

NGHIÊN CỨU, TỐI ƯU THIẾT KẾ CẢM BIẾN ĐIỆN DUNG ĐO NỒNG ĐỘ BỤI SILIC

STUDY ON DESIGN OPTIMIZATION OF A CAPACITIVE SILIC DUST CONCENTRATION MEASUREMENT SENSOR

Nguyễn Đắc Hải^{1,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.365>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu, tối ưu thiết kế cảm biến điện dung đồng phẳng đo nồng độ hạt bụi silic trong các nhà máy chế biến bột đá thạch anh. Để tối ưu cấu trúc cảm biến và giảm thành phần ký sinh và nhiễu thông thường, cấu trúc cảm biến điện dung được thiết kế gồm một tụ điện tham chiếu và một tụ điện cảm biến. Điện cực của cảm biến được phủ một lớp Acrylic để bảo vệ và cách điện. Mô phỏng được tiến hành sử dụng hạt bụi silic có điện môi là 5, bán kính hạt bụi là từ 10 μ m đến 500 μ m và thay đổi nồng độ hạt bụi để nghiên cứu nguyên lý làm việc của cảm biến. Kết quả mô phỏng cho thấy độ tuyến tính của điện dung đầu ra của cảm biến tương ứng với nồng độ hạt bụi khác nhau. Kết quả mô phỏng chứng minh rằng cảm biến này có tiềm năng cao cho ứng dụng đo nồng độ hạt bụi silic trong các nhà máy chế biến bột đá thạch anh và trong môi trường.

Từ khóa: Cảm biến điện dung; cảm biến bụi silic; cảm biến đồng phẳng.

ABSTRACT

This paper presents research and optimization of coplanar capacitive sensor design to measure silic dust concentration in quartz stone powder processing plants. To optimize the sensor structure and reduce parasitic components and common noise, the capacitive sensor structure is designed consisting of a reference capacitor and a sensing capacitor. The sensor's electrode is covered with an Acrylic layer for protection and electrical insulation. Simulations were conducted using silic dust particles with dielectric permittivity of 5, dust particle radius from 10 μ m to 500 μ m and varying the dust particle concentration to study the working principle of the sensor. Simulation results show the linearity of the sensor's output capacitance corresponding to different dust particle concentrations. Simulation results demonstrate that this sensor has high potential for application in measuring silic dust concentrations in quartz stone powder processing plants and in the environment.

Keywords: Capacitive sensor, Silic dust sensor, coplanar sensor.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: haind@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/12/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/10/2024

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2024

1. GIỚI THIỆU

Theo báo cáo năm 2014 của WHO có 4,3 và 3,7 triệu người thiệt mạng do ô nhiễm chất lượng không khí trong nhà và ngoài trời [1, 2]. Tác động của các hoạt động sản xuất, tác động biến đổi môi trường tự nhiên và hậu quả tai hại của chúng đến sức khỏe con người đã được các nhà khoa học nghiên cứu [3, 4]. Chất rắn lơ lửng trong không khí gọi là vật chất dạng hạt (PM), là một chất gây ô nhiễm không khí gây ra mối lo ngại lớn nhất của người dân vì tác động tiêu cực của nó, ảnh hưởng đến sức khỏe [5-7].

