

ENHANCING THE EFFECTIVENESS OF TOXIC GAS IDENTIFICATION USING A MOS MULTI-SENSOR AND MACHINE LEARNING MODELS

Nguyen Ngoc Viet*, Ninh Thi Nhu Hoa, Phan Hong Phuoc, Nguyen Van Hieu

Phenikaa University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	15/01/2024	An electronic nose is defined as a smart device for the detection and analysis of gases. It typically consists of two main components: an array of sensors (olfactory system) and an intelligent processing unit (brain). This study presents the design of a gas-sensing device utilizing a multi-sensor chip based on metal oxide semiconductors (MOS). Surveys measuring the response to various concentrations of harmful gases, such as NH ₃ , CO, and NO ₂ , were conducted. The measurement data indicate that the employed multi-sensor chip with three MOS sensors exhibits excellent selectivity for each gas. This outcome also demonstrates that using a sensor array allows for easier identification of gases compared to using a single sensor. Additionally, several typical machine learning models in artificial intelligence (AI), including PCA, LDA, SVM, DT, and RF, were employed to analyze gas response data. The performance of these models was evaluated based on the accuracy rate of gas sample identification. The results reveal that the utilization of machine learning models has enhanced the efficiency of gas classification, particularly with models such as DT and RF. This research may provide valuable contributions to the design of electronic noses for the analysis of multiple gases in various environmental settings.
Revised:	23/02/2024	
Published:	23/02/2024	
KEYWORDS		
Selectivity		
Machine learning		
Multi-sensor		
Electronic nose		
Toxic gas detection		

TĂNG CƯỜNG HIỆU QUẢ NHẬN DIỆN KHÍ ĐỘC SỬ DỤNG MỘT ĐA CẢM BIẾN MOS VÀ CÁC MÔ HÌNH HỌC MÁY

Nguyễn Ngọc Việt*, Ninh Thị Như Hoa, Phan Hồng Phước, Nguyễn Văn Hiếu

Trường Đại học Phenikaa

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 15/01/2024	Mũi điện tử được định nghĩa như một thiết bị thông minh trong nhận diện và phân tích khí. Mũi điện tử thường gồm hai phần chính là dãy đa cảm biến (khứu giác) và phần mềm xử lý thông minh (não bộ). Nghiên cứu này trình bày một thiết kế thiết bị đo khí sử dụng chip đa cảm biến trên cơ sở vật liệu bán dẫn oxit kim loại (MOS). Các khảo sát đối với các khí độc hại NH ₃ , CO, và NO ₂ tại một số nồng độ khác nhau đã được tiến hành. Dữ liệu đo đáp ứng khí cho thấy đa cảm biến sử dụng có ba vi cảm biến MOS có độ chọn lọc tốt với lần lượt từng khí đo. Kết quả này cũng chứng minh việc sử dụng một đa cảm biến sẽ cho phép nhận diện dễ dàng hơn các khí so với việc chỉ dùng một cảm biến riêng lẻ. Bên cạnh đó, một số mô hình học máy tiêu biểu của trí tuệ nhân tạo (AI) cũng đã được sử dụng để phân tích dữ liệu đáp ứng khí, gồm PCA, LDA, SVM, DT, và RF. Hiệu suất của các mô hình được đánh giá thông qua tỉ lệ nhận diện chính xác các mẫu khí. Kết quả chỉ ra rằng việc sử dụng các mô hình học máy đã tăng cường hiệu quả phân loại khí, đặc biệt là các mô hình DT và RF. Nghiên cứu có thể cung cấp các đóng góp giá trị cho việc thiết kế các mũi điện tử nhằm ứng dụng phân tích đa khí trong nhiều môi trường khác nhau.
Ngày hoàn thiện: 23/02/2024	
Ngày đăng: 23/02/2024	
TỪ KHÓA	
Đa cảm biến	
Độ chọn lọc	
Học máy	
Mũi điện tử	
Phát hiện khí độc	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9592>

