



Deteksi Dini Kebocoran Refrigeran Menggunakan Sensor Murah dan Klasifikasi Machine Learning

Baso Alauddin^{1*}

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia
Jl. Baruga Raya Antang, Kota Makassar, 90234
Email: basoalauddin84@gmail.com

Abstract. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem deteksi dini kebocoran *refrigeran* berbasis sensor murah dan *algoritma machine learning* pada sistem pendingin skala kecil. Sistem menggunakan sensor *MQ-135* untuk mendeteksi gas *refrigeran*, *DS18B20* untuk suhu *evaporator* dan *kondensor*, *DHT22* untuk suhu serta kelembapan ruangan, *ACS712* untuk pengukuran arus kompresor. Seluruh sensor diintegrasikan menggunakan *Arduino Uno* dan *modul ESP8266* untuk pengiriman data secara *real-time*. Pengujian dilakukan pada unit pendingin 1 PK dengan *refrigeran R134a* melalui simulasi kebocoran bertahap sebesar 0,5–3 g/s pada kondisi normal, kebocoran ringan dan kebocoran berat. Data yang diperoleh diproses menggunakan *algoritma K-Nearest Neighbor (KNN)*, *Support Vector Machine (SVM)*, dan *Random Forest*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tingkat kebocoran menyebabkan penurunan tekanan *system*, peningkatan suhu *evaporator*, arus listrik, dan konsentrasi gas yang terdeteksi sensor *MQ-135*. *Algoritma Random Forest* memberikan performa terbaik dengan akurasi 96,7% dan *F1-score* 0,95. Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi sensor murah dan *machine learning* mampu menghasilkan sistem deteksi kebocoran *refrigeran* yang efektif, adaptif dan berbiaya rendah.

Kata Kunci: Deteksi dini, kebocoran *refrigerant*, *machine learning*, sensor murah.

1 Pendahuluan

Sistem pendingin atau *refrigerasi* merupakan salah satu teknologi yang sangat penting dalam kehidupan modern. Aplikasi sistem ini mencakup berbagai bidang mulai dari penyimpanan makanan, pengkondisian udara, hingga sistem industri seperti pendingin mesin dan fasilitas manufaktur [1]. Pada umumnya sistem pendingin bekerja dengan memanfaatkan sirkulasi *fluida*. *Refrigeran* berfungsi sebagai media perpindahan panas antara *evaporator*, kompresor, kondensor, dan katup ekspansi [2].

Salah satu permasalahan utama dalam sistem *refrigeran* adalah kebocoran *refrigeran*. Kebocoran ini dapat menyebabkan penurunan performa sistem, peningkatan konsumsi energi, kerusakan permanen pada komponen utama seperti *kompresor*. Selain itu kebocoran *refrigeran* berpotensi menimbulkan dampak

lingkungan yang signifikan terutama jika *refrigeran* yang digunakan termasuk dalam kategori gas rumah kaca (*greenhouse gases*) atau memiliki potensi perusakan ozon (*Ozone Depletion Potential, ODP*) [3].

Menurut laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, emisi *refrigeran* seperti *HFC (hydrofluorocarbon)* memiliki potensi pemanasan global (*GWP*) hingga 2000–4000 kali lebih tinggi dibandingkan dengan *CO₂* [4]. Deteksi dini kebocoran *refrigeran* menjadi salah satu langkah strategis dalam mendukung transisi energi bersih dan pengurangan emisi gas rumah kaca sesuai agenda *Sustainable Development Goals (SDG)* [5], [6].

Teknologi deteksi kebocoran yang tersedia di industri masih relatif mahal bergantung pada sensor presisi tinggi seperti *infrared leak detector* atau *mass spectrometer* yang tidak ekonomis untuk sistem skala kecil seperti AC rumah tangga atau sistem pendingin komersial kecil. Sensor murah berbasis *semiconductor gas sensor* (seperti seri *MQ*, *TGS*, *Figaro*) menawarkan alternatif menarik karena memiliki harga rendah, ukuran kecil, dan kemudahan integrasi dengan *mikrokontroler* [7].