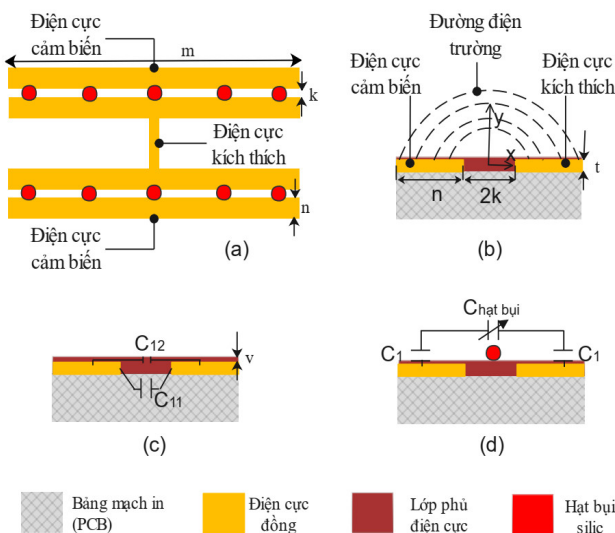
Ngày nay, do chất lượng cuộc sống ngày càng được cải thiện ở nhiều quốc gia, sự quan tâm về ô nhiễm không khí dạng hạt ngày càng được quan tâm, các công nghệ và sản phẩm tiên tiến như máy lọc không khí và hệ thống giám sát chất lượng không khí đang được cung cấp ra thị trường. Tuy nhiên, vì hầu hết hệ thống giám sát chất lượng không khí và hệ thống lọc không khí sử dụng cảm biến với độ chính xác và hiệu suất của các cảm biến tương đối thấp [8-12]. Các phương pháp khác nhau như phương pháp trọng lượng, phương pháp đo dựa trên tia beta, phương pháp đo tần số cộng hưởng và phương pháp tán xạ ánh sáng để đo các hạt đã được đề xuất [13-20]. Phương pháp trọng lượng [21] được sử dụng làm phương pháp đo tiêu chuẩn vì nó có độ chính xác đo tốt nhất. Tuy nhiên, phương pháp trọng lượng đắt tiền và cồng kềnh nên nó không phù hợp để sử dụng trong các thiết bị trong công nghiệp hoặc gia đình. Phương pháp hấp thụ tia beta (BAM) [22] thu thập các hạt trên giấy lọc trong một khoảng thời gian nhất định, truyền tia beta và đo nồng độ bằng sự chênh lệch giữa tia beta bị hấp thụ và tắt khi tia beta được chiếu vào đi qua các hạt trên giấy lọc. Phương pháp này có độ chính xác thấp hơn so với phương pháp trọng lượng, nhưng giá cả và kích thước tương đối thấp. Phương pháp đo lượng hạt trong không khí bằng cách phát hiện sự thay đổi tần số cộng hưởng theo trọng lượng của bụi mịn thu được trên giấy lọc trong

thiết bị va chạm (TEOM) [23]. Phương pháp tán xạ ánh sáng chiếu xạ một tia laser hoặc đèn LED hồng ngoại, đo cường độ ánh sáng tán xạ bởi các hạt và chuyển đổi nó vào nồng độ của các hạt. Trong các hệ thống như thiết bị IoT hoặc máy lọc không khí, phương pháp tán xạ ánh sáng chi phí thấp chủ yếu được sử dụng. Tuy nhiên, phương pháp tán xạ ánh sáng rất dễ bị ảnh hưởng bởi môi trường bên ngoài như nhiệt độ, độ ẩm,... và có nhược điểm về độ chính xác và độ ổn định [24]. Một số nghiên cứu đo nồng độ hạt trong môi trường xung quanh tương tự cũng đã được nghiên cứu [25-28].

Trong nhiều nghiên cứu về thiết kế cảm biến đo lường như đo góc nghiêng, phát hiện bọt khí trong kênh chất lỏng,... cảm biến được sử dụng rộng rãi nhất là cảm biến điện dung với nhiều ưu điểm như ít nhiễu, ít ảnh hưởng của môi trường đến nhiệt độ, độ ẩm và độ ổn định và độ bền cao của cảm biến điện dung [29-31].

Trong bài báo này, tác giả đề xuất thiết kế cảm biến đồng phẳng kiểu điện dung đo kích thước hạt bụi và nồng độ hạt bụi silic trong các nhà máy chế biến bột đá thạch anh. Các điện cực của cảm biến được tích hợp trên một đế PCB cố định. Kích thước hạt bụi từ 10µm đến 500µm. Kích thước hạt bụi được cảm nhận dựa trên sự thay đổi điện dung của cặp điện cực tụ cảm biến, khi hạt bụi được đặt trên điện cực cảm biến sẽ làm thay đổi điện môi của cảm biến tụ điện và làm thay đổi điện dung của cảm biến tụ điện. Từ sự thay đổi của điện dung này sẽ ước lượng được kích thước và nồng độ của hạt bụi.

