

XÂY DỰNG HỆ THỐNG THỬ NGHIỆM KIỂU SHADOWGRAPH PHỤC VỤ NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH HÌNH THÀNH VÀ PHÂN RÃ TIA PHUN NHIÊN LIỆU

Phùng Văn Đuộc^{1,*}, Phạm Vũ Thành Nam¹, Phạm Văn Thìn², Phạm Xuân Phương¹

¹Khoa Động lực, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

²Khoa Hóa - Lý kỹ thuật, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Sự phát triển của các kỹ thuật chụp ảnh hiện đại đóng vai trò hết sức quan trọng trong việc nghiên cứu quá trình hình thành và phân rã tia phun nhiên liệu. Kỹ thuật shadowgraph là kỹ thuật chụp ảnh hiện đại, kết hợp giữa camera, thấu kính và nguồn sáng chuyên dụng để xác định các thông số vi mô (kích thước, phân bố kích thước, tốc độ chuyển động của các khối chất lỏng) và vĩ mô (góc côn, chiều dài phân rã, độ xuyên sâu) của cấu trúc tia phun nhiên liệu bằng thực nghiệm. Để đạt được hiệu quả cao, hệ thống thử nghiệm này cần phải được hiệu chỉnh cẩn thận để đảm bảo độ tin cậy và khả năng khảo sát với sự thay đổi linh hoạt của các thông số làm việc. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng hệ thống thử nghiệm phục vụ nghiên cứu quá trình hình thành và phân rã tia phun nhiên liệu bằng kỹ thuật shadowgraph và một vài kết quả sơ bộ thu được trên vòi phun kiểu air-blast ly tâm.

Từ khóa: Vòi phun nhiên liệu; phân rã tia phun; chụp ảnh tia phun; air-blast; shadowgraph.

1. Đặt vấn đề

Quá trình hình thành và phân rã tia phun nhiên liệu có thể được tạo ra do sự chênh lệch áp suất giữa dòng chất lỏng trong lỗ vòi phun và môi trường bên ngoài hoặc do sự tương tác với môi trường xung quanh của dòng chất lỏng khi phun ra khỏi lỗ vòi phun [1]. Dòng chất lỏng sau khi đi ra khỏi lỗ vòi phun sẽ tạo thành các lõi tia phun hoặc có dạng màng và chịu sự tác động của các tác động từ bên ngoài dẫn tới việc tạo thành các khối chất lỏng có hình dáng, kích thước và tốc độ chuyển động khác nhau. Các khối chất lỏng này có thể có hình dáng dạng màng, dạng sợi, dạng tròn hoặc các dạng ngẫu nhiên. Tùy thuộc vào mật độ của tia phun và điều kiện của môi trường phun, một số khối chất lỏng có thể có vận tốc tương đối với pha khí đủ lớn để tiếp tục phân rã thành các khối nhỏ hơn. Một số khối có thể kết hợp lại trong các va chạm ngẫu nhiên với các khối khác. Quá trình hình thành và phân rã tia phun có ảnh hưởng đến góc côn tia phun, độ xuyên sâu, tốc độ và sự

* Email: duocpv@lqdtu.edu.vn

phân bố theo kích thước của khối chất lỏng trong không gian buồng cháy theo các hàm của thời gian và không gian [1-4].

Ở nước ta hiện nay, các nghiên cứu về quá trình hình thành và phân rã tia phun nhiên liệu bằng thực nghiệm còn rất ít. Một số nghiên cứu đã đo thực nghiệm các thông số của quá trình phun nhiên liệu như: áp suất trên đường ống cao áp [5, 6], cấu trúc và quá trình phát triển tia phun [2]. Tuy nhiên, các nghiên cứu bằng thực nghiệm thường rất tốn kém. Do vậy, hầu hết các công bố liên quan đến vấn đề này được thực hiện bằng tính toán lý thuyết hoặc sử dụng phần mềm mô phỏng chuyên dụng [7-10].

Kỹ thuật shadowgraph được thực hiện bằng cách hướng một chùm tia sáng (LED hoặc laser) song song qua đối tượng đo, bóng (shadow) của đối tượng được camera ghi lại trực tiếp hoặc gián tiếp. Khi ghi trực tiếp, camera được hướng đồng trục và ngược chiều với nguồn sáng. Việc ghi gián tiếp được thực hiện thông qua một màn hình hứng bóng của đối tượng đo. Phương án ghi trực tiếp được sử dụng phổ biến và được lựa chọn trong bài báo này. Kỹ thuật shadowgraph không thực hiện được khi môi trường xung quanh có cường độ ánh sáng mạnh [11, 12]. Lưu ý rằng, shadowgraph có thể được hiểu khác nhau trong các lĩnh vực khác nhau. Đối với đối tượng nghiên cứu là vòi phun chất lỏng, các công bố trên thế giới thường dùng các thuật ngữ phổ biến như shadowgraph / shadowgraphy / backlit illumination / back-light illumination cho kỹ thuật này [1, 2, 11, 12].

