SỬ DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN ĐỂ XÂY DỰNG PHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH GIÁ TRỊ ÁP SUẤT HÒA TRỘN TỐI THIỂU (MMP) TRONG BƠM ÉP KHÍ CO₂ VÀO VỈA DẦU KHÍ

Nguyễn Viết Khôi Nguyên^{1,2,3}, Đỗ Quang Khánh^{1,3}, Hoàng Văn Hiếu², Phạm Hữu Tài²

¹Trường Đại học Bách khoa Tp. Hồ Chí Minh

²Đại học Dầu khí Việt Nam

³Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh

Email: nguyennvk@pvu.edu.vn

<https://doi.org/10.47800/PVJ.2021.03-03>

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp sử dụng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) để xây dựng phương trình thực nghiệm xác định giá trị áp suất hòa trộn tối thiểu (Minimum Miscibility Pressure - MMP) trong quá trình bơm ép khí CO₂ vào vỉa dầu. Kết quả so sánh với các mô hình đã được công bố cho thấy, phương pháp sử dụng thuật toán GA giúp dễ dàng xác định giá trị MMP, có độ tin cậy cao, giúp tiết kiệm thời gian và kinh phí so với phương pháp thí nghiệm truyền thống như Slimtube, Rising Bubble, hoặc Vanishing Interfacial Tension (VIT)...

Từ khóa: Thuật toán di truyền (GA), áp suất hòa trộn tối thiểu (MMP), bơm ép CO₂, tăng cường thu hồi dầu (EOR).

1. Giới thiệu

Khi áp suất vỉa dầu suy giảm, độ linh động của dầu giảm, độ nhớt của dầu tăng, các công ty dầu khí thường sử dụng phương pháp bơm ép CO₂ nhằm tăng cường thu hồi dầu. Vào thập niên 1950, Whorton và nnk (1952) lần đầu tiên nhận ra lợi ích của quá trình bơm ép CO₂ vào vỉa dầu và đã xin cấp bằng sáng chế cho phương pháp khai thác dầu bằng bơm ép CO₂ tại Mỹ [1]. Từ đó, phương pháp này tiếp tục được cải tiến và phát triển, trở thành giải pháp tăng cường thu hồi dầu phổ biến nhất hiện nay.

Nền tảng chính trong quá trình bơm ép CO₂ là việc CO₂ trộn lẫn với dầu và mang lại hiệu quả thu hồi dầu cao nhất. Trong bằng sáng chế của Whorton và nnk đã chứng minh rằng khả năng thu hồi cao nhất trong vỉa đạt được khi CO₂ hòa tan hoàn toàn vào dầu trong vỉa tại một áp suất nhất định. Bên cạnh đó, các nhà nghiên cứu đã chứng minh được rằng, nếu khí bơm ép là CO₂ thì áp suất tối thiểu cần thiết để khí hòa trộn hoàn toàn vào trong dầu thường thấp hơn đáng kể so với các loại khí khác như khí tự nhiên, khí nitơ [2].

Phương pháp để xác định giá trị MMP của khí đối với dầu một cách chính xác nhất đó là thực hiện các thí nghiệm như Slimtube, Rising Bubble, hoặc Vanishing Interfacial Tension (VIT), dù có nhược điểm là mất rất nhiều thời gian và chi phí. Do đó, các nghiên cứu trên thế giới tập trung đề xuất các phương trình thực nghiệm để xác định giá trị MMP nhanh chóng và đơn giản. Bài báo đề xuất phương pháp sử dụng thuật toán di truyền để xây dựng phương trình thực nghiệm xác định MMP cho CO₂ và dầu thô có độ tin cậy cao.

2. Các mô hình thực nghiệm nhằm xác định giá trị MMP của CO₂ - dầu thô

Theo các tác giả Holm và Josendal (1974), Alston và nnk (1985), Johnson và Pollin (1981), giá trị MMP của CO₂-dầu thô là hàm phụ thuộc vào thành phần của dầu và nhiệt độ vỉa. Các công trình nghiên cứu chỉ ra nhiệt độ vỉa có ảnh hưởng đáng kể đến giá trị MMP của CO₂ - dầu thô [3 - 5]. Đối với thành phần dầu thô, Rathmell và nnk (1971) đã chỉ ra rằng thành phần nhẹ (C₁) sẽ làm tăng giá trị MMP và thành phần trung bình (từ C₂ - C₆) sẽ làm giảm giá trị MMP [6]. Bên cạnh đó, Metcalfe và Yarbrough (1974) đề xuất mô hình tổng quát xác định MMP, trong đó xem xét ảnh hưởng của cả 2 thành phần dầu nhẹ và trung bình cùng với nhiệt độ vỉa [7]. Alston và nnk (1985) cũng xây

