

MÔ HÌNH GIẢI TÍCH MÔ TẢ SỰ VẬN CHUYỂN CỦA CÁC CHẤT CHỈ THỊ TỰ NHIÊN TRONG QUÁ TRÌNH BƠM ÉP NƯỚC KHAI THÁC DẦU

HUỲNH THỊ THU HƯƠNG¹, NGUYỄN HỮU QUANG¹, LÊ VĂN SƠN¹,
TRẦN TRỌNG HIỆU¹

¹ Trung tâm Ứng dụng kỹ thuật hạt nhân trong công nghiệp,
Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam
Email: huonghtt@canti.vn

Tóm tắt:

Các hợp chất hữu cơ tồn tại trong dầu thô có khả năng phân bố trong hai pha dầu/nước, cụ thể là các alkylphenols và aliphatic acids, cho thấy nhiều tiềm năng sử dụng như chất chỉ thị tự nhiên trong xác định độ bão hòa dầu và các nguồn đóng góp cho giếng khai thác. Bài báo trình bày lời giải giải tích một chiều mô tả sự vận chuyển khuếch tán của các chất NPITs từ pha dầu vào pha nước trong quá trình bơm ép. Nghiệm giải tích chứng minh sự suy giảm nồng độ của các chất NPITs theo thời gian, trong đó tốc độ suy giảm phụ thuộc rõ rệt vào hệ số phân bố của chất NPITs, độ bão hòa dầu và vận tốc các pha qua kẽ rỗng. Kết quả khớp nghiệm giải tích với số liệu mô phỏng mô hình ¼ Five-spot đồng nhất một lớp sử dụng phần mềm UTCHEM và số liệu thực nghiệm trên mô hình vật lý là khá phù hợp, với sai số căn quân phương trong khoảng dưới 0,2 ở giai đoạn cuối bơm ép. Nghiệm giải tích thu được là cơ sở quan trọng cho các nghiên cứu tiếp theo về phương pháp sử dụng các chất NPITs để đánh giá dầu dư bão hòa trong quá trình khai thác.

Từ khóa: NPITs, nghiệm giải tích, sự suy giảm nồng độ, bão hòa dầu.

I. MỞ ĐẦU

Kỹ thuật đánh dấu liên giếng chủ động sử dụng chất phóng xạ hoặc hóa học bơm vào mỏ được biết đến như một trong những công cụ đáng tin cậy nhất để xác định các đặc trưng động học của mỏ, tuy nhiên, phương pháp đòi hỏi thời gian quan trắc dài cũng như giá thành tương đối cao. Gần đây, việc ứng dụng các hợp chất hữu cơ tồn tại trong dầu thô như alkylphenols và aliphatic acids có khả năng phân bố trong hai pha dầu/nước như các chất đánh dấu tự nhiên (NPITs) cho thấy nhiều tiềm năng trong đánh giá tỷ phần đóng góp của các giếng bơm vào giếng khai thác, thể tích quét của nước bơm ép cũng như độ bão hòa dầu dư bởi lợi thế về chi phí cũng như thân thiện với môi trường [1, 2, 3, 4, 5]. Do tính phân cực cao cùng độ linh hoạt của các liên kết hydrogen, các chất NPITs khuếch tán dần từ pha dầu vào pha nước trong quá trình bơm ép [6]. Nghiệm giải tích mô tả sự vận chuyển khuếch tán của các chất NPITs chỉ ra mối liên hệ tường minh giữa sự suy giảm nồng độ của các chất NPITs theo thời gian với các tham số như hệ số phân bố của chất NPITs, độ bão hòa dầu và vận tốc các pha qua kẽ rỗng.

Nghiệm giải tích sau đó được kiểm chứng trên số liệu mô phỏng mô hình ¼ Five-spot đồng nhất một lớp sử dụng phần mềm UTCHEM và số liệu thực nghiệm trên mô hình vật lý.

