

NGHIÊN CỨU - CHẾ TẠO BỘ ĐO LƯU LƯỢNG BIOGAS THEO NGUYÊN LÝ CHÊNH ÁP CHO ĐỘNG CƠ BIOGAS

DESIGNING AND MANUFACTURING PRESSURE MASS FLOW METERS FOR BIOGAS ENGINES

Nguyễn Việt Hải¹, Nguyễn Văn Anh²

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; nvhai@dut.udn.vn

²Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế; nvanh@hueic.edu.vn

Tóm tắt - Sử dụng nhiên liệu biogas cho động cơ đốt trong là một vấn đề nhận được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học. Để nâng cao hiệu quả sử dụng biogas trong động cơ, chúng ta cần chế tạo bộ phụ kiện có tính năng tốt hơn. Vì vậy, bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu - chế tạo bộ đo lưu lượng biogas theo nguyên lý chênh áp cho động cơ biogas và phương pháp hiệu chỉnh lưu lượng kế. Hệ thống đo hệ số tương đương của động cơ dual fuel biogas diesel được lắp đặt với 2 cảm biến áp suất được dùng trên động cơ ô tô. Mỗi quan hệ giữa hệ số thực tế nhận được nhờ phân tích khí sau bộ tạo hỗn hợp và tỉ số điện áp đầu ra của hai cảm biến cho phép ta xác định được hệ số chuẩn của hệ thống đo. Kết quả nghiên cứu được áp dụng để đo lưu lượng biogas cung cấp cho động cơ thí nghiệm một xi lanh EV2600NB.

Từ khóa - biogas; biogas-diesel; động cơ; phương pháp đo; bộ đo lưu lượng.

Abstract - The use of biogas fuel for internal combustion engines is an issue of great interest to scientists. To increase the efficiency of biogas engines, we need to manufacture a kit which has better features. This article presents the result of researching and manufacturing pressure mass flow meters for biogas engines and flow meter calibration method. A system of measuring equivalence ratio ϕ of biogas diesel dual fuel engines is established by 2 pressure sensors used on automobile engines. The relationship between real ϕ given by gas analysis in downstream of mixer and ratio of output voltage of the two sensors allows us to determine calibration coefficient of the system. The research result can be used to measure the flow of biogas for the EV2600NB engines in experiments.

Key words - biogas; biogas-diesel; engine; measurement methods; flow meters.

1. Giới thiệu

Nhu cầu phát triển các hệ thống điều khiển động cơ, đặc biệt là các hệ thống điều khiển cung cấp nhiên liệu và đánh lửa trên động cơ đốt cháy cưỡng bức như động cơ nhiều xi lanh/động cơ xe gắn máy dùng LPG/CNG/biogas/nhiên liệu sinh học, đặt ra yêu cầu quan trọng cho việc nghiên cứu và chế tạo thành công các bộ đo lưu lượng thể tích, nhất là bộ đo lưu lượng không khí nạp cho động cơ và lưu lượng nhiên liệu khí.

Các bộ đo lưu lượng không khí (kiểu tấm đo gió và kiểu dây nhiệt/màng nhiệt) đã qua sử dụng có trên thị trường hiện nay chỉ phù hợp cho các ứng dụng đo lưu lượng không khí nạp với động cơ có thông số làm việc tương đương. Những bộ đo này khó áp dụng được cho những động cơ có dung tích lớn hơn như các động cơ dùng nhiên liệu khí chuyển đổi từ động cơ diesel, hay kích thước rất nhỏ như các động cơ xe gắn máy, hay các chất khác nhiên liệu lỏng/khí, khí thải, lọt khí. Do đó, việc nghiên cứu và xác định công nghệ phù hợp để tự phát triển các bộ đo lưu lượng trong điều kiện ở Việt Nam là một công tác quan trọng và cần thiết.

Việc chuyển đổi động cơ xăng dầu truyền thống sang động cơ sử dụng biogas có ý nghĩa rất quan trọng đối với việc tiết kiệm nhiên liệu hóa thạch và bảo vệ môi trường ở nông thôn nước ta. Mặt khác, việc sử dụng các động cơ chạy bằng biogas còn góp phần giảm chi phí sản xuất nông nghiệp, nâng cao chất lượng cuộc sống, thực hiện chương trình nông thôn mới mà Nhà nước đang tiến hành.