Ngày nhận bài: 16/1/2021. Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 16/1 - 3/2/2021.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 9/3/2021.

dựng một loạt các thí nghiệm Slimtube để chứng minh rằng giá trị MMP bị ảnh hưởng bởi sự hiện diện của C_1 và những thành phần nhẹ khác trong dầu (ví dụ khí nitơ). Các tác giả này chứng tỏ rằng sự hiện diện của các thành phần nhẹ sẽ làm tăng giá trị MMP và những thành phần trung bình trong dầu lại làm giảm giá trị này (như thành phần từ $C_2 - C_4$, H_2S , CO_2). Các tác giả cùng kết luận rằng thông số khối lượng phân tử của C_{5+} quan trọng hơn tỷ trọng API của dầu trong phương trình thực nghiệm xác định MMP [4].

Bảng 1 tóm tắt các phương trình thực nghiệm đã được công bố và các nhận xét nhược điểm ngắn gọn cho từng mô hình tương ứng. Trong Bảng 1, các phương trình thực nghiệm sử dụng các thông số vật lý của vỉa và hỗn hợp dầu khí để xác định giá trị MMP như nhiệt độ vỉa (T_R), khối lượng phân tử hydrocarbon C_{5+} (MWC_{5+}), đồng thời đề cập đến tỷ số giữa thành phần hydrocarbon dễ bay hơi với thành phần hydrocarbon trung bình (Volatiles/Intermediate), áp suất điểm bọt khí (P_b , bubble point pressure).

3. Áp dụng thuật toán di truyền để xây dựng phương trình thực nghiệm xác định giá trị MMP của CO_2 - dầu thô

Thuật toán di truyền (GA) được dựa trên thuyết tiến hóa muôn loài trong tự nhiên của Charles Darwin. Thuyết tiến hóa của Darwin đã chỉ ra rằng, khi môi trường tự nhiên thay đổi, các cá thể hoặc quần thể buộc phải thay đổi để có thể thích nghi và sinh tồn trong môi trường sống mới. Những quần thể hoặc cá thể có độ thích nghi cao sẽ

có khả năng sống sót tốt hơn so với quần thể hoặc cá thể có độ thích nghi thấp, quá trình này được gọi chung là chọn lọc tự nhiên.

GA sử dụng một số thuật ngữ được lấy từ di truyền học như cá thể, quần thể, nhiễm sắc thể, kiểu gen. Một cá thể trong GA sẽ biểu diễn một giải pháp của bài toán. Tuy nhiên, không giống với trong tự nhiên là một cá thể có nhiều nhiễm sắc thể mà để giới hạn trong GA, ta quan niệm một cá thể chỉ có một nhiễm sắc thể. Do đó, khái niệm cá thể và nhiễm sắc thể trong GA coi như là tương đương. Trong toán học, 1 nghiệm của phương trình chính là nhiễm sắc thể, 1 thành phần trong nghiệm chính là 1 gen, tập hợp nghiệm của phương trình chính là quần thể.

Cụ thể thuật toán di truyền được diễn giải thông qua các phép sau [12]:

- Phép chọn: Là quá trình loại bỏ các cá thể xấu trong quần thể chỉ giữ lại những cá thể tốt dựa trên độ thích nghi của mỗi cá thể. Độ thích nghi là một hàm gán một giá trị thực cho các cá thể trong quần thể. Thông thường, sẽ lấy 50% số cá thể tốt nhất, ngoài ra có thể sử dụng phương pháp chọn lọc dựa trên độ thích nghi hay còn gọi là bánh xe Roulette.

- Phép lai: Là quá trình hình thành nhiễm sắc thể mới trên cơ sở các nhiễm sắc thể bố - mẹ, bằng cách ghép một hay nhiều đoạn gen của 2 (hay nhiều) nhiễm sắc thể bố - mẹ với nhau với xác suất (khả năng) lai tạo P_c . Xác suất lai tạo sẽ quyết định khả năng nhiễm sắc thể bố mẹ có thể tạo ra nhiễm sắc thể mới hay không.

