

ANALISIS PENGELOMPOKAN PENJUALAN OBAT MENGGUNAKAN ALGORITMA K-MEANS UNTUK OPTIMALISASI STOK OBAT PADA APOTEK OLE

Meifriska Aisyah¹; Willy Prihartono²; Indra Wiguna Marthanu³; Kaslani⁴; Aris Pratama Putra⁵;

Program Studi Komputerisasi Akuntansi¹²
Program Studi Rekayasa Perangkat Lunak³⁴
Program Studi Sistem Informasi⁵

STMIK IKMI Cirebon
<https://ikmi.ac.id/page/18/?lang=de>
meifriskaaisyah044@gmail.com

(*) Corresponding Author : meifriskaaisyah044@gmail.com
Published : 31 Desember 2025

Abstract— Inventory management of medicines is a crucial aspect of pharmacy operations as it directly affects service availability and cost efficiency. Common problems faced by pharmacies include overstocking of low-demand medicines and stock shortages of high-demand medicines. This study aims to apply the K-Means Clustering algorithm to group medicine sales data at Apotek OLE in order to support the optimization of medicine inventory management. The research method employed is data mining using the Knowledge Discovery in Database (KDD) approach, which consists of data selection, preprocessing, data transformation, clustering using the K-Means algorithm, and evaluation of clustering results. The dataset used in this study comprises medicine sales data from Apotek OLE with variables including medicine stock, selling price, and quantity sold. The optimal number of clusters was determined using the Davies-Bouldin Index (DBI). The results show that the optimal number of clusters is two ($K = 2$), with a DBI value of 0.101. The first cluster represents medicines with a low sales level, while the second cluster represents medicines with a moderate sales level. This clustering provides clear insights into sales patterns and stock movement of medicines in the pharmacy. In conclusion, the K-Means Clustering algorithm can be effectively applied to group medicine sales data and support decision-making related to medicine procurement and inventory control. By utilizing the clustering results, the pharmacy can minimize the risk of overstocking and stock shortages, thereby achieving more efficient and optimal inventory management.

Keywords: data mining; K-Means clustering; medicine sales; inventory management; pharmacy

Abstrak- Pengelolaan persediaan obat merupakan salah satu aspek penting dalam operasional apotek karena berpengaruh langsung terhadap ketersediaan layanan dan efisiensi biaya. Permasalahan yang sering terjadi adalah penumpukan stok obat yang kurang laku serta kekosongan obat yang memiliki tingkat permintaan tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan algoritma K-Means Clustering dalam mengelompokkan data penjualan obat di Apotek OLE guna mendukung optimalisasi pengelolaan stok obat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah data mining dengan pendekatan Knowledge Discovery in Database (KDD) yang meliputi tahapan seleksi data, preprocessing, transformasi data, proses clustering menggunakan algoritma K-Means, serta evaluasi hasil clustering. Data yang digunakan merupakan data penjualan obat Apotek OLE dengan variabel stok obat, harga jual, dan jumlah obat terjual. Penentuan jumlah cluster optimal dilakukan menggunakan Davies-Bouldin Index (DBI). Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah cluster optimal adalah dua cluster ($K = 2$) dengan nilai DBI sebesar 0,101. Cluster pertama merepresentasikan kelompok obat dengan tingkat penjualan rendah, sedangkan cluster kedua merepresentasikan kelompok obat dengan tingkat penjualan sedang. Pengelompokan ini mampu memberikan gambaran yang jelas mengenai pola penjualan obat dan tingkat perputaran stok di apotek. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa algoritma K-Means Clustering dapat digunakan secara efektif untuk mengelompokkan penjualan obat dan membantu pihak apotek dalam pengambilan keputusan terkait pengadaan dan pengelolaan stok obat. Dengan memanfaatkan hasil clustering, apotek dapat

meminimalkan risiko penumpukan stok dan kekurangan obat, sehingga pengelolaan persediaan menjadi lebih optimal.

