

Rancang Bangun *Particle Counter* untuk Monitoring Konsentrasi PM₁, PM_{2.5} dan PM₁₀ di Udara Berbasis IoT

Design and Build a Particle Counter for IoT-Based Monitoring of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ Concentrations in the Air

¹Muhamad Anda Falahuddin, ¹Asep Puloh*), ¹Sumeru, ¹Muhammad Arman,
¹Wirenda Sekar Ayu dan ¹Susilawati

¹Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

*) *corresponding email: ase.puloh.tptu420@polban.ac.id*

Abstrak

Kualitas udara yang buruk merupakan masalah serius bagi kesehatan dan lingkungan. Partikel mikroskopis seperti PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀ diketahui menyebabkan gangguan pernapasan dan masalah kesehatan lainnya. Karena itu, pemantauan kualitas udara yang akurat sangat penting untuk mengurangi dampak polusi udara. Penelitian ini bertujuan merancang bangun *particle counter* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk memantau kualitas udara secara *real-time* dan melaporkannya melalui platform *online*. Sistem ini menggunakan sensor PMS5003 untuk mengukur konsentrasi PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀ dengan presisi tinggi. Data dari sensor ini diolah oleh mikrokontroler ESP8266 yang terhubung ke internet, memungkinkan pengiriman data langsung ke platform online untuk analisis dan visualisasi data lebih lanjut. Pengujian dilakukan dengan membuat *chamber* pengujian ukuran 1x1x1 meter yang dapat disimulasikan berbagai kondisi lingkungan untuk memvalidasi kinerja alat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *particle counter* ini memberikan data yang akurat, dengan nilai *error* kurang dari 10% dibandingkan dengan alat standar. Alat ini juga dapat beroperasi dengan andal dalam berbagai kondisi lingkungan, menunjukkan kehandalan dan ketangguhan dalam aplikasi praktis. Secara keseluruhan, sistem *particle counter* berbasis IoT ini memberikan solusi inovatif untuk pemantauan kualitas udara yang lebih efektif dan efisien. Ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam upaya melindungi kesehatan manusia dan meminimalkan dampak negatif polusi udara terhadap lingkungan.

Kata Kunci: kualitas udara, particle counter, partikulat, Internet of Things.

Abstract

Poor air quality is a serious health and environmental issue. Microscopic particles such as PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ cause respiratory disorders and other health problems. Therefore, accurate and continuous air quality monitoring is crucial to mitigate the impacts of air pollution. This research aims to design an *Internet of Things* (IoT)-based particle counter capable of *real-time* air quality monitoring and reporting via an online platform. The system utilizes a PMS5003 sensor to measure PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ concentrations precisely. Data from the sensor is processed by an ESP8266 microcontroller connected to the internet, enabling direct data transmission to an online platform for further analysis and visualization. Testing is done by creating a 1x1x1 meter testing chamber to simulate various environmental conditions and validate the device's performance. Results show that the particle counter provides accurate data, with an error rate of less than 10% compared to standard devices. The device demonstrates reliable operation across different environmental conditions, showcasing its robustness in practical applications. This IoT-based particle counter offers an innovative solution for effective and efficient air quality monitoring. It is expected to significantly contribute to human health protection efforts and minimize the adverse environmental impacts of air pollution.

Keywords: air quality, particle counter, particulate matter, Internet of Things.

Makalah diterima 12 Juni 2024 – makalah direvisi 27 Juli 2024 – disetujui 5 Agustus 2024

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



1 Pendahuluan

Masalah kualitas udara telah menjadi isu utama global dalam beberapa tahun terakhir [1][2]. Partikel mikroskopis (partikulat) seperti PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀ menjadi perhatian karena dampak negatifnya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan [3][4]. Partikel-partikel ini dapat masuk ke saluran pernapasan dan menyebabkan berbagai penyakit seperti pneumonia dan sesak napas. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara yang akurat sangat penting untuk melindungi kesehatan masyarakat dari polusi udara [5]. Berdasarkan *World Health Organization* (WHO), beberapa zat polutan yang berbahaya di dalam ruangan yaitu PM_{2.5}, CO, SO₂, NO_x, NH₃, PAHs dan VOCs [6][7].

