

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Mutu udara di berbagai ruang mulai dari fasilitas umum, hunian, hingga ruang pendidikan merupakan persoalan krusial yang berpengaruh signifikan terhadap kesehatan, kenyamanan, dan efisiensi masyarakat. Di Indonesia, dua sumber pencemar udara yang paling umum ditemui sehari-hari adalah asap rokok dan emisi kendaraan bermotor. Kedua polutan ini tidak hanya merusak kualitas udara luar, tetapi juga merembet ke dalam ruangan tertutup yang notabene menjadi area aman, seperti rumah dan kelas. Situasi ini menegaskan bahwa penurunan kualitas udara adalah tantangan multidimensional yang penyelesaiannya sangat relevan ditangani melalui pendekatan rekayasa teknik

Tingginya tingkat paparan asap rokok di fasilitas umum masih menjadi masalah serius, terlepas dari adanya aturan kawasan tanpa rokok. Jumlah perokok di Indonesia tercatat sekitar 60 juta orang yang didominasi oleh laki-laki, yang secara tidak langsung memaksa masyarakat luas menjadi perokok pasif secara tidak sengaja. Berdasarkan penelitian, lebih dari 79% masyarakat merasa terganggu oleh asap rokok. Lebih lanjut, kelompok rentan seperti perempuan dan anak-anak yang tinggal serumah dengan perokok aktif memiliki potensi besar terjangkit penyakit kardiovaskular serta gangguan pernapasan [1]. Keberlanjutan permasalahan ini didorong oleh minimnya kesadaran perokok, penegakan aturan yang longgar di area publik, serta belum adanya teknologi deteksi otomatis, sehingga solusi teknis yang menyeluruh belum dapat terwujud.

Stakeholder utama yang berkepentingan dalam isu ini meliputi penghuni ruangan (mahasiswa, siswa, serta dosen/guru) dan pihak pengelola gedung. Para penghuni menginginkan lingkungan belajar yang sehat dan kondusif untuk produktivitas, sedangkan pengelola gedung bertanggung jawab atas penyediaan fasilitas yang memenuhi standar kesehatan pemerintah. Penerapan solusi yang efektif akan menghasilkan manfaat ganda berupa peningkatan kesehatan, kenyamanan, serta capaian akademik dan profesional. Upaya penanganan kualitas udara selama ini,

seperti pelarangan merokok, edukasi, dan perbaikan ventilasi, masih terbatas pada pendekatan manual dan reaktif tanpa sistem peringatan dini. Padahal, solusi teknologi mampu menyediakan deteksi otomatis, pemantauan real-time, dan respons cepat untuk pengendalian udara yang lebih optimal. Maka dari itu, diperlukan inovasi sistem berbasis sensor dan kecerdasan buatan untuk mengatasi polusi dari asap rokok, emisi kendaraan, dan akumulasi polutan dalam ruangan, guna mewujudkan lingkungan yang sehat, nyaman, dan produktif. Pada Tabel 1.1 dapat dilihat solusi yang telah ditemukan untuk menanggulangi permasalahan ini.

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

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 [2]. Pada Gambar 1.1 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.



Gambar 1.1 Zat Berbahaya Pada Rokok

Bahaya rokok tidak hanya menimpa perokok aktif, tetapi juga sangat dirasakan oleh perokok pasif yang terpapar asap di sekitarnya. Anak-anak dan remaja yang sering terpapar asap rokok berisiko mengalami gangguan pertumbuhan paru-paru, infeksi saluran pernapasan, serta peningkatan kasus ISPA (Infeksi Saluran Pernapasan Akut). Tidak hanya itu, wanita hamil yang terpapar asap rokok lebih rentan mengalami komplikasi kehamilan, sementara bayi yang dikandungnya berisiko lahir prematur atau dengan berat badan rendah. Hal ini menunjukkan bahwa dampak rokok meluas hingga ke kelompok rentan yang seharusnya lebih dilindungi [3]. Untuk mengatasi masalah ini, dibutuhkan solusi seperti sistem pendeteksi aktivitas merokok menggunakan kamera atau sensor asap.

