiliki sistem pendeteksi perokok dan notifikasi peringatan.....	41
2.1.4 Mampu melakukan komputasi dengan akurat dan mampu menggerakkan semua komponen yang terpasang.....	41
2.2 Analisis Kebutuhan Daya.....	44
2.3 Verifikasi.....	46
2.4 Perencanaan Pasar.....	48
2.4.1 Perkiraan Biaya.....	48
2.4.2 Analisis Finansial.....	50
BAB III	
RANCANGAN.....	54
3.1 Rancangan Umum Sistem.....	54

3.2 Rancangan Proses.....	62
3.3 Rancangan Detail komponen Sistem.....	67
3.3.1 Rancangan Perangkat Keras.....	67
3.3.2 Rancangan Perangkat Lunak.....	72
3.4 Rencana Jadwal Pengerjaan.....	75
BAB IV	
IMPLEMENTASI.....	77
4.1 Implementasi Sistem.....	77
4.1.1 Implementasi Perangkat Keras.....	79
4.1.2 Implementasi Perangkat Lunak.....	80
4.2 Pengujian.....	90
4.2.1 Menguji kemampuan pembacaan konsentrasi polutan input.....	90
4.2.1.1 Menguji Kemampuan input PM2.5 dari 0-40ugm.....	90
4.2.1.1.1 Langkah Pengujian.....	90
4.2.1.1.2 Hasil pengujian.....	90
4.2.1.1.3 Analisa pengujian.....	93
4.2.1.2 Menguji Kemampuan input CO dari 0-30ppm.....	94
4.2.1.2.1 Langkah Pengujian.....	94
4.2.1.2.2 Hasil Pengujian.....	94
4.2.1.2.3 Analisa pengujian.....	96
4.2.1.3 Menguji Kemampuan kamera.....	96
4.2.1.3.1 Langkah Pengujian.....	96
4.2.1.3.2 Hasil Pengujian.....	97
4.2.1.3.3 Analisa pengujian.....	97
4.2.2 Alat mampu mengurangi partikel halus dan gas.....	98
4.2.2.1 Alat mampu mengurangi partikel halus PM2.5.....	98
4.2.2.1 Langkah Pengujian.....	98
4.2.2.2 Hasil Pengujian.....	98
4.2.2.3 Analisa Pengujian.....	98
4.2.2.2 Alat mampu mengurangi gas CO.....	99
4.2.2.1 Langkah Pengujian.....	99
4.2.2.2 Hasil Pengujian.....	100
4.2.2.3 Analisa Pengujian.....	100
4.2.3 Mampu melakukan komputasi dengan akurat dan mampu menggerakkan semua komponen yang terpasang.....	101
4.2.3.1 Alat memiliki kemampuan waktu respon < 3 detik.....	101
4.2.3.1.1 Langkah Pengujian.....	101
4.2.3.1.2 Hasil Pengujian.....	102
4.2.3.1.3 Analisa Pengujian.....	105
4.2.3.2 Alat memiliki akurasi pemrosesan data > 85 %.....	106

4.2.3.2.1 Langkah Pengujian.....	106
4.2.3.2 Hasil Pengujian.....	106
4.2.3.3 Analisa Pengujian.....	107
4.2.4 Validasi alat mendeteksi polutan dan mengurangi polutan udara...	109
4.2.4.1 Langkah Pengujian.....	109
4.2.4.2 Hasil Pengujian.....	110
4.2.4.3 Analisa Pengujian.....	112
BAB V	
PENUTUP.....	115
5.1 Kesimpulan.....	115
5.2 Saran.....	116
DAFTAR PUSTAKA.....	117
LAMPIRAN.....	123



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Sistem Kerja Alat.....	17
Gambar 1.2 Flowchart Rule Based System.....	20
Gambar 1.3 Flowchart Hysteresis.....	23
Gambar 2.1 MQ-138[25].....	32
Gambar 2.2 DSM501A[29].....	33
Gambar 2.3 DHT22[31].....	35
Gambar 2.4 Kanso Living TX-G1 Aksesoris Hepa Filter[33].....	36
Gambar 2.5 Exhaust Fan AC[36].....	41
Gambar 2.6 Raspberry Pi 5[40].....	42
Gambar 2.7 Adapter switching (SMPS) 12V – 5A (60W).....	46
Gambar 2.8 Buck Converter XL4016.....	46
Gambar 3.1 Rancangan umum sistem.....	55
Gambar 3.2 Tampak depan atas desain 3D Sistem.....	56
Gambar 3.3 Tampak belakang atas desain 3D sistem.....	56
Gambar 3.4 Tampak depan sistem saat implementasi dalam format 3D.....	57
Gambar 3.5 Tampak depan sistem dalam format 3D.....	58
Gambar 3.6 Tampak depan sistem dalam format gambar teknik.....	59
Gambar 3.7 Tampak atas sistem dalam format 3D.....	59
Gambar 3.8 Tampak Atas sistem dalam format gambar teknik.....	60
Gambar 3.9 Tampak samping sistem dalam format 3D.....	60
Gambar 3.10 Tampak Samping sistem dalam format gambar teknik.....	61
Gambar 3.11 Tampak Belakang atas kanan dalam format 3D.....	61
Gambar 3.12 Tampak Belakang atas kanan dalam format gambar teknik.....	62
Gambar 3.13 Blok Diagram Sistem.....	62
Gambar 3.14 Top Level Flowchart Sistem.....	63
Gambar 3.15 Sub Process flowchart sistem.....	66
Gambar 3.16 Rancangan perangkat keras.....	68
Gambar 3.17 Skematik Rangkaian.....	69
Gambar 3.18 Tampilan halaman dashboard Home.....	73
Gambar 3.19 tampilan halaman CO2.....	74
Gambar 3.20 Tampilan halaman PM.....	74
Gambar 3.21 Tampilan halaman HCHO.....	75
Gambar 3.22 Tampilan halaman Suhu/Kelembaban.....	75
Gambar 3.23 Gantt Chart.....	76
Gambar 4.1.1.1 Tampak depan Implementasi Perangkat Keras.....	79
Gambar 4.1.2.1 Flowchart kerja sistem perangkat Lunak.....	82
Gambar 4.1.2.2 Confusion Matrix.....	84
Gambar 4.1.2.3 Learning curve.....	85

Gambar 4.1.2.4 pohon keputusan (decision tree).....	86
Gambar 4.1.2.7 Hasil Klasifikasi Sensor dan Aktuator.....	88
Gambar 4.1.2.8 Dashboard sistem kualitas udara.....	89
Gambar 4.2.3.2.1 Persamaan tingkat akurasi sistem data logging.....	108
Gambar 4.2.3.2.2 Perhitungan akurasi sistem data logging.....	108
Gambar 4.2.4.1 Alat ketika terdeteksi klasifikasi aman(relay berwarna merah). 110	
Gambar 4.2.4.2 Alat ketika terdeteksi klasifikasi kurang aman(relay berwarna hijau).....	110
Gambar 4.2.4.4 Perbandingan Konsentrasi Karbon Monoksida (CO) Sebelum dan Sesudah Pengoperasian Exhaust Fan (n=150).....	112
Gambar 4.2.4.5 Perbandingan Konsentrasi PM2.5 Sebelum dan Sesudah Pengoperasian Exhaust Fan (n=150).....	112



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Solusi yang telah ada.....	3
Tabel 1.2 House of Quality.....	26
Tabel 2.1 Spesifikasi Produk.....	29
Tabel 2.2 Perbandingan sensor HCHO.....	31
Tabel 2.3 Perbandingan sensor PM2.5-PM10.....	32
Tabel 2.4 Perbandingan sensor suhu dan kelembapan udara.....	34
Tabel 2.5 Perbandingan Filter dan Pre-Filter.....	35
Tabel 2.6 Perbandingan Aktuator.....	39
Tabel 2.7 Tabel Perbandingan Spesifikasi Mikrokontroler.....	41
Tabel 2.8 Perbandingan Algoritma Machine Learning.....	43
Tabel 2.9 Kebutuhan Daya Komponen.....	44
Tabel 2.10 Verifikasi Perangkat.....	46
Tabel 2.11 Product Cost.....	48
Tabel 2.12 Development Cost.....	50
Tabel 2.13 Total Cost.....	50
2.4.2.1 Analisis SWOT.....	50
2.4.2.2 Analisis Kelayakan Finansial.....	52
Tabel 3.1 Koneksi pin Sensor DHT22 dengan Raspberry Pi 5.....	69
Tabel 3.2 Koneksi pin sensor MQ-138 dengan ADC (ADS1115).....	70
Tabel 3.3 Koneksi ADC (ADS1115) dengan Raspberry Pi 5.....	70
Tabel 3.4 Koneksi DSM501A dengan Raspberry Pi 5.....	70
Tabel 3.5 Koneksi MH-Z1911A dengan Raspberry Pi 5.....	70
Tabel 3.6 Koneksi Webcam dengan Raspberry Pi 5.....	71
Tabel 3.7 Koneksi Speaker dengan Raspberry Pi 5.....	71
Tabel 3.8 Koneksi Cooler Fan dengan Raspberry Pi 5.....	71
Tabel 3.9 Koneksi Relay Module dengan Raspberry Pi 5.....	72
Tabel 3.10 Koneksi Relay Module dengan Exhaust Fan.....	72
Tabel 3.11 Rencana Jadwal Pengerjaan.....	75
Tabel 4.1.2.1 Sampel Dataset.....	82
Tabel 4.1.2.2 Lima data pertama.....	83
Tabel 4.2.1.1 Data sensor.....	91
Tabel 4.2.1.2 Respon sensor.....	93
Tabel 4.2.1.3 Data Sensor.....	94
Tabel 4.2.1.4 Respon sensor.....	96
Tabel 4.2.1.5 Data Kamera.....	97
Tabel 4.2.2.1 Data sensor PM2.5 saat exhaust fan hidup.....	98
Tabel 4.2.2.2 Data sensor CO saat exhaust fan hidup.....	100
Tabel 4.2.3.1 Tabel TimeStamp seluruh alat.....	102