Kata Kunci : data mining; K-Means clustering; penjualan obat; manajemen persediaan; apotek

INTRODUCTION

Dalam era teknologi saat ini, mengelola data yang besar dan kompleks membantu bisnis menjadi lebih efisien dan bersaing. Data ini memiliki informasi penting yang dapat membantu dalam membuat keputusan tentang hal-hal seperti manajemen stok obat, penentuan pola penjualan, dan optimalisasi manajemen inventori. Apotek sebagai fasilitas pelayanan kefarmasian memiliki peran penting dalam menyediakan obat-obatan sesuai kebutuhan masyarakat. Namun, pada kenyataannya masih banyak apotek yang menggunakan pencatatan stok secara manual dengan menggunakan sistem yang belum terkomputerisasi, seperti yang pada Apotek OLE. Sistem ini sering menimbulkan masalah, seperti kesulitan untuk mengetahui ketersediaan obat, penumpukan stok di gudang karena penjualan yang tidak seimbang, dan risiko kekosongan obat. Kondisi ini menunjukkan betapa pentingnya menggunakan teknologi analisis data agar apotek dapat mengelola persediaan obat secara lebih efisien dan efektif.

Salah satu masalah pada Apotek OLE saat ini masih menggunakan pencatatan buku stok obat secara manual, Sehingga beberapa jenis obat mengalami penumpukan di gudang karena penjualannya kurang optimal. . Berdampak pada kerugian penjualan karena sisa stok obat yang belum terjual tidak diketahui. Hal ini mengakibatkan ketidakseimbangan antara ketersediaan beberapa jenis obat, dan data penjualan obat yang tersimpan selama ini belum dimanfaatkan secara optimal untuk mengelompokkan data stok obat yang belum terjual(Fitriyani et al., 2024). data mining pada pengolahan data bertujuan untuk menemukan tingkang penjualan yang tinggi, sedang, rendah, yang nanti nya dapat membantu pengambilan keputusan bisnis. Data mining dapat membantu apotek memahami penjualan obat, menemukan obat dengan penjualan tinggi dan rendah, dan membuat kebijakan stok yang lebih baik.(Ramadhanty et al., 2022) menyatakan bahwa menggunakan metode data mining yang tepat dapat menghasilkan banyak pengetahuan tentang bagaimana meningkatkan efisiensi operasional. Menurut penelitian sebelumnya Algoritma K-means adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengelompokkan (clustering) data dengan melihat kesamaan karakteristik antar data. Sebuah metode pengelompokan data tanpa label (unsupervised

learning) yang membagi data ke dalam kelompok berdasarkan kesamaan karakteristik Algoritma ini memiliki keunggulan dalam kesederhanaan, kecepatan komputasi, dan kemampuannya dalam menangani dataset berukuran sedang hingga besar. Dalam penelitian(Supriyanto et al., 2024), K-Means terbukti efektif dalam mengelompokkan data penjualan ritel untuk mengidentifikasi produk dengan tingkat penjualan serupa.

Data yang tersedia, ditemukan beberapa masalah terkait sulit untuk menentukan obat mana yang paling cepat terjual dan lambat terjual. Ada pula beberapa ketidakseimbangan jenis obat menyebabkan kelebihan stok atau bahkan kekurangan stok, yang dapat menghambat pelayanan kepada pelanggan. Serta menentukan jumlah stok obat yang di beli ulang tidak akurat. Untuk mendukung penelitian data tersebut, yaitu optimalisasi stok obat melalui analisis pengelompokan (Clustering) menggunakan Algoritma K-Means, data penjualan obat tersebut merupakan dasar penting untuk transformasi sistem pencatatan manual menjadi analisis berbasis data yang lebih efektif.

