

Perancangan Sistem Kendali Kualitas Udara Toilet Sekolah Berbasis ESP32 Menggunakan Sensor MQ-2, MQ-135, dan Kontrol PID

Dian Atmasani^{1*}, Wa Ode Nirwana Sari Halidun², Khairul Anshari³, Irfin Sandra Asti⁴

¹Jurusan Teknik Elektronika dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar, Indonesia

²Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektronika, Universitas Halu Oleo, Indonesia

³Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektronika, Universitas Muhammadiyah Riau, Indonesia

⁴Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

*Penulis korespondensi, email: dian_atmasani@unm.ac.id

Abstrak— Penurunan kualitas udara pada toilet sekolah akibat asap rokok dan akumulasi gas amonia dapat mengganggu kesehatan serta kenyamanan pengguna. Sistem ventilasi konvensional berbasis kendali manual atau on-off memiliki keterbatasan dalam merespons perubahan konsentrasi polutan secara efektif. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kualitas udara toilet sekolah berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID). Sistem dikembangkan menggunakan ESP32 yang terintegrasi dengan sensor MQ-2 untuk deteksi asap rokok, sensor MQ-135 untuk deteksi gas amonia, sensor PIR untuk deteksi keberadaan pengguna, serta exhaust fan yang dikendalikan melalui MOSFET IRLZ44N. Data kualitas udara dipantau secara real-time melalui platform Blynk. Hasil pengujian menunjukkan bahwa saat konsentrasi asap mencapai 1.471–1.509 ppm, sistem menghasilkan keluaran PWM sebesar 254 sehingga exhaust fan bekerja pada kapasitas maksimum. Pada fase pembersihan udara, nilai PWM menurun secara bertahap dari 227 menjadi 198 seiring penurunan konsentrasi polutan dari 938 ppm menjadi 853 ppm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa algoritma PID mampu menghasilkan respons yang stabil, proporsional, dan lebih halus dibandingkan kendali on-off konvensional. Sistem juga berhasil mengaktifkan alarm secara otomatis pada kondisi polutan tinggi. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan efektif dalam mengendalikan kualitas udara dan mendukung pemantauan lingkungan secara real-time.

Kata kunci: ESP32, IoT, Kendali PID, Kualitas Udara.

This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

1. Pendahuluan

Kualitas udara dalam ruangan (indoor air quality) merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas manusia. Lingkungan dengan kualitas udara yang buruk dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan, iritasi saluran pernapasan, penurunan konsentrasi, serta berbagai dampak kesehatan lainnya. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara secara kontinu menjadi kebutuhan penting pada berbagai fasilitas publik, termasuk lingkungan pendidikan [1], [2]. Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) telah memungkinkan sistem monitoring kualitas udara dilakukan secara real-time dengan biaya yang relatif rendah serta kemudahan akses melalui jaringan internet [3], [4].

Toilet sekolah merupakan salah satu area yang rentan mengalami penurunan kualitas udara akibat akumulasi polutan seperti asap rokok dan gas amonia yang berasal dari limbah organik. Kondisi tersebut

dapat menimbulkan bau tidak sedap, mengurangi kenyamanan pengguna, dan berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan apabila tidak ditangani dengan baik. Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan menggunakan sensor gas dan mikrokontroler berbasis IoT untuk mendeteksi perubahan kondisi lingkungan secara real-time [5]–[8]. Penggunaan sensor gas MQ-2 dan MQ-135 banyak diterapkan karena mampu mendeteksi berbagai jenis polutan udara dengan biaya yang ekonomis dan tingkat sensitivitas yang memadai [9], [10].

Seiring berkembangnya teknologi mikrokontroler, ESP32 menjadi salah satu platform yang banyak digunakan dalam sistem monitoring kualitas udara karena memiliki kemampuan pemrosesan data yang baik serta konektivitas Wi-Fi yang terintegrasi [11], [12]. Beberapa penelitian telah memanfaatkan ESP32 untuk membangun sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT menggunakan kombinasi sensor MQ-2 dan MQ-135 sehingga data polutan dapat dipantau secara langsung melalui aplikasi maupun web server [13]–[16]. Selain itu, pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor MQ-135 juga telah diterapkan pada sistem deteksi dini kebakaran dan pemantauan emisi lingkungan perkotaan [17], [18].