Bảng 1. Các mô hình thực nghiệm xác định giá trị MMP của CO_2 - dầu thô

Tác giả	Phương trình thực nghiệm	Ghi chú
Cronquist (1978) [8] Stalkup (1984) [9]	$MMP = 0,11027 \times (1,8T_R + 32)^Y$ Với: $Y = 0,744206 + 0,0011038 MWC_{5+} + 0,0015279 Vol$	Giới hạn: - Tỷ trọng API của dầu từ 23,7 - 44°. - T_R từ 21,67 - 120 °C. - Giá trị MMP từ 7,4 - 34,5 MPa.
Lee (1979) [10]	Mô hình được phát triển dựa vào giả thiết tương đồng giữa MMP với áp suất hơi của CO_2 khi $T_R < \text{nhiệt độ tới hạn của } CO_2$, ngược lại thì sử dụng mô hình khi $T_R \geq \text{nhiệt độ tới hạn của } CO_2$ $MMP = 7,3924 \times 10^b$ Với: $b = 2,772 - \left(\frac{1519}{492 + 1,8T_R} \right)$	- Nếu $MMP < P_b$, lấy giá trị $MMP = P_b$.
Yellig và Metcalfe (1980) [11]	$MMP = 12,6472 + 0,015531 \times (1,8T_R + 32) + 1,24192 \times 10^{-4} \times (1,8T_R + 32)^2 - \frac{716,9427}{(1,8T_R + 32)}$	Nếu $MMP < P_b$, lấy giá trị $MMP = P_b$. Giới hạn: - Nhiệt độ vỉa từ 35 - 88,9 °C.
Alston và nnk. (1985) [4]	$MMP = 6,056 \times 10^{-6} \times (1,8T_R + 32)^{1,06} \times MWC_{5+}^{1,78} \times \left(\frac{Volatiles}{Interm.} \right)^{0,136}$ Nếu $P_b < 0,345 \text{ MPa}$: $MMP = 6,056 \times 10^{-6} \times (1,8T_R + 32)^{1,06} \times MWC_{5+}^{1,78}$	Nếu $MMP < P_b$, lấy giá trị $MMP = P_b$.

- Đột biến: Là hiện tượng cá thể con mang một số tính trạng không có trong mã gen di truyền của bố - mẹ (thay đổi một gen hoặc nhiều gen trên nhiễm sắc thể). Phép đột biến xảy ra với xác suất P_m nhỏ hơn rất nhiều so với xác suất lai P_c . Tương tự như trên, xác suất đột biến sẽ quyết định xem nhiễm sắc thể đó có thể xảy ra đột biến hay không.

- Tái tạo quần thể mới: Tính toán độ thích nghi của từng nhiễm sắc thể trong quần thể hiện tại và lấy khoảng 50% số cá thể tốt nhất chuyển vào quần thể mới. Với số nhiễm sắc thể còn lại, sẽ ngẫu nhiên bắt đầu vòng lặp mới cho đến khi nghiệm hội tụ hoặc chạy hết số vòng lặp được thiết lập.

Giá trị MMP của CO_2 - dầu thô bị ảnh hưởng bởi các thông số nhiệt độ vỉa và thành phần dầu thô. Các thông số này đều được xem xét trong mô hình thuật toán GA. Sau khi xây dựng được phương trình từ thuật toán, nhóm tác giả so sánh sai số giữa giá trị MMP được xác định từ phương trình và giá trị MMP từ thí nghiệm so với sai số của các mô hình tương quan trong Bảng 1. Hình 1 biểu diễn lưu đồ của thuật toán GA.

Hình 1. Lưu đồ thuật toán di truyền.

3.1. Thông số đầu vào của thuật toán

Metcalf và Yarborough (1974) cho rằng bất kỳ mô hình thực nghiệm tổng quát nào xác định giá trị MMP của CO_2 - dầu thô cần phải xem xét ảnh hưởng của nhiệt độ vỉa cùng với thông số thành phần hydrocarbon nhẹ và trung bình [7]. Ngoài ra, Alston và nnk (1985) cũng cho rằng thông số khối lượng phân tử của thành phần C_{5+} cho kết quả tốt hơn thông số tỷ trọng API của dầu [4].