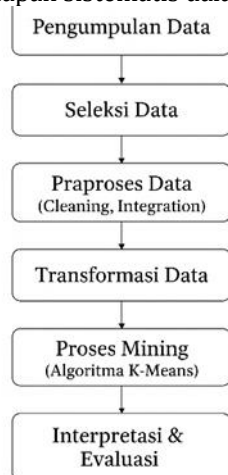
Tujuan penelitian ini untuk mengoptimalkan pengelolaan stok obat di Apotek OLE dengan menggunakan algoritma K-Means untuk menganalisis dan mengelompokkan data penjualan obat. Diharapkan dengan ini, jumlah persediaan obat dapat disesuaikan dengan kebutuhan aktual serta strategi penjualan yang digunakan oleh apotek, Metode ini juga bertujuan untuk mengurangi resiko kelebihan atau kekurangan stok obat, yang dapat mengganggu operasional pemasaran obat. Hasil penelitian ini diharapkan akan menghasilkan pengelompokan obat berdasarkan tingkat penjualan, sehingga manajemen apotek OLE dapat dengan mudah membedakan stok obat yang terjual, dengan tingkat penjualan tinggi, sedang, rendah. Dengan demikian, hasil pengelompokan ini diharapkan akan membantu manajemen apotek OLE membuat keputusan yang tentang pengelolaan persediaan, Sehingga dapat mengurangi kerugian finansial dan meningkatkan efektivitas operasional apotek.

Metode penerapan K-Means dapat membantu mengelompokkan obat berdasarkan pola penjualan sehingga apotek dapat menyesuaikan jumlah persediaan sesuai kebutuhan pasar. Penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma K-Means mampu membedakan obat dengan

frekuensi penjualan tinggi dan rendah, yang kemudian digunakan untuk menyusun strategi pemesanan ulang secara efisien. Sementara itu, (Sitorus et al., 2024). menegaskan bahwa integrasi metode clustering dalam sistem manajemen inventori dapat mengurangi risiko *overstock* dan *stockout*, serta meningkatkan keakuratan perencanaan stok.

MATERIAL DAN METODE

Tahapan perancangan pada penelitian ini mencakup proses mulai dari pengumpulan data hingga evaluasi hasil pengelompokan. Setiap tahap dirancang secara sistematis untuk memastikan bahwa data yang digunakan valid, diolah dengan baik, serta menghasilkan model analisis yang dapat diimplementasikan dalam pengambilan keputusan manajemen stok obat di apotek OLE. Proses Knowledge Discovery in Database (KDD) merupakan tahapan sistematis dalam



Gambar 1. Alur Penelitian

Menemukan pengetahuan baru dari kumpulan data yang besar. Pada penelitian ini, tahapan KDD digunakan untuk mengolah data penjualan obat hingga diperoleh pola pengelompokan yang dapat dimanfaatkan dalam pengambilan keputusan pengelolaan stok obat di Apotek OLE. Adapun tahapan proses KDD secara umum meliputi Selection, Preprocessing, Transformation, Data Mining, dan Evaluation/Interpretation.

Selection Tahap pertama adalah proses pemilihan data yang relevan dari sistem penjualan Apotek OLE. Data diperoleh dalam format Excel yang memuat informasi terkait nama obat, kategori, bentuk obat, jumlah stok, harga jual, dan jumlah penjualan. Atribut-atribut tersebut dipilih karena memiliki pengaruh langsung terhadap analisis penjualan dan pengelolaan stok obat. Data lain seperti identitas pelanggan atau nomor transaksi

dihilangkan agar fokus analisis tetap sesuai dengan tujuan penelitian.

Preprocessing Pada tahap ini, dilakukan pembersihan data untuk memastikan dataset yang digunakan bebas dari kesalahan. Proses praproses meliputi penghapusan data duplikat, pengisian nilai kosong dengan rata-rata, serta penyesuaian format angka dan satuan harga agar seragam. Selain itu, data yang bersifat anomali seperti jumlah penjualan ekstrem atau stok bernilai nol dihapus agar tidak memengaruhi hasil analisis. Hasil dari tahap ini adalah data yang sudah siap untuk diolah lebih lanjut.