Namun sensor murah memiliki keterbatasan seperti sensitivitas rendah *cross-sensitivity* terhadap gas lain serta *drift* jangka panjang yang dapat mempengaruhi akurasi deteksi [8], [9]. Untuk mengatasi hal ini teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) khususnya *machine learning (ML)* dapat diterapkan untuk meningkatkan kemampuan klasifikasi sinyal sensor [10], [11]. Pendekatan ini memungkinkan sistem mengenali pola perubahan sinyal yang mengindikasikan kebocoran *refrigeran* sekaligus meminimalkan kesalahan akibat variasi lingkungan seperti suhu dan kelembapan [12], [13].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa algoritma seperti *Support Vector Machine (SVM)*, *Nearest Neighbor, K (KNN)* dan *Random Forest* mampu memberikan akurasi tinggi dalam *klasifikasi* kondisi sistem pendingin berdasarkan parameter sensor [14]. Dengan kombinasi sensor murah dan *algoritma machine learning* menjadi solusi potensial untuk menciptakan sistem deteksi dini kebocoran *refrigeran* yang efisien, adaptif, dan berbiaya rendah. Penerapan sistem ini akan memberikan manfaat besar terutama bagi sektor industri kecil dan menengah (IKM) pengguna AC rumah tangga serta bidang pendidikan teknik mesin dan teknik elektro. Di samping itu solusi ini sejalan dengan upaya nasional menuju konservasi energi dan teknologi hijau sebagaimana tertuang dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) Indonesia [15], [16].

1.2 Permasalahan dalam Sistem Refrigerasi

Sistem pendingin umumnya bekerja dalam siklus kompresi uap (*vapor compression cycle*) yang terdiri atas empat proses utama: kompresi, *kondensasi*, *ekspansi* dan *evaporasi*. Ketika kebocoran terjadi jumlah refrigeran dalam sirkuit menurun, menyebabkan tidak seimbangan *termodinamika* dan penurunan efisiensi sistem.

Beberapa efek umum kebocoran refrigeran antara lain:

1. Penurunan tekanan di sisi rendah (*evaporator*)
2. Peningkatan suhu keluaran *evaporator*
3. Kinerja *kompresor* yang tidak stabil
4. Penurunan kapasitas pendinginan
5. Peningkatan konsumsi daya listrik

Deteksi dini terhadap kebocoran sangat penting untuk mencegah kerusakan lanjut karena jika sistem dibiarkan pelumasan kompresor akan berkurang mengakibatkan *overheating* dan kerusakan mekanis oleh karena itu sistem *monitoring* berbasis sensor menjadi kebutuhan mutlak.

1.3 Signifikansi Deteksi Dini dan Sensor Murah

Metode konvensional deteksi kebocoran seperti penggunaan *soap test*, *UV dye*, *electronic leak detector* seringkali memerlukan intervensi manusia dan tidak efisien untuk pemantauan berkelanjutan. Penggunaan sensor gas murah berbasis *metal oxide semiconductor (MOS)* seperti *MQ-2*, *MQ-4*, atau *MQ-135* dapat memberikan solusi *real-time monitoring* dengan biaya yang jauh lebih rendah.

Sensor ini bekerja dengan mendeteksi perubahan *resistansi material* sensitif ketika bereaksi terhadap gas target seperti *HFC-134a* atau *R-410a*. Walaupun demikian karakteristik sinyalnya sering terpengaruh oleh kelembapan suhu dan gas pengganggu lainnya oleh sebab itu penerapan *algoritma klasifikasi machine learning* menjadi kunci untuk menafsirkan data secara cerdas dan akurat.

2. Metodologi

Metode eksperimen merupakan metode yang digunakan untuk memperoleh data dalam penelitian ini yang bertujuan sebagai mengembangkan sistem deteksi dini kebocoran refrigeran berbasis sensor murah (*low-cost sensor*) dan algoritma klasifikasi *machine learning* untuk meningkatkan akurasi diagnosis pada sistem pendingin skala kecil.

2.1 Rancangan Sistem

Sistem terdiri dari empat sensor utama:

1. *MQ-135*: Mendeteksi konsentrasi gas refrigeran di udara
2. *DS18B20*: Mengukur suhu evaporator dan kondensor
3. *DHT22*: Mengukur suhu dan kelembapan ruangan
4. *ACS712*: Mengukur arus kompresor.

Semua sensor dihubungkan dengan *Arduino Uno* yang mengirimkan data ke *server* melalui *Wi-Fi (ESP8266)* untuk analisis.

2.2 Tahapan Prosedur Eksperimen

Prosedur eksperimen dilakukan secara bertahap untuk memperoleh data yang representatif pada berbagai kondisi operasi sistem pendingin. Pengujian diawali dengan penyiapan unit pendingin dan penentuan kondisi operasi kemudian dilanjutkan dengan simulasi kebocoran refrigerant proses pengambilan data serta tahap pengolahan data sebelum digunakan dalam pelatihan model *machine learning* (ML). Adapun tahapan prosedur eksperimen yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Sistem diuji pada unit pendingin 1 PK menggunakan refrigeran *R134a*.
2. Kebocoran buatan dibuat secara bertahap pada pipa tekan dengan debit kebocoran sebesar 0,5–3 g/s.
3. Data direkam selama 10 menit untuk setiap kondisi pengujian, yaitu kondisi normal, kebocoran ringan, dan kebocoran berat.
4. Data hasil pengukuran kemudian dibersihkan (*data cleaning*) dan dinormalisasi sebelum digunakan pada proses pelatihan model *ML*.