Do đó, phương trình thực nghiệm được xác định từ thuật toán GA của bài báo sẽ xem xét đến các thông số sau đây:

- Nhiệt độ vỉa (T_R);
- Khối lượng phân tử C_{5+} (MWC_{5+});
- Thành phần hydrocarbon nhẹ (C_1 và khí nitơ);
- Thành phần hydrocarbon trung bình ($C_2 - C_4$, khí H_2S và khí CO_2).

Bộ dữ liệu đầu vào của bài toán được tổng hợp trong Bảng 2 được trích dẫn từ các bài báo của Emera và Sarma (2005), Li và nnk (2012), Zhang và nnk (2015) [13 - 15]. Sau đó, nhóm tác giả sử dụng 50% dữ liệu trong Bảng 2 để làm thông số đầu vào cho thuật toán GA và sau khi chạy mô hình thuật toán sẽ áp dụng phương trình thực nghiệm được xác định từ GA cho toàn bộ cơ sở dữ liệu trong Bảng 2 và tính toán sai số trung bình và độ lệch tuyệt đối trung bình. Kết quả sẽ được so sánh với các phương trình thực nghiệm đã được trình bày trong Bảng 1.

Trong Bảng 2, số liệu có thứ tự từ 1 - 28 được trích dẫn từ bài báo của Emera và Sarma [13]; từ 29 - 39 được trích dẫn từ bài báo của Li và nnk [14]; từ 40 - 44 được trích dẫn từ bài báo của Zhang và nnk [15].

3.2. Các bước thực hiện thuật toán GA

Thuật toán di truyền được viết trên ngôn ngữ Python 3.8.6 với phần mềm Visual Studio Code. Chương trình tính toán sử dụng các giá trị thông số sau:

- Số vòng lặp: 1.000;
- Tỷ lệ lai tạo: 50%;
- Tỷ lệ đột biến: 20%;
- Điều kiện dừng: sai số trung bình giữa giá trị thực nghiệm và dự đoán nhỏ hơn 10%.

Bảng 2. Cơ sở dữ liệu giá trị MMP thực nghiệm đã được công bố [13 - 15].

TT	Nhiệt độ vỉa, T _R (°C)	Khối lượng phân tử C ₅₊ , M _{w5+}	Thành phần nhẹ, volatiles (%)	Thành phần trung bình, intermediate (%)	Tỷ số vol/int	Khối lượng phân tử C ₇₊ , M _{w7+}	Giá trị MMP từ thí nghiệm (MPa)
1	54,4	185,83	5,4	38,4	0,1406	-	9,48
2	61,1	185,83	5,4	38,4	0,1406	-	10,35
3	54,4	185,83	5	7,5	0,6667	-	10,35
4	54,4	185,83	22,9	38,4	0,5964	-	10,35
5	57,8	202,61	0,5	1,2	0,4167	-	11,72
6	54,4	235,56	5,4	35,5	0,1521	-	12,76
7	67,8	203,81	31	22,9	1,3537	210	16,9
8	112,2	213,5	32,7	28,1	1,1637	222	24,15
9	99	190,7	40,14	2,95	13,6068	195	30,28
10	110	180,6	32,51	35,64	0,9122	185	20,21
11	71,1	221	41,27	6,99	5,9041	227	23,45
12	102,2	205	51,28	9,84	5,2114	210	28,17
13	80	240,7	53,36	8,6	6,2047	245	26,76
14	71,1	207,9	4,4	13,9	0,3165	227,94	15,52
15	54,4	171,2	29,48	31,82	0,9265	197,4	11
16	42,8	196,1	19,35	26,8	0,7220	221	10,62
17	118,3	171,1	34,2	28,6	1,1958	192	23,45
18	32,2	187,77	10,5	14,28	0,7353	206	6,9
19	40,6	187,77	10,5	14,28	0,7353	206	8,28
20	57,2	187,77	10,5	14,28	0,7353	206	11,86
21	49	187,25	34,34	22,82	1,5048	200	11,04
22	57,2	182,6	0	5,11	0,0000	197	13,1
23	87,8	182,6	0	5,11	0,0000	197	17,24
24	54,4	170,5	0	1,57	0,0000	178	12,07
25	42,8	204,1	17,07	20,95	0,8148	222	10,35
26	59	205	5,45	11,35	0,4802	220	12,8
27	34,4	212,56	16,78	10,76	1,5595	227	10
28	48,9	205,1	12,5	22,62	0,5526	227	10,59
29	137,22	136,17	24,68	39,37	0,6269	149,6	19,38
30	115,56	189	32,99	42,44	0,7773	216	25,3
31	82,22	263	6,74	20,59	0,3273	281	21,99
32	115,56	263	6,74	20,59	0,3273	281	25,54
33	118,33	172	34,94	27,53	1,2692	190	23,442
34	65,6	187,25	34,34	22,82	1,5048	200	13,45
35	43,33	218	7,31	26,67	0,2741	248	8,62
36	40,56	207	9,01	25,22	0,3573	229	8,27
37	54,44	168	29,73	29,43	1,0102	190	11,78
38	81,11	198	9,82	16,78	0,5852	220	15,96
39	90,56	232	40,08	18,76	2,1365	256,14	27,68
40	137,22	136,48	24,68	39,37	0,6269	149,69	18,379
41	100	138,53	13,53	26,76	0,5056	151,74	14,634
42	80	160,59	12,15	2,63	4,6198	170,08	16,062
43	89,7	211,21	13,77	11,79	1,1679	229,17	22,63
44	53	182,8	18,706	12,933	1,4464	205,74	13,09