* Corresponding author. Email: viet.nguyennhoc@phenikaa-uni.edu.vn

1. Giới thiệu

Ngày nay, cảm biến khí được sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau [1], bao gồm giám sát không khí trong nhà và ngoài trời, quan trắc môi trường, kiểm tra chất lượng thực phẩm và đồ uống, chẩn đoán y sinh... Phương pháp nghiên cứu phát triển các cảm biến khí thường là nâng cao các thông số độ nhạy, độ đáp ứng, độ ổn định, độ lặp lại, thời gian sống, và độ chọn lọc. Bên cạnh việc ứng dụng các loại vật liệu nhạy khí, việc xây dựng các đa cảm biến hay áp dụng các thuật toán trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence/AI) để xử lý dữ liệu và nhận diện khí là một cách tiếp cận tiềm năng gần đây, xu hướng phát triển thành các mũi điện tử [2], [3].

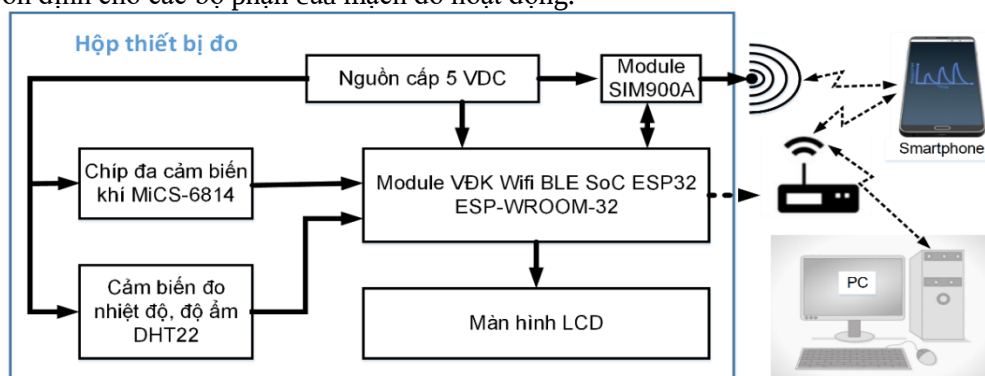
Nghiên cứu này nhằm hướng tới thiết kế, chế tạo một thiết bị đo hiệu quả các khí độc hại NH_3 , CO , và NO_2 , sử dụng đa cảm biến MiCS-6814. Chip cảm biến bao gồm các vi cảm biến khí dựa trên vật liệu oxit kim loại bán dẫn (Metal Oxide Semiconductor –MOS), được thiết kế hoạt động ở các công suất gia nhiệt khác nhau. Ưu điểm chung của các cảm biến khí MOS là độ đáp ứng, độ nhạy, độ bền, và độ ổn định cao [4]–[6]. Việc sử dụng chip đa cảm biến mang lại nhiều lợi ích như giảm thiểu kích thước thiết bị và mức tiêu thụ điện năng. Phần lớn các cảm biến khí thông dụng khác trên thị trường có công suất tiêu thụ lên tới hàng trăm hoặc hàng nghìn mW, trong khi chip MiCS-6814 có công suất tiêu thụ tối đa là 81 mW. Mặt khác, các thuật toán học máy (machine learning) tiêu biểu trong AI có thể được áp dụng vào xử lý dữ liệu đáp ứng khí, giúp nâng cao độ chính xác phát hiện khí, cũng như tăng cường độ chọn lọc của hệ cảm biến. Ngoài ra, các ứng dụng kết nối thiết bị đo với Internet, sóng Wifi hay sóng điện thoại cũng sẽ được chú ý vận dụng, giúp người dùng có thể giám sát các thông số đo từ xa, hay nhận được các cảnh báo kịp thời.