Tabel 4.2.3.2 Tabel TimeStamp sensor.....	104
Tabel 4.2.3.2 Tabel TimeStamp Respon ke website.....	104
Tabel 4.2.3.3 Lima sampel pertama tanpa label.....	107
Tabel 4.2.3.3.6 Lima sampel pertama dengan label.....	107
Tabel 4.2.4.1 5 sampel data hasil pengujian.....	111



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Kualitas udara, baik di ruang publik, rumah tinggal, maupun ruang kelas, merupakan isu nyata yang berdampak langsung pada kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas masyarakat. Indonesia menghadapi dua sumber utama polusi udara yang paling sering ditemui dalam kehidupan sehari-hari, yaitu asap rokok dan polusi udara dari kendaraan bermotor. Kedua sumber polusi ini tidak hanya mempengaruhi kualitas udara luar, tetapi juga meningkatkan pencemaran udara di dalam ruangan tertutup yang seharusnya menjadi tempat aman, termasuk rumah dan ruang kelas. Kondisi ini menjadikan masalah kualitas udara sebagai persoalan multidimensional yang relevan untuk diselesaikan melalui pendekatan keteknikan.

Di ruang publik, paparan asap rokok tetap tinggi meskipun regulasi kawasan tanpa rokok telah ditetapkan. Sekitar 60 juta perokok di Indonesia, sebagian besar laki-laki, menyebabkan masyarakat umum sering menjadi perokok pasif tanpa pilihan. Studi-studi menunjukkan bahwa lebih dari 79% masyarakat merasa terganggu kenyamanannya akibat asap rokok, sementara wanita dan anak-anak yang tinggal bersama perokok aktif memiliki risiko lebih tinggi mengalami penyakit pernapasan dan kardiovaskular [1]. Rendahnya kesadaran perokok aktif, lemahnya pengawasan di fasilitas umum, dan tidak adanya sistem deteksi otomatis menjadikan masalah ini terus berulang tanpa solusi teknis yang efektif.

Di sisi lain, polusi udara dari kendaraan bermotor terutama berdampak pada rumah-rumah yang berada di tepi jalan raya. Asap kendaraan yang mengandung PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, CO, dan SO₂ dapat masuk ke dalam rumah melalui ventilasi, sehingga penghuni tetap terpapar polutan meskipun berada di dalam ruangan. Dampaknya sangat serius, terutama bagi anak-anak usia 0–10 tahun yang berisiko tinggi mengalami ISPA, penurunan fungsi paru-paru, gangguan tumbuh kembang, dan penurunan imunitas. Penelitian menunjukkan peningkatan PM_{2.5} sebesar 10 µg/m³ dapat meningkatkan risiko rawat inap hingga 20% [2].

Permasalahan serupa juga ditemukan dalam ruang kelas. Sirkulasi udara yang buruk menyebabkan tingginya kadar CO₂, VOC, formaldehida, dan partikel halus. Konsentrasi CO₂ sering kali melampaui batas aman 1000 ppm, menyebabkan siswa mengantuk, sulit berkonsentrasi, cepat lelah, hingga turunnya performa akademik. Bahkan, berbagai penelitian membuktikan bahwa kualitas udara dalam ruangan dapat 2–5 kali lebih buruk dari udara luar. Hal ini memperburuk kondisi pembelajaran serta berpotensi menimbulkan *Sick Building Syndrome* (SBS) bagi penghuni ruangan [3].

Dalam beberapa peraturan yang berlaku, telah ditetapkan bahwasanya suatu ruangan dapat dikatakan bagus kualitas udaranya jika, polutan karbondioksida dalam ruangan tersebut kurang dari 1000 ppm, selain itu batas aman dari formaldehida adalah 0,1 ppm. Sedangkan WHO merekomendasikan batas lebih ketat yaitu 0.08 ppm dengan rata-rata paparan satu jam. Paparan jangka pendek dapat menimbulkan iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan [4].

Sementara itu, polutan berupa partikel halus seperti PM_{2.5} dan PM₁₀ juga menjadi perhatian, kadar maksimum yang diperbolehkan adalah 65 mikrogram untuk PM_{2.5} dan 150 mikrogram untuk PM₁₀ dalam periode 24 jam [4].

Stakeholder utama dalam masalah ini adalah penghuni ruangan itu sendiri (mahasiswa, siswa, dosen/guru) serta pengelola gedung. Penghuni berkepentingan mendapatkan lingkungan yang sehat dan mendukung produktivitas, sementara pengelola gedung berkepentingan menyediakan fasilitas yang layak dan sesuai standar kesehatan yang ditetapkan pemerintah. Solusi yang efektif akan memberikan dampak positif berupa peningkatan kesehatan, kenyamanan, dan performa akademik maupun profesional bagi para penghuni. Dengan permasalahan ini berdampak kepada mahasiswa/siswa karena paparan polutan karbondioksida (CO₂) yang melebihi 1000 ppm akan mengakibatkan mengantuk dan kurang berkonsentrasi dalam beraktivitas pembelajaran. Selain itu, dosen/guru

akan berdampak juga dikarenakan mahasiswa/siswa yang kurang konsentrasi akan mengakibatkan terganggunya aktivitas pembelajaran di dalam kelas [5].

Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi masalah kualitas udara di tiga lingkungan tersebut, seperti penerapan kawasan tanpa rokok, kampanye edukasi, penyediaan ventilasi, dan desain ruang yang lebih sehat. Namun, solusi yang ada pada umumnya masih bersifat manual, reaktif, dan kurang efektif dalam memberikan peringatan dini terhadap polusi atau perilaku yang berisiko. Padahal, pendekatan berbasis teknologi mampu memberikan deteksi otomatis, pemantauan *real-time*, dan respons cepat sehingga pengendalian kualitas udara dapat dilakukan secara lebih optimal. Dengan demikian, diperlukan inovasi sistem berbasis sensor dan kecerdasan buatan untuk mendukung upaya pencegahan polusi udara, baik yang berasal dari asap rokok, emisi kendaraan, maupun akumulasi polutan dalam ruangan, guna menciptakan lingkungan hidup yang sehat, nyaman, dan produktif.

Tabel 1.1 Solusi yang telah ada

Solusi	Kelebihan	Kekurangan
<i>Air Purifier</i> Konvensional	- Efektif menyaring partikel halus - Banyak tersedia di pasaran - Mudah digunakan	- Tidak semua model bisa menyaring gas seperti CO₂ dan VOC - Membutuhkan listrik dan penggantian <i>filter</i> secara berkala - Biaya operasional yang cukup tinggi
<i>Exhaust Fan</i>	- Lebih efektif dibandingkan ventilasi alami dan mempercepat sirkulasi udara - Relatif murah dan mudah dipasang	- Tidak menyaring polutan, hanya membuang udara - Jika udara luar juga kotor, kualitas udara tidak banyak membaik

<i>Humidifier</i>	- Membantu mengurangi penyebaran bakteri dan jamur - Menjaga kenyamanan pernapasan	- Tidak langsung mengurangi polutan CO₂ atau VOC - Jika salah penggunaan akan meningkatkan kondisi kelembaban yang tinggi hingga membuat ruangan berjamur
-------------------	---	---

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Kualitas udara yang sehat pada dasarnya memiliki standar tertentu agar aman dihirup oleh manusia. *Particulate Matter* (PM) merupakan jenis polutan udara yang terdiri dari campuran partikel cair maupun padat yang melayang di atmosfer, terbagi dua yaitu PM_{2.5} dan PM₁₀:

1. PM 2.5

Adalah campuran partikel padat dan tetesan cairan di udara yang berdiameter kurang dari 2,5 mikrometer.

2. PM 10

Polutan udara yang berukuran sangat kecil, sekitar 10 mikron (mikrometer) atau kurang, termasuk asap, debu, jelaga, garam, asam, dan logam.

Untuk partikel halus PM_{2.5}, kadar yang dianggap aman tidak melebihi 15 µg/m³ per hari, sementara untuk PM₁₀ ambang batasnya berada pada kisaran maksimal 45 µg/m³. Gas pencemar seperti nitrogen dioksida (NO₂) sebaiknya tidak lebih dari 25 µg/m³, dan ozon (O₃) troposferik seharusnya berada di bawah 100 µg/m³ [6]. Namun, kondisi nyata di kawasan perkotaan sering menunjukkan nilai yang jauh di atas standar tersebut. Konsentrasi PM_{2.5} di kota besar dapat mencapai

rata-rata 35–40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, atau hampir dua hingga tiga kali lipat dari batas aman [7]. Fakta ini menunjukkan bahwa udara yang dihirup sehari-hari sudah berada pada tingkat yang berisiko terhadap kesehatan.