Với mỗi vòng lặp chương trình sẽ thực hiện những bước sau:

- Khởi tạo quần thể ban đầu: thuật toán sẽ bắt đầu quần thể với 100 nhiễm sắc thể và thuật toán sẽ gán giá trị ngẫu nhiên cho mỗi gen trong nhiễm sắc thể.
- Đánh giá độ thích nghi và chọn lọc: thuật toán sẽ tiến hành đánh giá độ thích nghi của mỗi nhiễm sắc thể

bằng cách gán giá trị thực của nhiễm sắc thể dựa vào hàm thích nghi như Hình 2, sau đó thuật toán sẽ tiến hành chọn 50 nhiễm sắc thể có độ thích nghi cao nhất trong quần thể hiện tại và loại bỏ những nhiễm sắc thể xấu.

- Lai tạo là một bước quan trọng trong thuật toán GA. Mục đích của lai tạo là các nhiễm sắc thể mới sao cho vẫn giữ lại được những đặc tính của nhiễm sắc thể cha mẹ.

Hình 2. Lưu đồ thuật toán GA xác định giá trị MMP.

Hình 3. Quá trình lai tạo.

Hình 4. Quá trình đột biến.

Sau khi đánh giá độ thích nghi, thuật toán sẽ chọn lọc những nhiễm sắc thể tốt nhất tiến hành bắt cặp để lai tạo với tỷ lệ 50%, có nghĩa là 50% các cặp nhiễm sắc thể trong quần thể sẽ tiến hành bắt cặp và lai tạo. Phương pháp lai tạo trong bài báo sử dụng phương pháp lai tạo một điểm với điểm cắt ở giữa để tạo ra cặp nhiễm sắc thể mới (Hình 3).

- Đột biến là cơ chế được sử dụng nhằm giúp bài toán thoát khỏi các cực trị địa phương và khám phá vùng tìm kiếm

mới. Trong bài báo, tỷ lệ đột biến được chọn là 20%, nghĩa là sẽ có 20% các nhiễm sắc thể trong quần thể sẽ bị đột biến. Phương pháp đột biến được sử dụng sẽ là đột biến một điểm (một gen trong nhiễm sắc thể), ta sẽ thay đổi giá trị điểm xảy ra hiện tượng đột biến tại vị trí bất kỳ trong nhiễm sắc thể. Hình 4 miêu tả quá trình đột biến nhiều điểm trên một nhiễm sắc thể biểu diễn dưới dạng nhị phân.

- Tái tạo quần thể: Cuối cùng chương trình sẽ có 50 nhiễm sắc thể mới sau các bước chọn lọc, lai tạo và đột biến. Để bù số nhiễm sắc thể còn thiếu, thông thường các thuật toán sẽ tạo lại ngẫu nhiên. Để tránh trường hợp trong quần thể ban đầu tồn tại nhiễm sắc thể có thể tạo ra được nhiễm sắc thể vượt trội nhất, thuật toán của bài báo sẽ lấy 50 nhiễm sắc thể tại quá trình chọn lọc bù vào số nhiễm sắc thể còn thiếu.

