

# PHÂN TÍCH NỒNG ĐỘ KHÍ CO<sub>2</sub> VỚI CẤU HÌNH CẢM BIẾN HẤP THỤ HỒNG NGOẠI KHÔNG TÁN SẮC (NDIR) SỬ DỤNG BIẾN ĐỔI FOURIER NHANH (FFT)

ANALYZING CO<sub>2</sub> CONCENTRATION WITH NON-DISPERSIVE INFRARED SENSOR (NDIR) USING FAST FOURIER TRANSFORM (FFT)

Nguyễn Trường Giang<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Xuân Tuyên<sup>1</sup>, Nguyễn Ngọc Khải<sup>2</sup>,  
Giang Hồng Thái<sup>3</sup>, Vũ Tuấn Anh<sup>4</sup>, Nguyễn Hải Bình<sup>3,\*</sup>

## TÓM TẮT

Trong bài báo này, cấu trúc cảm biến khí CO<sub>2</sub> dựa trên nguyên tắc hấp thụ hồng ngoại theo cấu hình không tán sắc (NDIR) được thiết kế và chế tạo. Ở đó, cấu hình cảm biến gồm một nguồn phát hồng ngoại sử dụng đèn sợi đốt và đầu thu hồng ngoại dạng pin nhiệt điện với hai kênh có tích hợp kính lọc bước sóng hồng ngoại tại 4,279 $\mu$ m và 3,91 $\mu$ m. Điện áp điều khiển ( $U_{IR-Lamp}$ ) đèn phát hồng ngoại là dạng xung vuông với mức thấp 0V và mức cao là 5V tại tần số 0,1Hz. Tín hiệu điện áp từ hai kênh thu hồng ngoại được khuếch đại 10.000 lần cho giá trị tương ứng  $U_1$  của kênh nhạy khí và  $U_2$  là của kênh so sánh. Các bộ số liệu về  $U_1$  và  $U_2$  được ghi nhận và biến đổi Fourier nhanh (FFT) bằng phần mềm để lọc lựa được tín hiệu lỗi ra phù hợp tần số của đèn phát và loại bỏ được nhiễu tạp. Các giá trị điện áp  $U_1$  và  $U_2$  của cảm biến này được khảo sát trong dải nồng độ khí CO<sub>2</sub> 0 - 80% thể tích. Đặc trưng chuẩn hóa tín hiệu  $\ln(U_1/U_2)$  cho thấy phụ thuộc tuyến tính vào nồng độ khí CO<sub>2</sub>.

**Từ khóa:** Biến đổi Fourier nhanh (FFT), cảm biến khí CO<sub>2</sub>, cảm biến khí cấu hình không tán sắc (NDIR).

## ABSTRACT

In this paper, non-dispersive infrared gas sensor (NDIR) for analyzing CO<sub>2</sub> concentration was designed and fabricated. The gas sensor structure includes an infrared heat lamp (IR-lamp) and infrared thermopile device with two detectors integrated optical band-pass filters at 4.279 $\mu$ m and 3.91 $\mu$ m. Square-pulse voltage source with two levels of 5V and 0V at 0.1Hz was applied for operating the IR-lamp. Output voltages of the IR thermopile detectors were amplified by 10000 times to obtain the sensing voltage ( $U_1$ ) and the reference voltage ( $U_2$ ). The obtained voltage values ( $U_1$  and  $U_2$ ) were analyzed by fast Fourier transform (FFT) to eliminate the noise and get the signal in correspondence with the frequency of IR-lamp. The voltage values ( $U_1$  and  $U_2$ ) were investigated for the CO<sub>2</sub> concentration range of 0-80%vol. The linear dependence of gas-sensing characteristic  $\ln(U_1/U_2)$  on the CO<sub>2</sub> concentration was found.