Kontribusi terbesar polusi udara di wilayah perkotaan berasal dari emisi kendaraan bermotor, dengan persentase sekitar 60–70 persen dari total pencemaran [8]. Emisi tersebut mengandung gas berbahaya (CO_2) yang mana ambang batas kadar CO_2 di udara adalah 700 ppm, dan partikel halus $\text{PM}_{2.5}$ maupun PM_{10} yang dapat bertahan lama di udara. Rumah tangga yang berada di tepi jalan raya menghadapi risiko lebih tinggi, sebab kualitas udara di lokasi dengan jarak kurang dari 100 meter dari jalan utama dapat mencapai 2 hingga 3 kali lebih buruk dibandingkan daerah yang lebih jauh dari jalur lalu lintas [9]. Polusi ini tidak hanya bertahan di luar ruangan, tetapi juga masuk ke dalam rumah melalui ventilasi, jendela, dan celah bangunan, sehingga penghuni rumah tidak sepenuhnya terlindungi.

Kondisi kualitas udara luar ruangan yang telah melampaui ambang batas aman tersebut secara langsung berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara di dalam ruangan. Kualitas udara di dalam ruangan memiliki pengaruh langsung terhadap kemampuan seseorang dalam berkonsentrasi dan berpikir jernih. Konsentrasi karbon dioksida menunjukkan peningkatan kadar CO_2 di atas ambang 1000 ppm dapat menyebabkan rasa kantuk. Selain itu polutan seperti HCHO dan VOC juga berkontribusi pada gangguan kognitif. Paparan jangka pendek akan menimbulkan sakit kepala. [10]

Dalam perhitungan kualitas udara, *volume* dan luas ruangan sangat berdampak dengan kualitas udara di dalam ruangan kelas. Semakin besar *volume* dalam ruangan maka semakin lama waktu yang dibutuhkan CO_2 dan polutan lain untuk mencapai ambang berbahaya dan untuk ruangan yang kecil dan padat penghuni akan mengakibatkan kadar CO_2 dengan cepat naik dalam waktu 30 menit. Selain itu, kepadatan orang dalam suatu ruangan lebih berpengaruh dengan kualitas udara. Semakin padat jumlah orang dalam suatu ruangan, maka polutan VOC

akan naik dengan lebih cepat. Dalam pengukuran polutan CO₂ menggunakan *NDIR CO₂ ANALYZER*, sedangkan untuk fomoheldia menggunakan Spektrofotometer dan untuk pengukuran PM_{2.5} dan PM₁₀ menggunakan *Gravimetric Method*[5].

Selain mempertimbangkan kapasitas aliran udara dan volume ruangan, distribusi polutan di dalam ruangan juga dipengaruhi oleh fenomena *thermal stratification*, yaitu kecenderungan udara hangat untuk bergerak ke arah atas akibat perbedaan densitas. Berbagai kajian tentang kualitas udara dalam ruangan dan simulasi aliran udara menunjukkan bahwa udara dalam ruang tidak selalu diaduk secara merata (*not well-mixed*) tetapi dapat membentuk gradien vertikal; misalnya simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dalam ruang tanpa ventilasi menemukan bahwa konsentrasi CO₂ meningkat secara berbeda tergantung pada ketinggian di dalam ruang akibat stratifikasi udara yang dihasilkan oleh perbedaan massa jenis dari udara panas dan dingin, menunjukkan bahwa ventilasi pada tingkat atas ruang lebih efektif dalam mengeluarkan polutan dari zona tersebut[50]. Selain itu, hasil simulasi lain juga menunjukkan bahwa stratifikasi dapat terjadi di ruang kelas besar atau ruang tertutup bila aliran udara belum cukup kuat untuk mencampur udara secara merata, sehingga area atas dapat menumpuk udara yang lebih tercemar dibandingkan bagian bawahnya[51]. Tanpa adanya sirkulasi udara yang memadai, udara tercemar (termasuk gas CO₂ atau VOC) cenderung terakumulasi di lapisan atas ruangan sebelum tercampur secara homogen ke seluruh ruangan. Oleh karena itu, penempatan sensor kualitas udara dan outlet *exhaust fan* pada bagian atas ruangan dinilai lebih efektif dalam mendeteksi dan membuang udara tercemar sesuai dengan perilaku konveksi alami dan pola aliran udara dalam ruang tertutup[52].

Masalah selanjutnya, polutan seperti formaldehida (HCHO) yang bisa menguap dari perabotan baru, cat, ataupun lem juga dapat memberikan dampak buruk terhadap kesehatan penghuni. Zat ini mudah menguap ke udara dan bertahan dalam waktu yang lama, sehingga meningkatkan konsentrasi HCHO di dalam ruangan. Sebuah studi kasus pada bangunan kos di Yogyakarta telah menemukan

konsentrasi formaldehida (HCHO) yang cukup tinggi dapat menyebabkan iritasi mata dan tenggorokan pada penghuninya. Selain itu, kelembaban tinggi di ruangan ber- AC tanpa ventilasi yang memadai dapat menciptakan lingkungan yang ideal untuk pertumbuhan jamur dan bakteri. Spora jamur ini dapat dengan mudah menyebar di udara dan memperburuk kondisi penderita asma dan alergi.[11]

Selain polutan ambien dari aktivitas perkotaan, kualitas udara juga dipengaruhi oleh sumber pencemar lokal seperti asap rokok, yang dapat meningkatkan konsentrasi zat berbahaya secara signifikan di ruang publik maupun ruang tertutup. Oleh karena itu, asap rokok menjadi salah satu kontributor penting pencemaran udara yang berdampak langsung terhadap kesehatan dan kenyamanan masyarakat. Asap rokok diketahui mengandung sekitar 5.000 senyawa kimia dengan berbagai karakteristik yang berbahaya bagi kesehatan. Dari jumlah tersebut, sekitar 250 senyawa bersifat toksik, sementara 70 di antaranya telah terbukti bersifat karsinogenik. Beberapa zat yang umum dijumpai adalah karbon monoksida, nikotin, tar, benzena, formaldehida, dan nitrosamin. Zat-zat ini dapat menimbulkan kerusakan sel, mengganggu fungsi paru-paru, meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular, serta memicu terjadinya kanker pada organ vital. Kondisi tersebut menjadikan asap rokok sebagai salah satu faktor risiko terbesar terhadap kesehatan masyarakat secara umum [12]. Pada Gambar 1.2 dapat dilihat beberapa zat kimia yang terkandung pada rokok. Untuk menyelesaikan permasalahan dimana asap rokok yang dapat mengganggu ini, beberapa kandungan asap rokok seperti karbon monoksida dapat dideteksi menggunakan sensor asap.

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

Dalam merancang solusi untuk permasalahan kualitas udara yang buruk dalam ruangan tertutup, terdapat beberapa aspek yang berkaitan dengan masalah tersebut.

- a. Lingkungan : Penggunaan ruangan tertutup dengan ventilasi buruk meningkatkan kadar CO₂, VOC, dan kelembaban, yang dalam jangka panjang memperburuk kondisi ekosistem mikro dalam ruangan. Udara yang tidak sehat juga dapat menimbulkan sindrom "*Sick Building Syndrome*" (SBS) yang sering terjadi pada gedung-gedung perkantoran atau sekolah[13]. Solusi yang diusulkan dirancang menggunakan komponen elektronik yang tidak memberikan dampak negatif terhadap lingkungan sekitar serta solusi tersebut memperbaiki lingkungan dengan meningkatkan kualitas udara melalui penyaringan polutan dari dalam dan luar ruangan.

1. Konstrain 1 (Ambang Batas) : Sistem harus mengacu pada **Permenkes No. 1077 Tahun 2011** tentang Penyehatan Udara Dalam Ruang

2. Konstrain 2 (Kawasan Tanpa Rokok) : Berdasarkan **UU No. 17 Tahun 2023**, sistem identifikasi perokok harus mendukung penegakan aturan larangan merokok di area publik dan fasilitas pendidikan/kesehatan

- b. Kesehatan : Dari sisi kesehatan, kualitas udara yang buruk memberikan dampak serius terhadap masyarakat. Polusi udara telah memicu peningkatan kasus Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) dan gangguan pernapasan, dengan anak-anak sebagai kelompok paling rentan karena sistem pernapasan mereka masih dalam tahap perkembangan[14]. Selain itu, paparan asap rokok di ruang publik memperburuk kondisi kesehatan masyarakat karena mengandung zat berbahaya seperti nikotin, tar, dan karbon monoksida yang bersifat toksik dan karsinogenik, sehingga meningkatkan risiko gangguan pernapasan, penyakit jantung, dan kanker, baik pada perokok aktif maupun pasif[15]. Di dalam ruangan tertutup, tingginya kadar CO₂ yang melebihi 1000 ppm juga berdampak langsung terhadap kesehatan penghuni, menyebabkan kantuk, sakit kepala, serta penurunan fungsi kognitif.[16]. Selain itu, ditinjau dari sisi penghuninya, solusi yang akan dirancang tidak akan menyebabkan menurunnya kondisi

kesehatan dari penghuni karena pada dasarnya solusi yang akan dirancang dipergunakan untuk meningkatkan kondisi penghuni dan mengurangi resiko penyakit pernapasan seiring dengan meningkatkan kualitas udara.