- Điều kiện dừng: Sau khi tái tạo quần thể mới, chương trình sẽ tiến hành đánh giá sai số trung bình giữa giá trị được dự đoán của mỗi nhiễm sắc thể với giá trị thực nghiệm trong Bảng 2. Nếu sai số trung bình của nhiễm sắc thể dưới 10%, chương trình sẽ xuất ra kết quả và sẽ chạy cho đến khi kết thúc số lần lặp để tìm ra kết quả tốt nhất.

4. Kết quả chạy thuật toán GA

Thuật toán GA từ nghiên cứu cho thấy mô hình hàm mũ cho kết quả tốt nhất trong việc xác định giá trị MMP của CO₂ - dầu thô. Phương trình thực nghiệm xác định MMP cho CO₂ - dầu thô được rút ra từ thuật toán như sau:

- Trường hợp tổng quát:

$$MMP = 1,131427 \times 10^{-4} \times (1,8T_R + 32)^{1,215644} \times (MW_{C5+})^{1,070527} \times \left(\frac{Volatiles}{Interm.} \right)^{0,118693} \quad (1)$$

Bảng 3. Bảng so sánh kết quả và sai số giữa mô hình GA với các mô hình xác định giá trị MMP thông dụng.

Mô hình	GA		Alston và nnk (1985)		Cronquist (1978)		Lee (1979)		Yellig và Metcalfe (1980)	
Giá trị thực nghiệm MMP (MPa)	Giá trị MMP tính toán (MPa)	Error %	Giá trị MMP tính toán (Mpa)	Error %	Giá trị MMP tính toán (Mpa)	Error %	Giá trị MMP tính toán (Mpa)	Error %	Giá trị MMP tính toán (MPa)	Error %
9,48	8,94	5,74	8,83	6,88	-	-	11,64	22,76	11,26	18,76
10,35	9,95	3,83	9,70	6,29	-	-	13,11	26,62	12,32	19,04
10,35	10,75	3,85	10,91	5,39	-	-	11,64	12,44	11,26	8,78
10,35	10,61	2,49	10,74	3,81	-	-	11,64	12,44	11,26	8,78
11,72	11,79	0,62	12,53	6,93	-	-	12,37	5,53	11,80	0,71
12,76	11,63	8,89	13,61	6,65	-	-	11,64	8,80	11,26	11,77
16,9	15,87	6,07	16,96	0,35	19,11	13,06	14,69	13,08	13,35	21,03
24,15	27,24	12,78	28,10	16,37	31,95	32,31	28,31	17,21	20,02	17,09
30,28	28,37	6,31	28,67	5,32	25,90	14,46	23,68	21,81	18,00	40,56
20,21	21,67	7,21	19,82	1,92	25,10	24,19	27,50	36,07	19,68	2,62
23,45	21,59	7,93	24,91	6,23	23,66	0,89	15,51	33,84	13,84	40,97
28,17	28,27	0,35	29,45	4,54	31,89	13,22	24,75	12,13	18,48	34,39
26,76	26,72	0,14	32,30	20,72	31,91	19,24	17,88	33,18	15,17	43,33
15,52	14,29	7,93	15,01	3,30	17,87	15,13	15,51	0,04	13,84	10,82
11	10,24	6,93	9,86	10,38	14,83	34,84	11,64	5,80	11,26	2,35
10,62	9,29	12,53	10,08	5,10	13,07	23,03	9,36	11,84	9,26	12,80
23,45	22,80	2,79	19,97	14,85	28,29	20,62	30,62	30,57	20,98	10,52
6,9	7,03	1,94	7,63	10,54	9,38	35,98	7,56	9,63	7,10	2,93
8,28	8,50	2,61	8,99	8,61	10,94	32,11	8,97	8,30	8,85	6,84
11,86	11,52	2,90	11,72	1,14	14,01	18,09	12,24	3,18	11,71	1,28
11,04	10,86	1,64	11,37	3,03	14,41	30,51	10,54	4,55	10,36	6,16
13,1	11,59	11,50	11,63	11,20	12,33	5,87	12,24	6,59	11,71	10,63
17,24	17,57	1,94	16,72	3,02	17,14	0,60	20,14	16,81	16,32	5,33
12,07	10,29	14,78	9,89	18,07	10,73	11,07	11,64	3,58	11,26	6,72
10,35	9,84	4,97	11,00	6,29	12,92	24,84	9,36	9,54	9,26	10,53
12,8	12,38	3,29	13,27	3,64	14,90	16,37	12,63	1,31	11,99	6,31
10	9,25	7,46	11,03	10,27	11,36	13,62	7,92	20,84	7,59	24,11
10,59	10,61	0,19	11,65	10,04	14,14	33,55	10,52	0,69	10,34	2,33
19,38	19,37	0,05	16,20	16,41	22,83	17,81	38,49	98,58	24,08	24,28
25,3	23,51	7,09	22,00	13,04	31,72	25,37	29,57	16,87	20,55	18,78
21,99	21,30	3,16	25,96	18,06	27,77	26,28	18,51	15,84	15,49	29,54
25,54	30,21	18,30	35,22	37,90	37,72	47,71	29,57	15,77	20,55	19,54
23,442	23,09	1,49	20,32	13,30	28,12	19,97	30,63	30,67	20,99	10,47
13,45	14,22	5,75	14,39	7,01	18,06	34,28	14,16	5,25	13,01	3,26
8,62	9,37	8,73	10,77	24,89	13,91	61,35	9,46	9,73	9,36	8,56
8,27	8,65	4,58	9,69	17,17	12,17	47,19	8,96	8,35	8,84	6,88
11,78	10,14	13,90	9,65	18,07	14,29	21,30	11,65	1,14	11,26	4,37
15,96	16,61	4,07	16,75	4,96	19,84	24,29	18,19	13,99	15,33	3,95
27,68	25,64	7,36	29,18	5,41	34,23	23,67	20,98	24,22	16,73	39,55
18,379	19,42	5,64	14,04	23,61	22,84	24,30	38,49	109,40	24,08	31,04
14,634	13,77	5,88	10,47	28,48	16,27	11,20	24,01	64,06	18,15	24,02
16,062	16,73	4,17	15,10	5,99	15,03	6,45	17,88	11,33	15,17	5,58
22,63	21,38	5,53	22,55	0,35	23,48	3,75	20,71	8,47	16,60	26,63
13,09	11,31	13,63	11,53	11,93	14,04	7,26	11,35	13,33	11,03	15,74
Sai số TB		5,89		10,40		21,99		19,00		14,99
Độ lệch chuẩn		6,61		7,23		7,72		8,20		4,41