2. CẢM BIẾN ĐỒNG PHẪNG KIỂU ĐIỆN DUNG



Hình 1. Cảm biến tụ và các đường điện trường, điện dung của cảm biến. (a) Cấu trúc cảm biến tụ điện đồng phẳng phát hiện hạt bụi (b) Đường điện trường giữa các điện cực tụ; (c) Điện dung hình thành bởi lớp phủ điện cực (C₁₁ và C₁₂); (d) Điện dung hình thành bởi hạt bụi (C_{hatbui})

Cấu trúc cảm biến điện dung đồng phẳng gồm các bản cực tụ là các lá đồng mỏng được định hình trên tấm PCB. Hình 1a thể hiện hình dạng của cảm biến gồm 2 cặp lá đồng mỏng tạo thành 2 tụ cảm biến. Khoảng cách giữa 2 lá đồng là 2k, chiều dài là m, chiều rộng là n và độ dày bản cực tụ là t. Hình 1(b) thể hiện các đường điện trường giữa hai điện cực tụ. Hình 1(c) và 1(d) thể hiện sơ đồ tụ điện được tạo bởi lớp phủ điện cực và hạt bụi với điện cực.

Điện dung của tụ có hai bản cực song song và đồng phẳng cách nhau bởi một khoảng cách 2k được đặt trong một môi trường điện môi đồng nhất có hằng số điện môi ε_r (hình 1(b)) được xác định bằng công thức [31]:

$$C = \frac{2\epsilon_r \epsilon_0 m}{\pi} \ln \left[\left(1 + \frac{n}{k} \right) + \sqrt{\left(1 + \frac{n}{k} \right)^2 - 1} \right] \tag{1}$$

Với ε₀ là hằng số điện môi chân không, m là chiều dài và n là chiều rộng của điện cực. Hầu hết các cảm biến điện dung dựa trên cơ chế phát hiện sự thay đổi của điện dung gây ra bởi sự thay đổi của điện môi. Do đó, sự xuất hiện của hạt bụi sẽ dẫn đến sự thay đổi của điện dung của cảm biến.

Trong thiết kế này, sự thay đổi điện dung được tính đến sự ảnh hưởng của lớp phủ điện cực, hạt bụi. Điện dung được tạo bởi lớp phủ điện cực C₁ (hình 1c) được viết là:

$$C_1 = C_{11} + C_{12} \tag{2}$$

Điện dung được tạo bởi lớp phủ điện cực và hạt bụi (hình 1(d)) gọi là (C₂) được viết là:

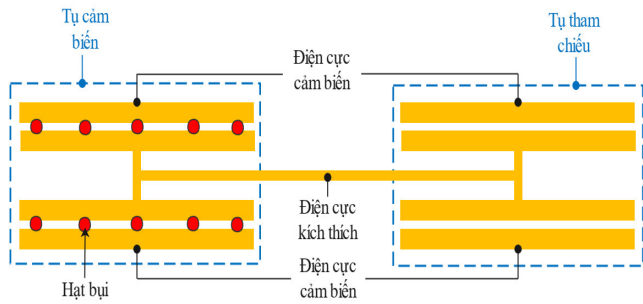
$$C_2 = \frac{\frac{C_1}{2} \cdot C_{hatbui}}{\frac{C_1}{2} + C_{hatbui}} = \frac{C_1 \cdot C_{hatbui}}{C_1 + 2C_{hatbui}} \tag{3}$$

Điện dung trên hạt bụi ký hiệu là C_{hatbui}, lớp phủ điện cực là C₁ (hình 1(d)). Khi thay đổi kích thước hay mật độ hạt bụi thì điện dung C_{hatbui} thay đổi là chủ yếu, còn điện dung C₁ được coi là không thay đổi.