Khác với các kỹ thuật khác như schlieren, X-ray, X-ray phase contrast imaging, ... bản chất của kỹ thuật shadowgraph là chụp ảnh ngược sáng. Kỹ thuật này cho phép quan sát được cấu trúc của các giọt chất lỏng có kích thước nhỏ đến 5 μm [2, 12]. So với các kỹ thuật quang học khác, shadowgraph đơn giản và rẻ hơn. Nguồn sáng LED được lựa chọn sử dụng cũng dễ điều khiển và cung cấp nền sáng đồng đều hơn.

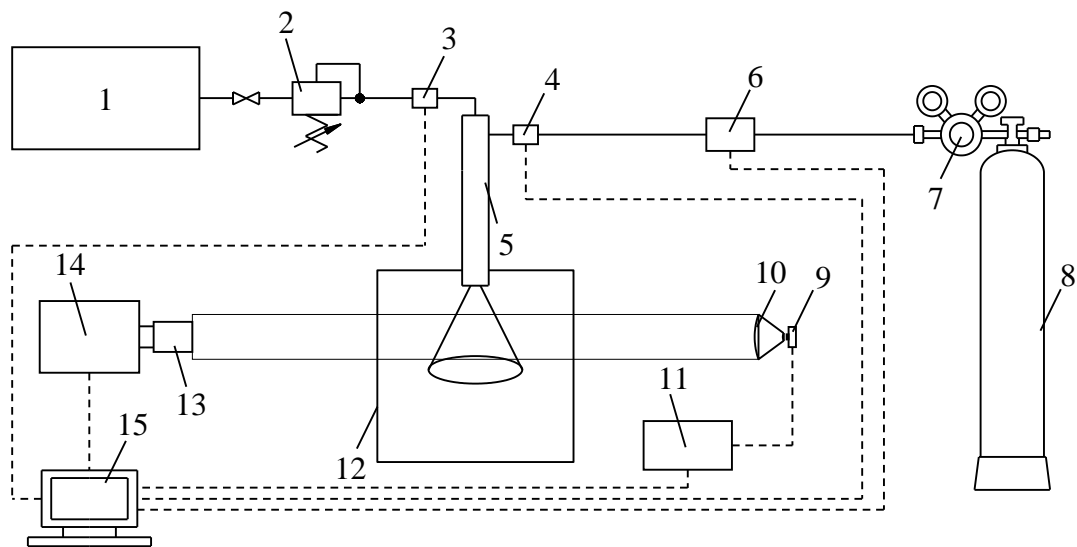
Một số hãng công nghệ hoặc tại các phòng thí nghiệm chuyên dùng được trang bị hệ thống đồng bộ nghiên cứu quá trình hình thành và phân rã tia phun bằng kỹ thuật shadowgraph [13-16]. Trang thiết bị trên các hệ thống này được đồng bộ nên cho độ chính xác cao. Tuy nhiên, giá thành của các hệ thống này thường rất đắt.

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng hệ thống thử nghiệm phục vụ nghiên cứu quá trình hình thành và phân rã tia phun nhiên liệu bằng kỹ thuật shadowgraph. Bài báo cũng đưa ra một số kết quả ban đầu thu được đối với vòi phun kiểu air-blast ly tâm. Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho việc thực hiện các nghiên cứu chuyên sâu bằng thực nghiệm về các quá trình hình thành, phân rã tia phun nhiên liệu và quá trình tạo hỗn hợp.

2. Xây dựng hệ thống thử nghiệm

2.1. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống thử nghiệm

Hệ thống thử nghiệm phục vụ nghiên cứu quá trình hình thành và phân rã tia phun bằng kỹ thuật shadowgraph bao gồm các bộ phận chính là: camera tốc độ cao và ống kính chuyên dụng có nhiệm vụ chụp lại hình ảnh của cấu trúc chùm tia phun theo các khung hình mong muốn; nguồn sáng và thiết bị cấp xung cho nguồn sáng có nhiệm vụ tạo ra chùm tia sáng có tần số và độ dài xung phù hợp chiếu qua chùm tia phun; máy tính có tốc độ xử lý cao để vận hành các hệ thống cũng như thu thập và xử lý số liệu thu được. Trong quá trình làm việc, camera và nguồn sáng phải được kết nối để đồng bộ tín hiệu. Ngoài ra, hệ thống thử nghiệm cũng có các thành phần khác như hệ thống cung cấp chất lỏng, hệ thống cung cấp không khí, bàn quang học và các giá đỡ điều chỉnh vòi phun, camera, nguồn sáng. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống thử nghiệm được trình bày như trên hình 1.