Hình 5. Mô hình GA cho giá trị MMP tính toán chính xác nằm trong khoảng 90%.

- Nếu dầu không chứa thành phần hydrocarbon nhẹ:

$$MMP = 1,131427 \times 10^{-4} \times (1,8T_R + 32)^{1,215644} \times (MW_{C_{5+}})^{1,070527} \quad (2)$$

Trong đó:

MMP: Giá trị áp suất hòa trộn tối thiểu của CO₂ - dầu thô (MPa);

TR: Nhiệt độ vỉa chứa chất lưu đang xét (°C);

MW_{C₅₊}: Khối lượng phân tử C₅₊ của chất lưu vỉa đang xét (g/mol);

Volatiles: Tỷ lệ hydrocarbon nhẹ (%);

Interm.: Tỷ lệ hydrocarbon trung bình (%);

Bảng 3 thể hiện giá trị MMP được xác định từ phương trình (1) hoặc (2) và các mô hình tương quan trong Bảng 1. Bảng 3 cũng cho thấy kết quả sai số trung bình và độ lệch chuẩn giữa các mô hình với nhau.

Kết quả từ Bảng 3 cho thấy mô hình xác định giá trị MMP của CO₂ - dầu thô có độ tin cậy cao, có thể sử dụng thay cho phương pháp thí nghiệm truyền thống tốn kém về chi phí và thời gian.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã tổng hợp cơ sở dữ liệu giá trị MMP thực nghiệm của CO₂ - dầu thô, sau đó áp dụng thuật toán di truyền cho 50% cơ sở dữ liệu ban đầu; 50% còn lại để kiểm tra độ tin cậy sau khi xác định được phương trình thực nghiệm. Bài báo áp dụng thuật toán di truyền với tỷ lệ lai tạo là 50%, tỷ lệ đột biến khi lai tạo là 20%.

Kết quả so sánh với các mô hình đã được công bố cho thấy hiệu quả của phương trình xác định MMP được xây dựng dựa trên thuật toán GA: giá trị sai số trung bình khi xác định MMP từ phương trình của nghiên cứu so với giá trị MMP thực nghiệm cho

toàn bộ dữ liệu ban đầu là 5,89%, độ lệch chuẩn là 6,61%.