Dari sisi hukum, pemerintah Indonesia telah menetapkan Peraturan Pemerintah No. 109 Tahun 2012 tentang Pengamanan Bahan yang Mengandung Zat Adiktif Berupa Produk Tembakau Bagi Kesehatan. Peraturan ini mengatur sejumlah ketentuan penting, antara lain larangan merokok di kawasan tanpa rokok, larangan merokok di sarana transportasi umum, serta kewajiban penyediaan tempat khusus merokok di area tertentu. Tujuan utama regulasi ini adalah melindungi masyarakat dari bahaya asap rokok orang lain, sehingga hak masyarakat untuk mendapatkan udara yang bersih dan sehat tetap terjamin [4]. Akan tetapi, dalam praktiknya, implementasi peraturan ini masih menghadapi tantangan di lapangan dimana tidak adanya peringatan secara langsung yang membuat perokok tidak mempedulikan tempat dimana ia melakukan aktivitas merokok. Akan tetapi, apabila terdapat sistem pendeteksi perokok yang secara tegas akan melarang aktivitas merokok seperti diberikannya notifikasi suara secara otomatis yang meminta untuk tidak merokok, mungkin saja regulasi peraturan untuk tidak merokok di kawasan tanpa merokok dapat terealisasi.

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

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

a. Lingkungan : Akumulasi CO₂, VOC, serta kelembaban tinggi sering kali terjadi pada ruangan tertutup dengan ventilasi minim. Jika dibiarkan, kondisi ini tidak hanya menurunkan kualitas ekosistem mikro ruangan, tetapi juga memicu *Sick Building Syndrome* (SBS), suatu sindrom yang lazim menyerang penghuni gedung perkantoran maupun sekolah [5]. Mengacu pada persoalan tersebut, solusi yang dikembangkan mengedepankan penggunaan material elektronik yang tidak merugikan lingkungan sekitar. Lebih jauh, sistem ini dirancang khusus untuk meningkatkan kualitas udara melalui penyaringan polutan secara efektif, menjangkau sumber polusi dari dalam ruangan maupun yang masuk dari luar.

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 : Secara kesehatan, penurunan kualitas udara memberikan implikasi yang signifikan bagi masyarakat. Pencemaran udara diketahui menjadi pendorong utama naiknya angka kejadian Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), di mana anak-anak menjadi kelompok paling rentan akibat sistem pernapasan mereka yang belum berkembang sempurna [6]. Permasalahan ini diperparah oleh paparan asap rokok di area publik yang mengandung zat toksik dan karsinogenik seperti nikotin, tar, dan karbon monoksida. Zat-zat ini berpotensi meningkatkan risiko penyakit pernapasan, kanker, maupun jantung bagi perokok aktif maupun pasif [7]. Sementara itu, di ruangan tertutup, konsentrasi CO₂ yang melampaui ambang batas 1000 ppm dapat langsung mempengaruhi kesehatan penghuni, memicu gejala seperti sakit kepala, rasa kantuk, dan penurunan kemampuan kognitif [8]. Menjawab permasalahan ini, solusi yang dirancang menjamin keamanan bagi penghuni karena tidak menimbulkan efek samping negatif. Sebaliknya, sistem ini bertujuan untuk

mengoptimalkan kondisi kesehatan dan menekan risiko gangguan pernapasan melalui perbaikan 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 : Ketidaknyamanan akibat kualitas udara yang buruk sering dialami oleh pengguna ruang, yang mana disebabkan oleh minimnya sirkulasi udara, polusi kendaraan, dan kebiasaan merokok di area publik. Hal ini secara nyata menurunkan kesejahteraan siswa, karyawan, maupun pengunjung fasilitas umum. Bahkan, budaya permisif terhadap asap rokok kerap memicu ketegangan antara hak perokok dan hak masyarakat lain untuk menghirup udara yang sehat [9]. Menyikapi hal tersebut, inovasi solusi yang dikembangkan menjamin tidak adanya efek sampingan sosial yang merugikan. Perangkat ini dioperasikan tanpa menghasilkan suara bising sehingga tidak mengganggu penghuni sekitarnya. Alih-alih merugikan, solusi ini justru meningkatkan kenyamanan dan produktivitas masyarakat melalui penyediaan udara bersih. Di samping itu, sistem ini secara tidak langsung turut menegakkan kawasan anti-rokok demi menciptakan lingkungan yang lebih nyaman.