Từ công thức (3) cho thấy giá trị điện dung tụ C₂ sẽ thay đổi phụ thuộc theo giá trị của C_{hatbui}. Như vậy khi hạt bụi có chất liệu được xác định thì chỉ có giá trị tụ C_{hatbui} sẽ thay đổi khi kích thước hay mật độ hạt bụi thay đổi. Vậy từ sự thay đổi điện dung của cảm biến tụ điện ta có thể ước lượng được kích thước hay mật độ hạt bụi.

3. THIẾT KẾ CẢM BIẾN

Cảm biến được thiết kế gồm bốn điện cực mỏng hình chữ nhật gắn ở trên bề mặt của đế PCB, điện cực được phủ một lớp cách điện. Hạt bụi được đặt áp sát vào lớp phủ điện cực và khe tụ (hình 2).



Hình 2. Mô hình thiết kế hệ thống cảm biến kiểu điện dung đồng phẳng phát hiện hạt bụi silic

Các điện cực có chất liệu bằng đồng trên đế PCB với kích thước như bảng 1. Điện dung của tụ tham chiếu ($C_{tham_chiếu}$) tương ứng với tụ không có hạt bụi, điện dung của tụ cảm biến ($C_{cảm_biến}$) tương ứng với tụ có hạt bụi. Điện dung do hạt bụi tạo ra (chênh lệch điện dung - ΔC) được viết như sau:

$$\Delta C = C_{cảm_biến} - C_{tham_chiếu} \tag{4}$$

Khi có sự xuất hiện của hạt bụi nó làm thay đổi điện môi của tụ, dẫn đến làm thay đổi giá trị điện dung của tụ, từ sự thay đổi điện dung này ta có thể ước lượng được kích thước hay mật độ hạt bụi.

Bảng 1. Tham số của cảm biến được thiết kế

Tham số	m	n	t	k	v
Giá trị (mm)	10	2	0,1	0,2	0,01

3. THIẾT LẬP MÔ PHỎNG

Hoạt động của cảm biến được khảo sát bởi phương pháp phần tử hữu hạn (FEM- Finite Element Method) sử dụng phần mềm mô phỏng Comsol.

Bảng 2. Các tham số dùng trong mô phỏng cảm biến

Thành phần hệ thống của cảm biến	Chất liệu	Hằng số điện môi	Độ dẫn điện (s/m)
Hạt bụi	Silic	5	0
Điện cực	Đồng	1	58.10^6
Lớp cách điện phủ điện cực	Acrylic	3,25	0

Mô hình cảm biến được thiết kế gồm bốn điện cực bằng đồng được thiết kế hình chữ nhật được gắn trên mặt đế PCB, phía trên điện cực được phủ một lớp cách điện. Điện cực kích thích được đặt điện thế 18,5V, điện cực cảm biến được đặt 0V. Hạt bụi được sử dụng để khảo sát có chất liệu là Silic. Bảng 2 thể hiện các tham số của vật liệu sử dụng trong cảm biến.

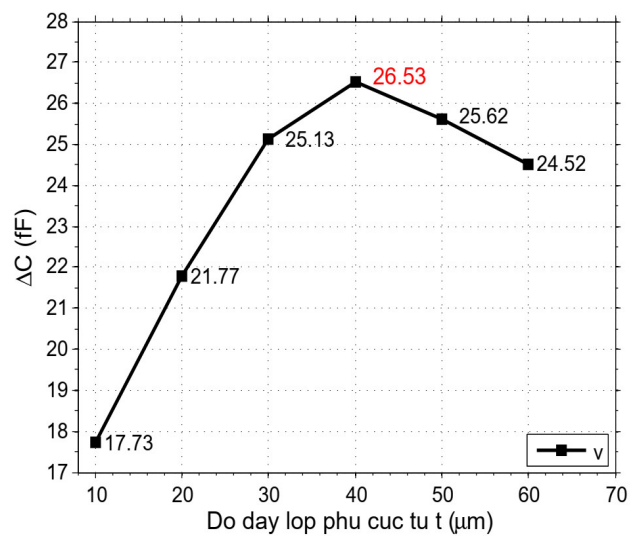
4. MÔ PHỎNG

Khi hạt bụi silic xuất hiện trên khe tụ cảm biến thì có sự thay đổi điện dung ΔC . Như vậy sự thay đổi giá trị điện