Transformation Tahap transformasi bertujuan untuk menyiapkan data agar sesuai dengan kebutuhan algoritma *K-Means*. Atribut kategorikal seperti *Kategori_Obat* dan *Bentuk_Obat* diubah menjadi nilai numerik menggunakan operator Nominal to Numerical di RapidMiner. Selanjutnya dilakukan normalisasi menggunakan metode *Min-Max Scaling* agar seluruh atribut memiliki skala nilai yang sebanding, sehingga tidak ada variabel yang mendominasi hasil pengelompokan.

Data Mining Tahap ini merupakan inti dari proses KDD, yaitu penerapan algoritma *K-Means Clustering* di RapidMiner. Proses dimulai dengan menentukan jumlah kluster (*k*) untuk mengelompokkan data menjadi penjualan tinggi, sedang, dan rendah. RapidMiner kemudian menghitung jarak antar data menggunakan *Euclidean Distance*, mengelompokkan data ke kluster terdekat, dan memperbarui pusat kluster (*centroid*) secara iteratif hingga hasilnya stabil. Hasil proses ini berupa pola pengelompokan penjualan obat berdasarkan kemiripan karakteristiknya.

Evaluation Tahap evaluasi dilakukan untuk menilai kualitas hasil pengelompokan. Evaluasi di RapidMiner menggunakan metrik Davies-Bouldin Index (DBI) atau Silhouette Coefficient. Nilai DBI yang rendah atau Silhouette yang mendekati 1 menunjukkan hasil kluster yang baik. Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa setiap kluster yang terbentuk benar-benar memiliki perbedaan yang signifikan dan merepresentasikan kondisi penjualan yang sebenarnya di apotek.

RESULTS AND DISCUSSION

Berdasarkan hasil analisis pengelompokan data menggunakan Algoritma *k-means clustering*. Hasil mengenai nilai *Davies-Bouldin Index* (DBI) dan jarak rata-rata data ke pusat kluster (*centroid*) untuk masing-masing kluster. Dengan melakukan proses penentuan *cluster* optimal agar memunculkan hasil *k* yang paling optimal dan nilai DBI terendah

dibandingkan dengan percobaan yang lain nya. Hasil Penentuan cluster optimal. Tabel tersebut

Tabel 1 Penentuan K Optimal

Cluster (K)	Davies-Bouldin Index (DBI)
2	0.101
3	0.170
5	0.173

pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan nilai Davies-Bouldin Index (DBI) untuk beberapa variasi jumlah cluster. DBI digunakan sebagai parameter evaluasi karena mampu mengukur tingkat kedekatan data dalam satu cluster (intra-cluster) serta tingkat pemisahan antar cluster (inter-cluster). Semakin kecil nilai DBI, maka semakin baik kualitas hasil clustering yang dihasilkan.

Berdasarkan tabel hasil pengujian, nilai DBI untuk K = 2 adalah 0,101, untuk K = 3 adalah 0,170 dan untuk K = 5 adalah 0,173. Dari ketiga nilai tersebut, K= 2 menghasilkan nilai DBI paling kecil dibandingkan dengan jumlah cluster lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada K = 2, cluster yang terbentuk memiliki tingkat kekompakan yang lebih baik dan pemisahan antar cluster yang lebih jelas. dapat disimpulkan bahwa jumlah cluster optimal pada penelitian ini adalah 2 cluster, karena memberikan nilai Davies-Bouldin Index terendah. Oleh karena itu, nilai K = 2 dipilih dan digunakan pada tahap analisis clustering selanjutnya, karena dinilai paling representatif dalam menggambarkan pola pengelompokan data penjualan obat pada apotek. Dapat disimpulkan pengelompokan data yang dilakukan oleh algoritma k-means menunjukkan hasil yang akurat dan optimal. Berdasarkan hasil *clustering*, data terbagi menjadi dua *cluster* dengan total 310 item. Rincian distribusi masing-masing *cluster* seperti yang ditampilkan pada Tabel ... dan Tabel adalah sebagai berikut:

Cluster 0 berisi 279 item, Berikut produk produk klaster 0 dilihat pada Tabel 4.7 Cluster 0 sebagai berikut.

