

Uji Karakteristik dan Kinerja Sensor MQ-135 dalam Sistem Deteksi Residu Pestisida Organofosfat pada buah dan sayur

Characteristics and Performance Test of the MQ-135 Sensor in the Organophosphate Pesticide Residue Detection System in Fruits and Vegetables

Asmaul Lutfi Marufah^{1*}, Muhamad Azwar Annas¹

¹Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Jawa Timur, Indonesia 62218

Email: *asmaullutfiii@gmail.com; annasazwar93@gmail.com

Received: 8th December 2025; Revised: 2nd February 2026; Accepted: 10th February 2026

Abstrak – Organofosfat merupakan senyawa yang sering kita temui di sayur dan buah. Organofosfat memiliki beberapa dampak kesehatan jika dikonsumsi secara berlebihan dan dalam jangka waktu yang lama. Penelitian ini bertujuan untuk menguji karakteristik dan kinerja sensor MQ-135 dalam sistem deteksi residu pestisida organofosfat pada buah dan sayur. Sensor MQ-135 dipilih karena sensitivitasnya terhadap berbagai senyawa gas, termasuk senyawa volatil hasil degradasi pestisida. Metode penelitian mencakup pengujian respons sensor terhadap variasi konsentrasi larutan pestisida organofosfat dengan 3 merk yang sering digunakan yaitu kanon, diazinon dan curacron. Pertama-tama dilakukan kalibrasi MQ-135 pada udara bersih selama 24 jam untuk mendapatkan baseline. Setelah didapatkan baseline sensor diuji dengan variasi konsentrasi 0-100 ppm dengan kelipatan 10. Berdasarkan hasil penelitian, secara keseluruhan, sensor MQ-135 menunjukkan kemampuan deteksi yang baik terhadap ketiga pestisida, dengan sensitivitas tertinggi pada pestisida A yaitu 25,645, dimana pestisida B memiliki nilai 21,836 dan pestisida C adalah 24,436. Untuk nilai linearitas terbaik didapatkan pada pestisida B yaitu 0,9969 dimana pestisida A dan C berturut turut yaitu 0,9443 dan 0,9933. Namun, pada konsentrasi rendah, sensor masih menunjukkan ketidakstabilan terutama pada pestisida A. Karakter ini menunjukkan bahwa MQ-135 cocok digunakan sebagai alat screening cepat (rapid test) untuk mendeteksi keberadaan residu pestisida organofosfat, namun memerlukan kalibrasi tambahan dan validasi lebih lanjut untuk pengukuran presisi kuantitatif.

Kata kunci: Deteksi residu; keamanan pangan; organofosfat; pestisida; sensor MQ-135.

Abstract – Organophosphates are compounds that we often find in vegetables and fruits. Organophosphates have several health impacts if consumed excessively and over a long period of time. This study aims to test the characteristics and performance of the MQ-135 sensor in the organophosphate pesticide residue detection system in fruits and vegetables. The MQ-135 sensor was chosen because of its sensitivity to various gaseous compounds, including volatile compounds resulting from pesticide degradation. The research method includes testing the sensor response to variations in the concentration of organophosphate pesticide solutions with 3 frequently used brands, namely kanon, diazinon and curacron. First, the MQ-135 was calibrated in clean air for 24 hours to obtain a baseline. After obtaining the baseline, the sensor was tested with concentration variations of 0-100 ppm in multiples of 10. Based on the research results, overall, the MQ-135 sensor showed good detection capabilities for the three pesticides, with the highest sensitivity in pesticide A, namely 325.645, where pesticide B has a value of 21.836 and pesticide C is 24.436. The best linearity value was obtained for pesticide B, which was 0.9969, while pesticides A and c were 0.9443 and 0.9933, respectively. However, at low concentrations, the sensor still showed instability, especially for pesticide A. This character indicates that the MQ-135 is suitable for use as a rapid screening tool (rapid test) to detect the presence of organophosphate pesticide residues, but requires additional calibration and further validation for quantitative precision measurements.

Keywords: Residue detection; food safety; organophosphate; pesticides; MQ-135 sensor.

