

ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG ĐÁP ỨNG CỦA VÒI PHUN COMMONRAIL KIỂU ĐIỆN TỪ CRI2.2 KHI ÁP DỤNG KỸ THUẬT PHUN CHÍNH HAI GIAI ĐOẠN

EVALUATING THE RESPONSIVENESS OF THE SOLENOID-TYPE COMMON RAIL INJECTOR CRI2.2 WHEN APPLYING THE TWO-STAGE MAIN INJECTION TECHNIQUE

Nguyễn Hoàng Vũ^{1,*}, Nguyễn Xuân Đạt²

¹Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

²Trường Đại học Trần Quốc Tuấn

TÓM TẮT

Kỹ thuật phun chính hai giai đoạn (PC2GD) là một trong những kỹ thuật phun hiện đại đang được quan tâm nghiên cứu. Việc sử dụng kỹ thuật phun này, phụ thuộc trước hết vào khả năng đáp ứng của vòi phun (khả năng thực hiện được nhiều lần phun trong giai đoạn phun chính với thời gian dừng giữa các lần phun là nhỏ). Vòi phun Commonrail (CR) kiểu điện từ (CRI2.2) được dùng trên động cơ diesel Hyundai 2.5 TCI-A (4 kỳ, 4 xi-lanh, sử dụng hệ thống phun nhiên liệu kiểu CR, chưa áp dụng kỹ thuật PC2GD). Bài báo này nghiên cứu khả năng đáp ứng của vòi phun CRI2.2 khi sử dụng kỹ thuật PC2GD dựa vào kết quả đo thực nghiệm quy luật cung cấp nhiên liệu (QLCCNL) cho vòi phun này trên bộ thử UniPg STS tại Phòng thí nghiệm SprayLab, Khoa Kỹ thuật, Đại học Perugia, Italia. Kết quả nghiên cứu cho thấy, vòi phun CRI2.2 đủ điều kiện để áp dụng kỹ thuật PC2GD trong vùng tốc độ cao (3500 vg/ph) và tải cao (100% tải) của động cơ, với lượng phun cho một chu trình công tác (CTCT) là tương đương khi dùng trên động cơ nguyên thủy.

Từ khóa: Vòi phun Commonrail kiểu điện từ; Phun chính hai giai đoạn; Thời gian dừng.

ABSTRACT

The Two-stage Main Injection (MI-2) technique has garnered significant interest in recent years. Its application relies heavily on the nozzle's capability to perform two injections during the main injection phase, with very minimal dwell time between injections. The solenoid-type Commonrail (CR) injector (CRI2.2) is utilized in the Hyundai D4CB 2.5 TCI-A diesel engine, which is a 4-stroke, 4-cylinder engine employing a CR injection system but not yet incorporating the MI-2 technique. This study focuses on assessing the response capability of the CRI2.2 injector when employing the MI-2 technique, based on experimental data regarding fuel delivery characteristics on the UniPg STS test bench at the SprayLab, Faculty of Engineering, University of Perugia, Italy. The research findings demonstrate that the CRI2.2 injector can perform well when applying the MI-2 technique at high engine speeds and 100% load, with the amount of fuel injected per working cycle equivalent to that of the original engine setup.

Keywords: Commonrail solenoid injector; Splits main-injection; Dwell time.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

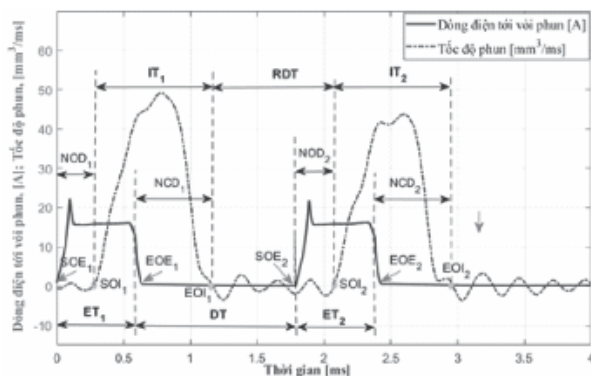
Trong hệ thống phun nhiên liệu (HTPNL) diesel kiểu CR, vòi phun cho phép cấp nhiên liệu vào xi-lanh với độ chính xác cao, linh hoạt theo chế độ vận hành mà không phụ thuộc vào tốc độ động cơ, [1], [2], [3], từ đó cho phép ứng dụng các kỹ thuật phun (KTP) tiên tiến. Hiện nay, KTP nhiều giai đoạn được áp dụng rộng rãi trên động cơ diesel hiện đại do có khả năng giảm ô nhiễm khí thải, giảm tiếng ồn, cải thiện hiệu suất làm việc của động cơ, [4], [5]. Ngoài kỹ thuật phun môi (Pilot injection, 1 đến 2 lần) trước giai đoạn phun chính (Main Injection – MI), phun bổ sung sau giai đoạn phun chính (Post Injection, 1 đến 2 lần), đã khá phổ cập với HTPNL kiểu CR, một số nghiên cứu gần đây [4], [6], [7], [8] đã đánh giá khả năng, lợi ích của việc tách giai đoạn phun chính (Main Injection) thành hai lần phun sát nhau (PC2GD), với kết quả đạt được là khả năng giảm ô nhiễm PM và tiếng ồn cháy, cải thiện mức tiêu thụ nhiên liệu.