**Keywords:** Fast Fourier transform (FFT), CO<sub>2</sub> gas sensor, non-dispersive infrared gas sensor (NDIR).

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông Vận tải

<sup>2</sup>Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

<sup>3</sup>Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

<sup>4</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: ntgiang@utc.edu.vn; binhnh@ims.vast.ac.vn

Ngày nhận bài: 05/8/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/10/2018

Ngày chấp nhận đăng: 25/10/2018

## 1. GIỚI THIỆU

Ô nhiễm môi trường không khí ngày càng trở lên trầm trọng do có nhiều nguồn khí phát thải, ví dụ như các phương tiện xe cơ giới, nhà máy sản xuất công nghiệp sử dụng nhiên liệu đốt cháy và cả các nguồn khí tự nhiên. Trong đó, khí CO<sub>2</sub> là loại khí rất phổ biến được phát thải từ nhiều nguồn khác nhau. Khí CO<sub>2</sub> là một khí không màu, có thể gây hại đến sức khỏe con người khi hít thở phải ở nồng độ cao với các triệu chứng ngạt thở, tạo ra vị chua trong miệng và cảm giác nhói ở mũi và cổ họng [1]. Khí CO<sub>2</sub> gây hiệu ứng tiêu cực đến biến đổi khí hậu, hiệu ứng nhà kính gây tình trạng ấm lên toàn cầu. Tuy vậy, khí CO<sub>2</sub> cũng được ứng dụng trong rất nhiều ngành công nghiệp khác nhau, ví dụ công nghệ làm lạnh, công nghệ thực phẩm, công nghệ hóa học... Do vậy, việc đo đạc, phân tích hay kiểm soát được nồng độ khí CO<sub>2</sub> đóng vai trò quan trọng cho cảnh báo, quan trắc và các ứng dụng điều khiển trong công nghiệp. Các linh kiện cảm biến cho khả năng phát hiện nhanh và chính xác nồng độ khí CO<sub>2</sub> được biết đến điển hình gồm cảm biến điện hóa (theo nguyên tắc hóa học) [2] và cảm biến hấp thụ hồng ngoại (theo nguyên tắc vật lý) [3]. Cảm biến dựa trên nguyên tắc vật lý thường có tuổi thọ cao và ổn định so với cảm biến dựa trên nguyên tắc hóa học, do vậy cảm biến khí hấp thụ hồng ngoại nhận được nhiều quan tâm.

Cơ sở của cảm biến khí dựa trên nguyên lý hấp thụ hồng ngoại là dựa trên tính hấp thụ chọn lọc vùng bước sóng điện từ trong vùng hồng ngoại của mỗi loại phân tử khí, đối với khí CO<sub>2</sub> là lân cận 4,279 $\mu$ m. Cảm biến hấp thụ hồng ngoại phù hợp tốt cho một số loại khí như CO<sub>2</sub>, CO, NO và CH<sub>4</sub> [3, 4]. Cảm biến hấp