1.Konstrain 3 (zat adiktif): **Peraturan Pemerintah (PP) No. 109 Tahun 2012:** Tentang Pengamanan Bahan yang Mengandung Zat Adiktif berupa Produk Tembakau bagi Kesehatan. Aturan ini menegaskan perlunya perlindungan bagi non-perokok dari paparan asap rokok di tempat umum.

- c. Sosial : Kualitas udara yang buruk, baik akibat sirkulasi ruangan yang tidak memadai, kebiasaan merokok di sembarang tempat, maupun paparan polusi dari kendaraan bermotor dan aktivitas manusia lainnya, menimbulkan ketidaknyamanan bagi pengguna ruang. Kondisi ini dapat menurunkan kepuasan dan kenyamanan masyarakat, seperti siswa di ruang kelas, karyawan di perkantoran, serta pengunjung fasilitas umum. Selain itu, budaya permisif terhadap rokok dan tingginya aktivitas di lingkungan sekitar memicu konflik antara hak perokok untuk merokok dan hak masyarakat lain untuk memperoleh udara yang bersih dan sehat[17]. Solusi yang telah diusulkan tidak memberikan efek sosial negatif karena perangkat yang digunakan tidak mengganggu kenyamanan penghuni dan dapat meningkatkan produktivitas dan kenyamanan masyarakat dengan menyediakan udara yang bersih dan sehat, lalu solusi ini akan menggunakan perangkat yang tidak akan mengeluarkan suara bising sehingga tidak mengganggu penghuni sekitar. Selain itu, solusi yang dirancang secara tidak langsung juga akan membangun kawasan anti rokok sehingga akan menambahkan rasa nyaman untuk penghuni

1.Konstrain 4 (Publik) : **Perda (Peraturan Daerah) KTR Lokal:** (Misal: Perda DKI Jakarta No. 2 Tahun 2005 atau Perda daerahmu). Regulasi ini biasanya memberikan mandat bahwa ruangan tertutup di area publik harus 100% bebas asap rokok tanpa menyediakan tempat merokok di dalam gedung tersebut.

1.1.3 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan analisis yang dilakukan, kebutuhan yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan masalah tersebut adalah sebagai berikut.

1. Diperlukan sebuah implementasi yang dapat mendeteksi polutan seperti CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, HCHO, dan asap rokok dalam ruangan tertutup secara real time.
2. Sistem harus mampu menyimpan dan mengolah data yang diperoleh.
3. Sistem harus mampu memantau kualitas udara dengan akurat.
4. Sistem harus mampu meningkatkan kualitas udara apabila polutan udara teridentifikasi meningkat melebihi batas toleransi

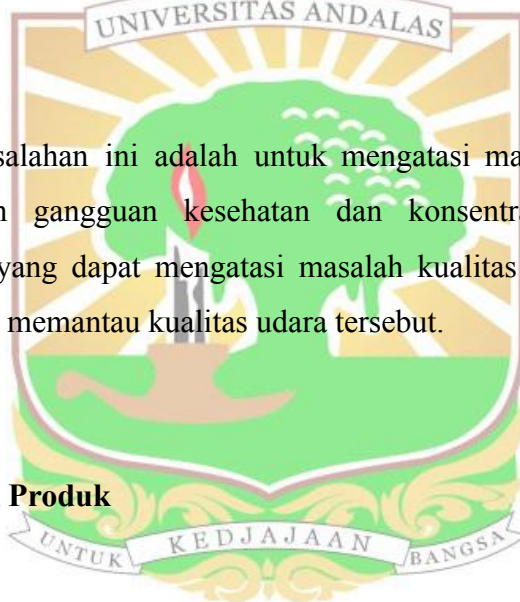
1.1.4 Tujuan

Tujuan dari permasalahan ini adalah untuk mengatasi masalah dalam ruangan yang menyebabkan gangguan kesehatan dan konsentrasi penghuni, maka dibutuhkan sistem yang dapat mengatasi masalah kualitas udara yang buruk di dalam ruangan serta memantau kualitas udara tersebut.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

1. Fitur Dasar :
 - a. *Sensing Capability* : Fitur dasar yang memiliki kemampuan sistem untuk mengenali dan mengukur kualitas udara secara menyeluruh di dalam ruangan tertutup. Melalui kemampuan ini, sistem dapat mendeteksi adanya polutan atau partikel berbahaya yang dapat mempengaruhi kesehatan dan kenyamanan penghuni seperti polutan CO₂, HCHO, PM_{2.5}, PM₁₀
 - b. *Data Processing* : Fitur dasar yang menggambarkan kemampuan sistem dalam mengolah data hasil pengukuran menjadi informasi yang bermakna. Data yang diperoleh dari proses *sensing* yang



dianalisis untuk menentukan status kualitas udara, apakah dalam kondisi baik, sedang, atau berbahaya.

- c. *Monitoring System* : Fitur dasar dapat berfungsi untuk menampilkan kondisi kualitas udara secara langsung kepada pengguna.
- d. *Automated Action* : Fitur dasar yang memungkinkan sistem untuk melakukan tindakan korektif secara otomatis berdasarkan hasil analisis yang dilakukan sebelumnya. Ketika kondisi udara terdeteksi menurun, sistem secara mandiri akan melakukan langkah penyesuaian tanpa memerlukan intervensi dari pengguna.
- e. *Notification Capability* : Fitur ini merujuk kepada kemampuan sistem untuk memberikan peringatan, baik secara visual atau audio.

2. Fitur Tambahan :

- a. Dapat diselesaikan dalam 6 bulan : Solusi yang diberikan harus diselesaikan dalam waktu enam bulan. Proses perancangan, pengembangan, dan pengujian dapat diselesaikan dalam jangka waktu ini.
- b. Biaya produksi < 5jt : Fitur tambahan menunjukkan bahwa sistem dirancang untuk dapat dibangun dengan biaya yang efisien tanpa mengorbankan kinerja atau keandalannya. Prinsip efisiensi diterapkan dalam proses perancangan dan pemilihan teknologi agar hasil akhirnya tetap terjangkau untuk diterapkan secara luas.
- c. Memenuhi standar dan regulasi : Fitur tambahan harus memastikan bahwa sistem beroperasi sesuai dengan standar dan regulasi yang telah ditetapkan oleh lembaga nasional maupun internasional terkait kualitas udara dalam ruangan.
- d. Mampu beradaptasi dengan lingkungan : Sistem dirancang agar dapat menyesuaikan respons pengendalian udara secara adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan sekitar.
- e. Mudah diimplementasikan : Solusi yang diberikan dapat dikembangkan dengan mudah, tanpa harus memerlukan

pengetahuan atau alat teknis yang sangat rumit. hal ini dapat mendukung proses implementasi menjadi cepat dan efisien.

1.2.2 Usulan Solusi

1. Sistem Prediktif Kualitas Udara Berbasis Machine Learning.

Solusi yang diusulkan merupakan sistem peningkatan kualitas udara pada ruangan tertutup berbasis *machine learning* (ML) yang bekerja secara prediktif, adaptif, dan kontekstual terhadap kondisi lingkungan. Sistem ini dirancang untuk memantau, menganalisis, serta memprediksi perubahan kualitas udara secara berkelanjutan, sehingga mampu melakukan tindakan pencegahan sebelum kualitas udara menurun melewati ambang batas yang direkomendasikan oleh WHO, ASHRAE, maupun peraturan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.

Sistem mengintegrasikan berbagai sensor lingkungan untuk mengukur parameter kualitas udara utama, meliputi konsentrasi karbon dioksida (CO_2), formaldehida (HCHO), serta partikulat udara halus PM2.5 dan PM10. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan sensor suhu dan kelembapan udara yang berfungsi sebagai parameter pendukung dalam analisis kondisi lingkungan ruangan. Data suhu digunakan untuk membantu memahami pola akumulasi polutan serta pengaruh kondisi termal terhadap kualitas udara dan kenyamanan penghuni. Berdasarkan penelitian "*Assessment of Traffic-Related Air Pollution Effects on Indoor Air Quality in Educational Buildings*", kondisi suhu dan kelembapan memiliki keterkaitan dengan konsentrasi partikel di udara dalam ruangan. Kelembapan relatif yang tinggi dapat memengaruhi karakteristik partikel halus karena partikel bersifat higroskopis dan mampu menyerap uap air, sehingga bertahan lebih lama di udara dan terakumulasi dengan konsentrasi yang lebih tinggi. Selain itu, kondisi lingkungan sekitar seperti polusi lalu lintas juga dapat memperburuk kualitas udara dalam ruangan melalui infiltrasi udara luar, terutama pada bangunan dengan ventilasi yang tidak optimal [22].