Có hai loại vòi phun đang được sử dụng phổ biến trong HTPNL diesel kiểu CR là vòi phun kiểu áp điện (piezo) và vòi phun kiểu điện từ (solenoid), trong đó, vòi phun CR kiểu điện từ được sử dụng phổ biến trên các động cơ diesel điều khiển điện tử, [9], [10], [13]. Khi động cơ làm việc, ECU sẽ gửi tín hiệu xung điện để điều khiển sự đóng, mở vòi phun theo yêu cầu của KTP. Khoảng thời gian từ lúc bắt đầu cấp điện đến khi ngắt điện của ECU, được gọi là thời gian cấp điện ET (Energizing Time). Khoảng thời gian từ lúc nhiên liệu bắt đầu được phun ra đến khi kết thúc phun của lần phun tương ứng được gọi là thời gian phun IT (Injection time). Khi vòi phun nhận được tín hiệu điện, nhiên liệu chưa được phun ra ngay mà nó có một độ trễ nhất định, độ trễ này được gọi là độ trễ mở của vòi phun NOD (Nozzle opening delay), được tính từ khi ECU cấp điện cho vòi phun đến khi nhiên liệu bắt đầu được phun ra từ lỗ

phun. Tương tự, khi ngắt dòng điện điều khiển vòi phun, nhiên liệu cũng không dừng phun ngay mà có một độ trễ nhất định, được gọi là độ trễ đóng của vòi phun NCD (Nozzle closing delay). NOD chịu ảnh hưởng bởi đặc tính điện từ của cuộn cảm, thông số kết cấu của vòi phun, trong khi NCD phụ thuộc vào đặc tính động lực của vòi phun, [3, 10, 11]. Do đó, NOD có giá trị không đổi trong các chế độ khảo sát còn NCD thay đổi phụ thuộc vào thời gian cấp điện ET (Energizing Time), áp suất phun (prail) và NCD thường lớn hơn NOD. Mối quan hệ giữa thời gian phun IT (Injection Time) và ET, NOD, NCD được xác định theo công thức: $IT = ET + NCD - NOD$.

Đối với vòi phun CR kiểu điện từ, khi áp dụng KTP nhiều giai đoạn cần phải quan tâm nhiều hơn đến NOD và NCD của vòi phun, [3], [11]. Khi tốc độ động cơ càng cao thì thời gian phun tính theo thời gian thực càng ngắn, do đó, việc áp dụng KTP nhiều giai đoạn sẽ khó khăn và phụ thuộc nhiều vào khả năng đáp ứng của vòi phun. Khi xét với kỹ thuật PC2GD, khả năng đáp ứng của vòi phun có thể hiểu là thời gian dừng nhỏ nhất giữa hai xung điện điều khiển có thể đạt được của vòi phun, sao cho hai đường diễn biến tốc độ phun không chồng lấn nhau [10]. Hiện tượng chồng lấn nhau xảy ra khi kim phun chưa hạ xuống hết trong lần phun thứ nhất thì đã tiếp tục bị nâng lên trong lần phun thứ hai. Hiện tượng này ảnh hưởng xấu đến QLCCNL (lượng phun và tổng thời gian phun). Đặc trưng về kỹ thuật PC2GD được thể hiện trên Hình 1, trong đó: SOE – Thời điểm bắt đầu cấp điện (Start Of Energizing); ET – Thời gian cấp điện; DT – Thời gian dừng giữa hai lần cấp điện (Dwell Time); SOI – Thời điểm bắt đầu phun (Start of injection); IT – Thời gian phun; RDT – Thời gian dừng giữa hai lần phun (Realized Dwell Time); Các chỉ số 1 tương ứng với lần phun chính thứ nhất, chỉ số 2 tương ứng với lần phun chính thứ hai.