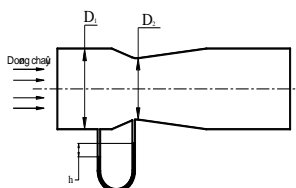
Nhóm GATEC của Đại học Đà Nẵng đi tiên phong trong việc phát triển các bộ phụ kiện đơn giản nhằm cải tạo các động cơ truyền thống thành động cơ biogas. Đây là các bộ phụ kiện kiểu cơ khí, điều chỉnh công suất động cơ theo các nguyên lý cổ điển của cơ học, vì vậy hiệu quả hoạt động có giới hạn [1].

Để nâng cao hiệu quả sử dụng biogas trong động cơ, chúng ta cần chế tạo bộ phụ kiện có tính năng tốt hơn dựa trên các thành tựu về điện tử và công nghệ thông tin. Một trong những vấn đề cần giải quyết theo hướng này là phát triển bộ đo lưu lượng biogas để xác định lưu lượng khí biogas cung cấp cho động cơ đốt trong [2], [3].

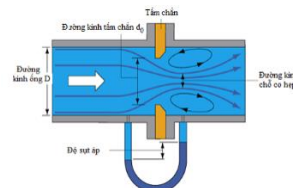
Nghiên cứu này trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo bộ đo lưu lượng theo nguyên lý chênh áp. Bộ đo này được áp dụng cho động cơ dual fuel biogas-diesel EV2600NB. Đây là kết quả do nhóm GATEC của Đại học Đà Nẵng nghiên cứu phát triển. Do đây là động cơ diesel được chuyển đổi sang động cơ sử dụng khí biogas, do vậy phạm vi làm việc của bộ đo lưu lượng sẽ được giới hạn theo các thông số kỹ thuật của động cơ này.

2. Phương đo lưu lượng theo nguyên lý chênh áp

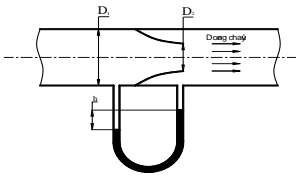
Một trong những nguyên tắc phổ biến để đo lưu lượng chất lỏng và khí là nguyên tắc đo lưu lượng dựa trên sự thay đổi áp suất: khi lưu chất chuyển động qua vị trí có tiết diện hẹp sẽ làm cho vận tốc tăng lên và đồng thời làm cho áp suất tĩnh giảm xuống. Lưu lượng chất lỏng/khí đi qua ống tỉ lệ với độ chênh lệch áp suất này. Các phương án đo lưu lượng dựa trên nguyên tắc chênh áp như: ống venturi, lỗ orifice, ống nozzle và ống pitot [4], [5], [6].



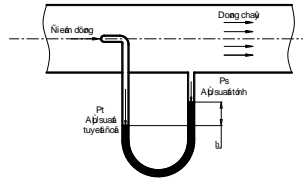
Hình 1. Phương pháp đo bằng ống venturi



Hình 2. Phương pháp đo bằng lỗ orifice



Hình 3. Phương pháp đo bằng ống nozzle

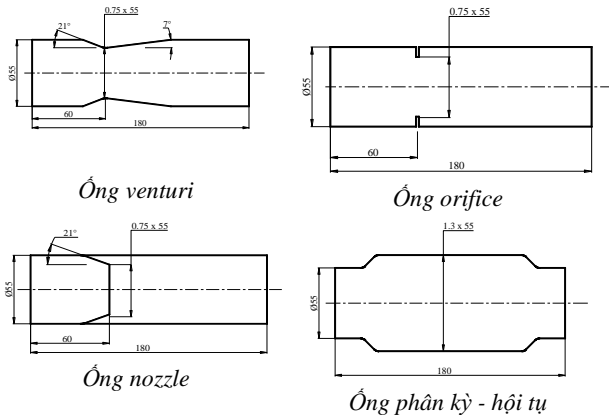


Hình 4. Phương pháp đo bằng ống pitot

Đặc tính làm việc của các phương án đo dựa trên độ chênh áp như: ống venturi, orifice, nozzle, phân kỳ - hội tụ sẽ được khảo sát bằng phương pháp mô phỏng với phần mềm Ansys CFD/Fluent để xác định các đặc tuyến chuyển đổi, độ nhạy và hệ số cản tương ứng.