II. NỘI DUNG

II.1. Mô hình toán

Giả sử nồng độ của chất NPITs giữa các pha đạt cân bằng tức thời, phương trình vận chuyển – khuếch tán của chất NPITs trong hai pha dầu nước được biểu diễn [7]:

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (S_w C_w + K_d S_o C_w) + \nabla \cdot (S_w \bar{v}_w^* C_w + K_d S_o \bar{v}_o^* C_w) - \nabla \cdot [(S_w \bar{D}_w^* + K_d S_o \bar{D}_o^*) \nabla C_w] = 0 \quad (1)$$

Trong đó, ϕ là độ rỗng của môi trường, C_w là nồng độ của chất NPITs trong pha nước [M/L³]; S_w và S_o lần lượt là độ bão hòa của pha nước và pha dầu ($S_w + S_o = 1$); K_d là hệ số phân bố của chất NPITs; \vec{v}_w^* và \vec{v}_o^* lần lượt là vector vận tốc qua lỗ rỗng của pha nước và pha dầu [L/T]; \vec{D}_w^* và \vec{D}_o^* lần lượt là tensor phân tán của chất NPITs trong pha nước và pha dầu [L²/T], t là thời gian [T].

Cho rằng môi trường rỗng đồng nhất vô hạn, độ bão hòa của các pha không đổi và vận tốc qua lỗ rỗng của các pha đồng nhất theo không – thời gian, nghiệm giải tích một chiều mô tả nồng độ chất NPITs $C(x, t)$ của Phương trình (1) ứng với điều kiện đầu và điều kiện biên được xác định như Phương trình (5):

$$\text{IC: } C_w(x, 0) = \begin{cases} C_0 & x \in [0, +\infty) \\ 0 & x \in (-\infty, 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{BC: } C_w(-\infty, t) = 0 \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial C_w(x, t)}{\partial x} \right|_{x \rightarrow +\infty} = 0 \quad (4)$$

$$C_w(x, t) = \frac{1}{2} \cdot C_0 \cdot \left[1 + \text{Erf} \left(\frac{x - \frac{C^*}{A} \cdot t}{2 \cdot \sqrt{\frac{B \cdot t}{A}}} \right) \right] \quad (5)$$

Trong đó A , B và C^* là các tham số phụ thuộc:

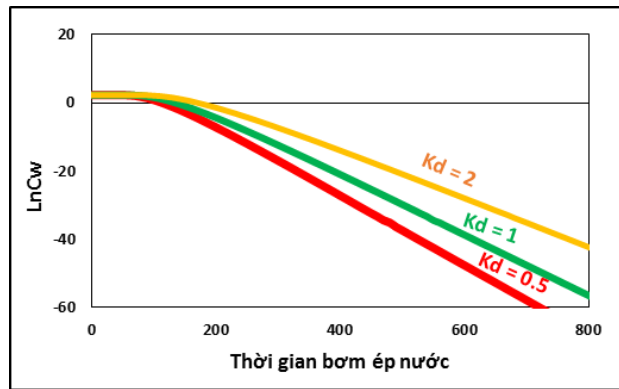
$$A = 1 + (K_d - 1)S_o$$

$$B = (1 - S_o)D_{Lw}^* + K_d S_o D_{Lo}^*$$

$$C^* = (1 - S_o)v_{wx}^* + K_d S_o v_{ox}^*$$

Nồng độ của các alkylphenol $C_w(x, t)$ có thể được biểu diễn như sau với X là biến theo khoảng cách:

$$C_w(x, t) = \int_0^{+\infty} \frac{C_0}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{B \cdot t}{A}}} \cdot e^{-\left(\frac{x - \frac{C^*}{A} \cdot t - X}{2 \cdot \sqrt{\frac{B \cdot t}{A}}} \right)^2} dX \quad (6)$$



Hình 1. Minh họa nghiệm giải tích Eq. (5) với các chất có hệ số $K_d = 0.5$, $K_d = 1$ và $K_d = 2$. Hệ số K_d càng nhỏ, nồng độ chất suy giảm càng nhanh.

Phương trình (6) cho thấy sự suy giảm của nồng độ chất NPITs trong pha nước phụ thuộc vào các tham số như hệ số phân bố của chất NPITs (K_d), độ bão hòa dầu (S_o) và vận tốc

của các pha qua kẽ rỗng (v_{ox}^* , v_{wx}^*). Định nghĩa tốc độ suy giảm nồng độ chất NPIT bằng hệ số $\alpha = \frac{\Delta \text{Ln}C_w}{\Delta t}$, trong cùng một môi trường (vận tốc các pha, độ bão hòa dầu) thì chất có hệ số phân bố càng nhỏ, tốc độ suy giảm nồng độ α càng lớn như minh họa ở Hình 1.