1. Pendahuluan

Environmental Working Group (EWG) tahun 2025 mengemukakan 75% dari semua produk segar konvensional yang diambil sampelnya mengandung residu pestisida yang berpotensi berbahaya. Selain itu untuk produk yang termasuk dalam Dirty Dozen, sebanyak 95 persen sampel mengandung pestisida [1]. Data statistik yang mengkhawatirkan yang menunjukkan bahwa sekitar 3 juta orang keracunan pestisida setiap tahunnya, kebutuhan akan metode deteksi yang efektif menjadi sangat penting [2], [3]. Pestisida, khususnya organofosfat, banyak digunakan dalam pertanian tetapi menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan, termasuk keracunan akut dan efek kesehatan jangka panjang [4]. Penggunaan bahan kimia ini secara sembarangan menyebabkan bahan kimia ini bertahan lama di lingkungan, mencemari sumber makanan, dan mempengaruhi kesehatan manusia [5]. Kemajuan terkini dalam teknologi sensor, seperti MQ-135, memungkinkan pemantauan kadar pestisida dalam buah dan sayuran secara real-time [6].

Keamanan pangan merupakan salah satu aspek penting yang harus dijaga untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Salah satu permasalahan serius dalam bidang pangan adalah adanya residu pestisida yang masih tertinggal pada produk pertanian seperti sayuran dan buah. Pestisida organofosfat merupakan golongan pestisida yang paling banyak digunakan karena efektif dalam membasmi hama, harganya relatif murah, dan mudah diperoleh. Namun, penggunaan yang berlebihan atau tidak sesuai aturan, baik dari segi dosis maupun waktu panen, dapat meninggalkan residu berbahaya yang mengancam kesehatan manusia. Residu pestisida organofosfat diketahui bersifat toksik, dapat mengganggu sistem saraf, menurunkan fungsi enzim asetilkolinesterase, serta meningkatkan risiko penyakit kronis [7].

Metode konvensional untuk mendeteksi residu pestisida biasanya menggunakan kromatografi gas, kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC), atau spektrometri massa. Metode tersebut sangat akurat, namun memiliki kelemahan yaitu membutuhkan biaya tinggi, waktu analisis lama, serta peralatan canggih yang tidak selalu tersedia di lapangan. Oleh karena itu, pengembangan metode deteksi cepat, murah, dan portabel menjadi kebutuhan yang mendesak [8].

Salah satu alternatif adalah pemanfaatan teknologi sensor gas. Sensor MQ-135 merupakan sensor gas berbasis *metal oxide semiconductor* (MOS) yang dapat mendeteksi berbagai gas berbahaya seperti amonia, karbon monoksida, nitrogen oksida, dan senyawa organik volatil. Beberapa penelitian melaporkan bahwa sensor ini juga peka terhadap senyawa hasil degradasi pestisida organofosfat, sehingga memiliki potensi digunakan dalam sistem deteksi residu pestisida [9].

Studi yang dilakukan Li dkk, 2020 juga melaporkan bahwa MQ-135 dapat mendeteksi berbagai gas organik seperti amonia, toluene, dan organofosfat, namun sensitivitas sangat bergantung pada volatilitas larutan. [8]. Penelitian ini difokuskan pada pengujian karakteristik dan kinerja sensor MQ-135 dalam mendeteksi residu pestisida organofosfat pada buah dan sayuran. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui sensitivitas, stabilitas, dan kemampuan klasifikasi sistem sehingga dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode deteksi cepat dan portabel dalam bidang keamanan pangan.

2. Landasan Teori

Organofosfat (OP) merupakan kelompok pestisida yang banyak digunakan dalam budidaya buah dan sayur karena efektivitasnya sebagai insektisida dengan waktu paruh yang relatif pendek dibandingkan organoklorin. Secara toksikologis, OP bekerja dengan menghambat enzim asetilkolinesterase yang menyebabkan akumulasi asetilkolin pada sinaps neuromuskular dan menimbulkan gejala neurotoksik akut maupun kronis. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa residu OP masih ditemukan secara signifikan pada komoditas hortikultura, terutama yang mengalami penyemprotan intensif dan tidak melalui proses karantina pascapanen yang memadai [10, 11].