Dan berdasarkan Penelitian berjudul “*Real-Time Insights into Indoor Air Quality in University Environments: PM and CO₂ Monitoring*” menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ di dalam ruangan sering terjadi bersamaan dengan kondisi suhu dan kelembapan yang kurang ideal. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan ventilasi dan tingginya aktivitas penghuni, yang mengakibatkan akumulasi panas, uap air, serta gas hasil respirasi manusia. Temuan ini menunjukkan bahwa parameter suhu dan kelembapan dapat digunakan sebagai indikator pendukung untuk memahami kondisi sirkulasi udara dan tingkat kualitas udara dalam ruangan secara menyeluruh [23].

Seluruh data sensor dikumpulkan secara kontinu dan dikirimkan ke unit pengendali pusat berbasis mikrokontroler yang memiliki kemampuan pemrosesan data dan inferensi *machine learning*. Data tersebut digunakan sebagai masukan utama dalam proses analisis dan prediksi kualitas udara secara real-time.

Sebagai pengembangan lanjutan, sistem ini dilengkapi dengan modul kamera yang berfungsi untuk menangkap informasi visual kondisi ruangan. Integrasi kamera memungkinkan sistem untuk mendeteksi aktivitas manusia, khususnya aktivitas merokok di dalam ruangan. Aktivitas merokok dijadikan sebagai parameter penting karena kontribusinya yang signifikan terhadap peningkatan konsentrasi polutan berbahaya, terutama partikulat halus dan senyawa kimia beracun.

Data visual dari kamera diproses menggunakan algoritma *computer vision* berbasis *machine learning* untuk mengidentifikasi indikasi aktivitas merokok, seperti keberadaan asap rokok atau pola gerakan tertentu. Informasi hasil identifikasi ini kemudian dikombinasikan dengan data sensor kualitas udara dan sensor suhu untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi dan sumber pencemaran udara di dalam ruangan.

Selain fungsi pemantauan dan prediksi, sistem ini juga dilengkapi dengan mekanisme notifikasi sebagai bentuk peringatan dini. Ketika sistem mendeteksi aktivitas merokok atau memprediksi peningkatan polutan akibat asap rokok,

sistem akan secara otomatis mengaktifkan notifikasi peringatan. Notifikasi ini dapat berupa peringatan visual atau audio di dalam ruangan, serta pesan digital yang dikirimkan melalui media komunikasi tertentu. Tujuan dari sistem notifikasi ini adalah untuk memberikan peringatan langsung kepada perokok agar menghentikan aktivitas merokok di dalam ruangan, sekaligus mengedukasi penghuni mengenai dampak aktivitas tersebut terhadap kualitas udara dan kesehatan bersama.

Model *machine learning* dikembangkan menggunakan pendekatan *supervised learning* dengan memanfaatkan data historis yang mencakup data polutan, suhu, kelembaban, serta hasil analisis visual dari kamera. Kombinasi parameter ini memungkinkan model untuk mengenali pola perubahan kualitas udara yang disebabkan oleh faktor lingkungan maupun aktivitas manusia. Algoritma *machine learning* seperti *Random Forest*, *Support Vector Regression*, atau *Artificial Neural Network* digunakan karena kemampuannya dalam menangani data multivariat dan pola nonlinier.

Tahapan kerja sistem dimulai dengan proses pengambilan data sensor dan data visual secara *real-time* dalam interval waktu tertentu. Data tersebut kemudian melalui tahap pra-pemrosesan, termasuk pembersihan data dari *noise*, normalisasi nilai pengukuran, serta ekstraksi fitur penting dari data suhu dan citra kamera. Tahap ini bertujuan untuk memastikan data yang digunakan dalam proses prediksi memiliki kualitas yang baik dan konsisten.

Setelah tahap pra-pemrosesan, sistem menjalankan proses prediksi kualitas udara menggunakan model *machine learning* yang telah dilatih. Apabila hasil prediksi menunjukkan potensi peningkatan polutan yang dipicu oleh aktivitas merokok atau kondisi lingkungan tertentu, sistem akan melakukan dua tindakan utama secara bersamaan, yaitu mengaktifkan aktuator pengendalian kualitas udara serta mengirimkan notifikasi peringatan kepada penghuni ruangan.

Pengendalian aktuator dilakukan berdasarkan prinsip pengendalian prediktif berbasis data, di mana keputusan sistem mempertimbangkan kondisi kualitas

udara saat ini, hasil prediksi, serta informasi aktivitas yang diperoleh dari kamera. Dengan pendekatan ini, sistem mampu melakukan tindakan pencegahan secara lebih dini dan efektif.

Aktuator bekerja berdasarkan keputusan yang dihasilkan dari analisis data sensor, hasil identifikasi aktivitas merokok, serta prediksi kualitas udara pada waktu mendatang. Ketika sistem mendeteksi atau memprediksi terjadinya peningkatan polutan, aktuator akan diaktifkan untuk meningkatkan sirkulasi udara di dalam ruangan dengan membuang udara yang tercemar dan membantu masuknya udara yang lebih bersih.

Selama sistem beroperasi, hasil pengukuran aktual dibandingkan dengan hasil prediksi untuk menghasilkan umpan balik adaptif. Apabila terjadi perbedaan yang signifikan, model *machine learning* akan diperbarui menggunakan data terbaru sehingga akurasi prediksi dapat terus ditingkatkan.

Keunggulan utama dari sistem ini terletak pada kemampuannya menggabungkan data sensor kualitas udara, sensor suhu, data visual kamera, serta sistem notifikasi dalam satu kesatuan sistem cerdas. Sistem tidak hanya mendeteksi dan memprediksi penurunan kualitas udara, tetapi juga mampu memberikan peringatan langsung kepada perokok, sehingga aspek pencegahan dan edukasi dapat berjalan secara bersamaan.

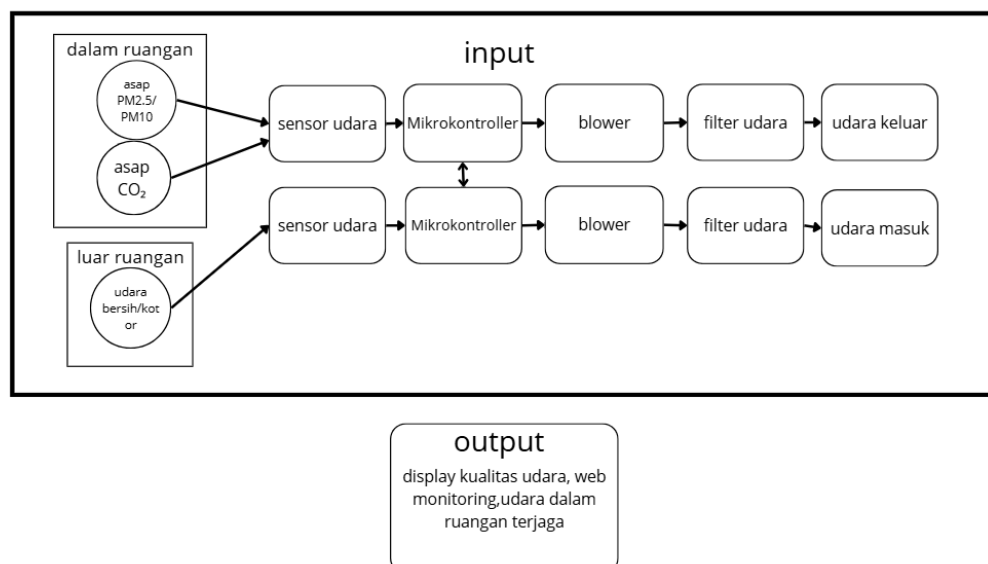
Secara keseluruhan, sistem prediktif kualitas udara berbasis *machine learning* dengan integrasi kamera, sensor suhu, dan sistem notifikasi ini menawarkan solusi komprehensif dalam menjaga kualitas udara ruangan tertutup. Sistem mampu meningkatkan kesehatan dan kenyamanan penghuni, mendorong kepatuhan terhadap aturan bebas rokok di dalam ruangan, serta mendukung implementasi konsep *smart building* yang berorientasi pada efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan.[18]

2. Sistem pengelolaan udara otomatis dua arah menggunakan metode rule based dan hysteresis.

Solusi kedua adalah sistem pengelolaan udara otomatis dua arah yang memanfaatkan dua unit filter udara dan dua blower, masing-masing berfungsi untuk menyaring udara dari dalam ruangan (internal) dan mengalirkan udara dari luar ruangan (eksternal). Sistem bekerja secara dinamis dan adaptif, di mana satu blower berperan untuk membuang udara kotor dari dalam ruangan, sementara blower lainnya berfungsi untuk memasukkan udara dari luar.

Cara kerja sistem ini, sensor udara akan membaca tingkat kualitas udara di dalam dan di luar ruangan secara real-time. Data tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler menggunakan metode *Rule-Based*, yaitu sistem pengambilan keputusan berdasarkan aturan logika yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil pembacaan sensor, sistem akan menentukan tindakan yang sesuai, seperti menyalakan blower dalam untuk membuang udara kotor, atau menyalakan blower luar untuk memasukkan udara bersih.