Meskipun berbagai penelitian telah berhasil mengembangkan sistem monitoring kualitas udara, sebagian besar penelitian masih berfokus pada fungsi pemantauan dan notifikasi tanpa mengintegrasikan sistem kendali yang mampu melakukan tindakan korektif secara otomatis [5], [7], [14]. Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem ventilasi otomatis menggunakan exhaust fan untuk meningkatkan kualitas udara dalam ruangan [19], [20]. Namun demikian, sebagian besar sistem tersebut masih menggunakan pendekatan kendali sederhana berupa logika on-off sehingga respons sistem cenderung kurang adaptif terhadap perubahan tingkat pencemaran udara yang bersifat dinamis.

Untuk meningkatkan efektivitas pengendalian kualitas udara, beberapa penelitian telah menerapkan metode kecerdasan buatan dan sistem kendali seperti logika fuzzy maupun teknik klasifikasi berbasis machine learning [21]–[23]. Meskipun mampu menghasilkan performa yang baik, metode tersebut umumnya membutuhkan proses komputasi yang lebih kompleks serta konfigurasi parameter yang relatif rumit. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode kendali yang lebih sederhana namun tetap mampu memberikan respons yang stabil dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID) merupakan salah satu metode kendali yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena memiliki struktur sederhana, mudah diimplementasikan, serta mampu menghasilkan respons yang stabil. Penerapan PID pada sistem ventilasi memungkinkan kecepatan exhaust fan diatur secara proporsional berdasarkan tingkat pencemaran udara yang terdeteksi sehingga proses sirkulasi udara menjadi lebih efisien dibandingkan sistem kendali on-off konvensional. Selain itu, integrasi teknologi IoT dalam sistem kendali memberikan keuntungan berupa kemampuan monitoring dan pengawasan jarak jauh yang semakin dibutuhkan dalam era transformasi digital [24].

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait integrasi sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT dengan algoritma PID untuk pengendalian kualitas udara toilet sekolah secara real-time. Sebagian besar penelitian terdahulu hanya berfokus pada monitoring kualitas udara atau pengendalian ventilasi secara sederhana tanpa memanfaatkan mekanisme kendali tertutup yang adaptif terhadap perubahan konsentrasi polutan.

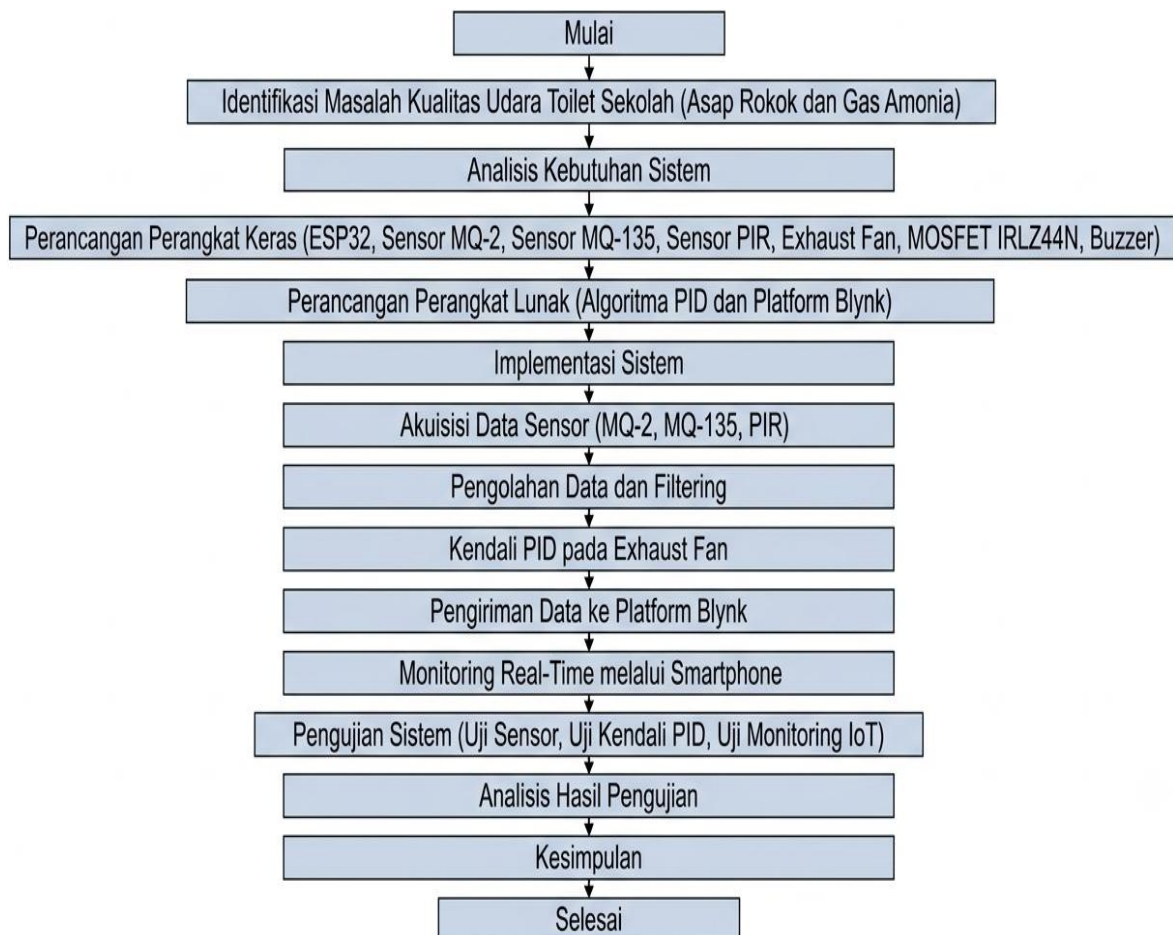
Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada integrasi sensor MQ-2, sensor MQ-135, sensor PIR, mikrokontroler ESP32, platform Blynk, dan algoritma PID dalam satu sistem kendali kualitas udara toilet sekolah berbasis IoT. Sistem yang dikembangkan tidak hanya mampu memantau kualitas udara secara real-time, tetapi juga mengendalikan kecepatan exhaust fan secara proporsional berdasarkan tingkat pencemaran udara yang terdeteksi sehingga menghasilkan respons yang lebih adaptif, efisien, dan stabil dibandingkan sistem ventilasi konvensional.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kualitas udara toilet sekolah berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID), mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi asap rokok dan gas amonia secara real-time, serta menganalisis kinerja pengendalian exhaust fan dalam menjaga kualitas udara agar tetap berada pada kondisi yang aman dan nyaman bagi pengguna.