Như vậy, có thể xem xét sử dụng phương trình thực nghiệm để xác định giá trị MMP trong phương án bơm ép khí CO₂ tăng cường thu hồi dầu thay cho phương pháp thí nghiệm, vốn mất nhiều thời gian và chi phí.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh và Đại học Dầu khí Việt Nam đã hỗ trợ chúng tôi trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Leonidas P. Whorton, Eugene R. Brownscombe, Alvin B. Dyes, "Method for producing oil by means of carbon dioxide", Patent US2623596A, 30/12/1952.
- [2] F.I. Stalkup, "Carbon dioxide miscible flooding: Past, present, and outlook for the future", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 30, No. 8, pp. 1102 - 1112, 1978. DOI: 10.2118/7042-PA.
- [3] L.W Holm and V.A. Josendal, "Mechanisms of oil displacement by carbon dioxide", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 26, No. 12, pp. 1427 - 1436, 1974. DOI: 10.2118/4736-PA.
- [4] R.B. Alston, G.P. Kokolis, and C.F. James, "CO₂ minimum miscibility pressure: A correlation for impure CO₂ streams and live oil systems", *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 25, No. 2, pp. 268 - 274, 1985. DOI: 10.2118/11959-PA.
- [5] James P. Johnson and James S. Pollin, "Measurement and correlation of CO₂ miscibility pressures", *SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, April 1981*. DOI: 10.2118/9790-MS.
- [6] J.J. Rathmell, F.I. Stalkup, and R.C. Hassinger, "A laboratory investigation of miscible displacement by carbon dioxide", *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, New Orleans, Louisiana, October 1971*. DOI: 10.2118/3483-MS.
- [7] R.S. Metcalf and L. Yarborough,

"Discussion", *Journal of Petroleum Technology*, pp. 1436 - 1437, 1974.

[8] C. Cronquist, "Carbon dioxide dynamic displacement with light reservoir oils", *U.S DOE Annual Symposium*, Tulsa, 1978.

[9] Jr.F. Stalkup, "Miscible displacement", *SPE Monograph Series*, 1984.

[10] J. Lee, "Effectiveness of carbon dioxide displacement under miscible and immiscible conditions", Petroleum Recovery Institute, 1979.

[11] W.F. Yellig and R.S. Metcalfe, "Determination and prediction of CO₂ minimum miscibility pressures", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 160 - 168, 1980. DOI: 10.2118/7477-PA.

[12] David A. Coley, *An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers*. World Scientific, 1999. DOI: 10.1142/3904.

[13] M.K. Emera and H.K. Sarma, "Use of genetic algorithm to estimate CO₂ - oil minimum miscibility pressure - A key parameter in design of CO₂ miscible flood", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 46, No. 1-2, pp. 37 - 52, 2005.

[14] Huazhou Li, Jishun Qin, and Daoyong Yang, "An improved CO₂-oil minimum miscibility pressure correlation for live and dead crude oils", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51, No. 8, pp. 3516 - 3523, 2012. DOI: 10.1021/ie202339g.

[15] Hao Zhang, Dali Hou, and Kai Li, "An improved CO₂-crude oil minimum miscibility pressure correlation", *Journal of Chemistry*, 2015.

USING GENETIC ALGORITHM FOR EXPERIMENTAL CORRELATION IN DETERMINING MINIMUM MISCIBILITY PRESSURE FOR CO₂ INJECTION

Nguyen Viet Khoi Nguyen^{1,2,3}, Do Quang Khanh^{1,3}, Hoang Van Hieu², Pham Huu Tai²

¹Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT)

²Petrovietnam University

³Vietnam National University Ho Chi Minh City

Email: nguyennvk@pvu.edu.vn

Summary

The paper presents the method of using the genetic algorithm (GA) to build the empirical equation for determining the minimum miscibility pressure (MMP) during CO₂ injection into oil reservoirs. Compared with conventional experimental models such as Slimtube, Rising Bubble, or Vanishing Interfacial Tension (VIT), the GA method makes it easier to determine MMP, has high reliability as well as saves time and costs.

Key words: Genetic algorithm (GA), minimum miscibility pressure (MMP), CO₂ injection, enhanced oil recovery (EOR).