Các phần tiếp theo của báo cáo mô tả kỹ hơn về thiết kế của thiết bị đo khí, khảo sát mạch đo thông qua hệ phân phối khí chuẩn. Độ đáp ứng khí của chip đa cảm biến đối với các khí độc hại NH_3 , CO , và NO_2 được thu thập và trình bày. Dữ liệu đo sau đó được xử lý và phân tích bởi các mô hình học máy thông dụng. Những kết quả có được góp phần đưa ra các đề xuất tin cậy để cải tiến thiết bị đo khí, tăng cường sự phát hiện chọn lọc các khí độc hại trong môi trường thực tế.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Thiết kế mạch đo khí

Hình 1 mô tả sơ đồ khối các thành phần thiết kế chính của thiết bị đo khí, gồm có chip đa cảm biến khí MiCS-6814 với khả năng phát hiện nhiều loại khí khác nhau, như NH_3 , CO , NO_2 , H_2 , và nhiều loại hơi hữu cơ (VOCs); cảm biến DHT22 dùng để đo nhiệt độ, độ ẩm môi trường khí đo; module vi điều khiển ESP-WROOM-32 cho phép kết nối Wifi và xử lý dữ liệu từ các cảm biến đến bộ truyền phát dữ liệu; module SIM900A cho phép truyền phát dữ liệu đo về máy tính hay điện thoại thông qua sóng GSM/GPRS và giao thức MQTT; màn hình LCD kết nối với vi điều khiển để hiển thị các thông tin chính tại hộp đo; và nguồn điện một chiều 5 V cung cấp năng lượng ổn định cho các bộ phận của mạch đo hoạt động.

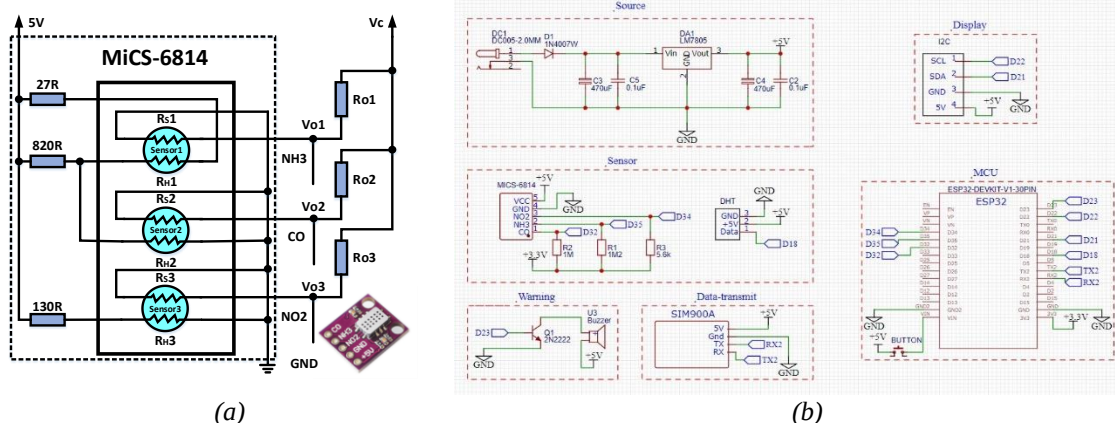


Hình 1. Sơ đồ khối thiết kế thiết bị đo khí sử dụng dây cảm biến

Chip đa cảm biến MiCS-6814 gồm 3 vi cảm biến loại vật liệu bán dẫn oxit kim loại (MOS). Hình 2(a) mô tả mạch nguyên lý hoạt động của chip cảm biến MiCS-6814. Mỗi cảm biến MOS có một điện trở gia nhiệt riêng (R_H). Công suất gia nhiệt có thể được điều chỉnh bằng cách mắc nối tiếp điện trở gia nhiệt với một điện trở ngoài và một nguồn điện một chiều. Phân điện trở nhạy khí (R_s) thay đổi khi môi trường khí đo thay đổi, và có thể được xác định thông qua nguyên lý chia áp. Giả sử, một nguồn V_c được cung cấp cho đầu mạch mắc nối tiếp R_o và R_s , điện áp nút nối hai điện trở đọc về là V_o (tương tự như thiết kế trong hình 2(a)), thì R_s được xác định bởi:

$$R_s = R_o / [(V_c/V_o) - 1] \quad (1)$$

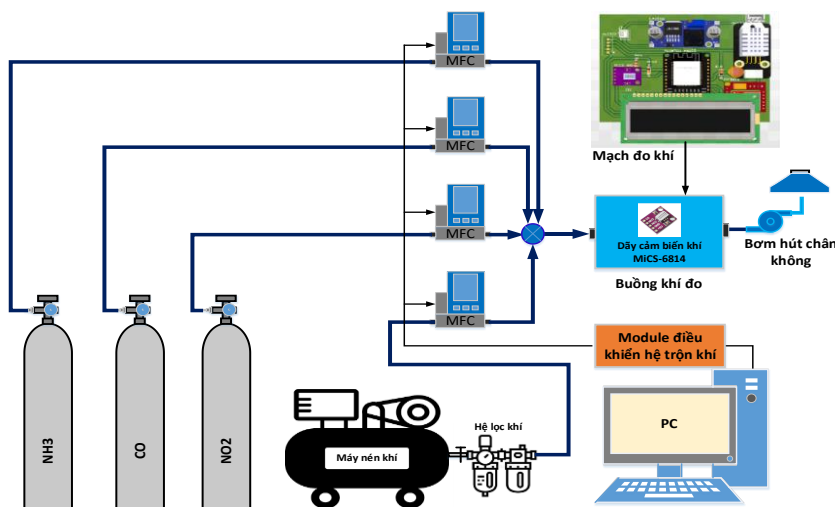
Với thiết kế mạch công suất cho phân gia nhiệt của chip MiCS-6814 như hiện tại, các cảm biến MOS trên chip lần lượt có độ đáp ứng và độ chọn lọc cao với các khí NH_3 , CO , và NO_2 . Cảm biến DHT22 là cảm biến tích hợp thông dụng, đo được cả nhiệt độ và độ ẩm trong môi trường, với dải đo rộng và độ chính xác khá cao. Mô-đun ESP-WROOM-32 là một chip vi điều khiển đa dụng, được sử dụng nhiều trong các thiết kế mạch Wifi/Bluetooth. Module GSM/GPRS SIM900A được thiết kế bởi hãng SIMCOM, là một mô-đun truyền dữ liệu không dây nhỏ gọn và tin cậy, hoạt động tự động trên các tần số 900/1800 MHz, hoặc dải tần số được thiết lập qua tập lệnh AT (Attention command, tập lệnh chuẩn được hỗ trợ bởi hầu hết các thiết bị di động như điện thoại di động). Giao thức MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) được sử dụng để truyền dữ liệu, tin nhắn về điện thoại, hoặc máy tính. Một mạch ổn áp nguồn một chiều đầu ra 5 V cũng đã được thiết kế. Sơ đồ mạch nguyên lý kết nối các thành phần của thiết bị đo được thể hiện trong hình 2(b).



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý mạch đọc chip đa cảm biến khí và mạch điều khiển thiết bị đo

2.2. Cài đặt hệ thống đo khí chuẩn

Hình 3 thể hiện sơ đồ khối hệ thống phân phối và đo khí chuẩn lắp đặt tại phòng thí nghiệm Nanosensors, Trường Đại học Phenikaa. Hệ thống cho phép thử nghiệm các nồng độ khí đo khác nhau với độ chính xác cao. Các thành phần chính của hệ thống gồm có buồng khí đo (bên trong đặt chip đa cảm biến khí), các chai khí đo có nồng độ xác định, máy nén khí và bộ lọc tạo khí nền, các ống dẫn truyền khí, và bộ điều khiển trộn khí. Khí đo được trộn với khí nền sau bộ lọc máy nén khí theo tỉ lệ thể tích nhất định để tạo ra nồng độ khí đo mong muốn đi qua buồng đo. Bộ điều khiển hệ trộn khí vừa có chế độ điều khiển thủ công, vừa có chế độ điều khiển tự động thông qua các thông số cài đặt trên một phần mềm máy tính, sử dụng lập trình giao diện LabVIEW. Trong quá trình đo khí, tín hiệu từ các cảm biến được truyền về vi điều khiển. Sau đó, dữ liệu đo được tính toán và hiển thị trên màn hình LCD, cũng như được truyền về máy tính để xử lý và lưu trữ.

