DầuKhí
KHOA HỌC, CÔNG NGHỆ VÀ ĐỔI MỚI SÁNG TẠO PETROVIETNAM

CÁC TIÊU CHÍ LỰA CHỌN BƠM ĐIỆN CHÌM TRONG KHAI THÁC DẦU TẦNG CHỨA MIOCENE GIỮA, BỂ CỬU LONG

Lê Vũ Quân[1], Nguyễn Minh Quý[1], Nguyễn Văn Đô[1], Trần Nguyên Long[2]
[1]Viện Dầu khí Việt Nam (VPI)
[2]Liên doanh Vietsovpetro (Vietsovpetro)
Email: quanlv@vpi.pvn.vn
https://doi.org/10.47800/PVSI.2025.04-03

Tóm tắt

Bài báo phân tích các tiêu chí kỹ thuật để lựa chọn và thiết kế hệ thống bơm điện chìm (ESP) nhằm tối ưu hóa sản lượng, nâng cao hệ số thu hồi và đảm bảo hiệu quả kinh tế cho các mỏ thuộc bể Cửu Long. Nhóm tác giả đề xuất quy trình lựa chọn bơm điện chìm xem xét toàn diện các tiêu chí về điều kiện giếng khoan, đặc tính chất lưu, thông số thiết bị, điều kiện vận hành và hiệu quả kinh tế.

Để giải quyết các thách thức đặc thù về địa chất và điều kiện vận hành tại bể Cửu Long, nghiên cứu đưa ra các khuyến nghị cụ thể về cấu hình thiết bị (bộ xử lý khí, vật liệu chống mài mòn, động cơ chịu nhiệt cao) và chiến lược vận hành (sử dụng biến tần - VSD) để điều chỉnh tần số và tối ưu hiệu suất. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc thiết kế hệ thống khai thác tin cậy và hiệu quả, góp phần tối ưu khai thác các tầng chứa Miocene giữa của bể Cửu Long.

Từ khóa: Bơm điện chìm (ESP), lựa chọn ESP, Miocene giữa, bể Cửu Long.

1. Giới thiệu

Bể Cửu Long, nằm ở thềm lục địa phía Nam Việt Nam, được xác định là một trong những bể trầm tích có tiềm năng dầu khí lớn nhất khu vực Đông Nam Á. Kể từ khi mỏ Bạch Hổ đi vào khai thác, bể Cửu Long đã trở thành trụ cột của ngành công nghiệp dầu khí Việt Nam. Trong cấu trúc địa tầng của bể, các tập sản phẩm thuộc tầng Miocene giữa, đặc biệt là khu vực trung tâm, đã và đang là đối tượng khai thác quan trọng, đóng góp đáng kể vào sản lượng khai thác toàn bể.

Tuy nhiên, sau giai đoạn khai thác tự phun ban đầu dựa vào năng lượng vỉa tự nhiên, áp suất vỉa suy giảm nhanh chóng, đòi hỏi áp dụng các phương pháp khai thác nhân tạo để duy trì và ổn định sản lượng. Trong số các phương pháp đó, bơm điện chìm (ESP) được xem là một giải pháp ưu việt nhờ khả năng đáp ứng lưu lượng lớn, hiệu suất cao và phù hợp với điều kiện khai thác ngoài khơi. Thực tế tại các mỏ như Đông Đô, Rồng, Cá Tầm cho thấy ESP là giải pháp khả thi nhất cho giai đoạn khai thác cuối đời mỏ.