2.3 Model Machine Learning

Dataset dibagi menjadi 80% pelatihan dan 20% pengujian. Tiga *algoritma* diuji:

1. *KNN* ($k=5$)
2. *SVM* (*kernel RBF*)
3. *Random Forest* (*100 trees*)

Evaluasi dilakukan berdasarkan akurasi, *presisi*, *recall*, dan *F1 score*

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Data Sensor

Analisis data sensor dilakukan untuk mengetahui perubahan parameter operasi sistem pendingin pada setiap kondisi pengujian. Parameter yang diamati meliputi tekanan, suhu *evaporator*, arus listrik, konsentrasi gas yang terdeteksi oleh sensor

MQ-135. Hasil pengukuran rata-rata untuk kondisi normal, kebocoran ringan, dan kebocoran berat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rata-rata perubahan parameter operasi sistem.

Kondisi	Tekanan (bar)	Suhu <i>Evaporator</i> (°C)	Arus <i>MQ-135</i> (A)	(ppm)
Normal	6,2	8,5	2,1	5
Kebocoran ringan	5,1	11,2	2,3	30
Kebocoran berat	4,0	14,8	2,6	85

Berdasarkan **Tabel 1**, terjadi penurunan tekanan sistem dan peningkatan suhu *evaporator* serta arus listrik seiring bertambahnya tingkat kebocoran refrigeran. Selain itu, nilai keluaran *sensor MQ-135* mengalami peningkatan yang signifikan dari 5 ppm pada kondisi normal menjadi 85 ppm pada kondisi kebocoran berat. Hasil ini menunjukkan bahwa *sensor MQ-135* memiliki potensi yang baik sebagai indikator utama dalam mendeteksi kebocoran refrigeran pada sistem pendingin.

3.2 Kinerja Model ML

Kinerja model pembelajaran mesin dievaluasi menggunakan metrik akurasi dan F1-score sebagaimana disajikan pada **Tabel 2**.

komputasi 0,8 s untuk inferensi. Kelebihan *RF* adalah kemampuannya menangani *non-linearitas* dan interaksi antar variabel.

Tabel 2 Hasil pengujian algoritma.

Algoritma	Akurasi (%)	F1-score
<i>KNN</i>	91,2	0,89
<i>SVM</i>	93,5	0,92
Random Forest	96,7	0,95

Berdasarkan **Tabel 2**, algoritma *KNN* memperoleh akurasi sebesar 91,2% dengan F1-score 0,89, menunjukkan performa yang cukup baik namun masih terbatas dalam menangani kompleksitas data. Algoritma *SVM* menunjukkan peningkatan kinerja dengan akurasi 93,5% dan F1-score 0,92, yang mengindikasikan kemampuan generalisasi yang lebih baik dibandingkan *KNN*. Hasil terbaik diperoleh oleh algoritma Random Forest dengan akurasi tertinggi sebesar 96,7% dan F1-score 0,95 peningkatan performa ini menunjukkan bahwa Random Forest lebih efektif dalam memodelkan hubungan non-linear serta interaksi antar variabel pada data yang digunakan. Selain itu, model Random Forest memiliki waktu komputasi inferensi sebesar 0,8 s, yang masih tergolong efisien untuk aplikasi praktis. Dengan kombinasi akurasi tinggi, keseimbangan

presisi–recall yang baik, serta waktu inferensi yang relatif singkat, Random Forest dipilih sebagai model terbaik dalam penelitian ini.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem deteksi dini kebocoran *refrigeran* berbasis sensor murah dan *algoritma machine learning* pada sistem pendingin skala kecil. Sistem yang dirancang menggunakan kombinasi *sensor MQ-135, DS18B20, DHT22, dan ACS712* yang terintegrasi dengan *Arduino Uno dan ESP8266* untuk pemantauan secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan tingkat kebocoran *refrigeran* menyebabkan penurunan tekanan sistem serta peningkatan suhu *evaporator*, arus listrik, dan konsentrasi gas yang terdeteksi oleh *sensor MQ-135*. Berdasarkan hasil *klasifikasi machine learning*, *algoritma Random Forest* memberikan *performa* terbaik dibandingkan *KNN dan SVM* dengan tingkat akurasi sebesar 96,7% dan *F1-score* 0,95. Hal ini menunjukkan bahwa *metode machine learning* mampu meningkatkan kemampuan sensor murah dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan kondisi kebocoran *refrigeran* secara lebih akurat dan adaptif terhadap perubahan lingkungan. Dengan demikian kombinasi sensor murah dan *machine learning* berpotensi menjadi solusi deteksi kebocoran *refrigeran* yang efektif, ekonomis, dan mudah diterapkan pada sistem pendingin rumah tangga maupun industri kecil. Penelitian ini juga mendukung upaya efisiensi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca melalui deteksi kebocoran secara dini.