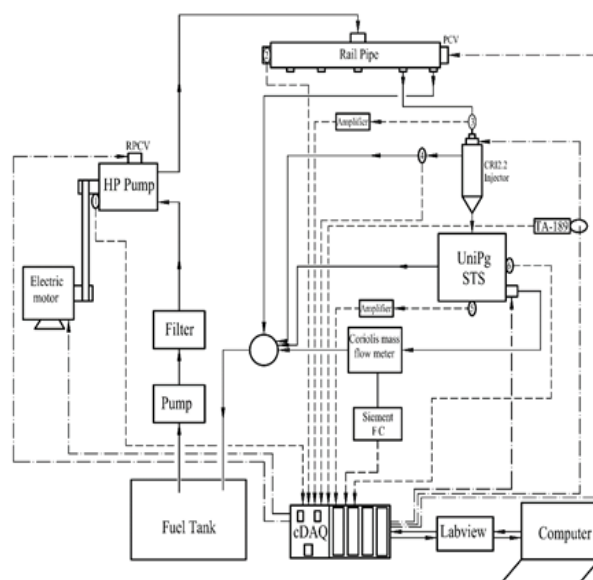
Hình 1. Đặc trưng của kỹ thuật phun chính hai giai đoạn, [12]

Vòi phun CRI2.2 sử dụng trên động cơ D4CB 2.5 TCI-A (xe Hyundai Starex 2018) là vòi phun kiểu điện từ, 8 lỗ phun, áp suất phun lớn nhất là 1600 bar, có khả năng thực hiện tối đa 5 lần phun trong một CTCT (bao gồm hai lần phun môi, một lần phun chính, một lần phun muộn và một lần phun bổ sung) với thời gian dừng tối thiểu giữa hai lần cấp điện DT_{min} là 0,8 ms, [13]. Động cơ D4CB 2.5 TCI-A nguyên thủy chưa áp dụng kỹ thuật PC2GD, [13], do đó khi muốn chuyển sang áp dụng kỹ thuật PC2GD cần phải đánh giá khả năng đáp ứng của vòi phun. Bài báo trình bày kết quả đánh giá khả năng đáp ứng của vòi phun CRI2.2, khi sử dụng kỹ thuật PC2GD dựa trên kết quả đo thực nghiệm trên bộ thử UniPg-STS, [3], tại Phòng thí nghiệm SprayLab, Khoa Kỹ thuật, Đại học Perugia, Italia; tại chế độ tải cao (100% tải) và tốc độ cao ($n = 3500$ vg/ph).

2. TRANG THIẾT BỊ VÀ CHẾ ĐỘ THỬ NGHIỆM

Thử nghiệm đánh giá khả năng đáp ứng kỹ thuật PC2GD của vòi phun CRI2.2 được tiến hành trên bộ thử UniPg-STS với sơ đồ bố trí trang thiết bị như trên Hình 2. Diễn biến tốc độ phun của vòi phun được xác định theo phương pháp Zeuch, [1], [3]. Trong đó, lưu lượng thể

tích phun được đo thông qua việc xác định sự gia tăng áp suất gây ra bởi mỗi lần phun trong một thể tích kín. Sự gia tăng áp suất phun (Δp) trong buồng đo tỷ lệ thuận với thể tích phun nhiên liệu phun (ΔV) và chúng được dùng để tính toán xác định tốc độ phun IR (Injection Rate) theo thể tích. Nguyên lý hoạt động, thông số kỹ thuật của thiết bị thử nghiệm có thể tham khảo tại các công trình khoa học đã công bố, [1], [3], [10], [12], [14].