dung nhiều hay ít phụ thuộc vào kích thước và mật độ hạt bụi silic. Ngoài ra độ nhạy của cảm biến còn phụ thuộc vào độ dày lớp cách điện phủ cực tụ và khoảng cách giữa hai điện cực. Trong nghiên cứu này, khảo sát về độ dày lớp cách điện phủ điện cực cho độ nhạy tốt nhất sẽ được trình bày. Các tham số trong bảng 1 ở trên là kích thước độ rộng của bản cực tụ (m, n), khoảng cách khe tụ (k) và độ dày bản cực tụ (t) được giữ cố định, độ dày lớp phủ cực tụ (v) sẽ lần lượt được thay đổi.

4.1. Khảo sát các tham số kích thước của cảm biến

Khảo sát mối liên hệ giữa độ dày lớp cách điện phủ cực tụ (v) và sự thay đổi chênh lệch của điện dung.



Hình 3. Mối liên hệ giữa độ dày lớp cách điện phủ cực tụ (v) và sự chênh lệch của điện dung

Thay đổi độ dày lớp phủ cực tụ cảm biến (v) để khảo sát sự biến thiên của điện dung của cảm biến. Kết quả mô phỏng cho thấy khi lần lượt thay đổi từng kích thước độ dày lớp phủ cực tụ v thì sự thay đổi chênh lệch của điện dung của cảm biến là khác nhau. Đồ thị hình 3 thể hiện sự thay đổi chênh lệch điện dung của cảm biến thu được ứng với từng giá trị độ dày lớp phủ cực tụ (v). Khi độ dày lớp phủ cực tụ tăng lên làm tăng ảnh hưởng của điện trường của cảm biến vào lớp phủ và hạt bụi dẫn đến điện dung tăng, tuy nhiên khi độ dày lớp phủ lớn hơn 40μm thì hạt bụi nằm ngoài phạm vi ảnh hưởng của điện trường và dẫn đến điện dung cảm biến giảm. Đồ thị hình 3 thể hiện, với độ dày lớp phủ cực tụ v = 40μm thì sẽ cho sự thay đổi chênh lệch điện dung của cảm biến cao nhất là 26,53fF tương ứng với 12 hạt silic. Trong đồ thị hình 3 cũng cho thấy cảm biến có điện dung thay đổi là 26,53fF tương ứng với 12 hạt silic và điện dung sẽ tăng đồng biến khi số hạt silic tăng, thử nghiệm này được thể hiện ở phần khảo sát ở hình 5.

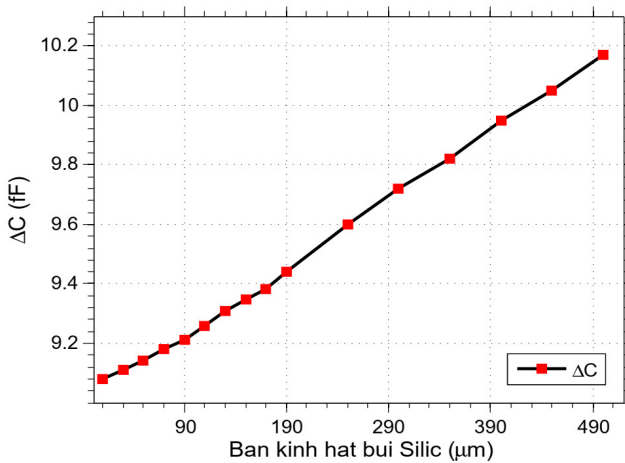
4.2. Khảo sát thay đổi điện dung của cảm biến theo mật độ hạt bụi silic

Theo kết quả khảo sát khoảng cách khe tụ và độ dày lớp phủ điện cực, giá trị các tham số của cảm biến được tối ưu và được thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3. Tham số của cảm biến được thiết kế tối ưu