2.1. Điều kiện về kích thước

Các phương án được mô phỏng phải đồng dạng về kích thước. Đường kính tại vị trí co hẹp bằng 0,75 đường kính vào của ống. Trong đó, đường kính vào $\Phi 55$ được chọn theo kích thước của động cơ ô tô.



Hình 5. Điều kiện về kích thước của các ống đo khi mô phỏng

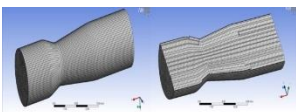
2.2. Điều kiện về lưu chất mô phỏng

Trong điều kiện mô phỏng, lưu chất được sử dụng là không khí ở 25°C có tính chất như bảng sau:

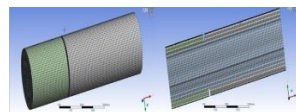
Bảng 1. Bảng thông số của không khí ở 25°C

Khối lượng phân tử	[kg/kmol]	28,96
Khối lượng riêng	[kg/m ³]	1,185
Hệ số giãn nở do nhiệt	[1/K]	0,003356
Hệ số nhớt động học	[kg/m.s]	1,831e-05

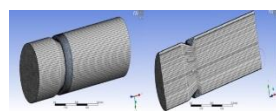
2.3. Điều kiện về lưới của mô phỏng



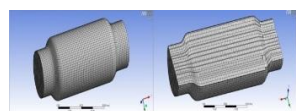
Hình 6. Mô hình chia lưới ống venturi



Hình 7. Mô hình chia lưới ống orifice



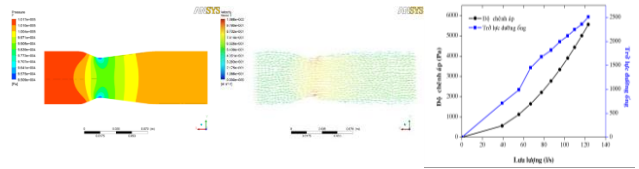
Hình 8. Mô hình chia lưới ống nozzle



Hình 9. Mô hình chia lưới ống phân kỳ - hội tụ

2.4. Kết quả mô phỏng

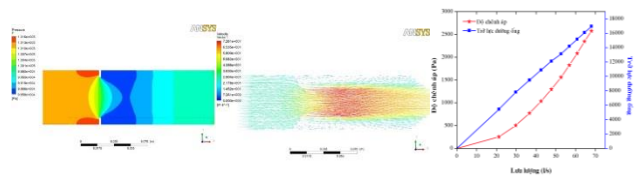
a. Ống venturi



Hình 10. Kết quả mô phỏng ống venturi

Kết quả trên Hình 10 cho thấy, với độ chênh áp $\Delta P_{max}=5.500$ Pa thì lưu lượng lớn nhất qua ống venturi $Q_{max}= 123$ lít/s và hệ số cản $C_{max} = 2.500$. Khi độ chênh áp ΔP tăng từ 550 Pa - 5.550 Pa thì lưu lượng Q tăng từ 40 lít/s - 123 lít/s (tăng 3 lần) và tỷ số $\Delta P/Q$ tăng khoảng 3,5 lần. Nếu độ chênh áp giữa đầu vào và chỗ co hẹp ngày càng tăng thì lưu lượng qua ống tăng theo, nhưng đồng thời làm cho hệ số cản của ống venturi cũng tăng theo, nguyên nhân là do khi tăng độ chênh áp sẽ làm cho các lốc xoáy xuất hiện ngày càng nhiều và làm tăng hệ số cản.

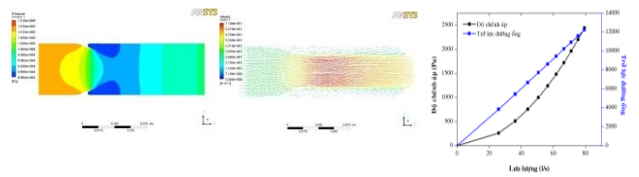
b. Ống orifice



Hình 11. Kết quả mô phỏng ống orifice

Theo đồ thị trên Hình 11 ta thấy, với độ chênh áp $\Delta P_{max}=2.500$ kPa thì lưu lượng lớn nhất qua ống orifice $Q_{max}\approx 68$ (lít/s) và hệ số cản $C_{max} \approx 17.000$. Khi độ chênh áp ΔP tăng từ 250 Pa - 2.500 Pa thì lưu lượng Q tăng từ 21 lít/s - 68 lít/s (tăng khoảng 3,2 lần) và tỷ số $\Delta P/Q$ tăng khoảng 3,11 lần. Hệ số cản của ống orifice tăng cao là do xoáy lốc được tạo ra khi dòng đi qua vị trí co hẹp, chính các lốc xoáy này làm cho dòng lưu chất bị mất năng lượng dẫn đến lưu lượng bị giảm mạnh.