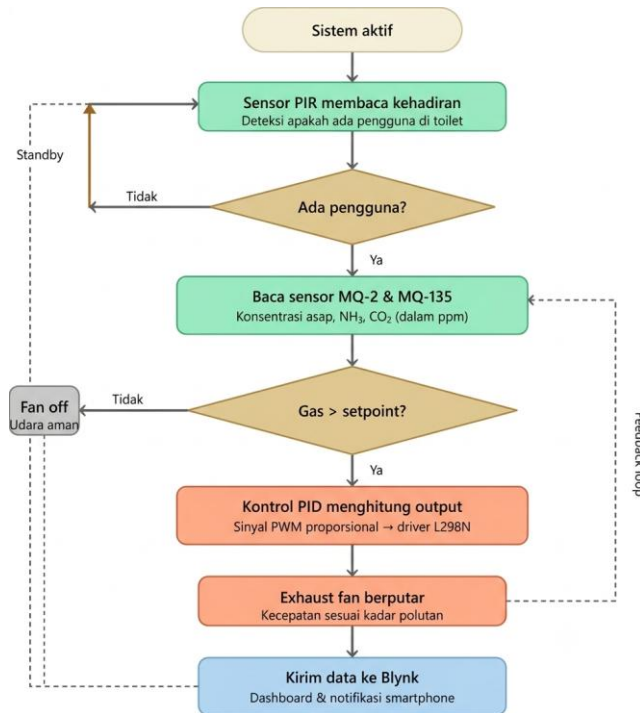
2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode rekayasa (engineering research) untuk merancang, membangun, dan menguji sistem kendali kualitas udara toilet sekolah berbasis Internet of Things (IoT). Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi kebutuhan sistem berdasarkan permasalahan kualitas udara yang disebabkan oleh asap rokok dan akumulasi gas amonia pada lingkungan toilet sekolah. Selanjutnya dilakukan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak yang terintegrasi untuk mendukung proses pemantauan dan pengendalian kualitas udara secara otomatis. Alur penelitian yang digunakan mulai dari identifikasi kebutuhan, perancangan sistem, implementasi algoritma kendali, integrasi platform IoT, hingga pengujian kinerja sistem ditunjukkan pada Gambar 1.