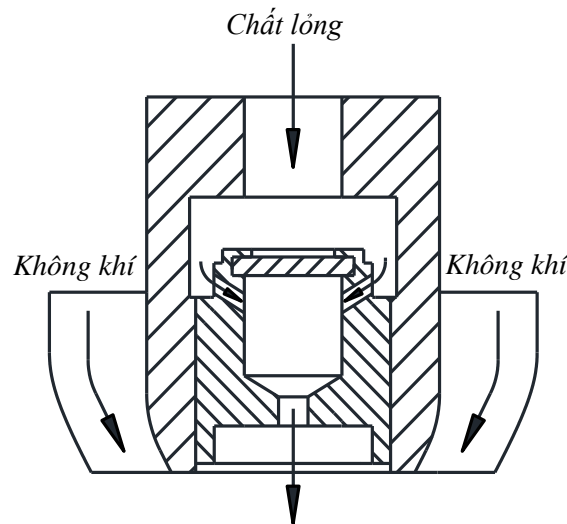


Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống thử nghiệm

1. Thùng chất lỏng; 2. Van điều chỉnh áp suất dòng chất lỏng; 3. Cảm biến áp suất dòng chất lỏng; 4. Cảm biến áp suất dòng không khí; 5. Vòi phun; 6. Van điều khiển áp suất dòng không khí; 7. Van giảm áp; 8. Bình khí nén; 9. Nguồn sáng LED; 10. Thấu kính; 11. Thiết bị cấp xung cho nguồn sáng; 12. Buồng phun; 13. Ống kính chuyên dụng; 14. Camera tốc độ cao; 15. Máy tính.

Vòi phun được sử dụng trong quá trình nghiên cứu là vòi phun kiểu air-blast ly tâm của động cơ hơi nước - ga lắp trên ngư lôi 53VA. Dòng chất lỏng trước khi phun ra khỏi lỗ vòi phun được tạo xoáy trong khoang tạo xoáy. Dòng không khí được thổi đồng trục với dòng nhiên liệu và tạo xoáy bởi bộ tạo xoáy. Tương tác giữa dòng chất khí với tốc độ

cao với dòng chất lỏng phun ra từ lỗ vòi phun với tốc độ thấp giúp quá trình phân rã tia phun thành các giọt chất lỏng có kích thước nhỏ. Quá trình làm việc thực tế của một vòi phun, chênh lệch áp suất trước và sau vòi phun và lưu lượng của dòng chất lỏng là 0,2 MPa và 0,2 lít/phút, của dòng không khí là 0,4 MPa và khoảng 2000 lít/phút (quy ra điều kiện tiêu chuẩn). Chất lỏng được sử dụng làm nhiên liệu là kerosene [17]. Nguyên lý làm việc của vòi phun được thể hiện như trên hình 2.



Hình 2. Nguyên lý làm việc của vòi phun kiểu air-blast ly tâm của động cơ hơi nước - ga lắp trên ngư lôi 53VA.

Nhằm khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố vận hành đến quá trình hình thành và phân rã tia phun, hệ thống thử nghiệm được xây dựng cần tạo ra và duy trì ổn định được các thông số bao gồm: áp suất của dòng chất lỏng từ 0 đến 0,6 MPa, lưu lượng của dòng chất lỏng từ 0 đến 0,5 lít/phút, áp suất của dòng không khí từ 0 đến 1 MPa, lưu lượng của dòng không khí quy về điều kiện tiêu chuẩn từ 0 đến 5000 lít/phút.

Để quan sát quá trình hình thành và phân rã của tia phun, nhóm nghiên cứu sử dụng camera tốc độ cao Photron FASTCAM Mini AX100 có tốc độ ghi lớn nhất là 212500 fps, độ phân giải lớn nhất là 1024 x 1024 pixels, kích thước của một pixel là 5 μm [18]. Nguồn sáng sử dụng là đèn LED Lightspeed HPLS-36DD18B có độ dài xung đơn từ 0,02 đến 2 μs , chu kỳ làm việc tối đa của xung là 3,3%. Sai lệch giữa tín hiệu đầu ra và xung điều khiển nguồn sáng là $\pm 0,015 \mu\text{s}$ [19].

2.2. Hệ thống cung cấp chất lỏng

Hệ thống cung cấp chất lỏng có nhiệm vụ lưu trữ, lọc sạch và cung cấp dòng chất lỏng đến vòi phun theo đúng các chế độ thử nghiệm. Thông số quan trọng nhất mà hệ

thống cung cấp chất lỏng cần đạt được là cung cấp và duy trì được một áp suất ổn định của dòng chất lỏng đến trước vòi phun. Nhóm nghiên cứu lựa chọn hệ thống cung cấp chất lỏng kiểu khí nén có áp suất đến 0,8 MPa để đẩy chất lỏng từ thùng chứa đến vòi phun. Trước khi được cấp đến vòi phun, dòng chất lỏng được đưa qua van điều chỉnh áp suất dạng màng nhằm duy trì áp suất ổn định tại các giá trị khác nhau. Áp suất của dòng chất lỏng ngay trước vòi phun được ghi nhận bằng cảm biến áp suất Sensys M5246-C3079E-010BG có dải đo từ 0 đến 1 MPa. Tín hiệu từ cảm biến này được thu nhận và xử lý bởi máy tính của hệ thống thử nghiệm.

2.3. Hệ thống cung cấp không khí

Hệ thống cung cấp không khí có nhiệm vụ lưu trữ và cung cấp không khí có áp suất cao đến vòi phun theo các chế độ thử nghiệm. Không khí được chứa trong các bình khí nén áp suất 15 MPa được giảm áp bởi van giảm áp trước khi cấp vào hệ thống. Để kiểm soát và duy trì áp suất ổn định của không khí trước khi cấp đến vòi phun, nhóm nghiên cứu sử dụng tín hiệu từ cảm biến áp suất Sensys M5246-C3079E-010BG và vòng lặp PID để điều khiển một van điều áp SMC IVT3050-214 có dải điều chỉnh từ 0 đến 1 MPa. Tín hiệu từ cảm biến áp suất được máy tính thu nhận và điều khiển độ mở của van điều áp.