thụ hồng ngoại cho phát hiện khí CO<sub>2</sub> có những ưu điểm như độ chọn lọc cao, có thể dùng cho cả dải nồng độ thấp (ppm) và dải nồng độ cao (% thể tích), thời gian hồi đáp nhanh và không cần khí O<sub>2</sub> để hoạt động. Tuy vậy, cảm biến này loại này có những nhược điểm như: khó khăn trong ghép các bộ phận quang học và xử lý tín hiệu điện đầu ra rất phức tạp. Cấu hình cảm biến khí hấp thụ hồng ngoại điển hình là theo kiểu không tán sắc (NDIR, viết tắt từ cụm từ Non-Dispersive Infrared sensor) [5]. Ở đó, cấu hình cảm biến gồm một nguồn phát hồng ngoại và đầu thu hồng ngoại hai kênh tích hợp kính lọc dải bước sóng. Trong đó, một kênh thu cường độ hồng ngoại đóng vai trò so sánh (cường độ tín hiệu lối ra không bị suy giảm khi tương tác với khí) và kênh còn lại đóng vai trò nhạy khí (cường độ tín hiệu lối ra suy giảm theo nồng độ khí). Tuy nhiên, tín hiệu điện của đầu thu hồng ngoại (thường sử dụng các linh kiện hóa điện, nhiệt điện hoặc photo-diốt) là rất nhỏ và chứa nhiều tạp nhiễu. Có hai hướng để xử lý cho tín hiệu của đầu thu hồng ngoại cho phân tích khí là theo phản ứng và phần mềm. Thứ nhất, bằng phản ứng là ở đó thiết kế bo mạch điện tử kèm theo với chức năng lọc dải tần (bandpass filter) để lấy được tín hiệu ra tương ứng với tần số của đầu phát hồng ngoại từ đó loại bỏ được tạp nhiễu [3]. Trong thiết kế bo mạch này cần đòi hỏi linh kiện điện tử cao cấp với độ chính xác cao và cần có thiết kế chuyên nghiệp. Thứ hai, sử dụng phần mềm để phân tích cũng là một giải pháp để xử lý tín hiệu hồng ngoại của đầu thu một cách hiệu quả. Ở đây, chúng ta có thể sử dụng phương pháp biến đổi Fourier nhanh (FFT) để loại bỏ nhiễu và thu được tín hiệu phù hợp cho xác định nồng độ khí. Phương pháp biến đổi Fourier nhanh (FFT) sẽ thực hiện phân tích tín hiệu đầu vào thành nhiều tín hiệu sin đầu ra với các tần số khác nhau [6], khi đó chúng ta có thể chọn lựa được các tín hiệu lối ra sau khi biến đổi Fourier nhanh (FFT) phù hợp tần số của đèn phát.

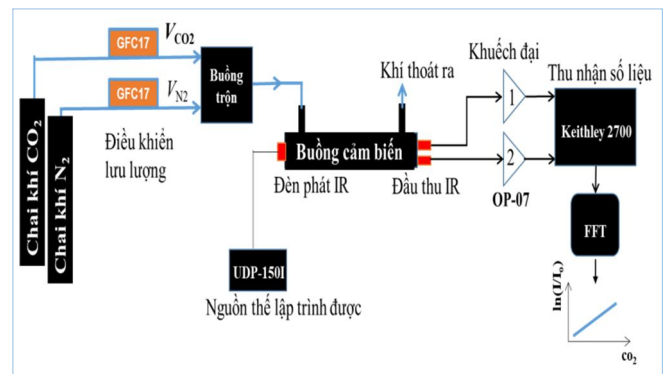
Trong bài báo này, nhóm tác giả đã thiết kế, chế tạo cảm biến khí theo cấu hình NDIR sử dụng một đèn sợi đốt cho phát hồng ngoại và đầu thu hồng ngoại hai kênh có kính lọc quang phù hợp cho phân tích khí CO<sub>2</sub>. Tín hiệu điện trên hai kênh thu hồng ngoại được khuếch đại 10.000 lần để thực hiện biến đổi Fourier nhanh (FFT) bằng phần mềm để lấy được tín hiệu liên quan đến hấp thụ hồng ngoại của khí, từ đó có thể phân tích nồng độ khí CO<sub>2</sub>. Nghiên cứu nhằm mục đích có thể chế tạo được một cấu hình cảm biến đơn giản cho xác định nồng độ khí CO<sub>2</sub> và xây dựng được hệ thí nghiệm cho phân tích khí dựa trên phương pháp vật lý.

**2. THỰC NGHIỆM**

Cảm biến khí trong nghiên cứu này được thiết kế và chế tạo với cấu hình không tán sắc (NDIR) [7]. Đèn sợi đốt (IR lamp) cho nguồn phát hồng ngoại được sử dụng là OIR-715 và đầu thu hồng ngoại hai kênh kiểu pin nhiệt điện (thermopile) OGS-237, mỗi kênh đã tích hợp kính lọc quang tương ứng bước sóng 4,279µm và 3,91µm, các linh kiện này của hãng Oriental System Technology, Đài Loan. Buồng

cảm biến có dạng ống tròn hình trụ với đường kính 25mm và chiều dài 80mm làm từ nhôm kim loại. Đèn phát và đầu thu hồng ngoại đặt đối diện nhau ở hai đầu của buồng hình trụ.