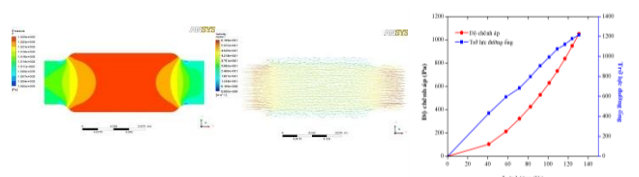
c. Ống nozzle



Hình 12. Kết quả mô phỏng ống nozzle

Kết quả trên Hình 12 cho thấy, với độ chênh áp $\Delta P_{max}=2.500$ Pa thì lưu lượng lớn nhất qua ống nozzle $Q_{max}\approx 79$ (lít/s) và hệ số cản $C_{max} \approx 12.200$. Khi độ chênh áp ΔP tăng từ 260 Pa - 2.440 Pa thì lưu lượng Q tăng từ 26 lít/s - 79 lít/s (tăng khoảng 3,03 lần) và tỷ số $\Delta P/Q$ tăng khoảng 3,18 lần.

d. Ống phân kỳ - hội tụ

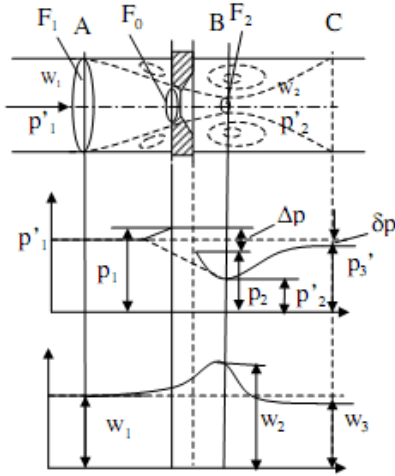


Hình 13. Kết quả mô phỏng ống phân kỳ - hội tụ

Kết quả mô phỏng được trình bày trên Hình 13 cho thấy, với độ chênh áp $\Delta P_{max} = 1.000$ Pa thì lưu lượng lớn nhất qua ống phân kỳ - hội tụ $Q_{max} \approx 130$ lít/s và hệ số cản $C_{max} \approx 1.200$. Khi độ chênh áp ΔP tăng từ 100 Pa - 1.050 Pa thì lưu lượng Q tăng từ 41 lít/s - 130 lít/s (tăng khoảng 3,18 lần) và tỷ số $\Delta P/Q$ tăng khoảng 2,81 lần. Chính vì khả năng cản dòng thấp cho nên độ chênh áp giữa đầu vào và chỗ co hẹp dẫn đến độ nhạy của ống phân kỳ - hội tụ thấp hơn nhiều so với các phương án khác.

3. Thiết kế bộ đo lưu lượng kiểu ống orifice

3.1. Nguyên lý làm việc của ống đo orifice



Hình 14. Phân bố áp suất và vận tốc trong ống đo orifice

Ống đo orifice hoạt động dựa trên nguyên tắc đo độ giảm áp suất của dòng chảy khí đi qua màng ngăn có lỗ thu hẹp. Khi chảy qua lỗ thu hẹp của màng ngăn, vận tốc của lưu chất tăng lên, do đó tạo ra sự chênh áp trước và sau lỗ thu hẹp. Sử dụng một áp kế vi sai đo độ chênh áp này có thể xác định được lưu lượng của dòng chảy.

Từ Hình 14 áp dụng phương trình Bernoulli cho lưu chất chảy qua lỗ ta có vận tốc cực đại W_2 được xác định như sau [7], [8]:

$$W_2 = \frac{1}{\sqrt{\xi - \mu^2 \cdot \beta^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)}, [m/s] \tag{1}$$

Trong đó:

- p_1, p_2 - Áp suất tĩnh tại tiết diện A-A và B-B;
- ρ - Trọng chất lưu;
- ξ - Hệ số tổn thất thủy lực;
- β - Tỷ số thu hẹp của màng ngăn, $\beta = F_0/F_1$;
- μ - Hệ số thu hẹp dòng chảy, $\mu = F_2/F_0$.