Senyawa Organofosfat dapat melepaskan komponen volatil ketika ditempatkan dalam ruang tertutup (*headspace chamber*). Gas volatil tersebut dapat dipantau menggunakan sensor gas berbasis semikonduktor. Penelitian Huang et al. (2003) membuktikan bahwa Sensor gas berbasis SnO₂ (stanum dioxide) mampu mendeteksi uap *acephate* dan *trichlorphon* melalui perubahan temperatur dan analisis perubahan resistansi. Pendekatan *headspace analysis* ini efektif untuk melakukan *screening* awal tanpa harus mengekstrak sampel secara kimiawi [12].

MQ-135 merupakan sensor gas komersial yang menggunakan material SnO₂ sebagai elemen sensornya. SnO₂ mengalami perubahan resistansi ketika berinteraksi dengan gas reduktor atau oksidator. Dalam kondisi normal, oksigen terserap pada permukaan SnO₂ (stanum dioxide) dan membentuk lapisan

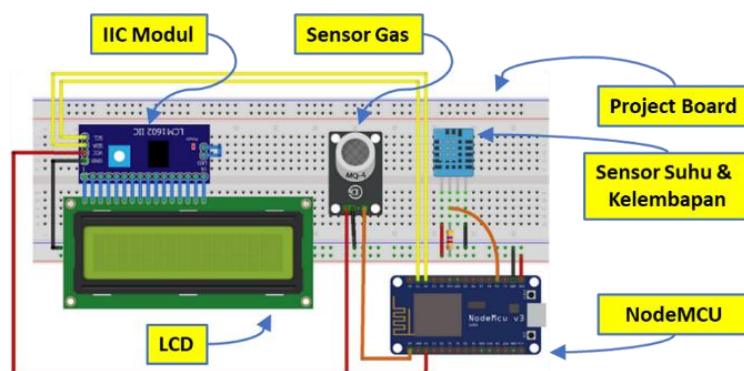
deplesi yang meningkatkan resistansi. Ketika molekul volatil dari pestisida bereaksi dengan oksigen terabsorpsi, elektron dilepaskan kembali ke SnO_2 sehingga resistansi sensor menurun [13].

Kinerja sensor ditentukan oleh beberapa parameter seperti sensitivitas, linearitas, *response time*, *recovery time*, stabilitas sinyal, serta pengaruh suhu dan kelembapan. MQ-135 dikenal memiliki sensitivitas terhadap NH_3 (ammonia), NO_x , alkohol, benzena, dan VOC lainnya. Oleh karena itu, MQ-135 berpotensi digunakan untuk memantau volatil pestisida yang dilepaskan oleh buah dan sayur, terutama ketika sensor dikalibrasi terhadap konsentrasi tertentu dalam lingkungan terkendali (*closed-chamber*) [14].

Studi yang dilakukan oleh Yilmaz dkk, 2025 menunjukkan bahwa sensor gas murah berbasis *metal oxide semiconductor* (MOS) dapat digunakan untuk membedakan sampel yang terkontaminasi pestisida dan yang tidak terkontaminasi. Sistem *electronic nose* yang terdiri dari beberapa sensor MQ-series telah digunakan untuk mendeteksi residu pestisida, meningkatkan akurasi melalui pola multivariat menggunakan klasifikasi *machine learning* [15].

3. Material Dan Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk menguji karakteristik dan kinerja sensor MQ-135 dalam mendeteksi residu pestisida organofosfat pada buah dan sayur. Pada penelitian ini sensor MQ-135 diuji sensitivitas dan evaluasi kemampuan identifikasi sensor pada sampel buah dan sayur yang telah dipaparkan pestisida dengan berbagai konsentrasi. Alat dan bahan yang digunakan meliputi sensor MQ-135, Arduino, sensor suhu dan kelembapan, ruang uji tertutup (*chamber*) dengan pemanas dan kipas sirkulasi, serta perangkat pendukung seperti multimeter, gelas beaker, pipet, dan gelas ukur. Bahan penelitian terdiri atas sampel buah dan sayur yaitu tomat dan sawi serta pestisida organofosfat 3 merk yang berbeda yaitu curacron (Pestisida A), Kanon (Pestisida B), dan diazinon (Pestisida C) yang digunakan sesuai protokol keamanan untuk menciptakan residu pada permukaan sampel.