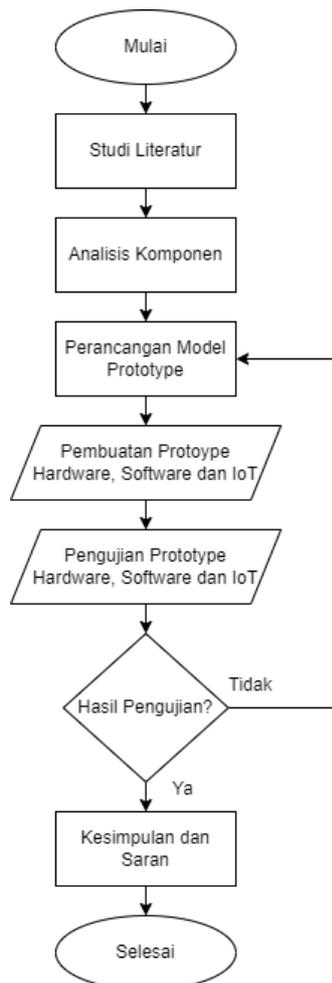
Monitoring kualitas udara diperlukan untuk mengetahui indeks polusi dan memungkinkan tindakan preventif. Namun, alat pemantauan saat ini memerlukan pengumpulan data manual dan hasilnya tidak tampil secara *real-time* [8][9]. Pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) menawarkan solusi potensial. Dengan menerapkan IoT pada sistem *particle counter*, pemantauan kualitas udara dapat dilakukan secara berkelanjutan dan lebih luas [10][11].

Penelitian ini dilakukan dalam *chamber* berukuran 1m³, dimana pengambilan sampel data dilakukan dengan membandingkan kinerja alat yang dikembangkan dengan alat standar HT9600. Alat yang dikembangkan menggunakan sensor PMS5003 dan mikrokontroler ESP8266 untuk mengukur jumlah partikel PM1, PM2.5, dan PM10. Metodologi ini tidak hanya menghadirkan pendekatan yang baru dalam pemantauan kualitas udara dalam skala yang terkontrol, tetapi juga mengeksplorasi aplikasi teknologi IoT yang dapat diterapkan dalam lingkup pemantauan lingkungan yang lebih luas di masa depan [12][13]. Diharapkan, penelitian ini tidak hanya akan memperluas pemahaman kita tentang kualitas udara dan dampaknya, tetapi juga memberikan kontribusi penting dalam pengembangan solusi teknologi untuk masalah kesehatan dan lingkungan global yang semakin mendesak.

2 Metode

2.1 Tahapan Penelitian

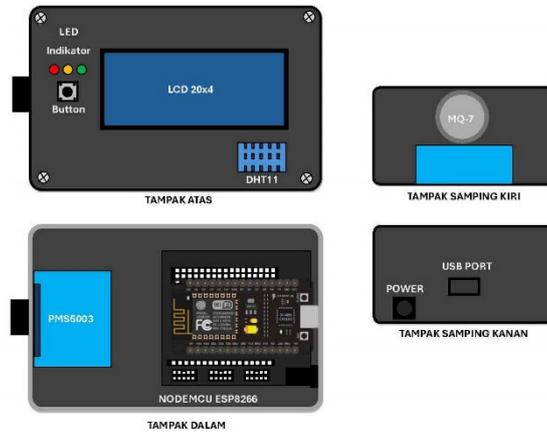
Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang mendasari pembuatan dan pengujian pengukuran partikel untuk mengukur konsentrasi PM di udara berbasis *internet of things*. Gambar 1 menunjukkan bahwa tahapan dari penelitian ini adalah mencari referensi literatur, analisis komponen, perancangan model, pembuatan perangkat, pengujian dan terakhir evaluasi. Jika pengujian berhasil data di evaluasi dengan mengacu pada standar indeks pencemaran udara dan jika pengujian tidak sesuai maka alat perlu dikalibrasi ulang.



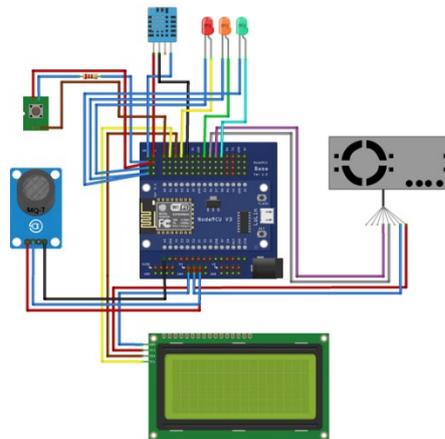
Gambar 1. Diagram alur penelitian.

2.2 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras menggunakan beberapa sensor dan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 [3], [4]. Sensor PMS5003 merupakan salah *particle counter* yang dapat mengukur partikel dengan akurasi baik. Sensor ini menggunakan prinsip hamburan sinar laser untuk mengukur nilai partikel yang tersuspensi di udara. PMS5003 memiliki rentang pengukuran partikel 0.3~1.0; 1.0~2.5; 2.5~10 *micrometer* (μm) dengan waktu respon total <10 s [5]. Integrasi perangkat keras dibuat dalam sebuah kotak sensor yang terdiri tiga sensor yaitu PMS5003, DHT11, MQ-7, LCD 20x4, ESP8266, button dan LED indikator.



Gambar 2. Desain prototipe *particle counter*.