Selain itu, metode Hysteresis diterapkan agar sistem tidak terlalu sering berganti status (misalnya *blower* hidup-mati secara cepat) ketika nilai sensor berada di sekitar ambang batas. Dengan adanya hysteresis, sistem menjadi lebih stabil dan efisien dalam menjaga sirkulasi udara. berikut sistem kerja alat sebagai berikut:

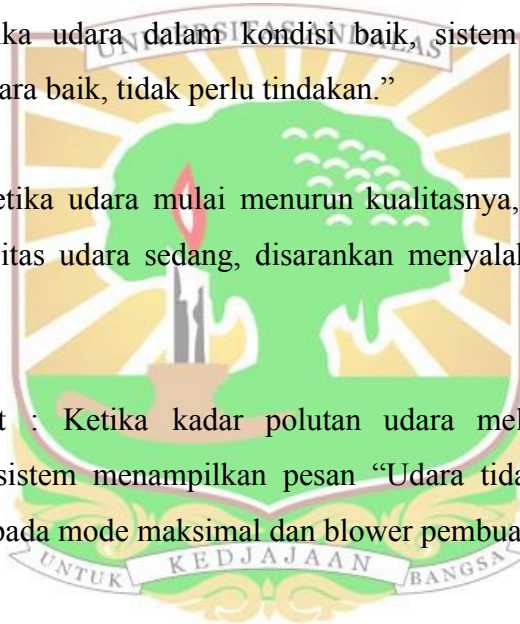


Gambar 1.1 Sistem Kerja Alat

Selain itu, sistem ini akan dihubungkan dengan web monitoring, di mana web ini berfungsi untuk memantau kualitas udara secara real-time. Cara kerjanya, setelah sensor gas, partikulat udara, dan sensor suhu mendeteksi data polusi dari hasil pengukuran kadar udara, data tersebut dikirimkan secara otomatis ke database dan disimpan pada web monitoring.

Web monitoring akan menampilkan nilai indeks kualitas udara dan memberikan pemberitahuan otomatis ketika kualitas udara menurun. Peringatan ini dibagi menjadi tiga tahap:

- A. Baik : Ketika udara dalam kondisi baik, sistem menampilkan pesan “Kualitas udara baik, tidak perlu tindakan.”
- B. Sedang : Ketika udara mulai menurun kualitasnya, sistem menampilkan pesan “Kualitas udara sedang, disarankan menyalakan filter pada mode hemat.”
- C. Tidak Sehat : Ketika kadar polutan udara melebihi ambang batas berbahaya, sistem menampilkan pesan “Udara tidak sehat, filter udara dihidupkan pada mode maksimal dan blower pembuangan aktif.”



Pengguna juga dapat melihat grafik perubahan kualitas udara berdasarkan waktu pada web monitoring untuk memahami tren tingkat polusi di lingkungan sekitar. Sistem ini dirancang agar hemat energi dengan mengatur kerja blower dan filter berdasarkan kondisi udara aktual menggunakan logika aturan (*rule-based*) yang efisien. Selain menampilkan data pemantauan secara visual pada web monitoring, sistem ini juga dilengkapi dengan fitur notifikasi otomatis sebagai bentuk peringatan dini kepada pengguna. Notifikasi akan dikirimkan secara real-time ketika terjadi perubahan status kualitas udara berdasarkan hasil pengolahan data sensor. Informasi yang disampaikan dalam notifikasi meliputi kondisi kualitas

udara saat ini serta rekomendasi tindakan yang diambil oleh sistem, seperti pengaktifan blower pembuangan, pemasukan udara bersih, atau pengoperasian filter udara pada mode tertentu.

Dengan adanya sistem ini, pengguna dapat memastikan sirkulasi udara di ruangan tetap sehat udara kotor dikeluarkan secara otomatis, dan udara bersih dimasukkan hanya ketika aman. Hal ini membuat sistem tidak hanya menjaga kualitas udara, tetapi juga mengoptimalkan konsumsi daya listrik.

Komponen yang dibutuhkan:

- a. Sensor Udara(gas,partikulat udara,suhu dan kelembaban): Mendeteksi tingkat polutan di dalam dan luar ruangan secara real-time.
- b. Mikrokontroler: Memproses data sensor dan menjalankan aturan logika berbasis rule-based dan hysteresis.
- c. Modul Filter Udara (2 unit): Menyaring udara dari debu dan gas berbahaya.
- d. *Blower Udara* (2 unit): Mengatur arah aliran udara satu untuk pembuangan udara kotor, dan satu untuk pemasukan udara bersih.
- e. *Display* (LCD/LED): Menampilkan status udara dan kondisi sistem.
- f. *Web Monitoring/IoT Dashboard*: Menampilkan data pemantauan udara, memberikan notifikasi otomatis, dan menyimpan data historis.
- g. Modul Wi-Fi atau Bluetooth: Menghubungkan sistem ke dashboard agar data dapat disinkronkan secara real-time.
- h. Catu Daya & Rangkaian *Driver*: Mengatur kecepatan blower dan menyediakan tenaga untuk seluruh sistem.

Solusi pertama ini menggunakan metode komputasi berbasis *Rule-Based* dan Hysteresis untuk mengontrol kerja dua blower dan dua filter udara secara otomatis. Berdasarkan hasil pembacaan sensor, sistem mengambil keputusan sesuai aturan logika apakah perlu membuang udara kotor atau menarik udara bersih dari luar. Penerapan hysteresis memastikan transisi sistem berjalan stabil dan tidak terjadi perubahan status yang terlalu cepat.

Dengan metode ini, sistem mampu menjaga keseimbangan kualitas udara di dalam ruangan secara efisien, hemat energi, serta menjaga kenyamanan pengguna dengan pergantian udara yang optimal.

Sistem berbasis aturan (*rule-based system*) merupakan salah satu bentuk sistem yang menggunakan sekumpulan aturan logika dalam format “*IF–THEN*” untuk melakukan penalaran dan pengambilan keputusan secara otomatis. Sistem ini menyimpan pengetahuan dalam bentuk rule base (basis aturan), bukan sekadar algoritma prosedural. Dengan demikian, sistem ini meniru cara berpikir seorang pakar dalam memecahkan suatu masalah dengan menerapkan aturan-aturan yang relevan terhadap fakta yang ada di lapangan.[19]

Format dasar dari aturan pada sistem ini adalah:

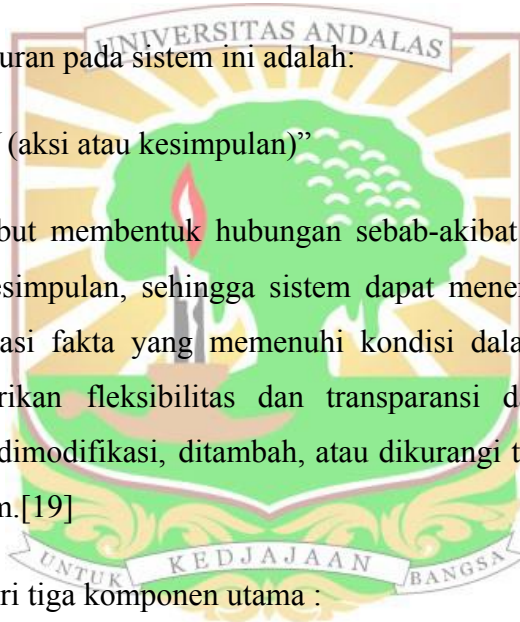
“*IF* (kondisi) *THEN* (aksi atau kesimpulan)”

Aturan-aturan tersebut membentuk hubungan sebab-akibat (*causal relationship*) antara fakta dan kesimpulan, sehingga sistem dapat menentukan solusi dengan menelusuri kombinasi fakta yang memenuhi kondisi dalam aturan. Pendekatan *rule-based* memberikan fleksibilitas dan transparansi dalam sistem, karena pengetahuan dapat dimodifikasi, ditambah, atau dikurangi tanpa perlu mengubah keseluruhan program.[19]

rule based terdiri dari tiga komponen utama :

A. *Rule Base* (Basis Aturan)

Merupakan kumpulan dari pengetahuan pakar yang direpresentasikan dalam bentuk aturan *IF–THEN*. Setiap aturan menggambarkan hubungan antara kondisi (premis) dan tindakan atau keputusan (konklusi). Basis aturan dapat berjumlah puluhan hingga ratusan aturan tergantung kompleksitas domain masalah.[19]