Hình 2. Trang thiết bị thực nghiệm đánh giá khả năng đáp ứng của vòi phun CRI2.2 khi áp dụng kỹ thuật PC2GD, [1, 3, 14]:

HP Pump – Bơm cao áp; Fuel Tank – Thùng nhiên liệu; CRI2.2 – Vòi phun CRI2.2; UniPg-STS – Thiết bị nghiên cứu vòi phun CR theo phương pháp Zeuch; Coriolis Mass Flow Meter – Cảm biến lưu lượng khối lượng chất lỏng (nhiên liệu); Siement FC – Thiết bị chuyển đổi tín hiệu; cDAQ – Bộ thu thập, phân tích, xử lý tín hiệu và điều khiển; Labview – Phần mềm điều khiển được viết trong Labview; RPCV – Van điều chỉnh lưu lượng; PCV – Van điều chỉnh áp suất; Amplifier – Bộ khuếch đại tín hiệu; 1 – Encoder; 2,3,5 – Cảm biến áp suất; 4 – Cảm biến nhiệt độ và áp suất nhiên liệu hồi; 6 – Cảm biến nhiệt độ; TA189 – Ampe kìm.

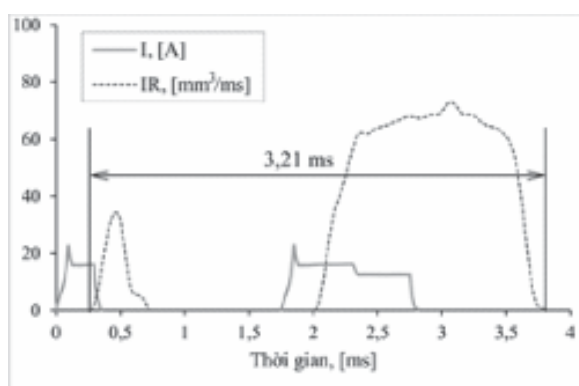
Từ dữ liệu thực nghiệm đo quy luật xung điện điều khiển vòi phun của động cơ D4CB 2.5 TCI-A ở các chế độ vận hành theo góc quay trục khuỷu (GQTK), được xác định trên bộ thử động cơ, [13], [15], [16], khi chuyển đổi thành dữ liệu phun theo thời gian thực (ms), ta thu được kết quả như trong Bảng 1. Kết hợp với kết quả thực nghiệm đo đặc tính vòi phun

CRI2.2 trên bộ thử UniPgSTS, ta xác định được thời gian cấp nhiên liệu lớn nhất có thể ở vùng tải cao, tốc độ cao của động cơ D4CB 2.5 TCI-A. Trên cơ sở đó, tiến hành khảo sát khả năng đáp ứng của vòi phun CRI2.2 ứng với bộ số liệu (về lượng phun, V_0 , mm³; áp suất phun, p_{Rail} , bar) của động cơ D4CB 2.5 TCI-A ở chế độ 100% tải và tốc độ $n = 3500$ vg/ph.

Bảng 1. Quy luật xung điện điều khiển vòi phun ở chế độ 100% tải và tốc độ cao, [13]

n, vg/ph	p_{rail} , bar	V_0 , mm ³	SOI, (ET), °GQTK			SOI, (ET), ms		
			Pilot ₁	Pilot ₁	MI	Pilot ₁	Pilot ₁	MI
2500	1500	97,2	-52,0 (4,2)	-29,5 (4,2)	-7,0 (14,9)	0 (0,28)	1,5 (0,28)	3 (0,99)
3000	1600	93,3		-43,0 (5,3)	-11,5 (17,6)		0 (0,29)	1,75 (0,98)
3500	1600	83,8			-15,0 (20,0)			0 (0,95)

Kết quả đo thời gian cấp nhiên liệu của vòi phun CRI2.2, trên bộ thử UniPg STS, ứng với độ rộng xung điện điều khiển vòi phun khi động cơ vận hành ở chế độ 100% tải, $n = 3000$ vg/ph được trình bày trên Hình 3 (I là cường độ dòng điều khiển vòi phun, A). Ta thấy, thời gian cấp nhiên liệu (tính từ thời điểm bắt đầu phun mỗi đến khi kết thúc giai đoạn phun chính) là 3,21 ms, tương ứng với 67,5°GQTK.