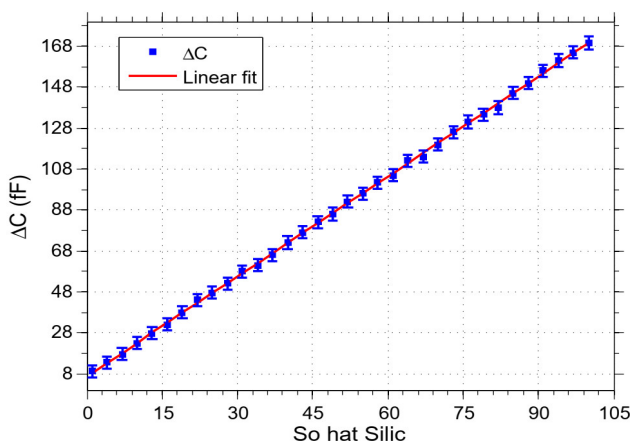
Tham số	m	n	t	k	v
Giá trị (mm)	10	2	0,1	0,2	0,04

Mô phỏng với một hạt bụi Silic, khi thể tích của hạt bụi Silic thay đổi sẽ làm điện dung của cảm biến cũng thay đổi tương ứng. Hình 4 thể hiện điện dung tăng từ 9,08fF đến 10,17fF khi bán kính một hạt bụi tăng tương ứng từ 10µm đến 500µm.



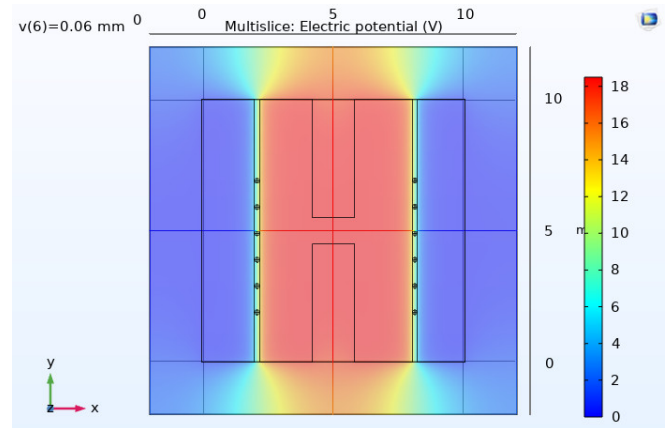
Hình 4. Kết quả mô phỏng điện dung thay đổi tương ứng với bán kính hạt bụi Silic

Hình 5 cho thấy kết quả mô phỏng sự thay đổi điện dung của cảm biến khi thay đổi số hạt bụi Silic có bán kính 0,1mm. Khi số hạt bụi Silic tăng lên thì điện dung của cảm biến cũng tăng tương ứng.



Hình 5. Kết quả mô phỏng điện dung thay đổi tương ứng với số hạt bụi Silic bán kính 0,1mm

Hình 6 cho thấy mặt phẳng của biên dạng trường tĩnh điện khi xuất hiện các hạt bụi Silic trên điện cực cảm biến. Có thể thấy sự phân bố của điện trường không đồng đều ở khe tụ giữa các điện cực và hạt bụi. Vùng màu đỏ biểu thị cường độ điện áp cao hơn và vùng màu xanh biểu thị điện áp thấp hơn. Sự phân bố điện trường này thể hiện hiệu ứng cao giữa các điện cực cảm biến và hạt bụi Silic.