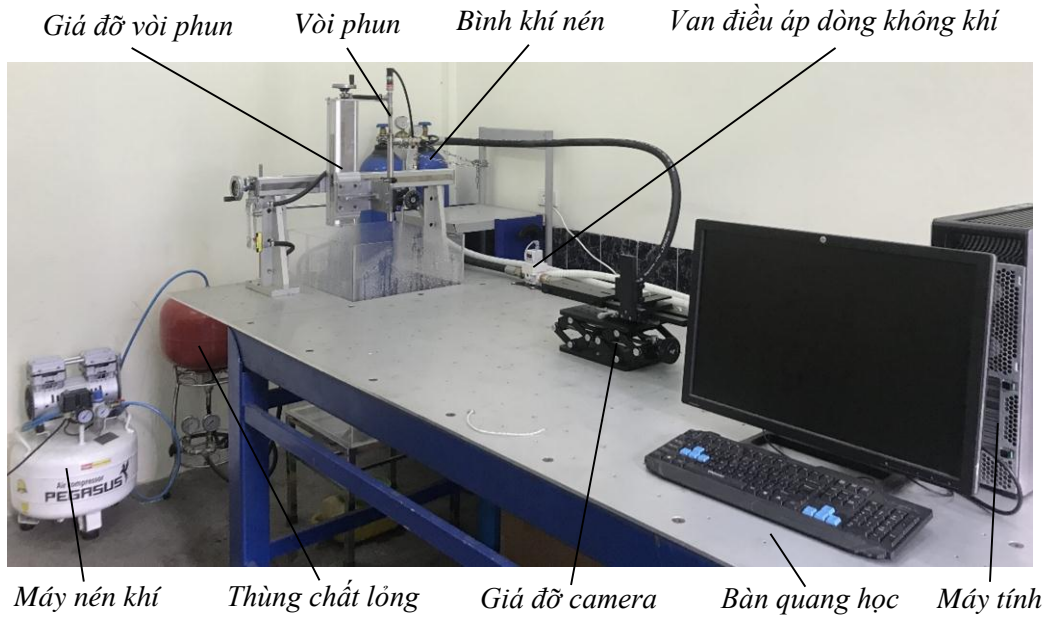
2.4. Các giá đỡ điều chỉnh vòi phun, camera và nguồn sáng

Các giá đỡ có nhiệm vụ gá lắp và cho phép điều chỉnh vòi phun, camera và nguồn sáng theo các vị trí khác nhau trong không gian. Các giá đỡ camera và nguồn sáng cho phép điều chỉnh nhằm thiết lập vị trí tương đối ban đầu giữa chúng sau đó cố định trong quá trình thử nghiệm. Giá đỡ camera sử dụng các cơ cấu kiểu ray trượt điều chỉnh bằng panme; phạm vi điều chỉnh theo 3 trục là 20 x 20 x 100 (mm); bước điều chỉnh là 0,01 mm. Giá đỡ nguồn sáng sử dụng cơ cấu kiểu thanh trượt; phạm vi điều chỉnh theo 3 trục là 200 x 400 x 300 (mm).

Giá đỡ vòi phun cho phép điều chỉnh vị trí nhằm cung cấp hình ảnh tại các vùng khác nhau của chùm tia phun. Để đáp ứng yêu cầu này, giá đỡ vòi phun được thiết kế để có thể gá lắp và điều chỉnh tịnh tiến vòi phun theo 3 phương trong không gian. Dựa vào các kết quả sơ bộ trong quá trình khảo sát chùm tia phun, nhóm nghiên cứu lựa chọn các cơ cấu kiểu vít me để chế tạo giá đỡ vòi phun. Phạm vi điều chỉnh theo 3 trục của giá đỡ là 100 x 400 x 300 (mm); bước điều chỉnh là 0,1 mm.

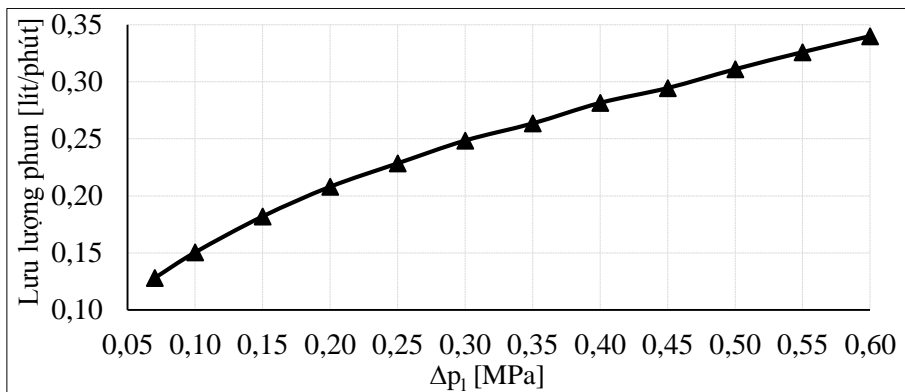
3. Một số kết quả sơ bộ và bàn luận

Hình ảnh bố trí các cụm chi tiết chính của hệ thống thử nghiệm được thể hiện như trên hình 3.