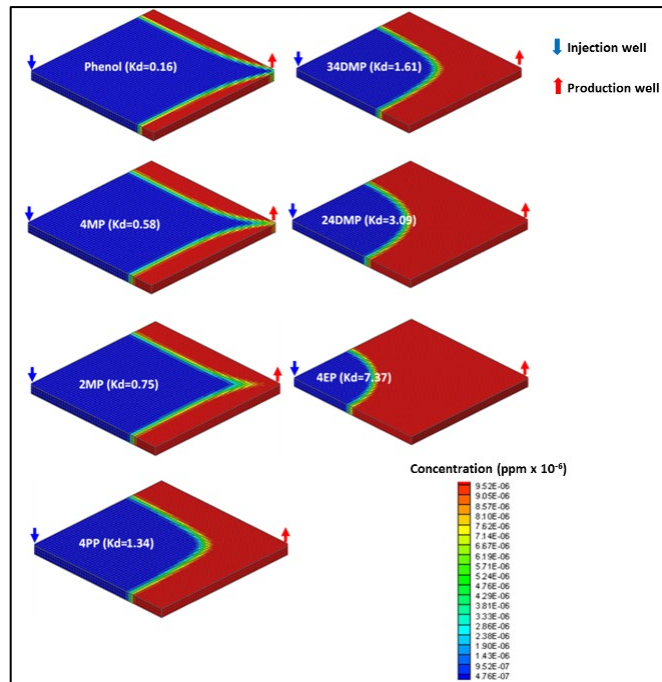
II.2. Kết quả mô phỏng

Nghiên cứu sử dụng UTCHEM (The University of Texas's Chemical Simulator), phần mềm mô phỏng mỏ mã nguồn mở đa pha, đa thành phần được phát triển bởi Đại học Texas, nhằm mô phỏng quá trình vận chuyển - khuếch tán của các chất NPITs từ pha dầu vào pha nước trong quá trình bơm ép [8].

Mô hình mô giả định thuộc kiểu ¼ Five-spot một lớp đồng nhất, được thiết lập với hai trường hợp cụ thể:

- mô hình dầu không di chuyển với độ bão hòa dầu ban đầu và độ bão hòa dầu dư là 0.35
- mô hình dầu di chuyển với độ bão hòa dầu ban đầu là 0.65 và độ bão hòa dầu dư là 0.35

Các mô hình có kích thước 165 m x 165 m x 12 m với số ô lưới 55 x 55 x 4. Lưu lượng nước bơm ép là 65.34 m³/d.



Hình 2. Phân bố nồng độ các chất NPITs ở thời điểm 0.6PV đối với mô hình ¼ Five – spot dầu di chuyển ($S_{oi} = 0.65$, $S_{or} = 0.35$).

Các thông số khác của mô hình gồm:

- Độ rỗng $\phi = 0.2$, độ nhớt của nước $\mu_w = 0.7$ cp, độ nhớt của dầu $\mu_o = 4$ cp;
- Độ phân tán dọc và ngang tương ứng là $\alpha_{DL} = 0.03$ m, $\alpha_{DT} = 0.003$ m;
- Đường thấm pha được thể hiện qua mô hình Corey với các thông số: critical water saturation $S_{cwr} = 0.3$, residual oil saturation $S_{or} = 0.35$, water endpoint: 0.15, oil endpoint 0.85, water exponent: 1.5, oil exponent: 2, endpoint mobility ratio: 1.

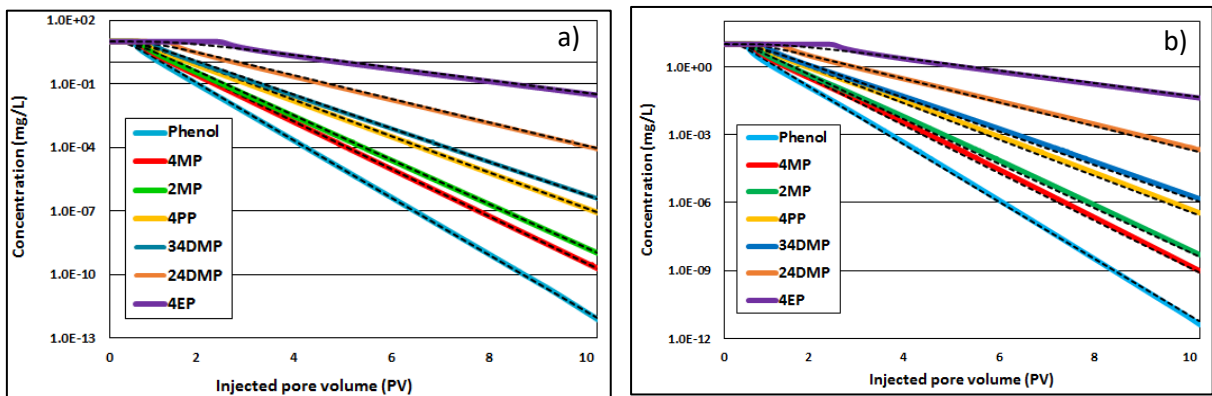
Bảng 1. Hệ số phân bố K_d của các chất NPITs được sử dụng trong mô hình