Hình 3. Thời gian cấp nhiên liệu (theo thời gian thực) ở 100% tải, $n = 3000$ vg/ph, [13]

Tổng hợp kết quả đã công bố về chế độ phun trong một số công trình nghiên cứu, [8], [17], [18], [19] về kỹ thuật PC2GD, ứng với các chế độ phun khác nhau (thể hiện qua tỷ lệ % thể tích nhiên liệu giữa hai lần phun chính: 50/50, 75/25, 70/30) được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả đã công bố về chế độ phun khi dùng kỹ thuật PC2GD, [8], [17], [18], [19]

Công trình nghiên cứu	Tỷ lệ phun	Chế độ phun °GQTK				Thời gian cấp nhiên liệu, °GQTK
		Thể tích phun, mm ³	SOI ₁ , °GQTK	SOI ₂ , °GQTK	RDT, °GQTK	
Công trình [17]	50/50	-	-23	0; 3; 6	-	58 ÷ 64
Công trình [18]	50/50	12,5	-30 ÷ -51	-15	-	49 ÷ 70
Công trình [8]	75/25	-	-12	15 ÷ 40	5 ÷ 30	41 ÷ 66
Công trình [19]	50/50; 70/30	80	-9	12 ÷ 27	-	45 ÷ 60

Bảng 3. Chế độ thực nghiệm đánh giá khả năng đáp ứng của vòi phun CRI2.2 khi PC2GD

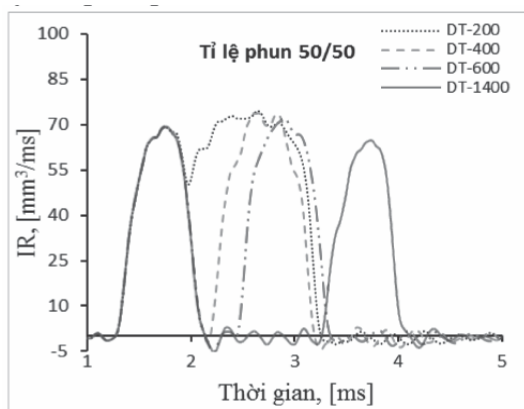
Chế độ khảo sát (tỷ lệ thể tích phun)	Thể tích phun V ₀ , mm ³	Thể tích phun tính toán V ₁ /V ₂ , mm ³	Theo thời gian cấp điện tính toán ET ₁ /ET ₂ , ms	DT, [ms]
30/70	83,8	25,1 / 58,7	0,51 / 0,80	9 bước (0,2 ÷ 1,8)
50/50	83,8	41,9 / 41,9	0,66 / 0,66	
70/30	83,8	58,7 / 25,1	0,80 / 0,51	

Theo dữ liệu trong Bảng 2, các công trình nghiên cứu về PC2GD đều có thời gian cấp nhiên liệu lớn nhất trong khoảng từ 60 ÷ 70°GQTK, giá trị này cũng tương đồng với thời gian cấp nhiên liệu của động cơ D4CB 2.5 TCI-A khi phun hai giai đoạn (phun môi và phun chính) là 67,5°GQTK. Do đó, trong bài báo, khả năng đáp ứng của vòi phun CRI2.2 được khảo sát trong thời gian cấp nhiên liệu là 67,5°GQTK, tại $n = 3500$ vg/ph, với tổng lượng phun $V_0 = 83,8$ mm³, $p_{\text{rail}} = 1600$ bar (tương ứng với thời gian cấp nhiên liệu theo thời gian thực là 3,21 ms). Do ảnh hưởng của hiện tượng dao động và truyền sóng áp suất, diễn biến quá trình phun lần phun 2 sẽ chịu sự tác động của quá trình phun thứ nhất. Vì vậy, để đánh giá đầy đủ khả năng đáp ứng của vòi phun CRI2.2 khi PC2GD, ba chế độ khảo sát được lựa chọn, tương ứng với tỷ lệ thể tích phun V_1/V_2 (với $V_1 + V_2 = V_0$) lần lượt là 50/50; 70/30 và 30/70 (Bảng 3).