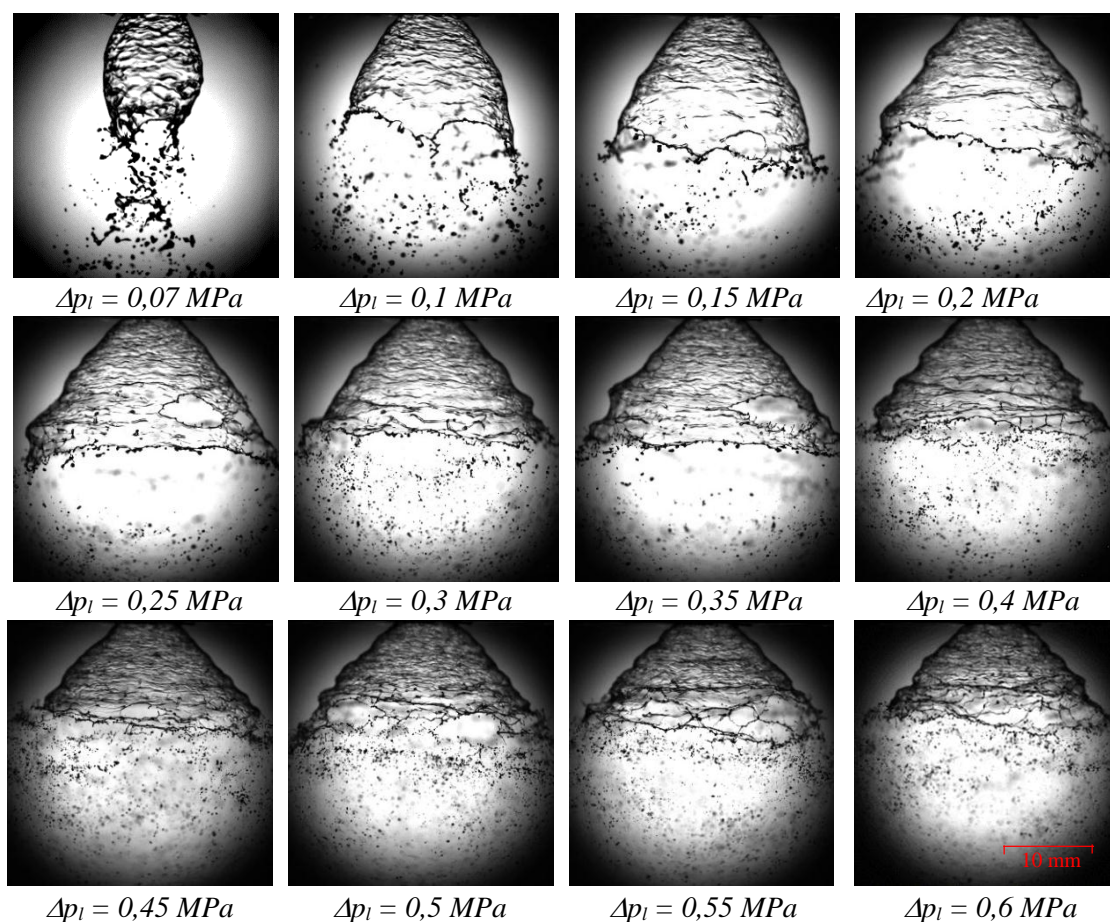
Hình 3. Hình ảnh bố trí các cụm chi tiết chính của hệ thống thử nghiệm.

Trong các nghiên cứu [20-22] đã chỉ ra rằng, do mật độ dày đặc của chất lỏng cũng như sự hình thành ngẫu nhiên của các khối chất lỏng tại vùng cận vòi phun nên để nghiên cứu cơ chế hình thành và phân rã tia phun tại khu vực này là rất khó và được quan tâm nhiều nhất. Trong phạm vi của nghiên cứu này, nhóm tác giả đưa ra một số kết quả sơ bộ về quá trình hình thành và phân rã tại vùng cận vòi phun. Để tách biệt nhằm đánh giá sự tương tác giữa các pha lỏng và khí, trong các kết quả sơ bộ này cũng chưa đưa ra tác động của dòng không khí đến quá trình hình thành và phân rã tia phun. Độ chênh lệch áp suất trước và sau vòi phun của dòng chất lỏng (Δp_1) lần lượt là 0,07; và các giá trị từ 0,1 đến 0,6 MPa với bước thay đổi 0,05 MPa. Khi độ chênh lệch áp suất trước và sau vòi phun của dòng chất lỏng nhỏ hơn 0,07 MPa, chùm tia phun được tạo ra là không ổn định. Chất lỏng được sử dụng là nước với các thuộc tính vật lý ở điều kiện môi trường như được trình bày trong [23].