NPITs	Hệ số phân bố	Nồng độ ban đầu	Nồng độ ban đầu
-------	---------------	-----------------	-----------------

	$K_d = C_o/C_w$	trong dầu (mg/L)	trong nước (mg/L)
Phenol	0,16	1,6	10
4-Methylphenol (4MP)	0,58	5,8	10
2-Methylphenol (2MP)	0,75	7,5	10
4-Propylphenol (4PP)	1,34	13,4	10
3,4-Dimethylphenol (34DMP)	1,61	16,1	10
2,4-Dimethylphenol (24DMP)	3,09	30,9	10
4-Ethylphenol (4EP)	7,37	73,7	10

Nồng độ ban đầu trong pha dầu và pha nước cùng hệ số phân bố tương ứng của các chất NPITs xác định thông qua số liệu thực nghiệm tại phòng thí nghiệm Tracer của CANTI được thể hiện như Bảng 1. Các chất giả định có cùng mật độ khối, ankan number và tính chất hóa học nhưng khác hệ số phân bố.

Quá trình bơm nước diễn ra đến 10 lần thể tích rỗng (PV) của mô hình nhằm thu được toàn bộ đường cong nồng độ của các chất tại giếng khai thác. Phân bố nồng độ của chất NPITs giữa các pha trong môi trường giả định đạt cân bằng tức thời khi có tiếp xúc dầu nước. Hình 2 mô tả phân bố nồng độ các chất NPITs ở thời điểm 0.6PV đối với mô hình dầu di chuyển.



Hình 3. Đường cong nồng độ các chất NPITs trong pha nước tại giếng khai thác của mô hình ¼ Five-spot dầu không di chuyển ($S_{oi} = S_{or} = 0.35$, a) và mô hình ¼ Five-spot dầu di chuyển ($S_{oi} = 0.65$, $S_{or} = 0.35$, b). Đường nét liền mô tả số liệu mô phỏng từ phần mềm UTCHEM, trong khi đường nét đứt mô tả kết quả khớp Phương trình (5) với số liệu mô phỏng.

Hình 3 cho thấy nồng độ các chất NPITs trong pha nước giảm dần theo thời gian trong cả hai mô hình, trong đó các chất có K_d càng nhỏ thể hiện sự suy giảm nồng độ càng lớn và ngược lại. Nghiệm giải tích mô tả đường cong nồng độ của các chất NPITs thu được từ việc giải phương trình vận chuyển – khuếch tán được sử dụng để làm khớp với số liệu mô phỏng. Sai số căn quân phương chuẩn hóa (RMSE) giữa số liệu mô phỏng và nghiệm giải tích theo giai đoạn bơm ép được trình bày trong Bảng 2. Kết quả cho thấy giá trị RMSE ở giai đoạn sớm từ 0 PV – 2 PV lớn hơn giai đoạn cuối bơm ép, trong đó chất có K_d càng lớn thì sai số càng lớn. Sự phù hợp giữa nghiệm giải tích và đường cong của các chất trên mô hình trong khoảng từ 3 PV cho thấy nghiệm giải tích mô tả khá tốt tốc độ suy giảm nồng độ chất NPITs ở giai đoạn cuối bơm ép.