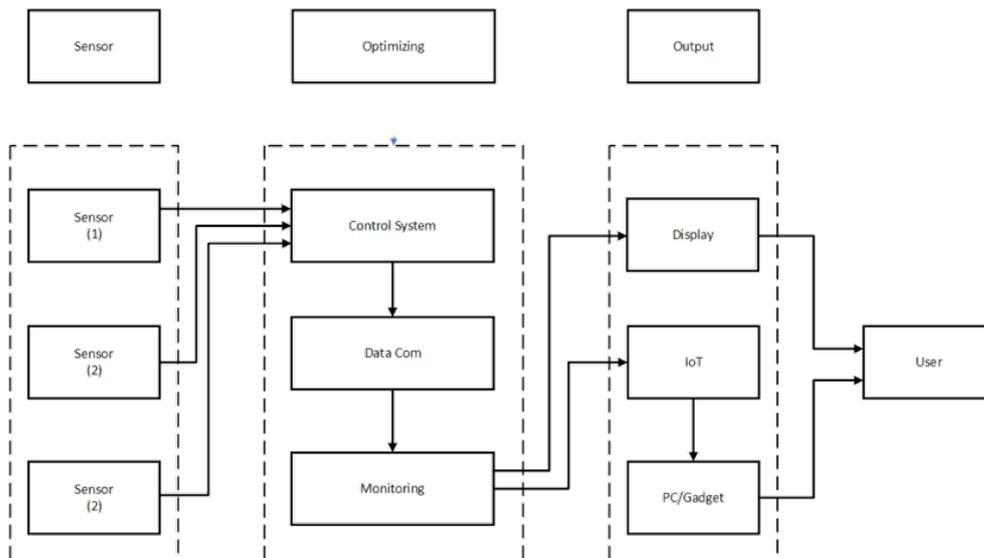


Gambar 3. Diagram *wiring* pada sistem *particle counter*.

Selain perancangan prototipe alat, dibuat juga perancangan diagram *wiring* prototipe yang ditunjukkan pada Gambar 3. Semua komponen pada alat dihubungkan ke NodeMCU ESP8266 yang dilengkapi dengan *base shield* ESP8266 untuk memudahkan konektivitas kabel *jumper* dari pin ke pin dan menyediakan stabilisasi tegangan dan perlindungan arus untuk ESP8266. Tegangan input yang dapat digunakan pada *base plate* NodeMCU ESP8266 adalah 6 hingga 24VDC dari *power supply*, sedangkan tegangan untuk tiap komponen disesuaikan dengan spesifikasi komponen ada yang menggunakan 3.3V dan 5V. Bagian *button* dan lampu indikator di buat dalam satu PCB untuk memudahkan dalam pemasangan pada *box*.

2.3 Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak prototipe terdiri dari diagram blok sistem dan tampilan *monitoring* yang dirancang untuk mengirim data dari sensor-sensor yang terhubung, memrosesnya dan menampilkan informasi yang relevan kepada pengguna yang dapat diakses secara *online* dan jarak jauh melalui *platform* IoT.



Gambar 4. Diagram blok sistem.

Sistem *particle counter* ini bekerja dengan mengintegrasikan tiga sensor utama, PMS5003 untuk mengukur konsentrasi partikel PM1, PM2.5 dan PM10, DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembaban udara, serta MQ7 untuk mengukur konsentrasi karbon monoksida (CO) [14]. Data dari ketiga sensor ini dikumpulkan oleh mikrokontroler NodeMCU ESP8266, yang berfungsi sebagai pusat kendali. NodeMCU ESP8266 kemudian memproses data yang diterima dan mengirimkannya ke *platform* IoT ThingSpeak melalui koneksi internet untuk penyimpanan dan analisis lebih lanjut. Selain itu, NodeMCU ESP8266 juga mengirimkan data yang telah diproses ke LCD 20x4, memungkinkan pengguna untuk memantau hasil pengukuran secara *real time* yang dapat diakses melalui *handphone* dan komputer. Dengan alur kerja ini, sistem dapat memantau kualitas udara secara kontinu dan memberikan informasi yang akurat mengenai konsentrasi partikel, suhu, kelembapan dan kadar karbon monoksida di udara.

2.4 Kalibrasi dan Pengujian Perangkat

Untuk keperluan kalibrasi dan pengujian perangkat dibangun ruang uji (*chamber*) ukuran 1 x 1 x 1 meter seperti ditunjukkan pada Gambar 5, terbuat dari material kedap terhadap perubahan temperatur lingkungan dan gangguan udara kotor di luar ruang uji. Ruang Uji dapat dikondisikan dengan berbagai kondisi temperatur dan laju aliran udara.



Gambar 5. *Chamber* pengujian.