Thường ta không đo độ giảm áp $\Delta p' = p_1' - p_2'$ ở tiết diện A-A và B-B, mà đo độ giảm áp $\Delta p = p_1 - p_2$ ngay trước và sau lỗ thu hẹp. Quan hệ giữa $\Delta p'$ và Δp có dạng:

$$\sqrt{(p_1' - p_2')} = \psi \cdot \sqrt{(p_1 - p_2)} \tag{2}$$

$$\text{Khi đó: } W_2 = \frac{\psi}{\sqrt{\xi - \mu^2 \cdot \beta^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)}, [kg/h] \tag{3}$$

Mặt khác, ta có lưu lượng khối lượng của lưu chất:

$$G = W_2 \cdot F_2 \cdot \rho, [kg/h] \tag{4}$$

$$\text{Với } \mu = F_2/F_0 \Rightarrow F_2 = \mu \cdot F_0, [m^2] \tag{5}$$

Thay (3) và (5) vào (4) ta có

$$W_2 = \frac{\mu \cdot \psi}{\sqrt{\xi - \mu^2 \cdot \beta^2}} \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}}, [kg/h] \tag{6}$$

Đặt $C_d = \frac{\mu \cdot \psi}{\sqrt{\xi - \mu^2 \cdot \beta^2}}$ - gọi là hệ số lưu lượng.

$$\text{Suy ra } G = C_d \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_2)}, [kg/h] \tag{7}$$

Từ các biểu thức trên và $F_0 = \frac{\pi d_2^2}{4}$, ta nhận được công

thức xác định lưu lượng khối của dòng lưu chất là:

$$G = C_d \cdot \frac{\pi d_2^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_2)}, [kg/h] \tag{8}$$

Trên cơ sở thực nghiệm người ta xác định hệ số lưu lượng cho mỗi lỗ thu hẹp và xem như không đổi trong phạm vi số Reynol giới hạn.

Bảng 2. Hệ số lưu lượng C_d theo chỉ số Re [1], [3]

β	C_d			
	Số Reynolds- Re			
	10^4	10^5	10^6	10^7
0,2	0,60	0,595	0,594	0,594
0,4	0,61	0,603	0,598	0,598
0,5	0,62	0,608	0,603	0,603
0,6	0,63	0,61	0,608	0,608
0,7	0,64	0,614	0,609	0,609

3.2. Xác định khối lượng riêng biogas

Khối lượng riêng biogas ρ_{biogas} với hàm lượng methane $\%CH_4$ ở điều kiện nhiệt độ T_{biogas} và áp suất P_{biogas} được xác định theo công thức sau:

$$\rho_{biogas} = \frac{M_{biogas}}{M_{air}} \cdot \rho_{air} \tag{9}$$

Trong đó:

- ✓ M_{biogas} : khối lượng mol của biogas với giả thiết chỉ bao gồm CH_4 và CO_2 .

$$M_{biogas} = 16,043 \cdot \%CH_4 + 44,01 \cdot (1 - \%CH_4) \tag{10}$$

- ✓ $M_{air} = 29,0$: khối lượng mol của không khí.

- ✓ ρ_{air} : khối lượng riêng của không khí ở điều kiện nhiệt độ T_{biogas} và áp suất P_{biogas}

$$\rho_{air} = \frac{P_{biogas}}{T_{biogas}} \cdot \frac{T_{air}^{cal}}{P_{air}^{cal}} \cdot \rho_{air}^{cal} \tag{11}$$

3.3. Cân chuẩn bộ đo lưu lượng orifice

Lưu lượng khối lượng đi qua bộ đo orifice có dạng: [5]

$$\dot{m} = \sqrt{\rho \cdot K \cdot \Delta P} \tag{12}$$

Trong đó:

- \dot{m} : lưu lượng khối lượng;

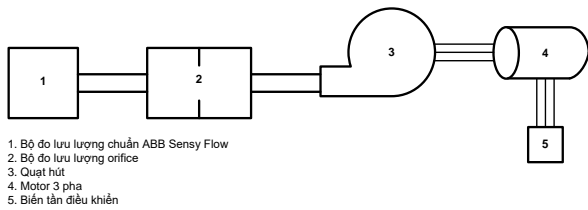
- ρ : khối lượng riêng;
- K : hệ số đặc trưng của đĩa orifice, được giả thiết là hằng số;
- ΔP : độ chênh lệch áp suất trước và sau đĩa orifice.