Bảng 2. Sai số căn quân phương chuẩn hóa (NRMSE) giữa số liệu mô phỏng và nghiệm giải tích theo giai đoạn bơm ép

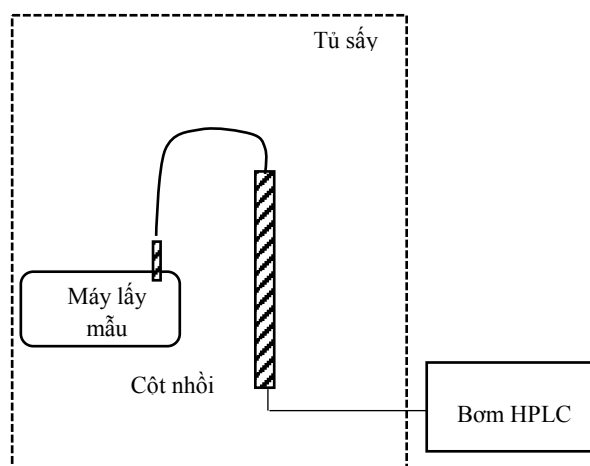
Giai đoạn (PV)	Phenol (Kd = 0,16)	4MP (Kd = 0,58)	2MP (Kd = 0,75)	4PP (Kd = 1,34)	34DMP (Kd = 1,61)	24DMP (Kd = 3,09)	4EP (Kd = 7,37)
	Mô hình dầu không di chuyển						
0 - 1	1,445	1,585	1,638	1,813	1,883	1,174	0,123
1 - 2	0,080	0,130	0,150	0,170	0,220	1,930	1,950
2 - 3	0,003	0,010	0,015	0,044	0,064	0,183	2,382
3 - 4	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,005	0,009	0,062	0,177
4 - 5	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	0,015	0,197
5 - 10	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	0,059
Mô hình dầu di chuyển							
0 - 1	1,115	1,377	1,469	1,744	1,849	1,285	0,215
1 - 2	0,118	0,161	0,169	0,147	0,169	1,939	2,103
2 - 3	0,001	0,004	0,006	0,018	0,029	0,109	2,469
3 - 4	< 0,001	0,002	0,003	0,007	0,007	0,025	0,118
4 - 5	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	0,003	0,004	0,144
5 - 10	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	0,046

II.3. Kết quả thực nghiệm

Thí nghiệm mô phỏng quá trình vận chuyển khuếch tán của các chất NIPTs được tiến hành trên mô hình nước đẩy dầu qua cột nhồi bi thủy tinh nhằm kiểm chứng nghiệm giải tích.

Sơ đồ bố trí thí nghiệm được trình bày như Hình 4 với mẫu dầu thô của mỏ Sư Tử Nâu và nước cất ở 40°C. Hệ số phân bố K_d của các chất NPITs được đo trong điều kiện tiếp xúc tĩnh giữa hai pha dầu/nước. Kết quả hệ số phân bố và nồng độ của chất NPITs trong pha dầu được trình bày trong Bảng 3.

Thông số thí nghiệm được mô tả trong Bảng 4.



Hình 4. Sơ đồ thí nghiệm trên mô hình vật lý.

Bảng 3. Nồng độ của các chất NPITs trong pha dầu và hệ số phân bố tương ứng trong điều kiện thí nghiệm

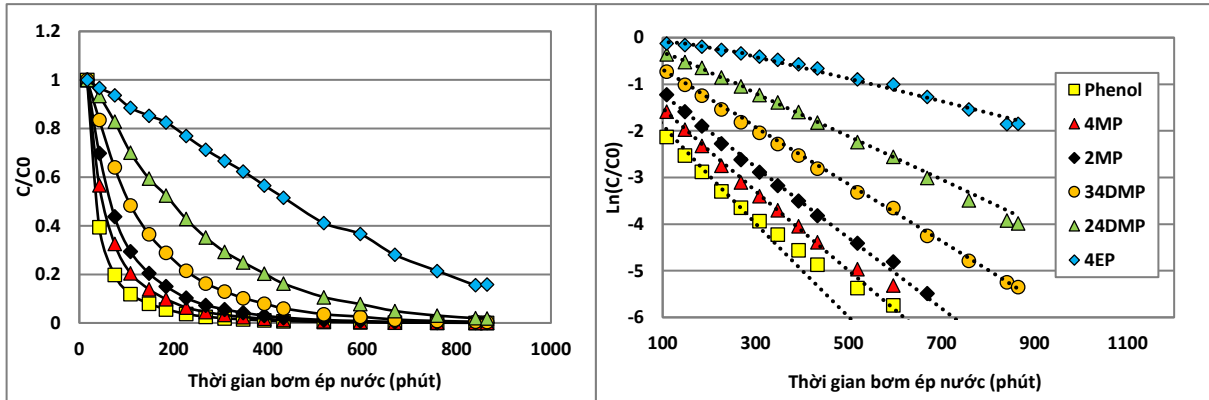
NPITs	Hệ số phân bố $K_d = C_o/C_w$	Nồng độ ban đầu trong dầu (mg/L)	Giới hạn phát hiện của chất NPITs trong nước (mg/L)
Phenol	1,0	134	0,03
4-Methylphenol (4MP)	1,3	128	0,06
2-Methylphenol (2MP)	1,5	137	0,03
3,4-Dimethylphenol (34DMP)	2,1	194	0,10
2,4-Dimethylphenol (24DMP)	3,1	291	0,04
4-Ethylphenol (4EP)	7,5	491	0,05