Sistem yang dikembangkan terdiri atas unit sensor, unit pemrosesan, unit aktuator, dan unit monitoring. Sensor MQ-2 digunakan untuk mendeteksi keberadaan asap rokok, sedangkan sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas amonia yang berpotensi menurunkan kualitas udara. Selain itu, sensor Passive Infrared (PIR) digunakan untuk mendeteksi keberadaan pengguna di dalam toilet. Seluruh data sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pengendali sistem. Hubungan antar komponen utama dalam sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



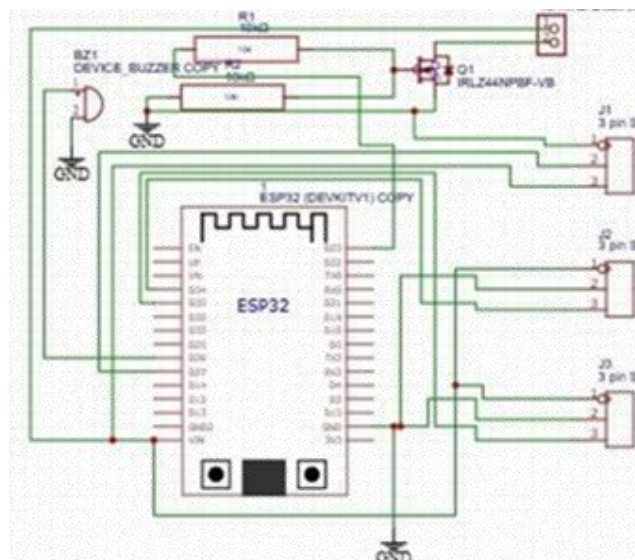
Gambar 1. Alur Penelitian



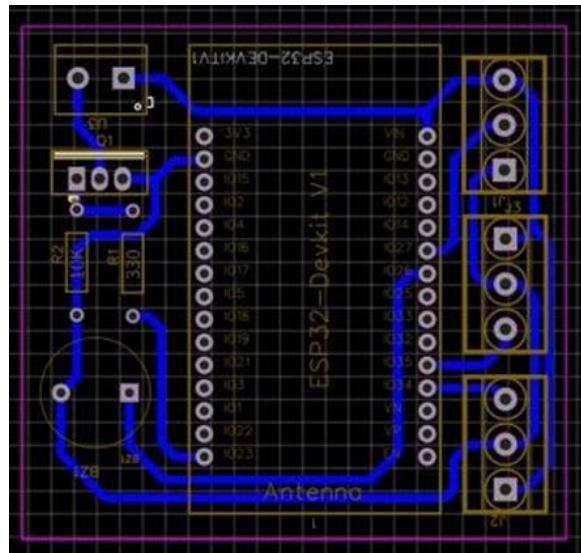
Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Berdasarkan arsitektur yang dirancang, data yang diperoleh dari sensor MQ-2 dan MQ-135 diolah oleh ESP32 untuk menentukan tingkat pencemaran udara. Nilai polutan tertinggi digunakan sebagai acuan dalam pengaturan kecepatan exhaust fan melalui algoritma kendali PID. Keluaran kendali dikirimkan dalam bentuk sinyal Pulse Width Modulation (PWM) menuju MOSFET IRLZ44N yang berfungsi sebagai penggerak exhaust fan. Selain itu, buzzer digunakan sebagai alarm ketika konsentrasi polutan melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Rangkaian elektronik yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.

Untuk mendukung stabilitas operasi dan kemudahan implementasi, seluruh komponen dirancang dalam bentuk Printed Circuit Board (PCB). Perancangan PCB mempertimbangkan aspek distribusi daya, integritas sinyal, serta meminimasi gangguan elektromagnetik yang dapat memengaruhi pembacaan sensor. Tata letak PCB yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Diagram Rangkaian Skematik