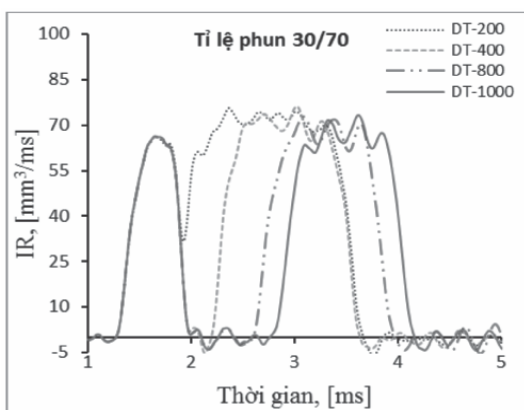
3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

Kết quả so sánh, đánh giá ảnh hưởng của DT (ứng với các giá trị 200, 400, 600, 1200 ms) đến diễn biến tốc độ phun IR khi áp dụng PC2GD được thể hiện trên Hình 4. Hình 4 chỉ biểu diễn 04 đường diễn biến tốc độ phun IR, đại diện cho các trường hợp: khi IR chồng lấn, khi IR vừa tách biệt, khi IR trong khoảng và khi IR ở sát giới hạn phạm vi cung cấp nhiên liệu. Hình 4a cho thấy, với tỉ lệ phun 50/50, hai đường diễn biến tốc độ phun IR tách biệt hoàn toàn khi $DT \geq 0,4$ ms và có sự chồng lấn lên nhau khi $DT < 0,4$ ms, do đó với chế độ này có thể coi $DT_{\text{min}} = 0,4$ ms. Giãn cách lớn nhất giữa hai lần phun có thể đạt được là 3,21 ms ứng với $DT = 1,4$ ms, do đó với chế độ này có thể coi $DT_{\text{max}} = 1,4$ ms. Với tỉ lệ phun 30/70 (Hình 4b), tương tự ta có $DT_{\text{min}} = 0,4$ ms và $DT_{\text{max}} =$

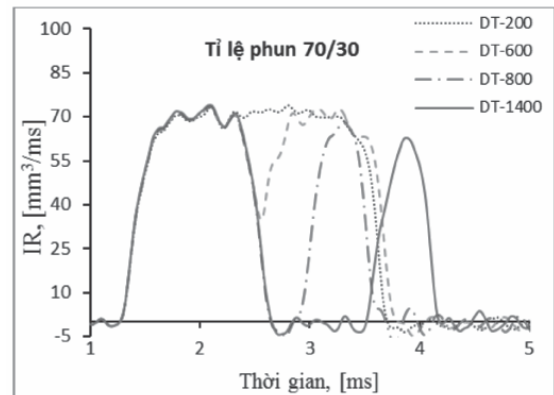
1,0 ms. Với tỉ lệ 70/30 (Hình 4c), các giá trị tương ứng là $DT_{\min} = 0,8$ ms và $DT_{\max} = 1,4$ ms. Kết quả khảo sát với ba chế độ cho thấy, trong giới hạn thời gian cấp nhiên liệu là 3,21 ms (so với giá trị DT tối thiểu của vòi phun CRI2.2 theo hãng sản xuất là 0,8 ms) thì giá trị $DT_{\min}$ (để đảm bảo hai đường IR không chồng lấn lên nhau) đều nhỏ hơn 0,8 ms và $DT_{\max}$ đạt được đều lớn hơn 0,8 ms. Điều này chứng tỏ vòi phun CRI2.2 có thể thực hiện được kỹ thuật PC2GD, với thời gian dừng nhất định, đối với vùng tải cao, tốc độ cao của động cơ D4CB 2.5 TCI-A. Tổng hợp kết quả so sánh thể tích phun tính toán (từ giá trị ET) và đo thực nghiệm (trên bộ thử UniPg-STS) khi áp dụng PC2GD với ba chế độ khảo sát được trình bày trong Bảng 4.



a)



b)



c)

Hình 4. Khả năng đáp ứng của vòi phun CRI2.2 với kỹ thuật PC2GD tại chế độ 100% tải, $n = 3500$ vg/ph, ứng với các tỷ lệ phun khảo sát là 50/50, 30/70 và 70/30

Theo dữ liệu trên Hình 4, trong phạm vi từ $DT_{\min}$ đến $DT_{\max}$, đường diễn biến IR lần phun 2 có xu hướng dao động, vì vậy ảnh hưởng đến thể tích phun lần 2. Do đó, tổng thể tích phun thực nghiệm thu được khi dùng kỹ thuật PC2GD sẽ dao động xung quanh giá trị tổng thể tích phun tính toán ban đầu ($V_0 = 83,8$ mm³). Do vậy, khi thực hiện kỹ thuật PC2GD, cần lựa chọn giá trị DT nằm trong phạm vi thời gian cấp nhiên liệu phù hợp của động cơ, sao cho các đường IR không chồng lấn lên nhau và đồng thời đảm bảo sai số về tổng thể tích phun giữa tính toán và thực nghiệm không quá lớn ($< 5\%$) (Bảng 4). Kết quả khảo sát thực nghiệm cũng cho thấy, với tỉ lệ phun 30/70 có thể ứng dụng kỹ thuật PC2GD với DT thay đổi trong khoảng từ 0,4 ms đến 1,4 ms; còn với tỉ lệ phun 50/50 và 70/30, giá trị DT có thể thay đổi trong khoảng từ 0,8 ms đến 1,4 ms.