Bảng 4. Thông số thí nghiệm trên mô hình vật lý

Nội dung	Thông số
Cột thép không rỉ (SS316L)	Chiều dài: 30,5 (cm) Đường kính trong: 1,6 (cm)
Bi thủy tinh	Đường kính trung bình: 100 - 150 μm Khối lượng riêng: 2,7 g/cm^3
Thể tích rỗng của cột nhồi (PV)	24,0 cm^3 (độ rỗng 41%)
Dầu thô mỏ Sư Tử Nâu	Khối lượng riêng ở 40 ⁰ C: 0,82 g/cm^3
Nước cất	Khối lượng riêng ở 40 ⁰ C: 0,992 g/cm^3
Lưu lượng bơm ép nước	0,3 ml/phút
Độ bão hòa dầu tại 11 PV	67% thể tích rỗng (PV)

Nước cất được bơm vào cột đã bão hòa dầu với lưu lượng 0,3 mL/phút và mẫu nước được lấy rời rạc theo thời gian cho đến khi đạt xấp xỉ trạng thái bão hòa dầu dư (67%) tại thể tích bơm tích lũy theo không gian rỗng 11 PV. Trạng thái bão hòa dầu dư được hiểu là trạng

thái dầu còn lại bị mắc kẹt trong không gian rỗng, không thể thu hồi thêm trong cùng chế độ bơm ép. Trong thí nghiệm này, trạng thái bão hòa dầu dư được chọn khi sự khác biệt giữa hai giá trị độ bão hòa dầu liên tiếp khoảng 1%. Nồng độ các chất alkylphenol trong mẫu nước được phân tích trên thiết bị sắc ký lỏng HPLC Dionex Ultimate 3000, detector DAD, cột C18. Giới hạn phát hiện của phương pháp phân tích khoảng 10^{-7} , chi tiết được trình bày trong Bảng 3, với độ tin cậy 95% và sai số phép đo 3-5%.



Hình 4. Đường cong nồng độ các chất NPITs trong pha nước theo thời gian bơm ép (trái); Đường nét đứt mô tả kết quả khớp Phương trình (5) với số liệu thực nghiệm (phải).

Nồng độ các chất NPITs trong pha nước tại đầu ra của mô hình giảm dần theo thời gian bơm ép được thể hiện như Hình 4, trong đó tốc độ suy giảm nồng độ của Phenol là lớn nhất và 4EP là nhỏ nhất. Số liệu thực nghiệm sau đó được làm khớp với nghiệm giải tích mô tả đường cong nồng độ của các chất NPITs qua Phương trình (5). Sai số căn quân phương chuẩn hóa (NRMSE) giữa số liệu thực nghiệm và nghiệm giải tích trong khoảng từ 0,02 đến 0,2 khi tỷ phần nước khai thác gần bằng 1 (2 PV – 11 PV). Kết quả chi tiết được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 5. Sai số căn quân phương chuẩn hóa (NRMSE) giữa số liệu thực nghiệm và nghiệm giải tích theo giai đoạn bơm ép

Giai đoạn (PV)	Phenol (Kd = 0,16)	4MP (Kd = 0,58)	2MP (Kd = 0,75)	34DMP (Kd = 1,61)	24DMP (Kd = 3,09)	4EP (Kd = 7,37)
0-2	0,46	0,48	0,47	0,43	0,33	0,22
2-4	0,06	0,06	0,06	0,20	0,10	0,20
4-6	0,06	0,07	0,05	0,09	0,06	0,13
6-8	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,05
8-11	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,06