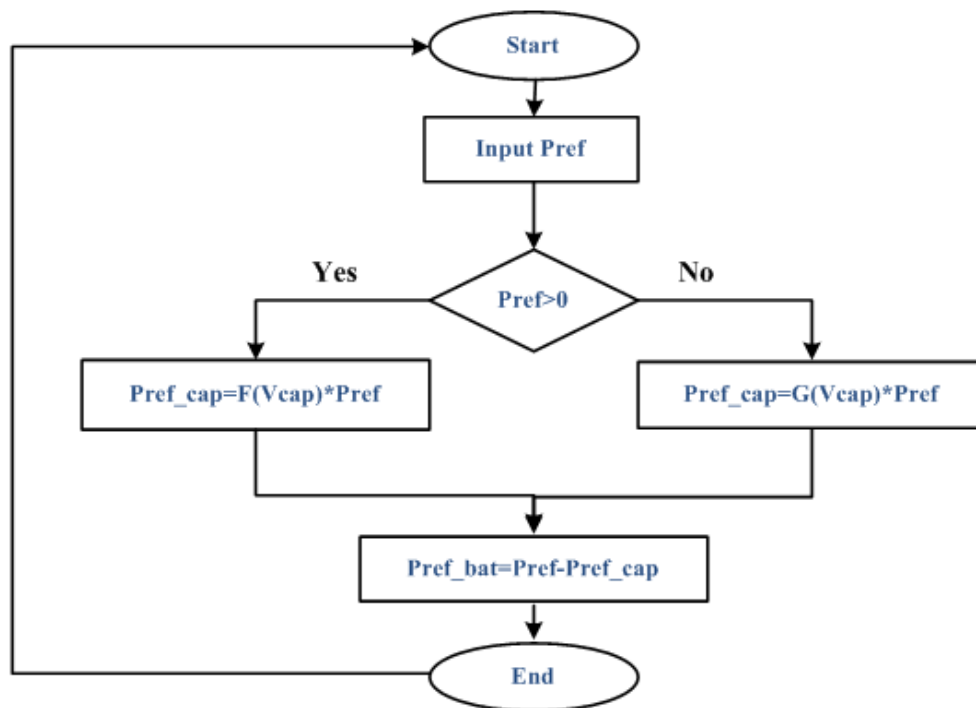


B. *Working Memory* (Basis Fakta)

Bagian ini menyimpan semua fakta atau data yang diketahui pada saat tertentu. Fakta-fakta ini bersifat dinamis — dapat berubah selama proses inferensi berlangsung. Setiap kali aturan dijalankan, *working memory* diperbarui agar mencerminkan kondisi terbaru dari sistem.[19]

C. *Inference Engine* (Mesin Inferensi)

Komponen ini berfungsi sebagai “otak” sistem. Mesin inferensi akan menelusuri basis aturan dan memilih aturan yang sesuai dengan fakta yang terdapat pada *working memory*. Ketika sebuah aturan terpenuhi (premisnya benar), maka kesimpulan atau tindakan dari aturan tersebut akan dijalankan, dan hasilnya dapat menambah fakta baru ke *working memory*. [19]



Gambar 1.2 Flowchart *Rule Based System*

2 metode utama penalaran dalam *rule-based system* :

A. *Forward Chaining* (Penelusuran Maju)

Pendekatan ini dimulai dari fakta-fakta yang diketahui, kemudian sistem menelusuri aturan untuk melihat aturan mana yang kondisinya terpenuhi oleh fakta tersebut. Setiap kali aturan terpenuhi, aksi atau kesimpulan dari aturan itu dieksekusi, menghasilkan fakta baru. Proses ini terus berlanjut hingga mencapai kesimpulan akhir. Metode ini cocok untuk sistem diagnosis atau sistem pemantauan.[19]

B. *Backward Chaining* (Penelusuran Mundur)

Pendekatan ini dimulai dari hipotesis atau tujuan tertentu, kemudian sistem berusaha mencari aturan yang dapat menghasilkan tujuan tersebut. Jika kondisi aturan belum terpenuhi, sistem akan mencari aturan lain yang dapat memenuhi kondisi tersebut. Proses ini berlanjut secara mundur hingga semua kondisi terpenuhi oleh fakta yang diketahui. Metode ini banyak digunakan dalam sistem konsultasi atau sistem perencanaan.[19]

Hysteresis merupakan salah satu konsep fundamental dalam teori sistem dan kontrol, yang menggambarkan fenomena ketika *output* (keluaran) dari suatu sistem tidak hanya bergantung pada *input* (masukan) saat ini, tetapi juga pada riwayat perubahan input sebelumnya. Dalam istilah lain, hysteresis menciptakan memory effect atau efek ingatan, di mana sistem “mengingat” kondisi masa lalunya.[20]

Secara umum, hysteresis muncul ketika suatu sistem tidak merespons perubahan input secara langsung, tetapi menunjukkan perbedaan jalur respons antara kenaikan dan penurunan input. Fenomena ini menghasilkan kurva hysteresis *loop*, yaitu grafik yang menunjukkan bahwa hubungan antara input dan output tidak linear serta bergantung pada arah perubahan input.[20]

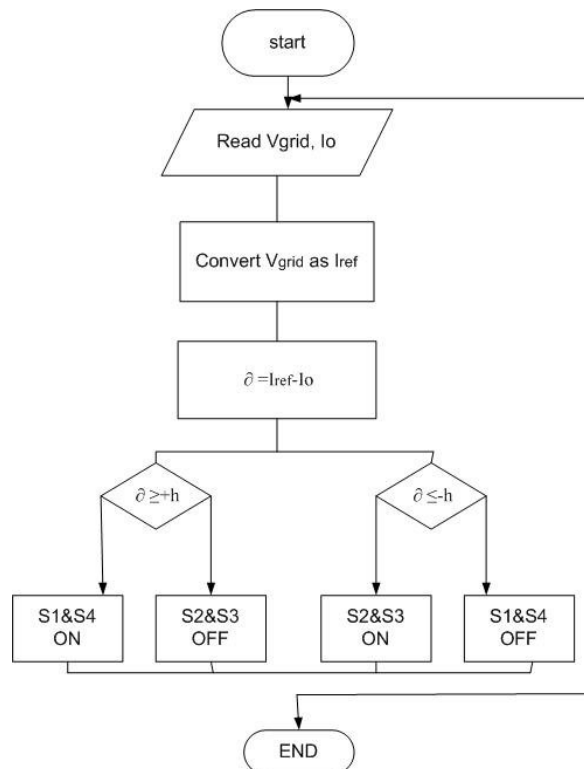
hysteresis sering dimanfaatkan secara sengaja pada sistem kontrol untuk meningkatkan kestabilan dan mengurangi osilasi yang terjadi akibat perubahan

sinyal atau noise yang kecil. Dalam hal ini, hysteresis berperan penting dalam mencegah terjadinya *switching* yang terlalu sering (*chattering*) pada aktuator, *relay*, atau saklar elektronik [20]

Prinsip dasar hysteresis adalah penggunaan dua ambang batas (*dual threshold*) dalam menentukan status suatu sistem.[21]

- A. Ketika nilai input melampaui ambang batas atas (*upper threshold*), sistem akan berubah ke kondisi “aktif” atau “ON”.
- B. Sebaliknya, ketika nilai input turun melewati ambang batas bawah (*lower threshold*), sistem akan kembali ke kondisi “non-aktif” atau “OFF”.
- C. Jika nilai input berada di antara kedua ambang tersebut, maka sistem akan mempertahankan status sebelumnya.

Pendekatan ambang ganda ini membuat sistem tidak mudah berubah status akibat fluktuasi kecil di sekitar nilai ambang. Dengan demikian, sistem menjadi lebih stabil dan efisien, terutama pada kondisi di mana sinyal input mengandung gangguan (*noise*) atau ketidakpastian. Penerapan hysteresis dengan dua ambang batas efektif menghindari efek osilasi tinggi dan menjaga umur operasional komponen mekanik serta elektronik karena jumlah siklus *switching* menjadi lebih sedikit[21]



Gambar 1.3 Flowchart Hysteresis

rule-based systems sering dikombinasikan dengan mekanisme hysteresis untuk memastikan keputusan logika tidak berubah terlalu sering akibat fluktuasi input. Rule-based bertugas menentukan apa yang harus dilakukan berdasarkan kondisi (misalnya “IF nilai > ambang THEN aksi”), sedangkan hysteresis memilih kapan perubahan dapat terjadi agar sistem tetap stabil.

Secara khusus, hysteresis menetapkan dua ambang batas (*upper threshold* dan *lower threshold*) sehingga sistem hanya merespons ketika input melewati batas atas atau turun melewati batas bawah; jika nilai input berada di antara kedua batas tersebut, status sistem tidak berubah. Kombinasi ini mencegah *chattering* yaitu *switching* on/off yang terlalu cepat dan sering yang dapat merusak komponen atau menyebabkan konsumsi energi berlebihan.

3. Sistem peringatan dengan mendeteksi zat kimia asap rokok menggunakan bantuan sensor gas.

Sistem yang dirancang merupakan implementasi pemantauan dan pengendalian kualitas udara pada ruangan tertutup yang bekerja secara *real-time*. Sistem ini mampu mendeteksi berbagai polutan udara, seperti karbon dioksida (CO_2), partikel $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , formaldehida (HCHO), serta asap rokok, guna memastikan kondisi udara tetap berada pada tingkat yang aman bagi penghuni ruangan.

Setiap node sensor dilengkapi dengan sensor gas dan partikel yang berfungsi mengukur konsentrasi polutan secara kontinu. Data hasil pengukuran kemudian diproses secara lokal oleh mikrokontroler menggunakan pendekatan edge computing. Pada tahap ini, sistem menerapkan logika pengambilan keputusan berbasis ambang batas (*threshold-based logic*), di mana nilai sensor dibandingkan dengan batas toleransi yang telah ditentukan berdasarkan standar kualitas udara dalam ruangan. Selain itu, logika histeresis dapat diterapkan untuk mencegah aktuator bekerja secara berulang akibat fluktuasi nilai sensor yang kecil.