Hình 6. Hình ảnh mô phỏng hoạt động của cảm biến

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày cảm biến kiểu tụ có cấu trúc đồng phẳng để đo nồng độ hạt bụi silic. Cảm biến được đề xuất có kích thước nhỏ 10 x 2mm. Cấu trúc cảm biến được tối ưu hóa bằng phương pháp tính toán lý thuyết, mô phỏng các kích thước khác nhau của độ dày lớp phủ điện cực và sử dụng cấu trúc tụ tham chiếu để giảm nhiễu chung. Đặc biệt, hai cảm biến điện dung được thiết kế trực tiếp trên cùng một bảng mạch PCB giúp giảm nhiễu nguồn điện và nhiễu tụ điện ký sinh. Khi hạt bụi silic tiếp xúc với cảm biến, hạt bụi silic sẽ làm thay đổi điện môi của cảm biến, từ đó làm thay đổi giá trị điện dung của cảm biến tụ điện, điều này giúp ta xác định được nồng độ hạt bụi silic. Độ nhạy của cảm biến là 1,62fF/1 hạt bán kính 0,1mm và 0,0022fF/1µm bán kính hạt bụi. Kết quả đã chứng minh rằng cấu trúc đề xuất có chi phí thấp, độ nhạy cao và phù hợp cho một số ứng dụng đo nồng độ hạt bụi silic trong các nhà máy chế biến bột đá thạch anh và trong môi trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. WHO, *Burden of Disease from Household Air Pollution for 2012*. Geneva, Switzerland, 2014.

[2]. WHO, *Public Health, Environmental and Social Determinants of Health (PHE)*. Geneva, Switzerland, 2017. Available online: <https://www.who.int/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution> (accessed on 10 September 2021).