CONCLUSION

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diuarikan maka dapat disimpulkan sebagaimana tertuang pada urain dibawah ini untuk menjawab rumusan masalah adalah sebagai berikut :

Hasil evaluasi menggunakan Davies-Bouldin Index (DBI) menunjukkan bahwa jumlah cluster

terbaik adalah K = 2 dengan nilai DBI sebesar 0,101. Nilai ini menandakan bahwa hasil pengelompokan memiliki tingkat kekompakan intra-cluster yang baik serta pemisahan antar cluster yang jelas, sehingga hasil clustering dinilai optimal.

Algoritma K-Means Clustering diterapkan untuk menganalisis data penjualan obat di Apotek OLE. Proses data mining yang meliputi tahapan seleksi data, preprocessing, transformasi, clustering, dan evaluasi, sehingga dapat menghasilkan pengelomkan penjualan obat dan didapatkan 2 cluster sehingga dapat diinterpretasikan bahwa cluster 0 menggambarkan produk penjualan rendah dan cluster 1 menggambarkan produk penjualan sedang .

Bahwa obat cluster 0 terdapat pada obat Domperidone, Tolak Angin, Stimuno, kelompok obat terlaris dan cluster 1 terdapat obat, Sanmol Forte Kids, Fitkom Gumy, kelompok obat kurang laris 5 obat teratas ini menunjukkan bahwa dalam optimalsasi stok manajemen apotek ole agar mengacu pada uraian tersebut sehingga proses persediaan barang memiliki referensi berdasarkan hasil pengolaan data menggunakan k-means.

REFERENCE

- Abdullah, A. N., Kamarudin, K., Kamarudin, L. M., Adom, A. H., Mamduh, S. M., Juffry, Z. H. M., & Hernandez Bennetts, V. (2022). Correction model for metal oxide sensor drift caused by ambient temperature and humidity. *Sensors*, 22(9), 3301. <https://doi.org/10.3390/s22093301>
- Ali, S., Alam, F., Arif, K. M., & Potgieter, J. (2023). Low-cost CO sensor calibration using one-dimensional convolutional neural network. *Sensors*, 23(2), 854. <https://doi.org/10.3390/s23020854>
- Almalki, S. S. (2025). AI-Driven decision support systems in agile software project management: Enhancing risk mitigation and resource allocation. *Systems*, 13(3), 208. <https://doi.org/10.3390/systems13030208>
- Alotaibi, B. (2023). A survey on Industrial Internet of Things security: Requirements, attacks, AI-based solutions, and edge computing opportunities. *Sensors*, 23(17), 7470. <https://doi.org/10.3390/s23177470>
- Andrews, B., Chakrabarti, A., Dauphin, M., & Speck, A. (2023). Application of machine learning for calibrating gas sensors for methane emissions monitoring. *Sensors*, 23(24), 9898. <https://doi.org/10.3390/s23249898>