V. KẾT LUẬN

Nghiệm giải tích một chiều mô tả sự vận chuyển khuếch tán của các chất NPITs từ pha dầu vào pha nước đã được kiểm chứng trên số liệu mô phỏng mô hình $\frac{1}{4}$ Five-spot đồng nhất một lớp sử dụng phần mềm UTCHEM và số liệu thực nghiệm trên mô hình vật lý. Kết quả chứng minh trong cùng một điều kiện môi trường, tốc độ suy giảm nồng độ của các chất NPITs theo thời gian phụ thuộc chủ yếu vào hệ số phân bố, trong đó chất có hệ số phân bố càng nhỏ thì tốc độ suy giảm nồng độ càng lớn. Kết quả khớp cho thấy nghiệm giải tích khá phù hợp với số liệu mô hình với sai số căn quân phương trong khoảng dưới 0,2 ở giai đoạn cuối bơm ép.

Kết quả nghiên cứu là tiền đề xây dựng phương pháp đánh giá độ bão hòa dầu ở giai đoạn cuối bơm ép cũng như những ứng dụng liên quan đến nghiên cứu sự vận chuyển của Non-Aqueous Phase Liquid (NAPL) trong ô nhiễm môi trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R. Sinha, K. Asakawa, G.A. Pope, K. Sepehmooi. *Simulation of natural and partitioning interwell tracers to calculate saturation and swept volumes in oil reservoirs*. SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma. 17 – 21 April, 2004.
- [2]. Kazuhiro Asakawa. *A generalized analysis of partitioning interwell tracer tests*. University of Texas. 2005.
- [3]. HTT. Huong, LT. Tai, NH. Quang, LV. Son. *Determination of contribution proportion of injection wells in oil production by interwell tracer method using partitioning organic compounds from crude oil*. Petrovietnam Journal. 2019.
- [4]. TB. Cuong, NH. Phan, NH. Quang. *Interwell tracer method using partitioning compounds naturally existing in crude oil for determination of residual oil saturation*. Petrovietnam Journal. 2016.
- [5]. Nguyễn Hồng Phan, Nguyễn Hữu Quang, Tô Bá Cường, Huỳnh Thị Thu Hương, nnk. *Phát triển mô hình mô phỏng quá trình vận động của các chất chỉ thị tự nhiên (NPIT) để đánh giá trữ lượng dầu trong khai thác*. Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam.
- [6]. Marisa Ioppolo – Armanios. *The occurrence and Orrigins of Some Alkylphenols in Crude Oils*. Curtin University of Technology. 1996.
- [7]. O. Huseby, A. Haugan, J. Sagen, J. Muller. *Transport of organic components from immobile and bypassed oil in porous media*. American Institute of Chemical Engineers Journal. 2003.
- [8]. Center for Petroleum and Geosystems Engineering, University of Texas. *Reservoir engineering research program: Volume II – Technical documentation for UTCHEM – 9.0 – A three-dimensional chemical flood simulator*. 2000.

AN ANALYTICAL SOLUTION DESCRIBING THE TRANSPORT OF PARTITIONING ORGANIC COMPOUNDS FROM OIL PHASE TO WATER PHASE DURING WATERFLOODING

HUYNH THỊ THU HUONG¹, NGUYEN HUU QUANG¹, LE VAN SON¹,
TRAN TRONG HIEU¹

¹ *Centre for Applications of Nuclear Technique in Industry, Vietnam Atomic Energy Institute.*
Email: huonghtt@canti.vn

Abstract.

Partitioning organic compounds naturally existing in crude oil able to distribute in the oil/water phase, such as alkylphenols and aliphatic acids, have shown great potential for use as natural partitioning inter-well tracers (NPITs) in oil saturation determination and sources contributed to the production well. The paper presents a 1D analytical solution describing the advection-dispersion transport of NPITs from the oil phase to the water phase during waterflooding. The analytical solution demonstrates the decrease in the concentration of NPITs over time, in which the decline rate depends significantly on NPITs partition coefficient, oil saturation and pore velocity of the phases. The results of matching analytical solution with simulation data of $\frac{1}{4}$ Five-spot homogeneous single-layered model using UTCHEM software and experimental data on the physical model are quite consistent, with the root mean square error in the range below 0.2 at the end of waterflooding. The analytical solution obtained is an important basis for further studies on the method of using NPITs to evaluate the residual oil saturation in the extraction process.

Từ khóa: NPITs, analytical solution, the decrease of concentration, oil saturation.