Đèn hồng ngoại (OIR-715) được điều khiển bằng nguồn thế (U<sub>IR Lamp</sub>) dạng xung hình vuông trong khoảng 0 - 5V ở tần số 0,1Hz thông qua một nguồn thế lập trình được (UDP-150I, Hàn Quốc). Tín hiệu điện áp ra của hai kênh thu hồng ngoại được khuếch đại lên 10.000 lần khi sử dụng bộ khuếch đại thuật toán (OP-07). Các tín hiệu sau khi được khuếch đại (U<sub>Thermopile</sub>) được ghi nhận liên tục bởi thiết bị đo điện thế (Keithley 2700, Mỹ) để thành các bộ số liệu cho biến đổi Fourier nhanh (FFT) qua phần mềm Origin để lập đường chuẩn hóa nồng độ khí CO<sub>2</sub> của cảm biến.



Hình 1. Sơ đồ thiết kế cho phân tích nồng độ khí chuẩn CO<sub>2</sub> bằng cấu hình cảm biến hấp thụ hồng ngoại NDIR sử dụng biến đổi FFT

Nồng độ khí CO<sub>2</sub> được tạo ra bằng phương pháp cách trộn thể tích các khí CO<sub>2</sub> và N<sub>2</sub> [8]. Để có các nồng độ khí CO<sub>2</sub> mong muốn cho nghiên cứu, các lưu lượng khí CO<sub>2</sub> và N<sub>2</sub> được khống chế qua hai bộ điều khiển lưu lượng (GFC17- Aalborg, Mỹ) đến một bình trộn và sau đó dòng khí hỗn hợp dẫn đến buồng đo của cảm biến. Nồng độ khí CO<sub>2</sub> được xác định qua công thức:

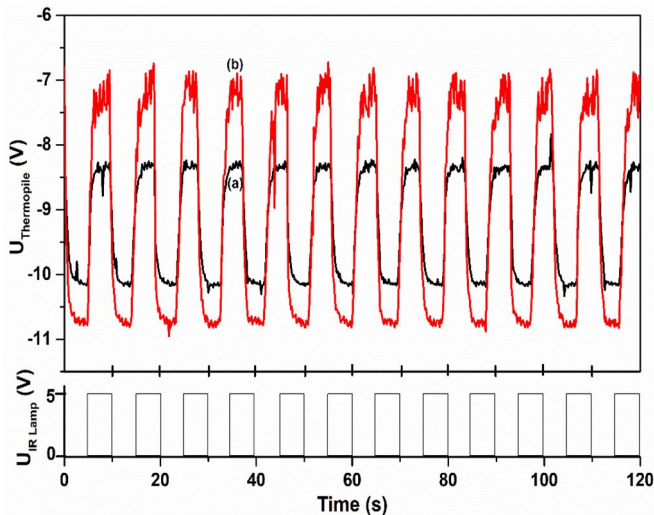
$$n_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{CO_2} + V_{N_2}} . 100 \tag{1}$$

Trong đó, n<sub>CO<sub>2</sub></sub> là nồng độ khí CO<sub>2</sub> mong muốn cần tạo ra, V<sub>CO<sub>2</sub></sub> và V<sub>N<sub>2</sub></sub> lần lượt là lưu lượng của khí CO<sub>2</sub> và N<sub>2</sub> được khống chế vào buồng trộn. Hình 1 minh họa sơ đồ thiết kế của hệ thiết bị cho nghiên cứu phân tích nồng độ khí CO<sub>2</sub> với cấu hình cảm biến hấp thụ hồng ngoại NDIR sử dụng biến đổi FFT. Đường chuẩn hóa tín hiệu ra phụ thuộc vào nồng độ khí CO<sub>2</sub> được đánh giá qua sự suy giảm tín hiệu điện áp ra của hai kênh thu theo các nồng độ khí chuẩn. Biến đổi Fourier nhanh (FFT) đóng vai trò như kỹ thuật lọc tạp nhiễu.