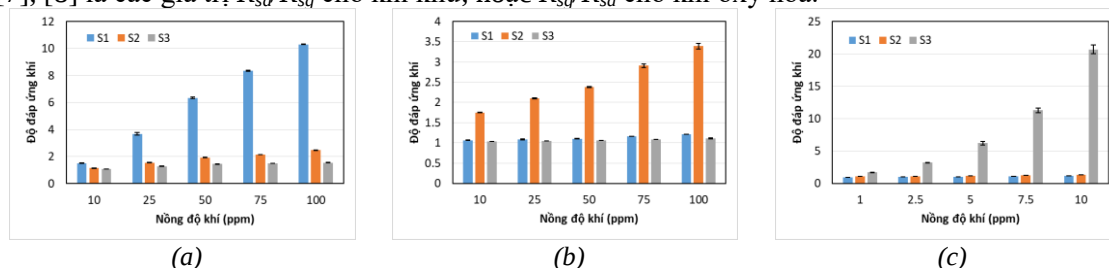


Hình 3. Sơ đồ hệ thống đo và kiểm tra khí chuẩn

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Dữ liệu đáp ứng khí

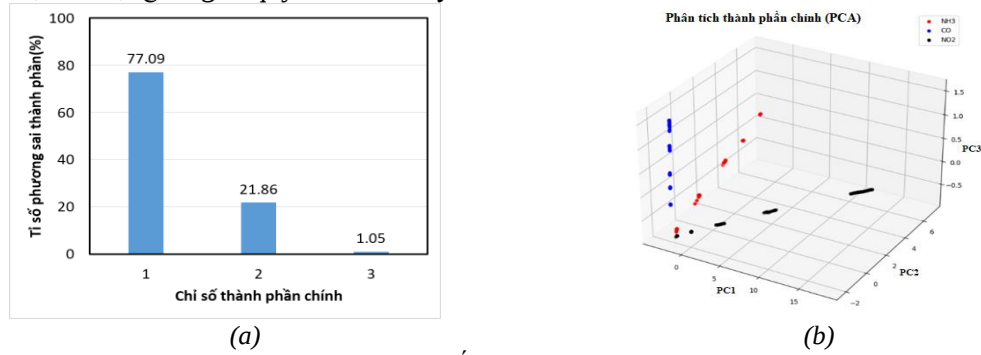
Trong khảo sát thử nghiệm với các khí chuẩn tại phòng thí nghiệm, dữ liệu điện trở nhạy khí (R_s) của các vi cảm biến MOS đã được thu thập và xử lý trên máy tính. Ban đầu, khí nền (khí sạch chưa có khí đo) được đưa vào buồng khí và đo để xác định giá trị điện trở nền (R_{sa}). Sau đó, lần lượt các khí đo NH_3 , CO , và NO_2 đã được khảo sát và xác định các giá trị điện trở đo khí (R_{sg}) tại một số nồng độ khác nhau. Trong đó, NH_3 , CO là các khí khử ($R_{sg} < R_{sa}$) được đo tại các nồng độ 10; 25; 50; 75; và 100 ppm. Trong khi NO_2 là khí oxy hóa ($R_{sg} > R_{sa}$) được đo tại các nồng độ 1; 2,5; 5,0; 7,5; và 10 ppm. Các nồng độ mỗi khí được khảo sát đều nằm trong khả năng phát hiện bởi các cảm biến MOS của chip MiCS-6814 (NH_3 : 1-500 ppm; CO : 1-1000 ppm; NO_2 : 0,05-10 ppm). Dữ liệu đáp ứng khí của các cảm biến MOS đối với từng khí tại mỗi nồng độ theo thông lệ [7], [8] là các giá trị R_{sa}/R_{sg} cho khí khử, hoặc R_{sg}/R_{sa} cho khí oxy hóa.