Gambar 1. Rangkaian sensor MQ-135 untuk deteksi residu pestisida.

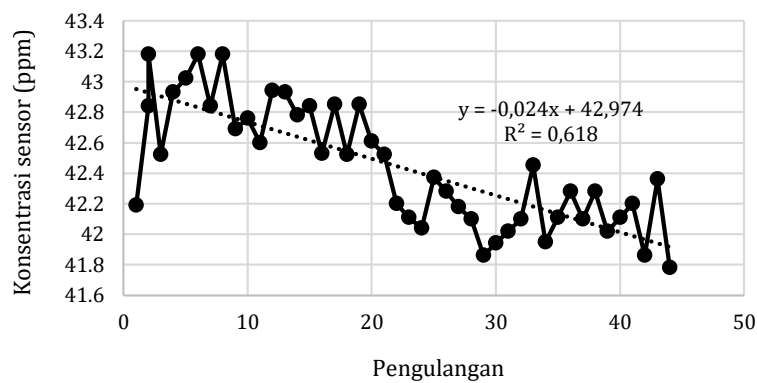
Tahap awal penelitian adalah perancangan dan perakitan sistem sensor. Sensor MQ-135 dihubungkan dengan mikrokontroler seperti pada Gambar 1. Sistem ini kemudian dipasang pada *chamber* berbahan akrilik yang dilengkapi pemanas kecil dan kipas untuk menjaga pemerataan uap. Selanjutnya, peneliti menulis program mikrokontroler untuk membaca nilai tegangan sensor, menampilkan nilai pada LCD dan menyimpannya secara *real-time* ke dalam penyimpanan digital. Tahap berikutnya adalah kalibrasi awal sensor, yang diawali dengan membiarkan sensor pada udara bersih selama 24 jam. Sensor dibiarkan menyala dalam kondisi udara bersih untuk memperoleh baseline sebagai titik acuan. Setelah itu dilakukan kalibrasi menggunakan uap organofosfat pada variasi konsentrasi yaitu konsentrasi 0-100 ppm dengan kelipatan 10. Pengukuran konsentrasi NH_3 dicatat untuk setiap konsentrasi dan digunakan untuk membangun kurva kalibrasi. Kurva ini memungkinkan peneliti mengidentifikasi hubungan kuantitatif antara respons sensor dan konsentrasi uap, yang menjadi dasar perhitungan sensitivitas, linearitas, dan limit deteksi.

Tahap pengujian sensor dilakukan dengan memberikan variasi konsentrasi larutan pestisida ke dalam *chamber* dan menjalankan sistem sensor. Data konsentrasi direkam pada interval 10 detik dengan 10 kali pengulangan untuk memperoleh pola respons sensor terhadap volatilitas organofosfat. Proses analisis data dilakukan dengan menghitung rata-rata respons sensor untuk setiap konsentrasi, yang kemudian diplot

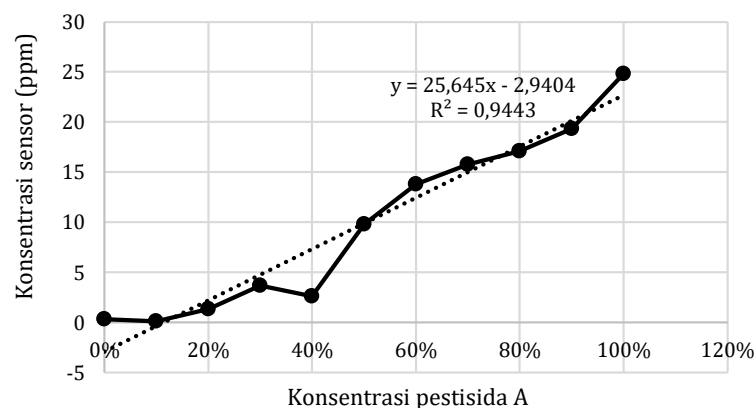
dalam kurva kalibrasi. Regresi linear atau nonlinear digunakan untuk memperoleh nilai sensitivitas dan koefisien determinasi (R^2) sebagai indikator linearitas.