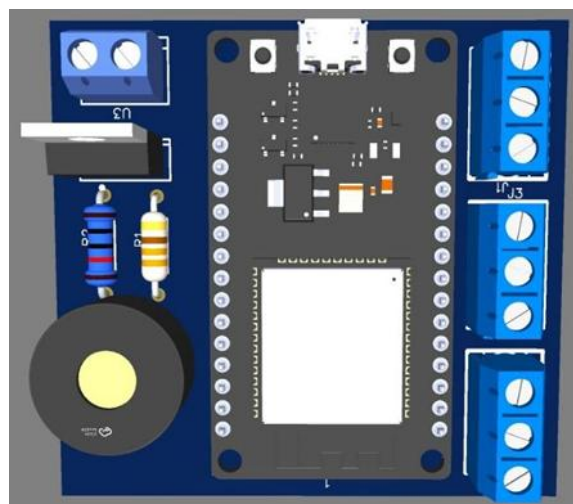


Gambar 4. Layout PCB

Selanjutnya, dilakukan visualisasi perangkat keras dalam bentuk model tiga dimensi untuk memastikan kesesuaian posisi komponen, kemudahan proses perakitan, dan kompatibilitas dengan media pemasangan di lingkungan toilet sekolah. Visualisasi rancangan perangkat keras tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada sisi perangkat lunak, sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan jaringan Wi-Fi. Data hasil pembacaan sensor terlebih dahulu difilter menggunakan metode rata-rata bergerak (moving average) untuk mengurangi pengaruh derau pada sinyal sensor. Selanjutnya, algoritma PID digunakan untuk mengatur kecepatan putaran exhaust fan secara proporsional sesuai dengan tingkat pencemaran udara yang terdeteksi. Pendekatan ini memungkinkan exhaust fan bekerja secara adaptif sehingga proses sirkulasi udara menjadi lebih efisien dibandingkan sistem kendali on-off konvensional.

Untuk mendukung pemantauan jarak jauh, sistem diintegrasikan dengan platform Blynk yang memungkinkan pengguna memonitor kondisi kualitas udara secara real-time melalui perangkat smartphone. Dashboard monitoring menampilkan informasi konsentrasi asap rokok, konsentrasi gas amonia, status keberadaan pengguna, serta tingkat keluaran kendali yang diberikan kepada exhaust fan. Tampilan dashboard monitoring yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Desain 3D PCB



Gambar 6. Dashboard Blynk

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi fungsi setiap komponen dan kinerja keseluruhan sistem. Pengujian mencakup validasi pembacaan sensor MQ-2, MQ-135, dan PIR, pengujian respons exhaust fan terhadap perubahan konsentrasi polutan, serta pengujian komunikasi data antara ESP32 dan platform Blynk. Selanjutnya dilakukan pengujian performa sistem dengan memberikan gangguan berupa asap rokok dan gas amonia secara terkendali untuk mengamati kemampuan sistem dalam merespons perubahan kualitas udara. Data hasil pengujian direkam melalui Serial Monitor dan dashboard Blynk, kemudian dianalisis untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menjaga kualitas udara secara otomatis, stabil, dan real-time pada lingkungan toilet sekolah.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja perangkat yang telah dikembangkan dalam memantau dan mengendalikan kualitas udara toilet sekolah. Sistem diuji menggunakan sumber polutan berupa asap rokok untuk mensimulasikan kondisi pencemaran udara yang umum terjadi pada lingkungan toilet. Selain itu, pengujian juga dilakukan pada kondisi penurunan konsentrasi polutan untuk mengamati respons algoritma PID dalam mengendalikan kecepatan exhaust fan secara bertahap. Bentuk fisik alat yang telah direalisasikan ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Tampilan Luar Alat



Gambar 8. Tampilan Dalam Alat

Gambar 7 menunjukkan tampilan luar perangkat yang terdiri atas sensor, indikator, serta sistem ventilasi yang terintegrasi dalam satu unit. Sementara itu, Gambar 8 memperlihatkan susunan komponen elektronik di bagian dalam perangkat yang meliputi mikrokontroler ESP32, sensor MQ-2, sensor MQ-135, sensor PIR, MOSFET IRLZ44N, buzzer, dan rangkaian pendukung lainnya. Seluruh komponen berhasil dirakit dan beroperasi sesuai dengan fungsi yang telah dirancang.

Untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam merespons kondisi pencemaran udara yang tinggi, dilakukan pengujian dengan mendekati sumber asap ke sensor MQ-2. Hasil pengujian yang diperoleh melalui Serial Monitor ditampilkan pada Gambar 9, sedangkan data hasil pengukuran dirangkum pada Tabel 1.

Berdasarkan data pada Tabel 1, sensor MQ-2 mendeteksi konsentrasi asap pada rentang 1.471–1.509 ppm. Nilai tersebut jauh melebihi nilai setpoint sistem sebesar 600 ppm sehingga menghasilkan error yang besar pada algoritma PID. Kondisi tersebut menyebabkan sistem memberikan keluaran PWM maksimum sebesar 254, yang menunjukkan bahwa exhaust fan beroperasi hampir pada kapasitas penuh. Respons ini menunjukkan kemampuan sistem dalam merespons kondisi pencemaran udara secara cepat untuk mempercepat proses sirkulasi dan pembersihan udara di dalam ruangan.

Selain itu, nilai konsentrasi polutan yang melebihi 1.000 ppm juga mengaktifkan buzzer sebagai sistem peringatan dini. Pada saat yang sama, sensor MQ-135 hanya menunjukkan konsentrasi gas amonia pada kisaran 51–52 ppm. Kondisi ini menunjukkan bahwa sumber pencemaran utama selama pengujian berasal dari asap rokok sehingga nilai MQ-2 menjadi parameter dominan yang digunakan sebagai acuan kendali sistem.