Hình 4. Dữ liệu đo đáp ứng khí của đa cảm biến đối với một số khí độc: (a) NH_3 ; (b) CO ; (c) NO_2

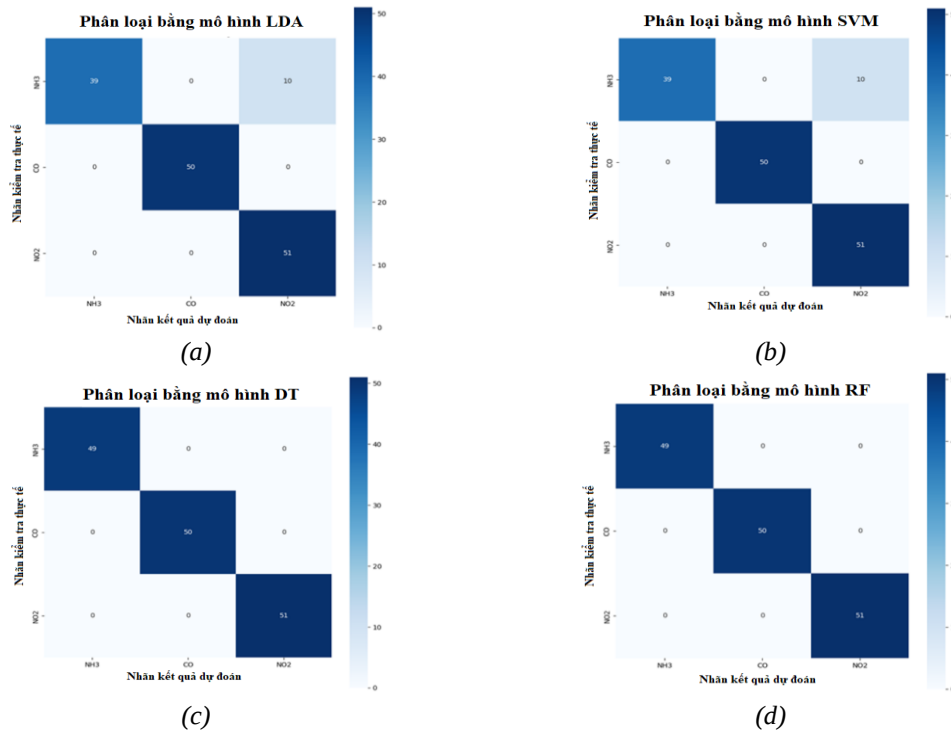
Hình 4 (a;b;c) lần lượt biểu diễn dữ liệu đáp ứng khí trong thử nghiệm của ba cảm biến MOS S1, S2, S3 trên chip MiCS-6814 đối với lần lượt các khí NH_3 , CO , và NO_2 . Trong hình 4(a), cảm biến S1 có độ đáp ứng khí tốt nhất với khí NH_3 , với giá trị tăng dần từ 1,5 đến 10,3 tương ứng với tăng nồng độ; cảm biến S2 có độ đáp ứng tăng nhẹ từ 1,1 đến 2,5; trong khi cảm biến S3 có độ đáp ứng gần như không đổi bằng 1. Trong hình 4(b), các cảm biến S1 và S3 giữ nguyên độ đáp ứng bằng 1 đối với khí CO , riêng cảm biến S2 có độ đáp ứng với khí CO tăng dần từ 1,7 đến 3,4. Tương tự trong hình 4(c), cảm biến S3 có độ đáp ứng với khí cao nhất với khí NO_2 và giá trị tăng dần từ 1,6 đến 20,7 khi tăng nồng độ khí đo; trong khi các cảm biến S1 và S2 có giá trị thay đổi không đáng kể. Như vậy, các cảm biến S1, S2, và S3 có độ chọn lọc tốt lần lượt với các khí NH_3 , CO , và NO_2 . Dễ dàng nhận thấy, nếu chỉ sử dụng một cảm biến MOS riêng lẻ thì chỉ có thể phát hiện tốt một loại khí. Việc sử dụng đồng thời ba cảm biến sẽ góp phần đáng kể khả năng nhận diện hay phân loại cả ba khí.