4. Hasil Dan Pembahasan

Pada penelitian ini dilakukan kalibrasi sensor MQ-135 untuk melihat respon sensor. Nilai kalibrasi dari sensor MQ-135 dapat dilihat pada Gambar 2. Dari Gambar 2 dapat dilihat nilai konsentrasi NH_3 yang terdeteksi oleh MQ-135 memiliki nilai yang fluktuatif. Perubahan nilai ini dikarenakan perbedaan waktu saat pengambilan nilai konsentrasi. Selain itu nilai ini memiliki rentang dari 41–43 ppm. Analisis awal pada kondisi udara bersih memperlihatkan bahwa nilai baseline sensor stabil setelah proses *burn-in*, dengan fluktuasi sinyal yang kecil dan berada dalam rentang yang dapat diterima. Stabilitas baseline ini penting karena menjadi acuan dalam menentukan perubahan sinyal akibat keberadaan residu pestisida. Selanjutnya dilakukan pengujian pada sampel pestisida yang telah diencerkan sesuai konsentrasi yang diinginkan yaitu 0–100 ppm dengan kelipatan 10.



Gambar 2. Grafik kalibrasi sensor MQ-135 pada udara bersih selama 24 jam.



Gambar 3. Grafik hubungan konsentrasi pestisida A (curacron) dengan konsentrasi sensor MQ-135.

Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi pestisida menghasilkan kenaikan nilai ppm yang terdeteksi oleh sensor. Secara umum, pola ini menggambarkan bahwa MQ-135 mampu memberikan respons yang cukup baik terhadap keberadaan senyawa volatil organofosfat yang terkandung dalam Curacron. Hal ini terlihat dari kecenderungan peningkatan sinyal sensor seiring bertambahnya konsentrasi, serta nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,9443$) yang menunjukkan bahwa hubungan antara keduanya bersifat linear dan kuat.

Pada konsentrasi rendah (0–40%), respons sensor terlihat masih fluktuatif. Nilai ppm yang dihasilkan belum stabil dan cenderung berubah-ubah meskipun perbedaan konsentrasi tidak terlalu besar. Kondisi ini dapat dipahami karena pada konsentrasi yang masih rendah, jumlah uap pestisida yang terlepas belum cukup signifikan untuk menghasilkan perubahan resistansi yang konsisten pada MQ-135. Selain itu, sensor gas seperti MQ-135 memang memiliki batas deteksi tertentu, sehingga pada kadar volatil yang sangat kecil,

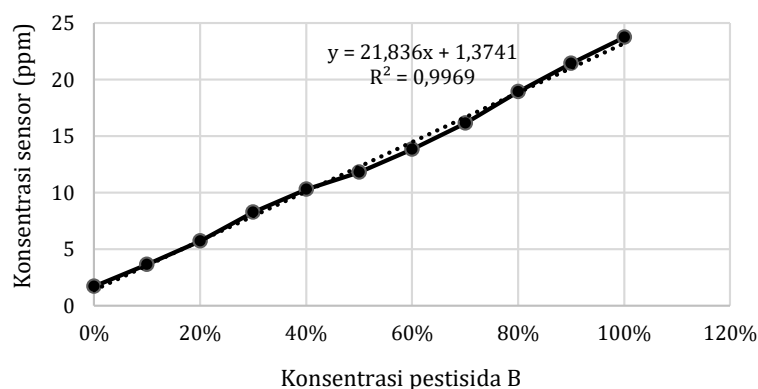
pembacaan cenderung dipengaruhi oleh noise, suhu, atau ketidakstabilan awal sensor. Bagian ini menunjukkan bahwa MQ-135 kurang sensitif untuk pendeteksian pestisida pada tingkat sangat rendah.