Setelah sumber polutan dijauhkan dari sensor, sistem memasuki fase pembersihan udara. Kondisi ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan algoritma PID dalam mengurangi kecepatan exhaust fan secara bertahap seiring menurunnya konsentrasi polutan. Tampilan hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 10, sedangkan data pengukuran disajikan pada Tabel 2.

```
10:13:28.605 -> MQ2 (Asap): 1471.00 PPM | MQ135 (Amonia): 52.10 PPM | PWM Aktual: 254
10:13:29.564 -> MQ2 (Asap): 1477.00 PPM | MQ135 (Amonia): 51.92 PPM | PWM Aktual: 254
10:13:30.560 -> MQ2 (Asap): 1509.00 PPM | MQ135 (Amonia): 51.76 PPM | PWM Aktual: 254
10:13:31.586 -> MQ2 (Asap): 1489.00 PPM | MQ135 (Amonia): 51.63 PPM | PWM Aktual: 254
```

Gambar 9. Kondisi Polutan Tinggi

Tabel 1. Data Serial Monitor pada Kondisi Polutan Tinggi

Waktu	MQ-2 (PPM)	MQ-135 (PPM)	PWM Aktual
10:13:28	1471	52.1	254
10:13:29	1477	51.92	254
10:13:30	1509	51.76	254
10:13:31	1489	51.63	254

```
10:13:28.605 -> MQ2 (Asap): 1471.00 PPM | MQ135 (Amonia): 52.10 PPM | PWM Aktual: 254
10:13:29.564 -> MQ2 (Asap): 1477.00 PPM | MQ135 (Amonia): 51.92 PPM | PWM Aktual: 254
10:13:30.560 -> MQ2 (Asap): 1509.00 PPM | MQ135 (Amonia): 51.76 PPM | PWM Aktual: 254
10:13:31.586 -> MQ2 (Asap): 1489.00 PPM | MQ135 (Amonia): 51.63 PPM | PWM Aktual: 254
```

Gambar 10. Kondisi Pembersihan Udara

Tabel 2. Data Serial Monitor pada Fase Pembersihan Udara

Waktu	MQ-2 (PPM)	MQ-135 (PPM)	PWM Aktual
10:14:56	938	40.4	227
10:14:57	931	38.83	225
10:14:58	938	41.02	224

Waktu	MQ-2 (PPM)	MQ-135 (PPM)	PWM Aktual
10:14:59	929	40.97	222
10:15:00	946	40.9	222
10:15:01	905	40.84	217
10:15:02	865	40.89	209
10:15:03	861	40.81	203
10:15:04	853	40.8	198

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa konsentrasi asap yang terdeteksi sensor MQ-2 menurun secara bertahap dari 938 ppm menjadi 853 ppm dalam waktu sekitar delapan detik. Seiring dengan penurunan konsentrasi polutan tersebut, nilai PWM exhaust fan juga mengalami penurunan secara proporsional dari 227 menjadi 198. Pola ini menunjukkan bahwa algoritma PID mampu menghasilkan respons yang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Penurunan nilai PWM yang berlangsung secara bertahap mengindikasikan bahwa sistem tidak bekerja secara biner seperti metode kendali on-off konvensional. Exhaust fan tidak langsung berhenti ketika konsentrasi polutan mulai menurun, tetapi kecepatan putarannya disesuaikan secara kontinu berdasarkan tingkat pencemaran udara yang masih terdeteksi. Mekanisme ini menghasilkan operasi yang lebih stabil, mengurangi fluktuasi kecepatan motor, serta berpotensi memperpanjang umur pakai exhaust fan akibat berkurangnya frekuensi proses start-stop yang berulang.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kendali kualitas udara toilet sekolah berbasis ESP32, sensor MQ-2, sensor MQ-135, dan algoritma PID mampu bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem berhasil mendeteksi polutan secara real-time, mengendalikan exhaust fan secara proporsional berdasarkan tingkat pencemaran udara, serta mengaktifkan alarm ketika konsentrasi polutan mencapai kondisi berbahaya. Integrasi dengan platform Blynk juga berjalan dengan baik sehingga seluruh parameter penting, seperti konsentrasi gas, status keberadaan pengguna, dan nilai PWM exhaust fan, dapat dipantau dari jarak jauh melalui jaringan internet.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan algoritma PID pada sistem ventilasi toilet sekolah memberikan kinerja yang lebih adaptif dibandingkan metode kendali manual maupun sistem on-off konvensional. Kemampuan sistem dalam menyesuaikan kecepatan exhaust fan berdasarkan tingkat polutan yang terukur menjadikan proses pengendalian kualitas udara lebih efektif, efisien, dan sesuai untuk mendukung lingkungan sekolah yang sehat dan nyaman.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kualitas udara toilet sekolah berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor MQ-2, sensor MQ-135, sensor PIR, serta algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID). Sistem yang dikembangkan mampu melakukan pemantauan kualitas udara secara real-time dan mengirimkan data ke platform Blynk sehingga kondisi lingkungan dapat dipantau dari jarak jauh melalui perangkat smartphone.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi peningkatan konsentrasi polutan secara cepat dan memberikan respons kendali yang sesuai. Pada kondisi polutan tinggi, sensor MQ-2 mendeteksi konsentrasi asap hingga 1.509 ppm dan sistem menghasilkan keluaran PWM maksimum sebesar 254 sehingga exhaust fan bekerja pada kapasitas hampir penuh untuk mempercepat proses sirkulasi udara. Selain itu, buzzer berhasil berfungsi sebagai sistem peringatan dini ketika konsentrasi polutan melebihi ambang batas yang telah ditetapkan.