**3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

Khi cảm biến hoạt động, đèn dây tóc (IR lamp) được cấp nguồn thế dạng xung vuông với mức cao 5V và mức thấp 0V với tần số có thể thay đổi được từ 0,01 đến 0,25Hz. Trong nghiên cứu này tần số được lựa chọn là 0,1Hz. Điện thế thu được trên hai kênh được khảo sát trong các nồng

độ khí CO<sub>2</sub> trong dải 0 - 80 % thể tích. Hình 2 thể hiện một kết quả điển hình về đường điện áp của hai kênh thu trong môi trường 2% khí CO<sub>2</sub> (a - kênh so sánh, b - kênh nhạy khí) biến thiên theo thời gian tương ứng với các chu kỳ điện áp nguồn cấp cho đèn phát hồng ngoại (với xung vuông 0 - 5V tần số 0,1Hz). Kết quả này cho thấy điện áp ( $U_{Thermopile}$ ) của hai kênh đáp ứng khá rõ ràng và tuần hoàn với chu kỳ điện áp cấp cho đèn hồng ngoại. Tuy vậy, nhận thấy tín hiệu ( $U_{Thermopile}$ ) có nhiều tạp nhiễu thể hiện qua sự dao động ngẫu nhiên của đường đáp ứng. Với tạp nhiễu này sẽ khó để xác định được cường độ điện áp để chuẩn hóa cảm biến.



Hình 2. Các đường điện áp  $U_{Thermopile}$  của kênh so sánh (a) và kênh nhạy khí (b) theo thời gian tương ứng với chu kỳ điện áp cấp cho đèn hồng ngoại  $U_{IR-Lamp}$

Để chuẩn hóa tín hiệu ra theo nồng độ khí CO<sub>2</sub>, các bộ số liệu về điện áp ( $U_{Thermopile}$ ) của cảm biến được ghi nhận trong các môi trường nồng độ khí CO<sub>2</sub> khác nhau sau đó thực hiện biến đổi Fourier nhanh (FFT). Hình 3 minh họa một ví dụ về biến đổi Fourier nhanh (FFT) cho bộ số liệu  $U_{Thermopile}$  của kênh nhạy khí (đường b trên hình 2). Kết quả trên hình cho thấy, sau khi biến đổi FFT cho ta được rất nhiều các hài tín hiệu khác nhau. Số lượng các hài này phụ thuộc vào thành phần tạp nhiễu. Tuy vậy, ba hài với các biên độ ( $A_1$ ,  $A_2$  và  $A_3$  như chỉ trên hình 3) là đặc trưng của tín hiệu hồng ngoại thu được phù hợp với nguồn phát. Các hài này được lựa chọn cho phân tích và lập đường chuẩn hóa theo nồng độ khí CO<sub>2</sub>. Do sự lệch pha của ba hài tín hiệu lựa chọn này là nhỏ (như thể hiện trên hình 3), chúng ta sẽ lấy gần đúng giá trị điện áp ra cho mỗi kênh thu hồng ngoại qua phép biến đổi Fourier nhanh (FFT) sẽ là:

$$U_{Thermopile} = A_1 + A_2 + A_3 \quad (2)$$

Về mặt lý thuyết, chuẩn hóa tín hiệu theo nồng độ khí CO<sub>2</sub> có thể tính theo công thức từ định luật Lambert-Beer [3]. Điện áp của kênh nhạy khí ( $U_1$ ) và kênh so sánh ( $U_2$ ) phụ thuộc vào nồng độ khí theo công thức:

$$U_1 = k_1 I_0 \exp(-KC) \quad (3)$$

$$U_2 = k_2 I_0 \quad (4)$$

Trong đó,  $k_1$  và  $k_2$  là hằng số liên quan tính chất hấp thụ hồng ngoại ở hai kênh tương ứng,  $K$  là hằng số liên