- Balogopal, G. (2025). Calibration of Low-Cost LoRaWAN-Based IoT Air Quality Monitors Using Machine Learning in a Smart City Context. *Sensors*, 25(5), 1614. <https://doi.org/10.3390/s25051614>
- Beck, K., Grenning, J., Martin, R. C., & Fowler, M. (2021). Agile manifesto and software engineering principles. *IEEE Software*, 38(4), 23–30. <https://doi.org/10.1109/MS.2021.3085897>
- Chan, R., Yan, W. K., Ma, J. M., Loh, K. M., Yu, T., Low, M. Y. H., Yar, K. P., Rehman, H., & Phua, T. C. (2023). IoT devices deployment challenges and studies in building management system. *Frontiers in Internet of Things*, 2, 1254160. <https://doi.org/10.3389/friot.2023.1254160>
- Chew, B.-K., Mahmud, A., & Singh, H. (2025). Autonomous Hazardous Gas Detection Systems: A Systematic Review. *Sensors*, 25(21), 6618. <https://doi.org/10.3390/s25216618>
- Chew, B. K., & al., et. (2025). Autonomous hazardous gas detection systems: A systematic review of sensor calibration, analytics and drift-compensation. *Sensors*, 25(21), 6618. <https://doi.org/10.3390/s25086618>
- Dauda, A., Flauzac, O., & Nolot, F. (2024). A Survey on IoT Application Architectures. *Sensors*, 24(16), 5320. <https://doi.org/10.3390/s24165320>
- de Rossi, A. M., & Li, L. (2023). A structured review of IoT-based embedded systems and machine learning for water quality monitoring. *Applied Sciences*, 15(21), 11719. <https://doi.org/10.3390/app152111719>
- Dorst, T., Schneider, T., Eichstädt, S., & Schütze, A. (2023). Influence of measurement uncertainty on machine learning results demonstrated for a smart gas sensor. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 12, 45–60. <https://doi.org/10.5194/jsss-12-45-2023>
- Dubey, R., Telles, A., Nikkel, J., Cao, C., Gewirtzman, J., Raymond, P. A., & Lee, X. (2024). Low-cost CO₂ NDIR sensors: Performance evaluation and calibration using machine learning techniques. *Sensors*, 24(17), 5675. <https://doi.org/10.3390/s24175675>
- El Barkani, M., Benamar, N., Talei, H., & Bagaa, M. (2024). Gas leakage detection using Tiny Machine Learning. *Electronics*, 13(23), 4768. <https://doi.org/10.3390/electronics13234768>
- Fu, L., You, S., Li, G., & Fan, Z. (2023). Application of Semiconductor Metal Oxide in Chemiresistive Methane Gas Sensor: Recent Developments and Future Perspectives. *Molecules*, 28(18), 6710. <https://doi.org/10.3390/molecules28186710>
- Furuta, D., Sayahi, T., Li, J., Wilson, B., Presto, A. A., & Li, J. (2022). Characterization of inexpensive metal oxide sensor performance for trace methane detection. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(17), 5117–5128. <https://doi.org/10.5194/amt-15-5117-2022>
- Ghamari, M., & al., et. (2022). Evaluation and calibration of low-cost off-the-shelf particulate matter sensors using machine learning techniques. *Wiley Wireless & Sensor Networks*, 12(3), 12043. <https://doi.org/10.1049/wss2.12043>
- Guerrero-Ulloa, G., Rodríguez-Domínguez, C., & Hornos, M. J. (2023). Agile methodologies applied to the development of Internet of Things (IoT)-based systems: A review. *Sensors*, 23(2), 790. <https://doi.org/10.3390/s23020790>
- Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>
- Imani, T., & Nakano, M. (2022). A study of IoT project management methodology with agile development. *Journal of Information & Management*, 38(3), 120–127. https://doi.org/10.20627/jsim.38.3_120
- Jena, B., Kumar Pradhan, S., Jha, R., Goel, S., & Sharma, R. (2023). LPG gas leakage detection system using IoT. *Materials Today: Proceedings*, 74, 795–800. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.172>
- Jiang, Z. (2025). Gas Leak Detection and Leakage Rate Identification in Underground Utility Tunnels via CRNN and IoT. *Applied Sciences*, 15(14), 8022. <https://doi.org/10.3390/app15148022>
- Koziel, S., Pietrenko-Dąbrowska, A., Wojcikowski, M., & Pankiewicz, B. (2024). Efficient Calibration of Cost-Efficient Particulate Matter Sensors Using Machine Learning and Time-Series Alignment. *Knowledge-Based Systems*, 295, 111879. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111879>
- Lalithadevi, B., & Krishnaveni, S. (2025). ExAIRFC-