Sau khi chế tạo, bộ đo được cân chuẩn (calibration) bằng không khí ở điều kiện nhiệt độ T_{air}^{cal} và áp suất P_{air}^{cal} (tương ứng với khối lượng riêng ρ_{air}^{cal}) để xác định quan hệ giữa \dot{m} và ΔP . Quan hệ này có dạng:

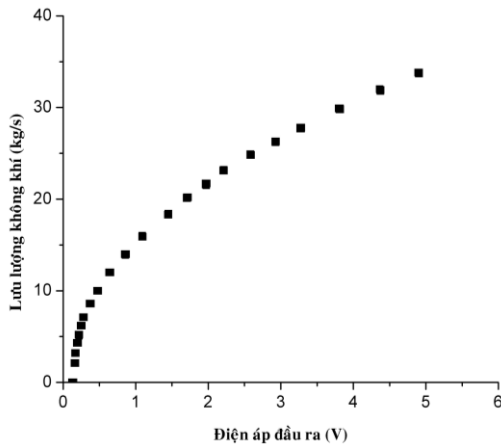
$$\dot{m}_{air}^{cal} = \sqrt{\rho_{air}^{cal} \cdot K \cdot \Delta P} \tag{13}$$

Quá trình cân chuẩn và chương trình đo độ chênh lệch áp suất ΔP và xác định lưu lượng \dot{m}_{air}^{cal} theo công thức (13). Khi sử dụng bộ đo orifice để đo lưu lượng biogas có khối lượng riêng ρ_{biogas} , \dot{m}_{air}^{cal} sẽ được hiệu chỉnh để xác định lưu lượng biogas cần đo \dot{m}_{biogas} :

$$\dot{m}_{biogas} = \dot{m}_{air}^{cal} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{biogas}}{\rho_{air}^{cal}}} \tag{14}$$



Hình 15. Sơ đồ nguyên lý cân chuẩn bộ đo lưu lượng orifice



Hình 16. Quan hệ giữa lưu lượng không khí và điện áp ra của cảm biến

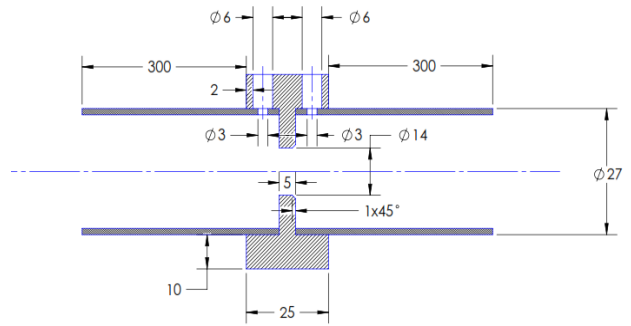
Từ đồ thị trình bày trên Hình 16 ta rút ra được phương trình quan hệ giữa lưu lượng không khí và điện áp ra:

$$Q = 0,179U^5 - 2,4657U^4 + 12,639U^3 - 30,161U^2 + 38,776U - 2,9532 \tag{16}$$

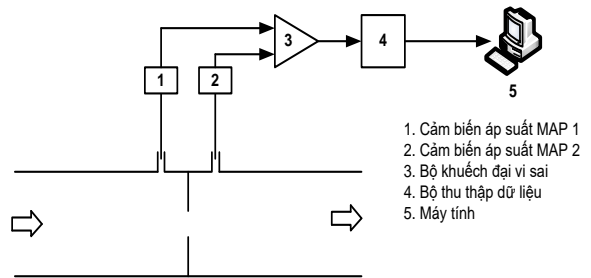
3.4. Bộ đo lưu lượng orifice

Hình 17 giới thiệu cấu tạo của ống đo lưu lượng kiểu orifice. Thông số chính của bộ đo:

- Giới hạn đo tức thời cực đại : 34,0 kg/h
- Giới hạn đo tức thời cực tiểu : 15%FS
- Sai số đo tĩnh : $\pm 2,5\%FS$
- Nguồn điện : 220V~50Hz