Proses kalibrasi sistem *particle counter* dilakukan dengan membandingkan hasil pengukurannya dengan alat acuan yaitu HT9600 untuk memastikan akurasi dan keandalan. Langkah pertama adalah persiapan alat, termasuk memprogram alat serta menyediakan alat HT9600 sebagai acuan. Pengukuran dilakukan di ruang *chamber* 1 m³ dengan kondisi terkendali, dimana kedua alat dioperasikan bersamaan dan diletakkan berdekatan untuk mengukur dari sumber udara yang sama. Data konsentrasi partikel dicatat secara berulang dalam rentang waktu tertentu. Data yang diperoleh dianalisis secara statik untuk mengevaluasi akurasi alat yang dibuat termasuk perhitungan rata-rata dan nilai *error*. Validasi hasil dilakukan melalui beberapa sesi pengukuran untuk memastikan keandalan alat yang dibuat dengan hasil valid ditandai oleh korelasi antara kedua alat.

3 Hasil Pembahasan

3.1 Hasil Perancangan Perangkat Keras

Semua komponen perangkat keras sistem *particle counter* berbasis IoT diintegrasikan dalam sebuah kotak sensor dengan ukuran 15 cm x 9.5 cm x 5 cm yang diposisikan secara rapi di bagian atas dan samping kotak. Hasil perancangan perangkat keras sistem ditunjukkan pada Gambar 6.

Dari hasil perancangan perangkat keras terdiri dari komponen komponen yang memiliki fungsi spesifik. Terdapat sebuah *button* yang berfungsi untuk mengganti layar tampilan data pada LCD, memungkinkan pengguna untuk melihat berbagai data pengukuran yaitu PM, temperatur, kelembaban dan karbon monoksida (CO). LED indikator memberikan visualisasi tingkat partikel PM dengan menggunakan tiga warna, merah untuk tingkat berbahaya, kuning untuk tingkat sedang, dan hijau untuk tingkat aman. Sensor MQ ditempatkan di sisi kiri perangkat mengukur konsentrasi CO di udara, sementara sensor DHT11 di bagian atas perangkat mengukur suhu dan kelembaban udara. LCD menampilkan data dari semua sensor dengan jelas, memudahkan pengguna untuk memantau kondisi lingkungan secara *real time*. Data dari semua sensor di proses NodeMCU ESP8266 dan mengirimkannya ke platform IoT ThingSpeak melalui koneksi internet *Wifi*. Perangkat ini dilengkapi USB *port* yang menyediakan koneksi daya dan antarmuka untuk pemrograman.



Gambar 6. Realisasi perancangan sistem *particle counter*.

3.2 Hasil Perancangan Perangkat Lunak

Data pengukuran semua sensor setelah diproses mikrokontroler ditampilkan pada beberapa media yaitu LCD yang terpasang pada alat, serial monitor pada *software* Arduino IDE dan secara IoT pada *platform* ThingSpeak. Seluruh data hasil pengukuran kualitas udara dapat disimpan dalam format *.xlsx*. Dengan integrasi antara LCD pada alat dan IoT memungkinkan pengguna untuk memonitoring kualitas udara secara langsung maupun secara jarak jauh melalui *website* dan *gadget*. Hasil realisasi perancangan perangkat lunak pada Gambar 7 dan tampilan pada ThingSpeak pada Gambar 8.



Gambar 7. Tampilan LCD sistem *particle counter*.



Gambar 8. Tampilan pada platform ThingSpeak.

Hasil dari perancangan perangkat menampilkan data pada LCD perangkat, data yang ditampilkan yaitu data PM1, PM2.5 dan PM10 beserta status kualitas udaranya, kemudian data temperatur dan kelembaban, serta data dari karbon monoksida (CO).

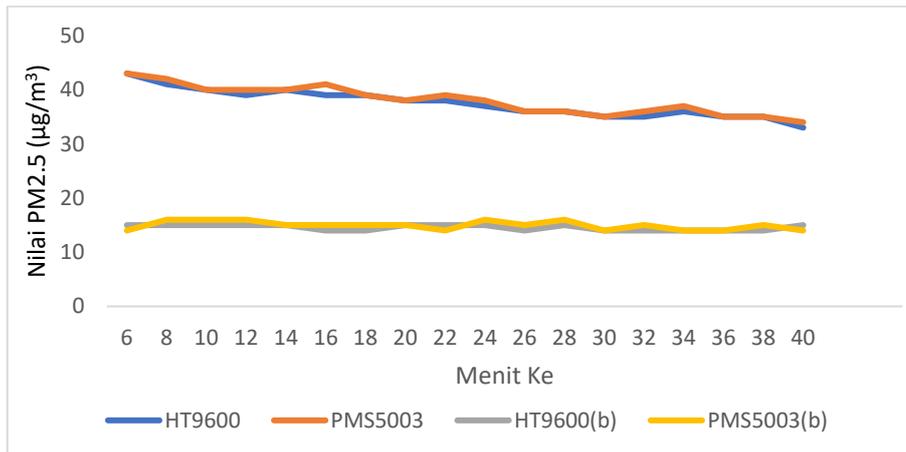
Tidak hanya menampilkan data pada LCD, sistem *particle counter* ini mampu mengirim dan menampilkan data pada platform IoT ThingSpeak, data yang ditampilkan nilainya sama dengan yang ditampilkan pada LCD namun dilengkapi dengan visual grafik secara *real time*. Keluaran dari platform IoT ini adalah dapat diekspor ke dalam format excel untuk dilakukan analisis lebih lanjut.