Apabila konsentrasi salah satu atau beberapa polutan terdeteksi melebihi ambang batas, sistem akan mengklasifikasikan kondisi udara ke dalam kategori tidak sehat. Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, mikrokontroler akan mengeksekusi logika kontrol untuk mengaktifkan aktuator secara otomatis. Aktuator yang digunakan dalam sistem ini berupa exhaust fan atau kipas ventilasi untuk membuang udara tercemar ke luar ruangan, air purifier untuk menyaring partikel dan gas berbahaya, serta bukaan ventilasi otomatis berbasis motor servo atau aktuator linear untuk meningkatkan sirkulasi udara segar dari luar.

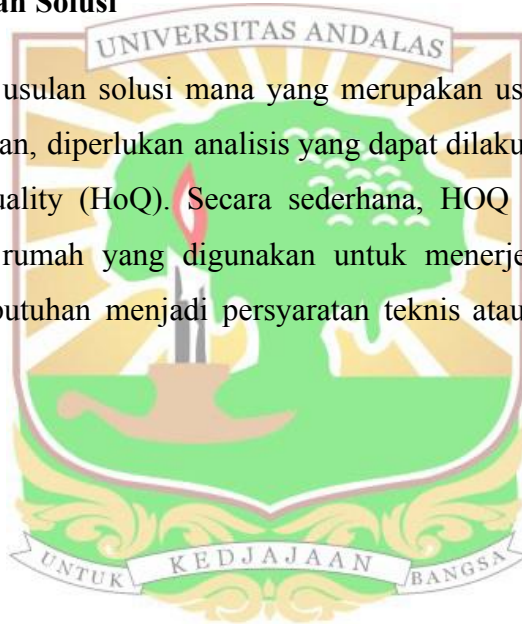
Data hasil pengukuran sensor, status kondisi udara, serta status aktuator disimpan dan dapat dikirimkan ke *gateway* pusat menggunakan protokol komunikasi nirkabel seperti LoRaWAN. Informasi ini memungkinkan pemantauan kualitas udara secara terpusat, analisis tren pencemaran udara, serta evaluasi efektivitas kerja aktuator dalam meningkatkan kualitas udara ruangan. Selain fungsi pemantauan dan pengendalian otomatis, sistem ini juga dilengkapi dengan mekanisme notifikasi sebagai bentuk peringatan dini kepada pengguna. Notifikasi dihasilkan berdasarkan hasil klasifikasi kondisi udara yang diperoleh dari proses

pengolahan data sensor pada mikrokontroler. Ketika kualitas udara berada pada kondisi baik, sistem akan memberikan informasi status normal. Namun, apabila terdeteksi peningkatan konsentrasi polutan yang mendekati atau melampaui ambang batas yang ditentukan, sistem akan mengirimkan notifikasi peringatan kepada pengguna secara real-time.

Dengan penerapan logika pengambilan keputusan yang jelas dan penggunaan aktuator yang tepat, sistem ini tidak hanya mampu memantau kualitas udara secara akurat, tetapi juga mampu meningkatkan kualitas udara secara otomatis ketika terjadi peningkatan polutan yang melebihi batas toleransi.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Untuk menentukan usulan solusi mana yang merupakan usulan terbaik dari tiga usulan yang diberikan, diperlukan analisis yang dapat dilakukan dengan membuat tabel House of Quality (HoQ). Secara sederhana, HOQ adalah diagram atau matriks berbentuk rumah yang digunakan untuk menerjemahkan permintaan, keinginan, atau kebutuhan menjadi persyaratan teknis atau karakteristik produk yang dapat diukur.



Tabel 1.2 House of Quality

		▲	▼	▲	▼	▼	
	Rating	Sensing Capability	Data Processing	Monitoring System	Automated Actoon	Notification Capability	
Pengerjaan dalam 6 bulan	4	○	○	○	○	○	
Biaya < Rp.5.000.000	3	○		△	●	○	
Memenuhi standar dan regulasi	4	○			○	○	
Mampu beradaptasi dengan lingkungan	2	●		△	●	●	
Mudah diimplementasikan	5	●	●	●	●	○	
	18						
Importance Rating		68	37	42	74	58	279
Percentage Rating		24.3 7%	13.2 6%	15.0 7%	26.5 2%	20.7 8%	100 %
Solusi 1		●	○	●	●	○	4.4236
Solusi 2		○	●	○	●	△	3.5540
Solusi 3		●	△	○	●	△	3.3718

Ket :

1. ● : 5

2. ○ : 3

3. △ : 1

Berdasarkan tabel 1.2 diatas, terdapat skenario mengenai hubungan dari fitur utama dengan fitur tambahan, usulan solusi dengan fitur dasar :

1. Hubungan fitur dasar dengan fitur tambahan.

Setiap fitur dasar memiliki keterikatan menengah atau poin 3 dengan fitur tambahan pengerjaan dalam 6 bulan, hal ini menimbang sebagaimana semua fitur dasar untuk solusi yang dibuat harus selesai dalam pengerjaan

dalam 6 bulan. Untuk fitur dasar biaya terjangkau memiliki keterikatan yang kuat dengan fitur dasar *automated action* karena kebanyakan alat dengan kemampuan otomatis memiliki harga yang relatif mahal. Untuk sistem dengan rating tertinggi yaitu mudah diimplementasikan memiliki keterikatan yang kuat dengan semua fitur dasar kecuali fitur notifikasi, karena mengingat waktu perancangan yang diharapkan selesai dalam waktu 6 bulan

2. Hubungan usulan solusi dengan fitur dasar.

Pada solusi 1 berhubungan erat dengan fitur *sensing capability*, *monitoring system*, dan *automated action*. lalu berhubungan dengan *data processing* dan *notification capability*, karena fitur dasar ini menjadi unsur penting keberhasilan sistem dari solusi pertama. Untuk fitur dasar *data processing* dan *notification capability* memiliki hubungan yang menengah dengan solusi 1 ini.

Pada solusi 2 memiliki hubungan yang kuat dengan fitur dasar *Data Processing* dan *Automated Action* karena solusi 2 ini karena sistem ini memiliki output dimana terdapat alat yang dapat mengalirkan udara dari dalam rumah ke luar dan dari luar ke dalam rumah, dengan ketentuan memenuhi syarat yang dihasilkan oleh *Data processing*. Lalu memiliki hubungan yang sedang atau menengah dengan fitur dasar *Sensing Capability* dan *Monitoring System*. Untuk fitur dasar notifikasi, solusi 2 memiliki hubungan yang lemah karena sistem bisa saja dapat dipublikasikan tanpa notifikasi.

Pada solusi 3 memiliki hubungan yang kuat dengan fitur dasar *Sensing Capability* dan *Automatic Action* karena pada solusi 3, sensor menjadi komponen utama dari input dan penentu aksi dari alat aktuator yang akan bekerja secara otomatis. Solusi 3 ini memiliki hubungan yang sedang atau menengah dengan fitur dasar *Monitoring System*. Lalu memiliki hubungan

yang rendah dengan fitur dasar *Data Processing* dan *Notification Capability* dikarenakan fitur dasar ini tidak terlalu menjadi fokus utama usulan solusi ini.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan hasil analisis dengan bantuan tabel HoQ didapatkan beberapa persentase hubungan usulan solusi dengan fitur dasar dan fitur tambahan.

Hubungan usulan dengan solusi dengan fitur dasar :

Solusi 1 : $[(5 \times 24.37\%) + (3 \times 16.74\%) + (5 \times 15.07\%) + (5 \times 26.52\%) + (3 \times 20.78\%)] = 4.4236$

Solusi 2 : $[(3 \times 24.37\%) + (5 \times 16.74\%) + (3 \times 15.07\%) + (5 \times 26.52\%) + (1 \times 20.78\%)] = 3.5540$

Solusi 3 : $[(5 \times 24.37\%) + (1 \times 16.74\%) + (3 \times 15.07\%) + (5 \times 26.52\%) + (1 \times 20.78\%)] = 3.3718$

Berdasarkan hasil analisis HoQ, didapat solusi terbaik yaitu solusi pertama dengan dirancangnya Sistem Prediktif Kualitas Udara Berbasis Machine Learning. Dimana sistem akan bekerja dengan membaca polutan seperti CO₂, HCHO, PM 2.5 dan PM10 menggunakan sensor yang diintegrasikan dengan model *machine learning* untuk mengidentifikasi kualitas udara pada ruangan tersebut, selain itu juga dilengkapi dengan kamera untuk mengidentifikasi perokok di sekitar ruangan dan memberikan output berupa notifikasi kepada perokok agar menghentikan aktivitas tersebut. Jika di dalam ruangan tersebut memiliki kualitas udara yang melewati ambang batas maka akan ada aktuator yang membersihkan polutan di ruangan tersebut. Solusi pertama ini dipilih karena metode prediksi yang menggunakan machine learning memiliki kemampuan yang akurat. Keakuratan ini akan berpengaruh terhadap pembacaan sensor terhadap polutan dan aktuator yang berlaku. Dengan terpilihnya solusi ini diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan yang diangkat pada topik ini.