Respons sensor mulai meningkat secara tajam pada kisaran konsentrasi menengah (50–70%). Pada rentang ini, sinyal sensor naik lebih cepat dan lebih konsisten dibandingkan sebelumnya. Hal tersebut mengindikasikan bahwa volatil Curacron sudah berada pada jumlah yang cukup untuk ditangkap oleh elemen sensor, sehingga perubahan resistansi terjadi lebih stabil. Fakta ini menunjukkan bahwa rentang menengah merupakan zona sensitivitas optimal MQ-135 dalam mendeteksi residu pestisida Curacron.

Pada konsentrasi tinggi (80–100%), respons sensor kembali stabil dan cenderung mengikuti garis kecenderungan linear. Nilai ppm meningkat secara proporsional terhadap penambahan konsentrasi, yang berarti MQ-135 mampu menangkap peningkatan kadar volatil secara lebih akurat. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan tingkat presisi yang baik pada konsentrasi yang lebih besar, sehingga hasil regresi dan model kalibrasi dapat digunakan untuk perkiraan kuantitatif dalam uji lanjutan.

Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan bahwa MQ-135 dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan Curacron, khususnya pada konsentrasi menengah hingga tinggi. Meskipun begitu, kinerja sensor kurang optimal pada konsentrasi rendah karena sensitivitas dan batas deteksinya yang terbatas. Oleh karena itu, MQ-135 lebih cocok digunakan sebagai alat deteksi awal (*screening*) dalam analisis cepat residu pestisida organofosfat, bukan sebagai alat pengukuran presisi pada kadar sub-ppm.

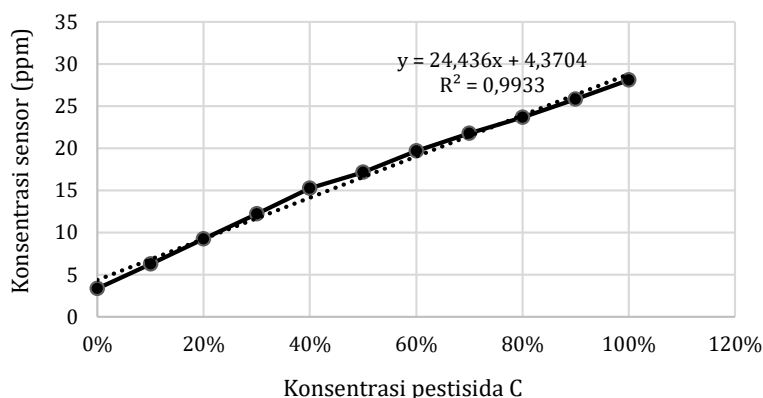
Karakterisasi sensor MQ-135 menunjukkan bahwa sensor ini mampu mendeteksi volatil organik dari ketiga jenis pestisida (A, B, dan C) melalui perubahan sinyal output dalam satuan ppm. Secara umum, seluruh grafik memperlihatkan pola meningkatnya respons sensor seiring dengan bertambahnya konsentrasi pestisida. Pola ini sesuai dengan karakteristik dasar sensor MQ-135 sebagai sensor berbahan dasar SnO_2 yang peka terhadap gas-gas organik volatil, termasuk senyawa organofosfat dan karbamat yang umum dijumpai pada formulasi pestisida [10].



Gambar 4. Grafik hubungan konsentrasi pestisida B (kanon) dengan konsentrasi sensor MQ-135.

Pestisida B menghasilkan respons sensor paling stabil di seluruh rentang konsentrasi seperti yang ditunjukkan Gambar 4. Hampir semua titik pengukuran berada tepat pada garis tren, yang tercermin dari nilai $R^2 = 0,9969$, mendekati linearitas sempurna. Persamaan regresi $y = 21,836x + 1,3741$ menunjukkan sensitivitas sensor yang lebih tinggi dibanding pestisida A. Stabilitas sinyal ini mengindikasikan bahwa pestisida B memiliki volatilitas yang lebih konsisten dan interaksi kimia yang lebih kuat dengan permukaan SnO_2 .