3.3 Hasil Pengujian dan Kalibrasi

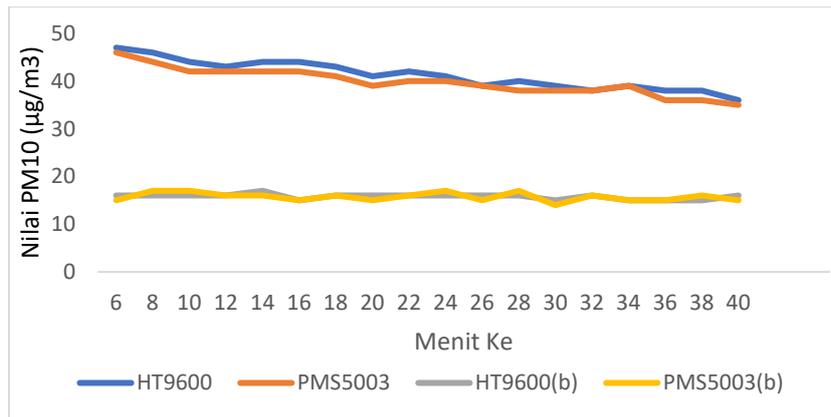
Pengujian dan kalibrasi dilakukan dalam sebuah *chamber* berukuran 1 m³ yang diinsulasi untuk menjaga kondisi dalam *chamber* dengan durasi pengujian selama 40 menit setiap kondisi. Selama pengujian alat ditambahkan parameter temperatur dan kecepatan udara untuk mengetahui pengaruhnya terhadap alat. Pengujian alat dilakukan dalam 3 kondisi, yaitu kondisi kedap, kondisi dengan pemanas dan kondisi dengan kipas dan pemanas. Pengujian dilakukan dengan dibandingkan dengan alat acuan yaitu HT9600.

3.3.1 Pengujian dan Kalibrasi Sensor PMS5003

3.3.1.1 Kondisi *Chamber* Kedap



Gambar 9. Grafik data kalibrasi PM2.5 kondisi kedap tanpa pemanas.

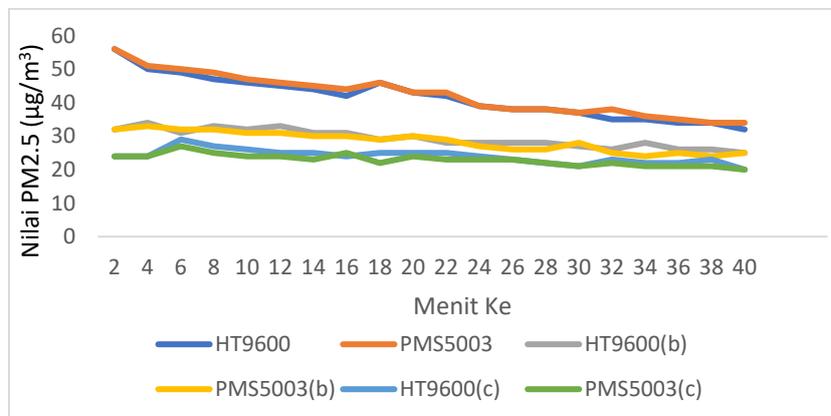


Gambar 10. Data kalibrasi PM10 kondisi *chamber* kedap tanpa pemanas.