Implementasi algoritma PID terbukti mampu mengendalikan kecepatan exhaust fan secara proporsional terhadap perubahan konsentrasi polutan. Pada fase pembersihan udara, penurunan konsentrasi asap

dari 938 ppm menjadi 853 ppm diikuti oleh penurunan nilai PWM dari 227 menjadi 198 secara bertahap dan stabil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan respons yang lebih halus dan adaptif dibandingkan metode kendali on-off konvensional, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang umur operasional exhaust fan.

Secara keseluruhan, tujuan penelitian untuk merancang sistem pemantauan dan pengendalian kualitas udara toilet sekolah berbasis IoT, mendeteksi polutan secara real-time, mengendalikan exhaust fan menggunakan algoritma PID, serta menyediakan fasilitas monitoring jarak jauh telah tercapai dengan baik. Sistem yang dikembangkan berpotensi diterapkan pada fasilitas sanitasi sekolah maupun ruang publik lainnya guna mendukung terciptanya lingkungan yang lebih sehat, aman, dan nyaman.

Daftar Pustaka

- [1] B. Harpad, S. Salmon, dan R. M. Saputra, “Sistem Monitoring Kualitas Udara di Kawasan Industri dengan NodeMCU ESP32 Berbasis IoT,” *Jurnal Informatika Wicida*, vol. 12, no. 2, pp. 39–47, 2022.
- [2] J. D. Susatyo dan Y. Fitrianto, “Sistem Monitoring Kualitas Udara dan Otomatisasi Pemberian Pakan Ayam Berbasis IoT,” *Krea-TIF: Jurnal Teknik Informatika*, vol. 9, no. 2, pp. 1–10, 2021.
- [3] S. Sadi, S. Mulyati, dan P. B. Setiawan, “Internet of Things pada Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan Web Server,” *Formosa Journal of Multidisciplinary Research*, vol. 1, no. 4, pp. 1085–1094, 2022.
- [4] S. T. Z. Noor et al., *Penerapan Teknologi Internet of Things (IoT) dalam Industri*. Padang: CV Pustaka Inspirasi Minang, 2025.
- [5] R. Ramadhan dan J. C. Chandra, “Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT dengan NodeMCU,” in *Prosiding Seminar Nasional Mahasiswa Fakultas Teknologi Informasi (SENAFTI)*, vol. 1, no. 1, pp. 1183–1190, 2022.
- [6] L. Hanum dan E. Elfizon, “Rancang Bangun Pemantau Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis Internet of Things,” *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 619–624, 2023.
- [7] R. Purbakawaca dan S. A. Fauzan, “Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbiaya Rendah Berbasis IoT,” *Jurnal Talenta Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 118–125, 2022.
- [8] M. S. Novelan, “Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Menggunakan Mikrokontroler dan Aplikasi Android,” *Jurnal Nasional Informatika dan Teknologi Jaringan*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2020.
- [9] G. P. Humairoh dan R. D. E. Putra, “Prototipe Pengendalian Kualitas Udara Indoor Menggunakan Mikrokontroler dengan Sensor MQ135, DHT-22, dan Filter HEPA,” *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 2529–2536, 2021.
- [10] M. A. Satryawan dan E. Susanti, “Perancangan Alat Pendeteksi Kualitas Udara dengan IoT (Internet of Things) Menggunakan Wemos ESP32 D1 R32,” *Sigma Teknik*, vol. 6, no. 2, pp. 410–419, 2023.
- [11] R. F. Nugraha, F. N. Husna, S. Sandi, A. F. Syahla, Y. A. Saputra, dan R. Hidayat, “Smart Air Quality Guardian: Pengawasan Polusi Udara Berbasis ESP32 dengan Sensor Gas MQ-2 dan MQ-135,” *Jurnal Komputer dan Elektro Sains*, vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2024.
- [12] L. M. Easterline, A. A. Z. R. Putri, P. S. Atmaja, A. L. Dewi, dan A. Prasetyo, “Smart Air Monitoring with IoT-Based MQ-2, MQ-7, MQ-8, and MQ-135 Sensors Using NodeMCU ESP32,” *Procedia Computer Science*, vol. 245, pp. 815–824, 2024.
- [13] A. Refalista, R. Irawati, I. Irawan, dan T. W. Wisjhnuadji, “Penggunaan Sensor MQ-2, MQ-4, MQ-7, MQ-135 dan ESP32 untuk Air Pollution Monitoring Berbasis Internet of Things,” *Jurnal Ticom: Technology of Information and Communication*, vol. 12, no. 1, pp. 31–36, 2023.
- [14] F. A. D. Cahyono dan D. Irawan, “Rancang Bangun Sistem Pemantauan dan Kontrol Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis IoT,” *Elkom: Jurnal Elektronika dan Komputer*, vol. 17, no. 2, pp. 468–476, 2024.
- [15] F. Hasyim dan I. Suharjo, “Sistem Notifikasi Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Produksi Berbasis Internet of Things Menggunakan ESP8266,” *Pixel: Jurnal Ilmiah Komputer Grafis*, vol. 17, no. 1, pp. 149–158, 2024.