- GSDC: An Advanced Machine-Learning-Based Interpretable Framework for Accurate Gas Leakage Detection and Classification. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 18, 16. <https://doi.org/10.1007/s44196-025-00742-6>
- Landi, E., Parri, L., Baldo, D., Parrino, S., Vatansever, T., Fort, A., Mugnaini, M., & Vignoli, V. (2025). Reliability and Performance Evaluation of IoT-Based Gas Leakage Detection Systems for Residential Environments. *Electronics*, 14(19), 3798. <https://doi.org/10.3390/electronics14193798>
- Lee, H., & Park, J. (2024). Enhancing IoT-based environmental monitoring and power forecasting: a comparative analysis of AI models for real-time applications. *Applied Sciences*, 14(24), 11970. <https://doi.org/10.3390/app142411970>
- Lee, J. H., Kim, Y., Kim, I., Hong, S. B., & Yun, H. S. (2024). Comparative analysis of ultrasonic and traditional gas-leak detection systems in the process industries: A Monte Carlo approach. *Processes*, 12(1), 67. <https://doi.org/10.3390/pr12010067>
- Lee, W.-T., & Chen, C.-H. (2023). Agile software development and reuse approach with Scrum and software product line engineering. *Electronics*, 12(15), 3291. <https://doi.org/10.3390/electronics12153291>
- Li, Z., Zeng, W., & Li, Q. (2022). SnO₂ as a Gas Sensor in Detection of Volatile Organic Compounds: A Review. *Sensors & Actuators A: Physical*, 349, 113845. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113845>
- Liang, H. (2021). Risk Assessment of Liquefied Petroleum Gas Explosion in a Closed Pipeline. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03430>
- Liang, L., & Daniels, J. (2022). What influences low-cost sensor data calibration? A systematic assessment of algorithms, duration, and predictor selection. *Aerosol and Air Quality Research*, 22, 220076. <https://doi.org/10.4209/aaqr.22-02-0a-0076>
- Liang, L., Gong, P., Cong, N., Li, Z., Zhao, Y., & Chen, Y. (2022). What influences low-cost sensor data calibration? A systematic assessment. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(4). <https://doi.org/10.4209/aaqr.220076>
- Manowska, A., Wycisk, A., Nowrot, A., & Pielot, J. (2023). The Use of the MQTT Protocol in Measurement, Monitoring and Control Systems as Part of the Implementation of Energy Management Systems. *Electronics*, 12(1), 17. <https://doi.org/10.3390/electronics1201017>
- Mitchell, H. L., Cox, S. J., & Lewis, H. G. (2024). Calibration of a low-cost methane sensor using machine learning. *Sensors*, 24(4), 1066. <https://doi.org/10.3390/s24041066>
- Mustafa, F. E., Ahmed, I., Basit, A., Alvi, U. E.-H., Malik, S. H., Mahmood, A., & Ali, P. R. (2023). A Review on Effective Alarm Management Systems for Industrial Process Control: Barriers and Opportunities. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 41, 100599. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2023.100599>
- Nguyen, T. T., Pham, H. D., & Kim, S. (2024). Edge Computing-Based Gas Detection System Using Low-Cost Sensors and IoT Integration. *IEEE Access*, 12, 7715–7730.
- Oh, K., Kang, H. M., Leem, D., Lee, H., Seo, K. Y., Yoon, S., & Kim, H. (2021). Early detection of diabetic retinopathy based on deep learning and ultra-wide-field fundus images. *Scientific Reports*, 11(1), 1897. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81539-3>
- Orfanos, V. A., Kaminaris, S. D., Papageorgas, P., Piromalis, D., & Kandris, D. (2023). A comprehensive review of IoT networking technologies for smart home automation applications. *Journal of Sensor & Actuator Networks*, 12(2), 30. <https://doi.org/10.3390/jsan12020030>
- Ouyang, R., Wang, J., Xu, H., Chen, S., Xiong, X., Tolba, A., & Zhang, X. (2023). A Microservice and Serverless Architecture for Secure IoT System. *Sensors*, 23(10), 4868. <https://doi.org/10.3390/s23104868>
- Papaconstantinou, R., Demosthenous, M., Bezantakos, S., Hadjigeorgiou, N., Costi, M., Stylianou, M., Symeou, E., Savvides, C., & Biskos, G. (2023). Field evaluation of low-cost electrochemical air quality gas sensors under extreme temperature and relative humidity conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(12), 3313–3329. <https://doi.org/10.5194/amt-16-3313-2023>
- Popescu, S. M., Mansoor, S., Wani, O. A., Kumar, S. S., Sharma, V., Sharma, A., Arya, V. M., Kirkham, M. B., Hou, D., Bolan, N., & Chung, Y. S. (2024). Artificial intelligence and IoT driven