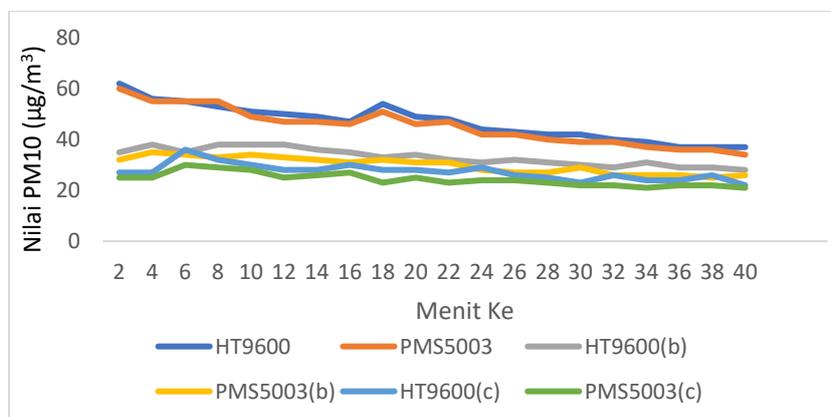
Gambar 9 dan 10 menunjukkan data pengujian kondisi *chamber* kedap tanpa kipas dan pemanas, alat acuan membaca nilai rata-rata untuk PM2.5 sebesar $38.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan untuk PM10 adalah $42.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara nilai rata-rata PM2.5 pada alat yang dibuat adalah $38.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan untuk PM10 sebesar $40.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sedangkan pada kondisi kedap dengan pemanas terjadi penurunan dalam pembacaan PM2.5 dan PM10. Rata-rata pembacaan PM2.5 pada alat acuan $14.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 $15.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sementara rata-rata PM2.5 pada alat yang dibuat adalah $14.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 $15.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3.1.2 Kondisi *Chamber* dengan Kipas tanpa Pemanas (1000 rpm – 3000 rpm)

Gambar 11 dan 12 menunjukkan data pengujian kondisi *chamber* dengan kipas berputaran 1000 rpm, rata-rata nilai PM2.5 pada alat acuan adalah $41.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan PM10 $46.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sementara, rata-rata PM2.5 pada alat yang dibuat adalah $42.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 $45.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Gambar 11. Data kalibrasi PM2.5 kondisi *chamber* dengan kipas.

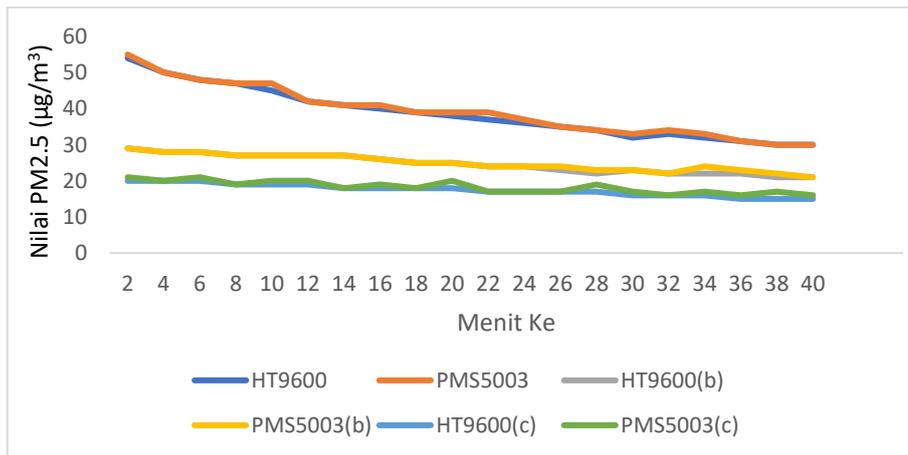


Gambar 12. Data kalibrasi PM10 kondisi *chamber* dengan kipas 2000 rpm.

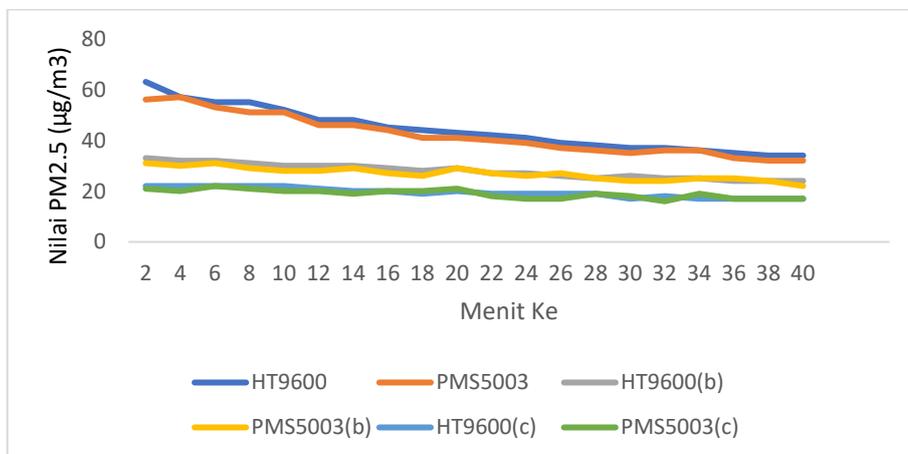
Sedangkan dalam kondisi *chamber* dengan putaran kipas 2000 rpm, rata-rata PM2.5 pada alat acuan adalah 30.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 32.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara rata-rata PM2.5 pada alat yang dibuat adalah 28.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dan PM10 29.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Adapun pengujian dalam kondisi *chamber* dengan kipas 3000 rpm, rata-rata PM2.5 pada alat acuan adalah 24.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 27.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara rata-rata PM2.5 pada alat yang dibuat 22.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 24.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3.1.3 Kondisi *Chamber* dengan Kipas dan Pemanas



Gambar 13. Data kalibrasi PM2.5 kondisi *chamber* dengan kipas dan pemanas.