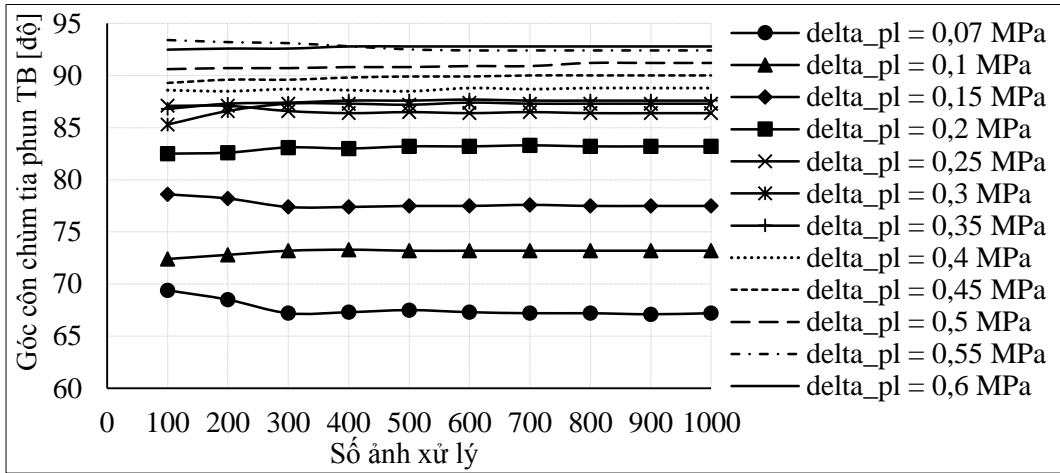
Hình 4. Lưu lượng phun theo độ chênh lệch áp suất của dòng chất lỏng trước và sau vòi phun.

Lưu lượng phun theo độ chênh lệch áp suất của dòng chất lỏng trước và sau vòi phun được thể hiện như trên hình 4. Kết quả thu được cho thấy, khi độ chênh lệch áp suất tăng thì lưu lượng dòng chất lỏng có xu hướng tăng theo. Tại chênh lệch áp suất 0,2 MPa cho lưu lượng của dòng chất lỏng tương đồng với điều kiện làm việc thực của vòi phun trên động cơ được cho trong [17].



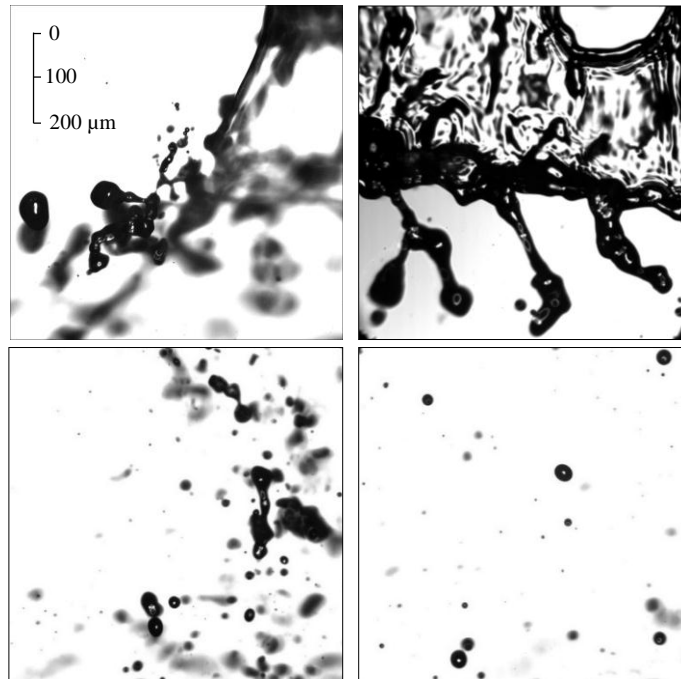
Hình 5. Hình ảnh chụp chùm tia phun khi thay đổi chênh lệch áp suất của dòng chất lỏng trước và sau vòi phun.

Hình ảnh chụp chùm tia phun khi thay đổi chênh lệch áp suất của dòng chất lỏng trước và sau vòi phun được thể hiện như trên hình 5. Quá trình chụp ảnh sử dụng ống kính có góc nhìn rộng và tốc độ chụp là 20000 fps. Tần số của nguồn sáng LED là 20000 Hz. Từ các hình ảnh thu được, sử dụng phần mềm phân tích hình ảnh ImageJ để xác định góc côn chùm tia phun trung bình. Số lượng ảnh được lựa chọn xử lý bằng phần mềm ImageJ nhằm đạt được độ hội tụ của góc côn chùm tia phun trung bình [24, 25]. Sai lệch của góc côn chùm tia phun trung bình đạt được giá trị nhỏ hơn $\pm 0,1$ độ khi số ảnh xử lý là 1000. Đồ thị diễn biến thay đổi của góc côn chùm tia phun trung bình theo số ảnh xử lý được thể hiện như trên hình 6.



Hình 6. Đồ thị diễn biến thay đổi của góc côn chùm tia phun trung bình theo số ảnh xử lý.