- technologies for environmental pollution monitoring and management. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1336088. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1336088>
- Quintana, M. A., Palacio, R. R., Soto, G. B., & González-López, S. (2022). Agile development methodologies and natural language processing: A mapping review. *Computers*, 11(12), 179. <https://doi.org/10.3390/computers11120179>
- Santos, L., Costa, T., Caldeira, J. M. L. P., & Soares, V. N. G. J. (2022). Performance Assessment of ESP8266 Wireless Mesh Networks. *Information*, 13(5), 210. <https://doi.org/10.3390/info13050210>
- Schmitz, S., Towers, S., Villena, G., Caseiro, A., Wegener, R., Klemp, D., Langer, I., Meier, F., & von Schneidmesser, E. (2021). Unravelling a black box: an open-source methodology for the field calibration of small air quality sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(11), 7221–7240. <https://doi.org/10.5194/amt-14-7221-2021>
- Sharma, P., Kaur, H., & Singh, A. (2023). Smart Gas Monitoring Systems Using Machine Learning and IoT: Design and Performance Evaluation. *IEEE Sensors Journal*, 23(15), 16621–16630.
- Smith, A., & Jones, B. (2025). Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. *Artificial Intelligence Review*, 58, 275. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11277-9>
- Taştan, M. (2025). Machine learning-based calibration and performance evaluation of low-cost Internet of Things air quality sensors. *Sensors*, 25(10), 3183. <https://doi.org/10.3390/s25103183>
- Tsoukas, V., Gkogkidis, A., Boumpa, E., Papafotikas, S., & Kakarountas, A. (2023). A gas leakage detection device based on the technology of TinyML. *Technologies*, 11(2), 45. <https://doi.org/10.3390/technologies11020045>
- Vardakis, G., Hatzivasilis, G., Koutsaki, E., & Papadakis, N. (2024). Review of smart-home security using the Internet of Things. *Electronics*, 13(16), 3343. <https://doi.org/10.3390/electronics13163343>
- Yadav, R., Kumar, R., & Pandey, R. (2021). Design and Implementation of an IoT-Based Real-Time Gas Leakage Detection and Monitoring System. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(12), 9642–9652.
- Yasin, A., Delaney, J., Cheng, C.-T., & Pang, T. Y. (2022). The design and implementation of an IoT sensor-based indoor air quality monitoring system using off-the-shelf devices. *Applied Sciences*, 12(19), 9450. <https://doi.org/10.3390/app12199450>
- Yu, Y. (2025). A review of machine learning-assisted gas sensor calibration. *Biosensors*, 15(8), 548. <https://doi.org/10.3390/bios15080548>
- Zeng, F., Pang, C., & Tang, H. (2024). Sensors on Internet of Things Systems for the Sustainable Development of Smart Cities: A Systematic Literature Review. *Sensors*, 24(7), 2074. <https://doi.org/10.3390/s24072074>
- Zhou, Q., Liu, X., & Zhang, Y. (2022). A Review on Sensor Technologies for Gas Leakage Detection in Smart Environments. *Sensors and Actuators A: Physical*, 341, 113579.