- [3]. Haklay M., Eleta I., "On the front line of community-led air quality monitoring," In *Integrating Human Health into Urban and Transport Planning*, Springer: Cham, Switzerland, 563–580, 2019.
- [4]. Dowthwaite L., Sprinks J., "Citizen science and the professional-amateur divide: Lessons from differing online practices," *J. Sci. Commun.*, 18, 2019.
- [5]. EPA, *Criteria Air Pollutants*. Available online: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants> (accessed on 30 September 2019).
- [6]. *Searched Topics: PM Pollution, NO2 Pollution, CO Pollution, PM Pollution, O3 Pollution*. Available online: <https://trends.google.com/trends> (accessed on 30 September 2019).
- [7]. Kim K. H., Kabir E., Kabir S., "A review on the human health impact of airborne particulate matter," *Environ. Int.*, 74, 136-143, 2015.
- [8]. Anderson J. O., Thundiyil J. G., Stolbatch A., "Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health," *J. Med. Toxicol.*, 8, 166-175, 2012.
- [9]. Pope C. A., Burnett R. T., Thun M. J., Calle E. E., Krewski D., Ito K., Thurston G. D., "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution," *J. Am. Med. Assoc.*, 287, 1132-1141, 2002.
- [10]. Fine G. F., Cavanagh L. M., Afonja A., Binions R., "Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors in Environmental Monitoring," *Sensors*, 10, 5469-5502, 2010.
- [11]. Lee D. D., Lee D. S., "Environmental Gas Sensors," *IEEE Sens. J.*, 1, 214-224, 2001.
- [12]. Cho H., "Personal Environmental Monitoring System and Network Platform," In *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology*, Auckland, New Zealand, 8–10 December 2015.
- [13]. Alfano B., Barretta L., Del Giudice A., De Vito S., Di Francia G., Esposito E., Formisano F., Massera E., Miglietta M. L., Polichetti T., "A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives," *Sensors*, 20, 6819, 2020.
- [14]. Holder A. L., Mebust A. K., Maghran L. A., McGown M. R., Stewart K. E., Vallano D. M., Elleman R. A., Baker K. R., "Field Evaluation of Low-Cost Particulate Matter Sensors for Measuring Wildfire Smoke," *Sensors*, 20, 4796, 2020.
- [15]. Lee H., Kang J., Kim S., Im Y., Yoo S., Lee D., "Long-Term Evaluation and Calibration of Low-Cost Particulate Matter (PM) Sensor," *Sensors*, 20, 3617, 2020.
- [16]. Brattich E., Bracci A., Zappi A., Morozzi P., Di Sabatino S., Porcù F., Di Nicola F., Tositti L., "How to Get the Best from Low-Cost Particulate Matter Sensors: Guidelines and Practical Recommendations," *Sensors*, 20, 3073, 2020.
- [17]. Johnston S. J., Basford P. J., Bulot F. M. J., Apetroaie-Cristea M., Easton N. H. C., Davenport C., Foster G. L., Loxham M., Morris A. K. R., Cox S. J., "City Scale Particulate Matter Monitoring Using LoRaWAN Based Air Quality IoT Devices," *Sensors*, 19, 209, 2019.
- [18]. Zanni S., Lalli F., Foschi E., Bonoli A., Mantecchini L., "Indoor Air Quality Real-Time Monitoring in Airport Terminal Areas: An Opportunity for Sustainable Management of Micro-Climatic Parameters," *Sensors*, 18, 3798, 2018.
- [19]. Di Antonio A., Popoola O. A. M., Ouyang B., Saffell J., Jones R. L., "Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter," *Sensors*, 18, 2790, 2018.
- [20]. Reece S., Williams R., Colón M., Southgate D., Huertas E., O'Shea M., Iglesias A., Sheridan P., "Spatial-Temporal Analysis of PM2.5 and NO2 Concentrations Collected Using Low-Cost Sensors in Peñuelas, Puerto Rico," *Sensors*, 18, 4314, 2018.
- [21]. Hu S., Zhang S., Sardar S., Chen S., DzHEMA I., Huang S. M., Quiros D., Sun H., Laroo C., Ayala A., et al., "Evaluation of Gravimetric Method to Measure Light-Duty Vehicle Particulate Matter Emissions at Levels below One Milligram Per Mile (1 mg/mile)," *SAE: Warrendale, PA, USA*, 2014.
- [22]. Shin S. E., Jung C. H., Kim Y. P., "Analysis of the measurement difference for the PM10 concentrations between Beta-ray absorption and gravimetric methods at Gosan," *Aerosol Air Qual. Res.*, 11, 846-853, 2011.
- [23]. Patashnick H., Rupprecht E. G., "Continuous PM-10 measurements using the tapered element oscillating microbalance," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 41, 1079-1083, 1991.
- [24]. WHO, *WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants*. Geneva, Switzerland, 2010.
- [25]. Johnson K. K., Bergin M. H., Russell A. G., Hagler G. S., "Using Low Cost Sensors to Measure Ambient Particulate Matter Concentrations and On-Road Emissions Factors," *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 1-22, 2016.
- [26]. Sousan S., Regmi S., Park Y. M., "Laboratory Evaluation of Low-Cost Optical Particle Counters for Environmental and Occupational Exposures," *Sensors*, 21, 4146, 2021.
- [27]. Venkatraman Jagatha J., Klausnitzer A., Chacón-Mateos M., Laquai B., Nieuwkoop E., van der Mark P., Vogt U., Schneider C., "Calibration Method for Particulate Matter Low-Cost Sensors Used in Ambient Air Quality Monitoring and Research," *Sensors*, 21, 3960, 2021.
- [28]. Zaidan M. A., Motlagh N. H., Fung P. L., Lu D., Timonen H., Kuula J., Niemi J. V., Tarkoma S., Petäjä T., Kulmala M., et al., "Intelligent Calibration and Virtual Sensing for Integrated Low-Cost Air Quality Sensors," *IEEE Sens. J.*, 20, 13638-13652, 2020.
- [29]. Dac Hai Nguyen, Thuy Ha Tran Thi, Quoc Tuan Vu, Van Thai Le, Duc Trinh Chu, Bui Tung Thanh, Ngoc An Nguyen, "Study on Design Optimization of a Symmetry Two-Axis Tilt Angle Capacitive Sensor," *IETE. J. Res.*, 264-271, 2020.
- [30]. Hai Nguyen Dac, Tuan Vu Quoc, Loc Do Quang, Hai Nguyen Hoang, Trinh Chu Duc, "Differential C4D sensor for conductive and non-conductive fluidic channel," *Microsystem Technologies*, 22, 10, 2511-2520, 2016.
- [31]. Chen Jian Z., Darhuber Anton A., Troian Sandra M., Wagner Sigurd, "Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation," *Lab on a Chip*, 4, 5, 473-480, 2004.

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Dac Hai

Hanoi University of Industry, Vietnam