Kết quả khảo sát cho thấy, khi chênh lệch áp suất của dòng chất lỏng trước và sau vòi phun tăng thì góc côn chùm tia phun có xu hướng tăng. Điều này là do khi tăng chênh lệch áp suất trước và sau vòi phun sẽ làm tăng lưu lượng và hệ số xoáy của chất lỏng trong buồng tạo xoáy dẫn đến gia tăng động năng và góc côn của chùm tia phun. Tuy nhiên, mức độ gia tăng của góc côn chùm tia phun không tuyến tính với mức gia tăng của chênh lệch áp suất trước và sau vòi phun. Khi chênh lệch áp suất trước và sau vòi phun của dòng chất lỏng lớn hơn 0,25 MPa, góc côn chùm tia phun có xu hướng ổn định và có mức gia tăng ít hơn.



Hình 7. Một số hình ảnh chụp quá trình hình thành và phân rã tia phun tại vùng cận vòi phun.

Khi sử dụng ống kính chuyên dụng với góc nhìn hẹp, cùng với sự dịch chuyển tại các vị trí khác nhau của vòi phun trên giá điều chỉnh, cho phép chụp được quá trình hình thành và phân rã tại vùng cận vòi phun. Kết quả chụp quá trình hình thành và phân rã của tia phun tại vùng cận vòi phun với tốc độ chụp của camera là 10000 fps và tần số phát xung của nguồn sáng là 10000 Hz được thể hiện như trên hình 7.

Các hình ảnh chụp quá trình phân rã tại vùng cận vòi phun cho thấy sự hình thành của các khối chất lỏng ngẫu nhiên có thể dạng màng, sợi và giọt. Sau đó các khối chất lỏng này tiếp tục được phân rã thành các khối có kích thước nhỏ hơn. Với sự kết hợp của camera tốc độ cao cùng với ống kính và nguồn sáng chuyên dụng, khả năng quan sát và định lượng kích thước, các thông số động học, động lực học của các khối chất lỏng hình thành trong vùng cận vòi phun là hoàn toàn có thể. Điều này mở ra cơ hội để đánh giá tính chính xác của các mô hình mất ổn định của tia phun Rayleigh-Taylor và Kelvin-Helmholtz khi chỉ xem các khối chất lỏng hình thành trong quá trình phân rã có dạng khối cầu.

4. Kết luận và hướng phát triển

Hệ thống thử nghiệm xây dựng được đáp ứng được các yêu cầu đã đặt ra và có thể phục vụ cho các nghiên cứu quá trình hình thành và phân rã tia phun bằng kỹ thuật shadowgraph. Các thông số làm việc của hệ thống được xác định và duy trì tốt, cho phép khảo sát sự làm việc của vòi phun tại các chế độ vận hành khác nhau hoặc khi thay đổi các kết cấu của vòi phun.

Khi tăng độ chênh áp trước và sau vòi phun thì lưu lượng dòng chất lỏng và góc côn chùm tia phun có xu hướng tăng. Tuy nhiên, mức độ gia tăng của lưu lượng dòng chất lỏng và góc côn chùm tia phun không tuyến tính với mức gia tăng của chênh lệch áp suất trước và sau vòi phun. Khi chênh lệch áp suất trước và sau vòi phun của dòng chất lỏng lớn hơn 0,25 MPa, góc côn chùm tia phun có xu hướng ổn định và có mức gia tăng ít hơn.

Khác với các mô hình mất ổn định tia phun của Rayleigh-Taylor và Kelvin-Helmholtz, chỉ xem các khối chất lỏng hình thành trong quá trình phân rã có dạng khối cầu, các hình ảnh chụp quá trình phân rã tại vùng cận vòi phun cho thấy sự hình thành của các khối chất lỏng ngẫu nhiên dạng màng, sợi và giọt. Sau đó, các khối chất lỏng này tiếp tục được phân rã thành các khối có kích thước nhỏ hơn. Với hệ thống thử nghiệm đã xây dựng được cho phép nhóm tác giả thực hiện được các nghiên cứu chuyên sâu nhằm đưa ra cơ chế và xây dựng các mô hình tính toán phù hợp hơn cho quá trình hình thành và phân rã tia phun tại vùng cận vòi phun.

Tài liệu tham khảo

- [1] Arthur H. Lefebvre, Vincent G. McDonell, *Atomization and Sprays*, Second Edition, CRC Press, 2017.