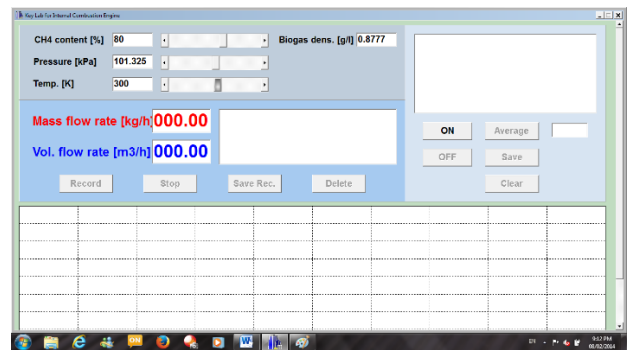


Hình 17. Cấu tạo ống đo orifice



Hình 18. Sơ đồ nguyên lý bộ đo lưu lượng kiểu ống orifice

Khi lưu lượng biogas đi vào ống đo thì tiếp xúc với màng do có lỗ thu hẹp. Khi đó, áp suất trước và sau màng đo sẽ được cảm biến áp suất 1 và 2 ghi nhận và truyền tín hiệu về bộ khuếch đại 3. Tại đây, tín hiệu được khuếch đại lên và truyền đến bộ thu nhận dữ liệu 4, bộ thu nhận dữ liệu xử lý và truyền tín hiệu đến máy tính hiển thị cho kết quả đo (Hình 18, Hình 19).



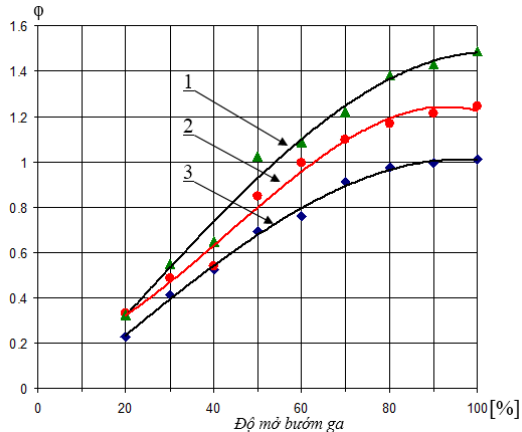
Hình 19. Giao diện của chương trình ghi nhận dữ liệu đo của bộ đo lưu lượng biogas

3.5. Kết quả thực nghiệm trên động cơ EV2600NB

Trong quá trình vận hành động cơ dual fuel biogas-diesel, việc điều chỉnh công suất được thực hiện thông qua điều chỉnh lưu lượng biogas cung cấp cho động cơ, thông qua đó điều chỉnh hệ số tương đương ϕ . Các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đều cho thấy rằng, công suất cực đại của động cơ đạt được khi hệ số tương đương của hỗn hợp đạt giá trị cháy hoàn toàn lý thuyết nghĩa là $\phi = 1$. Do đó, đường đặc tính ngoài của động cơ dual fuel là đường đặc tính công suất ứng với $\phi = 1$. Do nguồn cung cấp biogas có chất lượng thay đổi nên khi thiết kế hệ thống cung cấp biogas cho động cơ ta chọn đường kính ống cung cấp biogas đảm bảo cho hệ số tương đương ứng với $\phi = 1$, với biogas chứa thành phần CH₄ thấp nhất và động cơ chạy ở

tốc độ cao nhất. Khi thành phần CH_4 trong biogas cao hơn hay động cơ chạy ở tốc độ định mức thấp hơn, ta chỉnh lại độ mở cực đại của bướm ga để đạt $\phi = 1$.

Hình 20 giới thiệu biến thiên hệ số tương đương ϕ theo độ mở bướm ga ứng với biogas có chứa 60%, 70% và 80% CH_4 và động cơ chạy ở tốc độ 2.000 vòng/phút. Kết quả này cho thấy rõ hàm lượng CH_4 trong biogas càng cao thì hệ số tương đương ϕ của hỗn hợp càng cao ứng với một độ mở bướm ga cho trước. Để đạt được hệ số tương đương $\phi=1$ khi biogas chứa 60% CH_4 , bướm ga phải mở 90%. Trong khi đó, ứng với biogas chứa 70% CH_4 , điều kiện này đạt được ứng với độ mở bướm ga 65% và ứng với biogas chứa 80% CH_4 , ứng với độ mở bướm ga 55%.