3.2. Nâng cao độ chọn lọc khí sử dụng các thuật toán học máy

Tiếp theo, một số thuật toán học máy tiêu biểu trong AI được áp dụng để xử lý dữ liệu đáp ứng khí từ dãy cảm biến. Đầu tiên, phương pháp phân tích thành phần chính (Principal Component Analysis/ PCA) được sử dụng để biến đổi dữ liệu [9]. Thông số đáp ứng khí từ ba cảm biến MOS tại mỗi nồng độ khí đo được đặt là một đầu vào của PCA. Mỗi khí đo ở 5 nồng độ khác nhau. Mỗi nồng độ được thu thập dữ liệu 20 lần. Như vậy, tổng cộng có 300 điểm dữ liệu cho 3 khí được khảo sát. Đầu ra của PCA cũng là các điểm dữ liệu ba thành phần, nhưng giá trị của các thành phần được sắp xếp theo thứ tự quan trọng giảm dần (PC1, PC2, PC3). Hình 5(a) cho biết tỉ số phương sai của các thành phần PC1, PC2, và PC3 lần lượt là 77,09%; 21,86%; và 1,05%. Hình 5 (b) thể hiện các điểm dữ liệu đầu ra PCA, với nhóm các điểm cùng màu đại diện cho một loại khí. Kết quả cho thấy tập hợp các điểm dữ liệu đầu ra PCA của mỗi khí khá tuyến tính, và ba đường có xu hướng chụm lại khi nồng độ khí đo giảm dần về 0 (khí nền). Điều này có thể làm suy giảm hiệu quả nhận biết các khí tại nồng độ thấp. May mắn là các thuật toán học máy có thể được sử dụng để giải quyết vấn đề này.



Hình 5. Kết quả phân tích PCA



Hình 6. Kết quả dự đoán khí ở tỉ lệ phân chia tập dữ liệu đào tạo-thử nghiệm là 50%:50% với một số mô hình học máy tiêu biểu: (a) LDA, (b) SVM, (c) DT, (d) RF

Tiếp theo, một số thuật toán phân cụm tiêu biểu được áp dụng, bao gồm Phân tích biệt số tuyến tính (Linear Discriminant Analysis-LDA) [7], Máy vectơ hỗ trợ (Support Vector Machine-SVM) [10], Cây quyết định (Decision Tree-DT) [11], và Rừng ngẫu nhiên (Random Forest-RF) [12]. Tập dữ liệu đầu ra PCA được chia đôi ngẫu nhiên. Một nửa tập dữ liệu (50%, hay 150 điểm) dùng cho đào tạo các mô hình, và một nửa còn lại (50%) cho kiểm thử các mô hình đã đào tạo. Kết quả nhận dạng các mẫu khí được thể hiện thông qua các ma trận dự đoán trong hình 6. Dễ thấy, các mô hình LDA và SVM chỉ đạt độ chính xác là 93,3% (tương ứng 140/150 mẫu khí được nhận diện đúng). Cả hai mô hình đều nhận diện sai 10 mẫu khí NH_3 là NO_2 . Trong khi, các mô hình DT và RF phân loại đúng tất cả các mẫu khí kiểm thử, đạt được hiệu quả nhận diện vượt trội là 100%. Như vậy, sử dụng các mô hình học máy cho phép tăng cường mạnh mẽ khả năng nhận biết và phân loại khí.