Temuan ini sesuai dengan studi oleh Jayan (2025), yang menyatakan bahwa stabilitas volatilitas suatu pestisida sangat menentukan konsistensi sinyal sensor berbasis metal *oxide semiconductor* (MOS). Bahan aktif pestisida tertentu lebih mudah teroksidasi, menghasilkan peningkatan elektron bebas dan penurunan resistansi yang terukur secara stabil oleh MQ-135 [16].



Gambar 5. Grafik hubungan konsentrasi pestisida C (diazinon) dengan konsentrasi sensor MQ-135.

Dari ketiga pestisida, pestisida C (Gambar 5) menunjukkan respons paling tinggi dengan slope regresi $y = 24,436x + 4,3704$, menandakan sensitivitas paling kuat. Nilai R^2 sebesar 0,9933 juga menunjukkan hubungan linear yang sangat baik antara konsentrasi pestisida dengan keluaran sensor. Hal ini mengimplikasikan bahwa volatil dari pestisida C bereaksi lebih intens dengan bahan aktif sensor SnO_2 sehingga menghasilkan sinyal yang lebih tajam.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Chang (2022), yang menyebutkan bahwa pestisida dengan komposisi organofosfat teroksidasi cenderung memberikan reaktivitas tinggi terhadap sensor MOS. Kandungan gugus fosfat yang mudah terurai menjadi gas volatil mampu meningkatkan sensitivitas sensor secara signifikan [17].

Perbandingan hasil uji ketiga pestisida menunjukkan perbedaan karakteristik volatil dan tingkat interaksi kimia terhadap permukaan sensor pada Pestisida A memiliki sensitivitas rendah pada konsentrasi rendah serta memiliki linearitas baik pada rentang konsentrasi menengah–tinggi, Pestisida B memiliki linearitas terbaik di seluruh rentang konsentrasi (R^2 tertinggi), dan pada Pestisida C memiliki sensitivitas tertinggi (slope paling besar)

Perbedaan respons ini menandakan bahwa MQ-135 tidak merespons seluruh pestisida secara setara, melainkan tergantung pada struktur kimia, volatilitas, dan reaktivitas molekul masing-masing pestisida. Studi oleh Wawrzyniak (2023), mendukung temuan ini, bahwa sensor MOS memiliki pola sensitif yang unik terhadap setiap jenis senyawa organofosfat [18].

Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya memperkuat temuan sebelumnya tetapi juga memberikan kontribusi baru berupa perbandingan tiga jenis pestisida sekaligus dalam kondisi uji yang sama, sehingga memberikan gambaran komprehensif tentang karakter respons sensor terhadap variasi bahan aktif pestisida.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, secara keseluruhan, sensor MQ-135 menunjukkan kemampuan deteksi yang baik terhadap ketiga pestisida, dengan sensitivitas tertinggi pada pestisida A yaitu 25,645, dimana pestisida B memiliki nilai 21,836 dan pestisida C adalah 24,436. Untuk nilai linearitas terbaik didapatkan pada pestisida B yaitu 0,9969 dimana pestisida A dan C berturut turut yaitu 0,9443 dan 0,9933. Namun, pada konsentrasi rendah, sensor masih menunjukkan ketidakstabilan terutama pada pestisida A. Karakter ini menunjukkan bahwa MQ-135 cocok digunakan sebagai alat screening cepat (*rapid test*) untuk mendeteksi keberadaan residu pestisida organofosfat, namun memerlukan kalibrasi tambahan dan validasi lebih lanjut untuk pengukuran presisi kuantitatif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia melalui Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM) yang telah memberikan dukungan pendanaan melalui Program Hibah Penelitian Dosen Pemula Tahun 2025 dengan nomor surat pengumuman 128/C3/DT.05.00/PL/2025, nomor kontrak dengan LLDIKTI 072/LL7/DT.05.00/PL/2025, dan nomor kontrak turunan perguruan tinggi dan peneliti

006/III.3.AU/F/PDP/2025. Bantuan pendanaan ini telah memungkinkan penelitian berjudul “*Deteksi Residu Pestisida Organofosfat pada Buah dan Sayur Berbasis Artificial Intelligence dengan Sensor MQ-135 Sebagai Indikator Keamanan Pangan*” dapat terlaksana dengan baik.