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 keseluruhan sistem 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 identifikasi 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 (CO₂), formaldehida (HCHO), serta partikulat udara halus PM2.5 dan PM10. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan sensor suhu dan kelembaban 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 kelembaban memiliki keterkaitan dengan konsentrasi partikel di udara dalam ruangan. Kelembaban relatif yang tinggi dapat mempengaruhi 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 [10].

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 kelembaban 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 kelembaban dapat digunakan sebagai

indikator pendukung untuk memahami kondisi sirkulasi udara dan tingkat kualitas udara dalam ruangan secara menyeluruh [11].

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 identifikasi 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.[12]

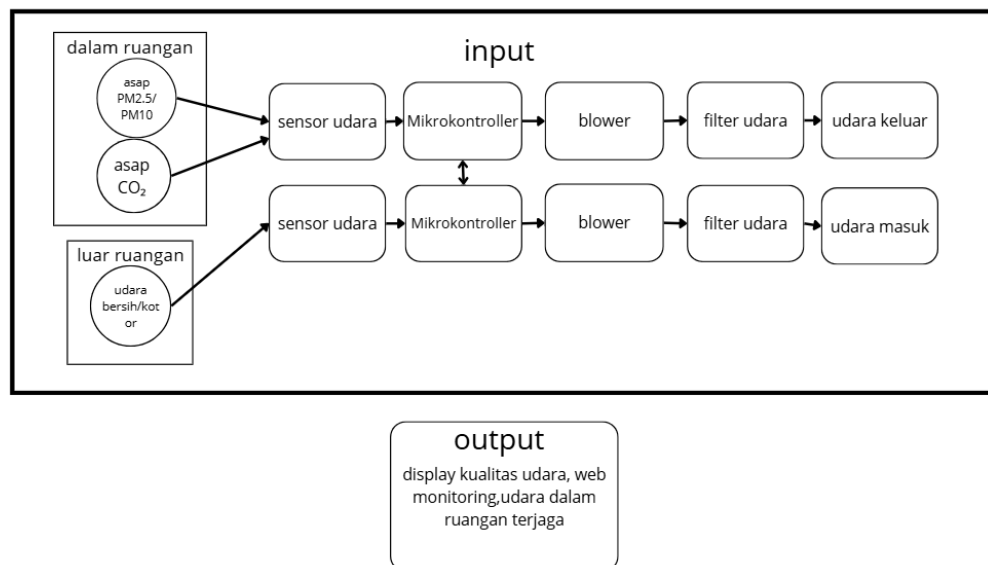
2. Sistem pengelolaan udara otomatis dua arah menggunakan metode rule based dan hysteresis.

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 1.2 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.[13]

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.[13]

rule based terdiri dari tiga komponen utama :

A. *Rule Base* (Basis Aturan)

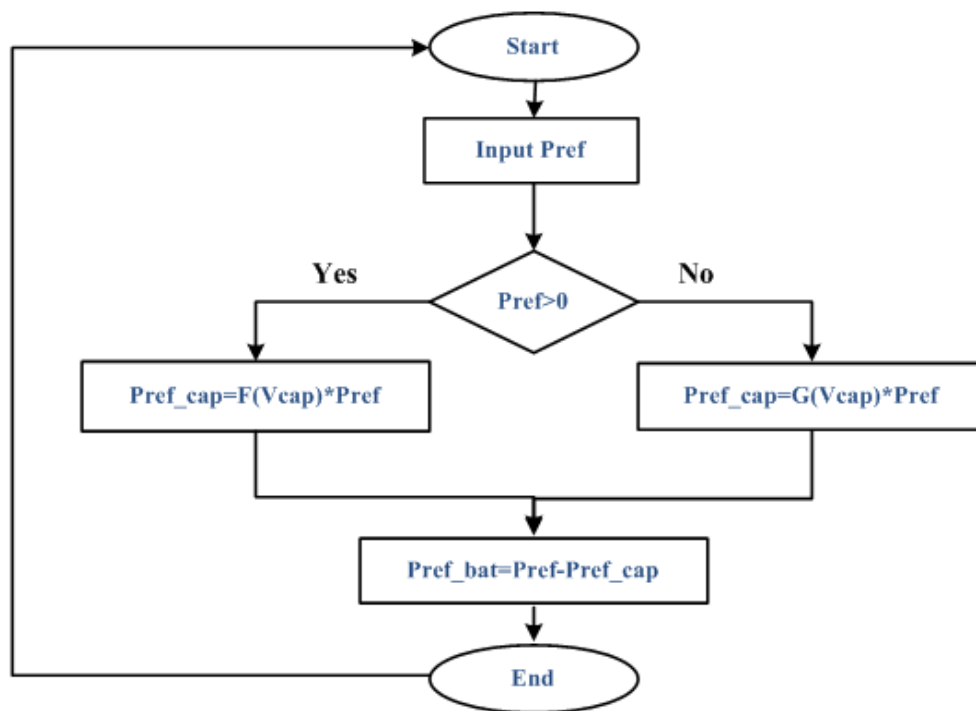
Merupakan kumpulan dari pengetahuan pakar yang direpresentasikan dalam bentuk aturan *IF-THEN*. Setiap aturan menggambarkan hubungan antara kondisi (premis) dan tindakan atau keputusan (konklusi). Basis aturan dapat berjumlah puluhan hingga ratusan aturan tergantung kompleksitas domain masalah.[13]