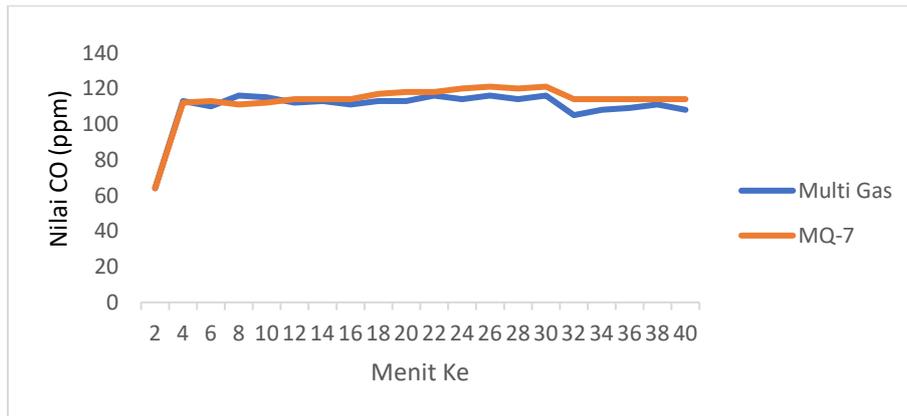
Gambar 14. Data kalibrasi PM10 kondisi *chamber* dengan kipas dan pemanas.

Pengujian dengan kondisi *chamber* berpemanas dan bervariasi kecepatan angin ditunjukkan pada Gambar 13. Hasil dengan kondisi *chamber* dengan kipas 1000 rpm dan pemanas, rata-rata PM2.5 yang dibaca oleh alat acuan adalah 38.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 45.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara rata-rata PM2.5 yang dibaca alat yang dibuat adalah 38.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 42.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sedangkan pengujian kondisi *chamber* dengan kipas 2000 rpm dan pemanas, rata-rata PM2.5 yang dibaca oleh acuan adalah 25.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 28.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara rata-rata PM2.5 oleh alat yang dibuat adalah 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 26.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Adapun pengujian dalam kondisi *chamber* dengan kipas 3000 rpm dan pemanas, rata-rata PM2.5 yang dibaca oleh alat acuan adalah 17.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 19.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara rata-rata PM2.5 yang dibaca alat yang dibuat adalah 18.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 19.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3.2 Pengujian dan Kalibrasi Sensor MQ-7



Gambar 15. Data kalibrasi MQ-7

Hasil pengujian dan kalibrasi sensor MQ-7 rata-rata nilai CO yang dibaca oleh alat acuan adalah 112.55 ppm dengan rentang pembacaan berkisar antara 64–116 ppm. Sedangkan rata-rata CO yang dibaca oleh alat yang dibuat adalah 114.45 ppm dengan rentang pembacaan berkisar antara 64–121 ppm, seperti ditunjukkan pada Gambar 15.

Hasil pengujian alat yang dibuat dengan perbandingan alat acuan HT9600 dimasukkan kedalam tabel untuk mengetahui nilai error dari alat yang dibuat. Tabel 1 menyajikan tabel data rata-rata nilai *error* pengukuran PM2.5 dan PM10.

Berdasarkan hasil kalibrasi dan pengukuran di berbagai kondisi lingkungan, rata-rata nilai *error* dari sistem *particle counter* berbasis IoT dibandingkan dengan alat acuan HT9600 menunjukkan variasi yang signifikan tergantung pada kondisi pengukuran. Pada kondisi *chamber* kedap tanpa pemanas dan kipas, alat menunjukkan rata-rata nilai *error* sebesar 1.40% untuk PM2.5 dan 3.55% untuk PM10, yang menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi. Namun, ketika pemanas dan kipas ditambahkan ke dalam *chamber*, rata-rata nilai *error* meningkat menjadi 4.66% untuk PM2.5 dan 4.14% untuk PM10. Dengan hanya menggunakan kipas tanpa pemanas pada kecepatan 1000 rpm, 2000 rpm dan 3000 rpm, rata-rata nilai *error* untuk PM2.5 adalah masing-masing 2.04%, 4.24% dan 4.75%, sedangkan untuk PM10 adalah 4.12%, 8.76% dan 9.81%, menunjukkan peningkatan *error* dengan peningkatan kecepatan kipas. Ketika pemanas ditambahkan bersama kipas pada kecepatan yang sama, rata-rata nilai *error* untuk PM2.5 adalah 1.40%, 1.29% dan 4.07%, sedangkan untuk PM10 adalah 4.87%, 4.46% dan 5.36%. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan pemanas secara umum membantu mengurangi *error* untuk PM2.5, tetapi hasil untuk PM10 bervariasi lebih besar dengan perubahan kecepatan kipas.