- [2] Pham Xuan Phuong, “Influences of Molecular Profiles of Biodiesels on Atomization, Combustion and Emission Characteristics”, Ph.D. Thesis, The University of Sydney, 2014.
- [3] Pham Xuan Phuong, Nguyen Trung Kien, Pham Van Thin, Nguyen Quoc Quan, Hoang Huy Toan, and Phung Van Duoc, “Retrofitting an Experimental System for Examining Mechanical Diesel Injection Systems”, *Journal of Science and Technique*, Le Quy Don Technical University, No. 209, 2020.
- [4] Dong T. Hoang, Duoc V. Phung, Nam V. T. Pham, and Phuong X. Pham, “Spray Evolution of a Mechanical Diesel Injector”, *Vietnam Mechanical Engineering Journal*, No. 4, 2021.
- [5] Nguyễn Hoàng Vũ, “Nghiên cứu ảnh hưởng một số thông số điều chỉnh của quy luật cung cấp nhiên liệu đến các chỉ tiêu kinh tế năng lượng và mức độ độc hại khí thải động cơ diesel”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, 2005.
- [6] Phạm Hồng Sơn, “Nghiên cứu cải tiến quy luật cung cấp nhiên liệu cho động cơ diesel khi cường hóa bằng tăng áp”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, 2014.
- [7] Hoàng Huy Toàn, Phùng Văn Đước, Nguyễn Trung Kiên, Phạm Văn Thìn, Phạm Xuân Phương, “Ảnh hưởng của thông số kết cấu của các chi tiết hệ thống nhiên liệu diesel kiểu Bosch đến đặc tính phun”, *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số 1+2, 2020.
- [8] Nguyễn Công Lý, Phan Đắc Yên, Nguyễn Trung Kiên, Nguyễn Hoàng Vũ, “Tính toán mô phỏng hệ thống phun nhiên liệu của động cơ diesel B2 bằng phần mềm Inject32”, *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật*, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, số 148, 2012.
- [9] Phùng Văn Đước, Nguyễn Hoàng Vũ, Trần Thị Tuyết, “Khảo sát ảnh hưởng của độ nhớt, tỷ trọng nhiên liệu đến quá trình hình thành và phát triển của tia phun trong buồng cháy động cơ diesel”, *Hội nghị quốc tế Khoa học công nghệ Hàng hải 2016*, 2016.
- [10] Hà Quang Minh, Xây dựng mô hình và tính toán quy luật cung cấp nhiên liệu của một số loại động cơ diesel điển hình dùng trên phương tiện cơ giới quân sự, Đề tài cấp cơ sở Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, 2012.
- [11] Mark Linne, “Imaging in the optically dense regions of a spray: A review of developing techniques. Progress in Energy and Combustion”, *Science*, 39, 403-440, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.06.001>
- [12] Gary S. Settles, Michael J. Hargather, “A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques”, *Measurement Science and Technology*, 28 (2017) 042001 (25pp), 2017.
- [13] <https://www.lavision.de/en/applications/sprays/index.php>
- [14] <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/spray-and-particle/shadow-sizing/>
- [15] <https://www.oxfordlasers.com/laser-imaging/fuel-sprays>
- [16] <http://www.controlvisioninc.com/products/thermalsprayspraycam.html>
- [17] *Инструкция по эксплуатации и текущему ремонту боевой торпеды 53VA.*
- [18] *FASTCAM Mini AX, Photron Technical Datasheet.*
- [19] *The DRAGON series High Power LED Light Sources, Lightspeed Technologies.*

- [20] H.M. Gad, E.A. Baraya, T.M. Farag, I.A. Ibrahim, “Effect of Geometric Parameters on Spray Characteristics of Air Assisted Pressure Swirl Atomizer”, *Alexandria Eng. J.*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.010>
- [21] Imtiaz Qavi, Lulin Jiang, Oladapo S. Akinyemi, “Near-field Spray Characterization of a High-Viscosity Alternative Jet Fuel Blend C-3 Using a Flow Blurring Injector”, *Fuel*, 293, 2021, 120350. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120350>
- [22] Charalampous G, Hardalupas Y, Taylor A., “Novel Techniques for Measurements of the Continuous Liquid Jet Core in an Atomizer”, *AIAA Journal*, 47(11), 2605-15, 2009. <https://doi.org/10.2514/1.40038>
- [23] Boyd, C.E., “Physical Properties of Water”, In: *Water Quality*, Springer, Cham, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17446-4_1
- [24] Vu Thanh Nam Pham, Xuan Phuong Pham, Trung Kien Nguyen, Nguyen Cuong Le, The Vu Bui, Van Huan Truong, “An Image Processing Approach for Determining the Spray Cone Angle of a Pressure Swirl Injector Equipped in a Gas-Turbine Engine”, *Journal of Science and Technique*, Vol. 16 No. 02, 2021.
- [25] Irene Ruiz-Rodriguez, Radboud Pos, Thanos Megaritis, Lionel Christopher Ganippa, “Investigation of Spray Angle Measurement Techniques”, *IEEE Access*, Vol. 7, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2899214

DEVELOPING A SHADOWGRAPH EXPERIMENT SYSTEM FOR CHARACTERIZING SPRAY ATOMIZATION

Abstract: *The development of modern imaging techniques plays an important role in studying fuel spray atomization. Shadowgraph combines camera, lens and light sources to experimentally determine micro parameters (droplet size, droplet size distribution, velocity of droplets) and macro parameters (cone angle, breakup length, penetration) of spray structure. To achieve high quality, shadowgraph systems need to be carefully validated to ensure reliability and capability of working under various operating conditions. This article develops an experiment system for characterizing spray atomization by shadowgraph imaging technique. A preliminary study on an air-blast atomizer is also provided.*

Keywords: Injection; spray atomization; high speed imaging; air-blast; shadowgraph.

Nhận bài: 09/05/2022; Hoàn thiện sau phản biện: 28/07/2022; Chấp nhận đăng: 16/09/2022