Daftar Pustaka

- [1] Sanchuli, N., Dan, S. & Bagheri, H., *Ammonia Application in Cooling Systems*, *Progresses in Ammonia: Science, Technology and Membranes*, pp. 113–132, 2024.
- [2] Wabang, J.A., Hattu, E.P.D., & Abanat, J.D.J., *Performance Test Study of Car Cooling System (Air Conditioning/AC) Using Block and Elder Type Expansion Valve*, in *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science*, Editor: M. Udin Harun Al Rasyid, pp. 1052–1055, 2022.
- [3] Erić, S., Rajić, A., & Palinkaš, I., *Application of Refrigerant Gases and Their Impact on Climate Change*, in *Entrepreneurship, Engineering and Management: Climate Change as an Engineering*

- Challenge - zbornik radova*, Technical College of Applied Sciences in Zrenjanin, pp. 147–154, 2025.
- [4] Sharma, V., Fricke, B., Cheekatamarla, P., Abdelaziz, O. & Baxter, V., *Refrigerants for a Sustainable Future*, Encyclopedia, **5**(1), pp. 5, 2025.
 - [5] Saengsikhiao, P., Taweekun, J. & Prapaipornlert, C., *The Improvement of Energy Efficiency in Refrigeration Systems using Ultrasonic Sensors*, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, **119**(1), pp. 189–195, 2024.
 - [6] Bhattacharjee, D., Ghosh, S., Mukherjee, A., & Choudhury, N., *Pre-heating Characterization of Semiconductor Gas Sensors for Pollution Monitoring*, in International Conference on Data Science and Communication, pp. 401–413, 2024.
 - [7] Shah, A., Laurent, O., Broquet, G., Romand, C., & Ciais, P., *Characterising Changes in the Methane Response of a Semiconductor-Based Metal Oxide Sensor Over Time*, Environmental Science: Atmospheres, **5**(10), pp. 1119–1143, 2025.
 - [8] Reimringer, W., & Bur, C., *Promoting quality in low-cost gas sensor devices for real-world applications*, Frontiers in Sensors, **4**, 2023.
 - [9] Shobana, M., Kokulavani, K., & Gowri, V., *Semiconductor-Based Chemical Detection Devices: Advantages, Limitations, And Applications*, International Journal of Food and Nutritional Sciences, **11**(9), 2023.
 - [10] Roy, P., Ghosh, S., Dubey, S., & Fernandes, J., *Artificial intelligence for sensor data analysis*, Adaptive AI in Sensor Informatics, pp. 25–49, 2026.
 - [11] Feng, Q. & Long, Z., *Comparative Analysis of Traditional Sensors and Machine Learning-Enhanced Sensors: Innovations and Implications*, Highlights in Science, Engineering and Technology, **102**, pp. 346–350, 2024.
 - [12] Mtibaa, A., Sessa, V., & Guerassimoff, G., *Evaluating Fault Detection Techniques for Refrigerant Leak Detection in Industrial Vapor Compression Refrigeration Systems*, in 2025 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), IEEE , pp. 1–6, 2025.
 - [13] Zhao , Y., et al., *Research on the Dynamic Characterization and Detection of Refrigerant Leakage in Multi-Connected Air-Conditioning System*, Energy Build, **309**, 2024.

- [14] Tran, D.A.T., Ho, T.K.P. & N,V.T., *Fault Diagnosis in Vehicle Air Conditioning Systems via Comparison of k -Nearest Neighbors and Random Forest Classification Models*, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, **14**(5), pp. 534–541, 2025.
- [15] Panjaitan, T.W.S., Pandyaswargo, A.H., Atmaja, T.D., Firman, F.A. & Irsyad, M.I.A., *Drawing Insights from Japan's Energy Efficiency Policies for Indonesia's Progress*, Indonesian Journal of Energy, **7**(2), 2024.
- [16] Murdiyansyah, N., Yandri, E., Lodewijk, D.P.Y. & Ariati, R., *Leading Light: The Impact of Advanced Lighting Technologies on Indonesia's Office Industry*, Leuser Journal of Environmental Studies, **2**(1), pp. 1–11, 2024.