Tabel 1. Rata-rata nilai *error* PM2.5 dan PM10.

Kondisi Pengujian	Rata-rata Nilai <i>Error</i> (%)	
	PM2.5	PM10
Kondisi <i>chamber</i> kedap tanpa pemanas dan kipas	1.40	3.55
Kondisi <i>chamber</i> kedap dengan pemanas dan kipas	4.66	4.14
Kondisi <i>chamber</i> dengan kipas 1000 rpm tanpa pemanas	2.04	4.12
Kondisi <i>chamber</i> dengan Kipas 2000 rpm tanpa pemanas	4.24	8.76
Kondisi <i>chamber</i> dengan kipas 3000 rpm tanpa pemanas	4.75	9.81
Kondisi <i>chamber</i> dengan kipas 1000 rpm dan pemanas	1.40	4.87
Kondisi <i>chamber</i> dengan kipas 2000 rpm dan pemanas	1.29	4.46
Kondisi <i>chamber</i> dengan kipas 3000 rpm dan pemanas	4.07	5.36

4 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun sistem *particle counter* berbasis IoT yang dapat memonitor konsentrasi PM1, PM2.5 dan PM10 di udara secara *real time* dan pemantauan jarak jauh. Berdasarkan hasil pengujian sistem *particle counter* yang dirancang memiliki nilai akurasi 98.60% pada PM2.5 dan 96.45% pada PM10 kondisi kedap. Sedangkan pada kondisi dengan ditambahkan variasi kecepatan kipas dan pemanas nilai akurasi rata-rata 96% dan dengan kondisi menggunakan kipas dan pemanas nilai akurasi rata-rata 97%. Adapun nilai akurasi untuk sensor CO sebesar 96%.

Referensi

- [1] G. Settimo, M. Manigrasso, and P. Avino, "Indoor air quality: A focus on the european legislation and state-of-the-art research in Italy," *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, no. 4, 2020, doi: 10.3390/ATMOS11040370.
- [2] S. Sun, X. Zheng, J. Villalba-Díez, and J. Ordieres-Meré, "Indoor air-quality data-monitoring system: Long-term monitoring benefits," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 19, pp. 1–18, 2019, doi: 10.3390/s19194157.
- [3] D. Y. C. Leung, "Outdoor-indoor air pollution in urban environment: Challenges and opportunity," *Front. Environ. Sci.*, vol. 2, no. JAN, pp. 1–7, 2015, doi: 10.3389/fenvs.2014.00069.
- [4] P. Carrer and P. Wolkoff, "Assessment of indoor air quality problems in office-like environments: Role of occupational health services," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 4, 2018, doi: 10.3390/ijerph15040741.
- [5] W. A. Wardhana, *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: Andi, 2004.
- [6] U. Bariss, E. Avenitis, G. Junghans, and D. Blumberga, "CO2 Emission Trading Effect on Baltic Electricity Market," *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 58–65, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.016.
- [7] OMS, "WHO global air quality guidelines," *Part. matter (PM2.5 PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide carbon monoxide*, pp. 1–360, 2021.
- [8] S. Rusmana, M. Falahuddin & Pratikto, "Pengaturan Konsentrasi CO2 Ruang Menggunakan Exhaust Fan Berbasis Inverter Vsd dan Plc," *Prosiding Ind. Res. Work. Natl. Semin. 2022*, pp. 13–14, 2022. [Online]. Available: <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/4259>.
- [9] M. Benammar, A. Abdaoui, S. H. M. Ahmad, F. Touati, and A. Kadri, "A Modular IoT Platform for Real-Time Indoor Air Quality Monitoring," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 2, 2018, doi: 10.3390/s18020581.
- [10] N. S. Technologies, "System To Control Indoor Air Quality in Energy," 2016.
- [11] J. A. Orosa and A. C. Oliveira, "Hourly Indoor Thermal Comfort and Air Quality Acceptance with Passive Climate Control Methods," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2735–2742, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.04.021.
- [12] M. Jin, R. Jia, and C. J. Spanos, "Virtual Occupancy Sensing: Using Smart Meters to Indicate Your Presence," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 11, 2017, doi: 10.1109/TMC.2017.2684806.
- [13] P. Zhou, G. Huang, L. Zhang, and K. F. Tsang, "Wireless Sensor Network Based Monitoring System for a Large-Scale Indoor Space: Data Process And Supply Air Allocation Optimization," *Energy Build.*, vol. 103, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.042.
- [14] C. Monoxide, "MQ-7 GAS SENSOR," vol. 1, pp. 3–5.