Pustaka

- [1] EWG Science Team 2025 EWG’s 2025 Shopper’s Guide to Pesticides in Produce *Environmnet Working Group (EWG)*.
- [2] Zheng K, Shang X, Qin Z, Zhang Y, Shi J, Zou X and Zhang M 2025 Recent Advances in SERS-Based Detection of Organophosphorus Pesticides in Food: A Critical and Comprehensive Review *Foods* **14**.
- [3] Gai T, Nie J, Ding Z, Wu W and Liu X 2023 Progress of rapid detection of pesticides in fruits and vegetables *Frontiers in Food Science and Technology* **3**.
- [4] Kumaravel A, Aishwarya S and Sathyamoorthi S 2024 Emerging Technologies for Sensitive Detection of Organophosphate Pesticides: A Review *Curr Anal Chem* **20** 383–409.
- [5] Banerjee D, Adhikary S, Bhattacharya S, Chakraborty A, Dutta S, Chatterjee S, Ganguly A, Nanda S and Rajak P 2024 Breaking boundaries: Artificial intelligence for pesticide detection and eco-friendly degradation *Environ Res* **241** 117601.
- [6] K N, Shaik F N, Shaik J A, Anand P and Abhishek P 2024 Low Cost IoT and ML based Pesticide Level Detection in Fruits and Vegetables 2024 *International Conference on Electrical Electronics and Computing Technologies (ICEECT)* (IEEE) pp 1–5.
- [7] Ahmad M F, Ahmad F A, Alsayegh A A, Zeyaulah M, AlShahrani A M, Muzammil K, Saati A A, Wahab S, Elbendary E Y, Kambal N, Abdelrahman M H and Hussain S 2024 Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures *Heliyon* **10**.
- [8] Li B, Zhou Q, Peng S and Liao Y 2020 Recent Advances of SnO₂-Based Sensors for Detecting Volatile Organic Compounds *Front Chem* **8**.
- [9] Rosa A A, Simon B A and Lieanto K S 2020 Sistem Pendeteksi Pencemar Udara Portabel Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135 *ULTIMA Computing* **XII**.
- [10] Li W, Chen J, Linli F, Chen X, Huang Y and Yang X 2023 Organophosphorus pesticide contaminants in fruits and vegetables: A meta-analysis *Food Chem X* **20**.
- [11] Hartono B and Husna M 2022 Health Risk Assessment of Organophosphate Residues in Rice and Vegetables in Banggai, Central Sulawesi, Indonesia *Open Access Maced J Med Sci* **10** 151–4.
- [12] Huang X, Liu J, Pi Z and Yu Z 2003 Detecting Pesticide Residue by Using Modulating Temperature Over a Single SnO₂-Based Gas Sensor *Sensors* **3** 361–70.
- [13] Kanan S M, El-Kadri O M, Abu-Yousef I A and Kanan M C 2009 Semiconducting metal oxide based sensors for selective gas pollutant detection *Sensors* **9** 8158–96.
- [14] Uma S and Shobana M K 2023 Metal oxide semiconductor gas sensors in clinical diagnosis and environmental monitoring *Sens Actuators A Phys* **349** 114044.
- [15] Yılmaz A and Şimşek C 2025 GP-Optimized E-Nose: A Low-Cost Solution for Apple Pesticide Detection *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences* **11** 276–85.
- [16] Jayan H, Zhou R, Sun C, Wang C, Yin L, Zou X and Guo Z 2025 Intelligent Gas Sensors for Food Safety and Quality Monitoring: Advances, Applications, and Future Directions *Foods* **14**.
- [17] Chang H W, Chen C L, Chen Y H, Chang Y M, Liu F J and Tsai Y C 2022 Electrochemical Organophosphorus Pesticide Detection Using Nanostructured Gold-Modified Electrodes *Sensors* **22**.
- [18] Wawrzyniak J 2023 Advancements in Improving Selectivity of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors Opening New Perspectives for Their Application in Food Industry *Sensors* **23**.