Bảng 4. So sánh thể tích phun tính toán và đo thực nghiệm khi áp dụng PC2GD với ba chế độ khảo sát

DT, ms	V ₀ tính toán, mm ³	Tỷ lệ 30/70		Tỷ lệ 50/50		Tỷ lệ 70/30	
		V ₀ đo thực nghiệm, mm ³	Sai số, %	V ₀ đo thực nghiệm, mm ³	Sai số, %	V ₀ đo thực nghiệm, mm ³	Sai số, %
0,2	83,8	93,6	11,7	124,8	48,9	102,2	22,0
0,4		84,5	0,8	100,5	19,9	102,3	22,1
0,6		86,1	2,7	92,7	10,6	97,8	16,7
0,8		82,1	-2,0	84,0	0,2	84,3	0,6
1,0		81,8	-2,4	80,1	-4,4	86,1	2,7
1,2		83,7	-0,1	83,2	-0,7	82,4	-1,7
1,4		80,9	-3,5	80,9	-3,5	83,3	-0,6
1,6		82,8	-1,2	82,4	-1,7	84,4	0,7
1,8		83,2	-0,7	84	0,2	83,2	-0,7

4. KẾT LUẬN

Kết quả thực nghiệm trên bộ thử UniPg-STS cho thấy vòi phun CR kiểu điện từ CRI2.2 hoàn toàn đáp ứng việc áp dụng kỹ thuật PC2GD, với các chế độ phun khác nhau, đảm bảo được tổng thể tích phun yêu cầu và giãn cách giữa hai lần phun phù hợp, tại chế độ 100% tải và tốc độ cao của động cơ D4CB 2.5 TCI-A.

Kết quả nghiên cứu thu được sẽ được sử dụng để lập chương trình điều khiển cho ECU [13] của động cơ D4CB 2.5 TCI-A khi áp dụng KTP tiên tiến và sử dụng biodiesel nhằm mục tiêu tăng tính kinh tế nhiên liệu và giảm phát thải ô nhiễm.❖

Ngày nhận bài: 02/5/2024

Ngày phản biện: 8/6/2024

Tài liệu tham khảo:

[1]. L. Postrioti, G. Buitoni, F. C. Pesce, and C. Ciaravino, "Zeuch method-based injection rate analysis of a Common-rail system

operated with advanced injection strategies", Fuel, vol. 128, pp. 188-198, 2014; doi: doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.006.

[2]. R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno, and J. De la Morena, "Influence of injector technology on injection and combustion development – Part 2: Combustion analysis," Applied Energy, vol. 88, no. 4, pp. 1130-1139, 2011; doi: doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.004.

[3]. V. H. Nguyen, A. Cavicchi, D. X. Nguyen, K. T. Nguyen, P. X. Pham, and L. Postrioti, "Hydraulic characterization of a second-generation common rail injector operating under solo and split injection strategies", Flow Measurement and Instrumentation, vol. 85, p. 102170, 2022; doi: org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102170.

[4]. S. Jafarmadar, "The Effect of Split Injection on the Combustion and Emissions in DI and IDI Diesel Engines", Diesel Engine – Combustion, Emissions and Condition Monitoring, S. Bari Ed. Rijeka: InTech, 2013.

[5]. Nguyễn Xuân Đạt, Nguyễn Hoàng Vũ, Phạm Xuân Phương; "Kỹ thuật phun nhiên liệu dùng cho động cơ diesel điều khiển điện tử", Kỷ yếu Hội nghị Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải lần IV, Trường Đại học Giao thông Vận tải TP. Hồ Chí Minh, 5/2018.