Hình 20. Biến thiên hệ số tương đương ϕ theo độ mở bướm ga khi động cơ chạy ở tốc độ 2.000 vòng/phút
1 - Ứng với biogas có chứa 80% CH_4 ; 2 - Ứng với biogas có chứa 70% CH_4 ; 3 - Ứng với biogas có chứa 60% CH_4 .

Từ kết quả khi chạy thực nghiệm ta tiến hành xác định kích thước lỗ cấp chính tương ứng với từng loại nhiên liệu có thành phần biogas khác nhau.

Bảng 3. Đường kính lỗ cấp chính của nhiên liệu biogas

Nhiên liệu biogas	60% CH_4	70% CH_4	80% CH_4
Đường kính lỗ cấp chính (mm)	17,07	14,83	13,59

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu của bài báo này cho ta rút ra một số kết luận sau:

- Bộ đo lưu lượng biogas theo nguyên lý chênh áp được áp dụng cho hệ thống đo lưu lượng khí biogas cung cấp cho động cơ dual fuel biogas diesel. Khi áp dụng cho động cơ dual fuel biogas diesel EV2600NB thì dựa vào hệ thống đo chúng ta đã xác định được các kích thước cơ bản của lỗ cấp chính tương ứng với hàm lượng CH_4 có trong biogas.

- Hệ thống đo lưu lượng kế kiểu ống orifice có độ chính xác và tín hiệu đầu ra dưới dạng điện áp nên thuận lợi trong việc thiết lập hệ thống điều khiển tự động.

- Trong điều kiện nước ta, việc chế tạo bộ đo lưu lượng cho động cơ dual fuel biogas-diesel gặp khó khăn về mặt kỹ thuật. Do đó, việc sử dụng các cảm biến áp suất trên các loại ô tô để chế tạo bộ đo lưu lượng biogas có kích thước phù hợp để áp dụng trên động cơ dual fuel biogas-diesel là rất thiết thực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bùi Văn Ga, Nguyễn Văn Anh, Nguyễn Việt Hải, Võ Anh Vũ, Bùi Văn Hùng, “Phát triển phương pháp đo hệ số tương đương ϕ của động cơ dual fuel biogas diesel”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Số 05(90), 2015, trang 43-46.
- [2] Bùi Văn Ga, Nguyễn Văn Anh, Nguyễn Việt Hải, Võ Anh Vũ, Bùi Văn Hùng, “Đo thực nghiệm hệ số tương đương ϕ và nghiên cứu ảnh hưởng nó đến tính năng công tác của động cơ dual fuel biogas-diesel”, *Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc năm 2015*, trang 225-232.
- [3] Võ Anh Vũ, *Nghiên cứu xác định ảnh hưởng độ đậm của hỗn hợp đến tính năng của động cơ sử dụng biogas*, Luận văn thạc sỹ kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng, 2014.
- [4] American Society of Mechanical Engineers, *Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle and Venturi*, ASME Standard MFC-3M-1989, Reaffirmed 1995.
- [5] Ahmet Baylar, M. Cihan Aydın, Mehmet Unsal and Fahri Ozkan, “Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining Air Injection Rates Using Fluent V6.2”, *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 14, No. 2, 2009, pp. 97-108.
- [6] Roger C. Baker, *Industrial designs, Handbook Flow Measurement, Operating principles, Performance and Application*, 2000.
- [7] Nguyễn Ngọc Ân, Nguyễn Thị Bảy, Lê Song Giang, Huỳnh Công Hoài, Lê Thị Minh Nghĩa, Nguyễn Thị Phương, Nguyễn Thiện Tông, *Giáo trình Cơ lưu chất*, NXB Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.
- [8] Richard Thorn, Adrian Melling, Herbert Köchner, Reinhard Haak, Zaki D. Husain, Donald J. Wass, David Wadlow, Harold M. Miller, Halit Eren, Hans-Peter Vaterlaus, Thomas Hossle, Paolo Iordano, Christophe Bruttin, Wade M. Mattar, James H. Vignos, Nam-Trung Nguyen, Jesse Yoder, Rekha, Philip-Chandy, Roger Morgan, Patricia J. Scully, *Flow Measurement*, 1999.

(BBT nhận bài: 14/11/2017, hoàn tất thủ tục phân biên: 13/4/2018)