4. Kết luận

Một thiết bị đo đa khí độc hại (NH_3 , CO, và NO_2) đã được phát triển dựa trên chip đa cảm biến MOS. Mỗi cảm biến MOS hoạt động ở một công suất gia nhiệt khác nhau và có độ chọn lọc khác nhau đối với từng khí. Việc sử dụng đồng thời nhiều cảm biến MOS đã được chứng minh hiệu quả hơn so với sử dụng cảm biến đơn lẻ trong việc xác định các loại khí. Các kết quả cũng cho thấy một số mô hình học máy tiêu biểu đã nâng cao hiệu quả phân tích dữ liệu đáp ứng khí của thiết bị đo. Trong đó, các phương pháp DT và RF thể hiện một cách xuất sắc khả năng phân biệt và nhận diện các mẫu khí. Những kết quả này góp phần bổ sung các phương pháp thiết kế tối ưu thiết bị đo khí, cũng như tăng cường mạnh mẽ độ chính xác phát hiện khí độc trong môi trường.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Phenikaa cho Đề tài mã số PU2023-1-A-05.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. Feng *et al.*, "Review on smart gas sensing technology," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 17, pp. 1–22, 2019, doi: 10.3390/s19173760.
- [2] P. Boeker, "On 'Electronic Nose' methodology," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 204, pp. 2–17, 2014, doi: 10.1016/j.snb.2014.07.087.
- [3] D. Karakaya, O. Ulucan, and M. Turkan, "Electronic Nose and Its Applications: A Survey," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 17, no. 2, pp. 179–209, 2020, doi: 10.1007/s11633-019-1212-9.
- [4] H. Nazemi, A. Joseph, J. Park, and A. Emadi, "Advanced micro-and nano-gas sensor technology: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 6, 2019, doi: 10.3390/s19061285.
- [5] Z. Wu, H. Wang, X. Wang, H. Zheng, Z. Chen, and C. Meng, "Development of electronic nose for qualitative and quantitative monitoring of volatile flammable liquids," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 7, 2020, doi: 10.3390/s20071817.
- [6] J. Zhang *et al.*, "A miniaturized electronic nose with artificial neural network for anti-interference detection of mixed indoor hazardous gases," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 326, 2021, Art. no. 128822, doi: 10.1016/j.snb.2020.128822.
- [7] V. M. H. Ho *et al.*, "Superior detection and classification of ethanol and acetone using 3D ultra-porous $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanocubes-based sensor," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 362, 2022, Art. no. 131737, doi: 10.1016/j.snb.2022.131737.
- [8] V. T. Nguyen *et al.*, "Enhanced NH_3 and H_2 gas sensing with H_2S gas interference using multilayer $\text{SnO}_2/\text{Pt}/\text{WO}_3$ nanofilms," *J. Hazard. Mater.*, vol. 412, 2021, Art. no. 125181, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125181.
- [9] J. Oh *et al.*, "Machine learning-based discrimination of indoor pollutants using an oxide gas sensor array: High endurance against ambient humidity and temperature," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 364, 2022, Art. no. 131894, doi: 10.1016/j.snb.2022.131894.
- [10] B. Ehret, K. Safenreiter, F. Lorenz, and J. Biermann, "A new feature extraction method for odour classification," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 158, no. 1, pp. 75–88, 2011, doi: 10.1016/j.snb.2011.05.042.

- [11] M. A. H. Khan, B. Thomson, R. Debnath, A. Motayed, and M. V. Rao, "Nanowire-Based Sensor Array for Detection of Cross-Sensitive Gases Using PCA and Machine Learning Algorithms," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 11, pp. 6020–6028, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2972542.
- [12] X. Zhao, Z. Wen, X. Pan, W. Ye, and A. Bermak, "Mixture Gases Classification Based on Multi-Label One-Dimensional Deep Convolutional Neural Network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 12630–12637, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2892754.