- [16] H. H. W. Wibowo dan L. Kurniasari, “Monitoring Kualitas Udara dan Emisi Asap dengan Teknologi Internet of Things (IoT) pada Halte Bus di Wilayah Perkotaan Menggunakan Sensor MQ-135 dan MQ-2,” *Jurnal Elektro dan Telekomunikasi Terapan*, vol. 11, no. 1, pp. 45–50, 2024.
- [17] S. D. Ghoza, U. Latifa, dan I. A. Bangsa, “Perancangan Smoke Detector Berbasis Sensor MQ-135 dan Mikrokontroler ESP32 sebagai Deteksi Dini Kebakaran,” *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 8, no. 3, pp. 4344–4350, 2024.
- [18] H. Haniza, B. Pamungkas, Z. Saputra, dan N. Novitasari, “Alat Pendeteksi Asap Rokok dengan Peringatan Suara Menggunakan Sensor MQ-2 dan MQ-135,” *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan*, vol. 3, no. 1, pp. 129–138, 2025.
- [19] N. D. Setia, B. Suprianto, E. Endryansyah, dan N. Kholis, “Perancangan Sistem Kendali Exhaust Fan Berbasis IoT dengan Sensor MQ-2 dan DHT22 untuk Optimalisasi Konsumsi Energi,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 14, no. 3, pp. 250–256, 2025.
- [20] R. Irfani, A. A. Rahmanto, dan M. E. Gazazanata, “Rancang Bangun Sistem Exhaust Fan Otomatis Berbasis Sensor DHT11 dan Mikrokontroler ESP32 untuk Peningkatan Kualitas Udara di Smoking Area,” *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, vol. 9, no. 1, pp. 102–112, 2025.
- [21] R. Z. Shoma, S. Noertjahjono, dan J. D. Irawan, “Penerapan Logika Fuzzy untuk Pengendalian Kualitas Udara pada Ruang Smoking Area dengan Mikrokontroler,” *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 4, no. 1, pp. 287–294, 2020.
- [22] T. Pratama, “Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruang Berbasis Arduino Menggunakan Metode Fuzzy Logic,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3S1, 2025.
- [23] L. T. Swarga dan L. A. Swarga, “Identifikasi Kualitas Udara pada Ruang Menggunakan Deret Sensor Gas dan Algoritma LDA,” *El Sains: Jurnal Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 13–16, 2024.
- [24] M. I. Tiara dan N. Firmawati, “Rancang Bangun Prototipe Sistem Kontrol Penutup Ventilasi dan Pembersih Udara Otomatis Berbasis Mikrokontroler,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 12, no. 3, pp. 356–362, 2023.