- [6]. J. Zhuang, X. Qiao, J. Bai, and Z. Hu, "Effect of injection-strategy on combustion, performance and emission characteristics in a DI-diesel engine fueled with diesel from direct coal liquefaction", *Fuel*, vol. 121, pp. 141-148, 2014; doi: doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.032.
- [7]. M. Yoon Kim, S. Hyun Yoon, and C. Sik Lee, "Impact of Split Injection Strategy on the Exhaust Emissions and Soot Particulates from a Compression Ignition Engine Fueled with Neat Biodiesel", *Energy & Fuels*, vol. 22, pp. 1260-1265, 2008. doi: 10.1021/ef700537w.
- [8]. S. Jafarmadar, "The Effect of Split Injection on the Combustion and Emissions in DI and IDI Diesel Engines", *Diesel Engine - Combustion, Emissions and Condition Monitoring*, 2013. doi: 10.5772/55232.
- [9]. Mattes, Boecking and Kampmann, "Piezo-Inline-Injektoren". Haus der Technik Fachbuch. 93-100, 2004.
- [10]. F. M. Andrea Piano, Lucio Postrioti, Andrea Cavicchi, Giulia Biscontini, Francesco C. Pesce, "Modeling of a New Generation Solenoid Common Rail Injector", *European GT Conference 2016 - Frankfurt*, 2016.
- [11]. A. Ferrari, A. Mittica, F. Paolicelli, and P. Pizzo, "Hydraulic Characterization of Solenoid-actuated Injectors for Diesel Engine Common Rail Systems", *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 878-885, 2016. doi: org/10.1016/j.egypro.2016.11.111.
- [12]. Nguyễn Xuân Đạt; "Nghiên cứu ảnh hưởng của phun chính nhiều giai đoạn đến các chỉ tiêu kinh tế, kỹ thuật của động cơ diesel kiểu Commonrail khi sử dụng nhiên liệu diesel sinh học" Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 2022.
- [13]. Nguyễn Hoàng Vũ, Báo cáo tổng kết nhiệm vụ NCKH&PTCN cấp Quốc gia; "Nghiên cứu, chế tạo thử nghiệm ECU phù hợp cho việc sử dụng nhiên liệu sinh học biodiesel với các mức pha trộn khác nhau", Mã số ĐT.08.14/NLSH (thuộc Đề án Phát triển nhiên liệu sinh học đến năm 2015, tầm nhìn đến năm 2025), 2017.
- [14]. Nguyễn Xuân Đạt, Phạm Xuân Phương, Nguyễn Hoàng Vũ; "Xác định diễn biến tốc độ phun của vòi phun Commonrail kiểu điện từ bằng phương pháp Zeuch khi phun chính một giai đoạn", *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, tháng 10/2020.
- [15]. Trần Trọng Tuấn và cộng sự; "Xác định các thông số công tác và mức phát thải ô nhiễm của động cơ diesel Hyundai 2.5TCI-A bằng thực nghiệm", *Kỷ yếu Hội nghị KHCN toàn quốc về Cơ khí 2015*, TP.Hồ Chí Minh, 2015.
- [16]. Phùng Văn Đước và cộng sự; "Khảo sát ảnh hưởng của chế độ tải, tốc độ đến diễn biến quá trình phun nhiên liệu và áp suất trong xi-lanh động cơ diesel Hyundai D4CB 2.5 TCI-A bằng thực nghiệm", *Kỷ yếu Hội nghị KHCN toàn quốc về Cơ khí 2015*, TP.Hồ Chí Minh, 2015.
- [17]. K. B. Nguyen, T. Dan, and I. Asano, "Effect of double injection on combustion, performance and emissions of Jatropa water emulsion fueled direct-injection diesel engine", *Energy*, vol. 80, pp. 746-755, 2015, doi: org/10.1016/j.energy.2014.12.033.
- [18]. A. Sarangi, C. Garner, G. McTaggart-Cowan, M. Davy, E. Wahab, and M. Peckham, "The effects of split injections on high exhaust gas recirculation low-temperature diesel engine combustion", *International Journal of Engine Research*, vol. 14, pp. 68-79, 2013, doi: 10.1177/1468087412450987.
- [19]. G. Bower, and Foster, D, "The Effect of Split Injection on Soot and NOx Production in an Engine-Fed Combustion Chamber". *SAE Technical Paper*, vol. 932655, 1993, doi: doi.org/10.4271/932655.