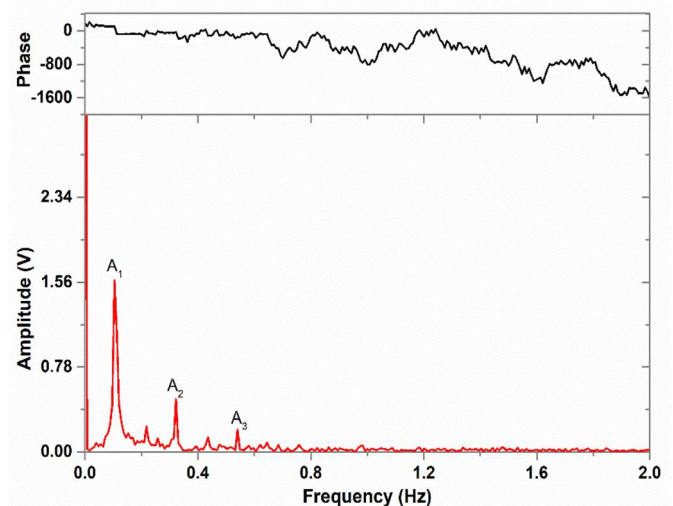
quan tính chất hấp thụ hồng ngoại của toàn bộ cấu hình cảm biến,  $C$  là nồng độ khí và  $I_0$  liên quan đến cường độ chiếu sáng từ nguồn. Trong thực tế khó xác định được thông số liên quan đến cường độ chiếu sáng  $I_0$  và để loại bỏ ảnh hưởng của cấu hình cảm biến chúng ta thực hiện phép tính:

$$U_1/U_2 = k_1/k_2 \exp(-KC) \quad (5)$$

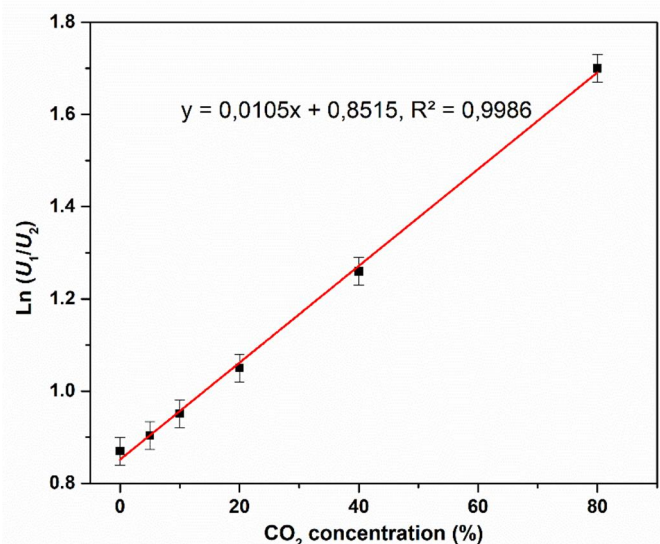
Khi đó, nồng độ khí CO<sub>2</sub> sẽ theo công thức:

$$C = -Q \ln(U_1/U_2) \quad (6)$$

Trong đó,  $C$  là nồng độ khí CO<sub>2</sub>,  $Q$  như là hệ số phẩm chất liên quan tính hấp thụ hồng ngoại của khí CO<sub>2</sub> trong một cấu hình cảm biến. Vì vậy, từ các bộ số liệu thu nhận từ hai kênh chúng ta sẽ tính toán được các giá trị  $\ln(U_1/U_2)$  tại các nồng độ khí CO<sub>2</sub>. Kết quả tính toán này được thể hiện trên hình 4. Nó cho thấy đường đặc trưng  $\ln(U_1/U_2)$  phụ thuộc tuyến tính với nồng độ khí CO<sub>2</sub> theo hệ số 0,0105 với hệ số hồi quy  $R^2 = 0,9986$ .



Hình 3. Kết quả minh họa biến đổi Fourier nhanh (FFT) của một bộ số liệu điện áp  $U_{Thermopile}$



Hình 4. Đường chuẩn hóa tín hiệu của hai kênh thu  $\ln(U_1/U_2)$  phụ thuộc vào nồng độ khí CO<sub>2</sub>.