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.[13]

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*. [13]



Gambar 1.3 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.[13]

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.[13]

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.[14]

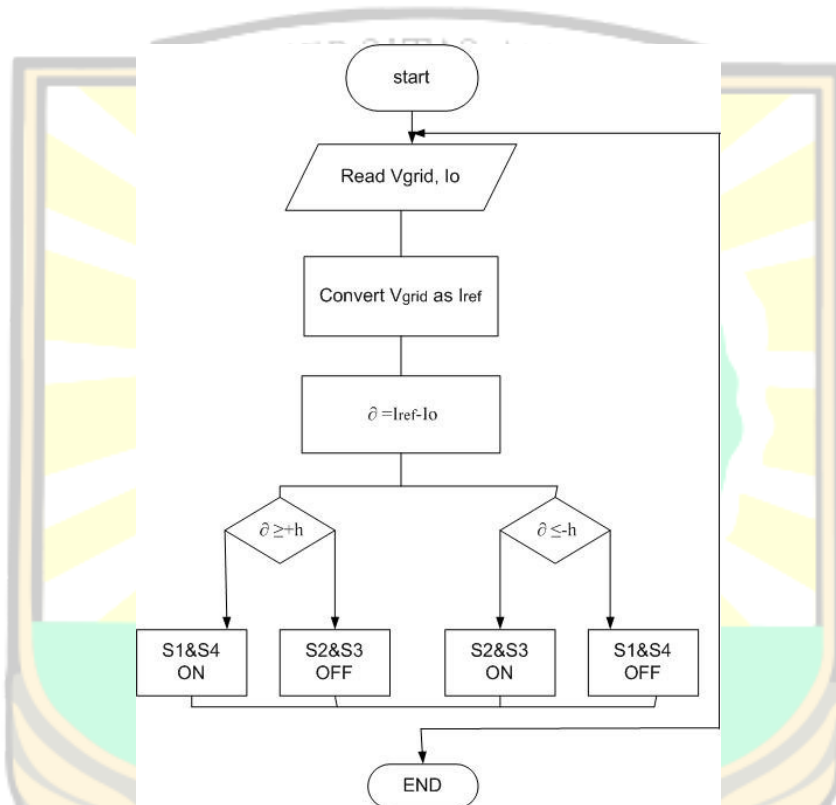
Secara umum, hysteresis muncul ketika suatu sistem tidak merespons perubahan input secara langsung, tetapi menunjukkan perbedaan jalur respons antara kenaikan dan penurunan input. Fenomena ini menghasilkan kurva hysteresis *loop*, yaitu grafik yang menunjukkan bahwa hubungan antara input dan output tidak linear serta bergantung pada arah perubahan input.[14]

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 [14]

Prinsip dasar hysteresis adalah penggunaan dua ambang batas (*dual threshold*) dalam menentukan status suatu sistem.[14]

- 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[14]



Gambar 1.4 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 (CO₂), partikel PM2.5, PM10, 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 akan digunakan untuk keseluruhan sistem, 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 Action	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 :

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

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

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

Berdasarkan hasil analisis HoQ, didapat solusi terbaik yaitu solusi pertama dengan dirancangnya Sistem Identifikasi 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.