Như vậy, việc xác định được các điện áp ở đầu thu hồng ngoại hai kênh sẽ tính toán được nồng độ khí CO<sub>2</sub> theo đường chuẩn hóa. Việc sử dụng biến đổi FFT sẽ giúp loại bỏ được thành phần tạp nhiễu và tăng được độ chính xác của hệ cảm biến. Cảm biến có khả năng xác định nồng độ CO<sub>2</sub> trong thời gian ngắn hơn, và dải điện áp làm việc tương đương với các cảm biến hiện có trên thị trường (bảng 1).

Bảng 1. So sánh tính chất cảm biến NDIR-FFT với các cảm biến trên thị trường

Cảm biến	Điện áp làm việc	Dải nồng độ (vol)	Thời gian đáp ứng	Ghi chú
NDIR MH-Z19	3,6 – 5,5 V	0 - 0,5 %	< 60s	[9]
NDIR SenseAir S8 0053	4,5 - 5,25V	0,04 - 0,2 % (đến 1%)	< 90s	[10]
NDIR-FFT	0 - 5V	0 - 80 %	< 2s	Nghiên cứu này

**4. KẾT LUẬN**

Phân tích nồng độ khí CO<sub>2</sub> (trong dải 0 - 80%) được xác định qua cấu hình cảm biến hấp thụ hồng ngoại không tán sắc NDIR. Việc sử dụng biến đổi Fourier nhanh (FFT) cho các bộ số liệu điện áp ghi nhận trên hai kênh thu hồng ngoại đã loại bỏ được các tạp nhiễu và xây dựng lên đường chuẩn hóa  $\ln(U_1/U_2)$  phụ thuộc tuyến tính vào nồng độ khí CO<sub>2</sub> theo hệ số 0,0105 và độ hồi quy  $R^2 = 0,9986$ . Với việc sử dụng phần mềm tính toán cho biến đổi FFT và cấu hình cảm biến NDIR đơn giản chúng ta có thể xây dựng hệ thí nghiệm cho xác định nồng độ khí CO<sub>2</sub>.

**LỜI CẢM ƠN**

Công trình này được thực hiện với sự tài trợ bởi đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường, Trường Đại học Giao thông Vận tải (mã số T2018-CB003). Chúng tôi xin cảm ơn Phòng cảm biến và thiết bị đo khí, Viện Khoa học vật liệu về việc tạo nồng độ khí chuẩn CO<sub>2</sub> và các thảo luận khoa học về cảm biến khí trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. Carbon dioxide, Immediately Dangerous to Life and Health Concentrations, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).  
 [2]. Jeffrey W. Fergus, 2008. *A review of electrolyte and electrode materials for high temperature electrochemical CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> gas sensors*, Sensors and Actuators B 134, 1034-1104.  
 [3]. Qiulin Tan, Licheng Tang, Mingliang Yang, Chenyang Xue, Wendong Zhang, Jun Liu and Jijun Xiong, 2015. *Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology*. Optics and Lasers in Engineering 74, 103-108.  
 [4]. Qiu-lin Tan, Wen-dong Zhang, Chen-yang Xue, Ji-jun Xiong, You-chun Ma and Fen Wen, 2008. *Design of mini-multi-gas monitoring system based on IR absorption*. Optics & Laser Technology 40, 703-710.  
 [5]. K. Luft, 1943. *Über eine neue Methode der registrierenden Gasanalyse mit Hilfe der Absorption ultraroter Strahlen ohne spektrale Zerlegung*. Z. Tech. Phys. 24, 97-104.

[6]. NTi. "How an FFT works". www.nti-audio.com. Audio.  
 [7]. Guangjun Zhang and Xiaoli Wu, 2004. *A novel CO<sub>2</sub> gas analyzer based on IR absorption*. Optics and Lasers in Engineering 42, 219-231.  
 [8]. Hanns Erik Endres, Hildegard D. Jander and Wolfgang Gottler, 1995. *A test system for gas sensors*. Sensors and Actuators B 23, 163-172  
 [9]. Zhengzhou Winsen Electronics Co Ltd, Intelligent Infrared CO2 Module MH Z19 model: user manual.  
 [10]. <https://senseair.com/products/size-counts/senseair-s8-commercial/>.