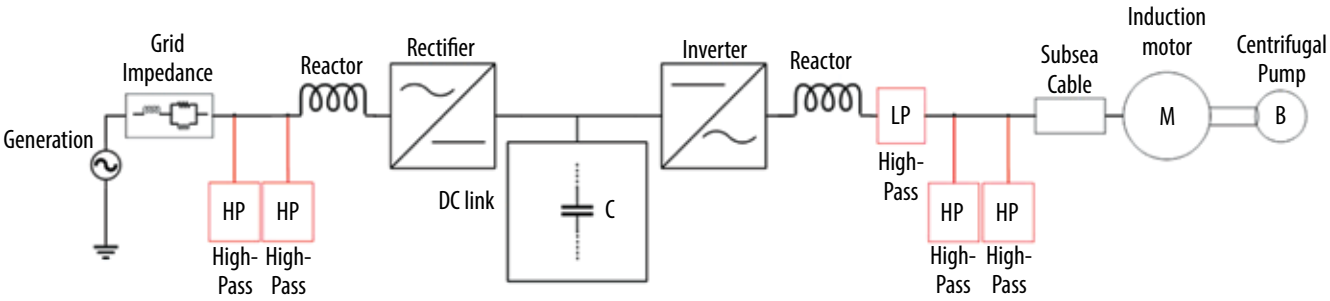
Ngày nhận bài: 23/7/2025
Ngày đánh giá và sửa chữa: 23/7 - 6/8/2025
Ngày duyệt đăng: 6/8/2025

Bảng 1 thể hiện tình hình vận hành của các giếng thuộc 2 đối tượng khai thác chính là Miocene và Móng tính đến quý I năm 2025. Ở tập Miocene, đa số các giếng như Mio-1, Mio-2, Mio-3 và Mio-5 vẫn đang hoạt động ổn định, với thời gian khai thác kéo dài từ khoảng 10 đến hơn 11 năm, cho thấy hệ thống ESP đang sử dụng tại đây có độ tin cậy cao và vận hành bền bỉ. Riêng Mio-4 đã dừng hoạt động sau khoảng 11 năm, phản ánh chu kỳ tự nhiên của thiết bị hoặc sự suy giảm điều kiện khai thác.

Từ thành công bước đầu của việc áp dụng khai thác bằng bơm điện chìm cho đối tượng Miocene nói chung, việc rút ra các bài học kinh nghiệm trong công tác lựa chọn và thiết kế một hệ thống ESP phù hợp cho các tầng Miocene giữa là một nhiệm vụ đầy thách thức. Nguyên nhân là do đặc điểm địa chất - địa vật lý của khu vực khá phức tạp, trong khi tính chất chất lưu lại biến động mạnh với hàm lượng khí tự do cao và xu hướng sinh cát đáng kể. Bên cạnh đó, điều kiện vận hành khắc nghiệt càng làm gia tăng yêu cầu về kỹ thuật và độ tin cậy của thiết bị. Do vậy, việc xác định một bộ tiêu chí tổng thể, vừa đáp ứng đặc điểm vỉa vừa đảm bảo tính ổn định vận hành, là cơ sở quan trọng để lựa chọn được tổ hợp ESP tối ưu. Hình 1 cho thấy hệ thống điện của ESP truyền thống tương đối phức

Bảng 1. *Hiện trạng một số giếng khai thác bằng bơm điện chìm tại bể Cửu Long*

Đối tượng	Giếng	Tình trạng (Q1/2025)	Số năm hoạt động
Miocene	Mio-1	Đang chạy	~ 10,7+
	Mio-2	Đang chạy	~ 11,5+
	Mio-3	Đang chạy	~ 10,5+
	Mio-4	Đã dừng	~ 11 năm
	Mio-5	Đang chạy	~ 10,7+
Móng	Mong-1	Đang chạy	~ 3,2+
	Mong-2	Đang chạy	~ 3,2+
	Mong-3	Đã dừng	~ 1,9
	Mong-4	Đang chạy	~ 0,7+
	Mong-5	Đang chạy	~ 0,8+
	Mong-6	Đang chạy	~ 0,7+
	Mong-7	Đã dừng	~ 1,1
	Mong-8	Đã dừng	~ 1,0
	Mong-9	Đang chạy	~ 0,6+
	Mong-10	Đã dừng	~ 0,6
	Mong-11	Đang chạy	~ 0,4+



Hình 1. *Sơ đồ hệ thống điện của bơm điện chìm truyền thống [1].*

tạp nên việc hỏng hóc sẽ kéo theo thời gian sửa chữa dài, chi phí cao.

Xuất phát từ thực tiễn đó, bài báo này nhằm mục đích hệ thống hóa các tiêu chí kỹ thuật then chốt làm cơ sở cho việc lựa chọn ESP tối ưu cho các mỏ thuộc tầng Miocene giữa, bể Cửu Long. Thông qua việc phân tích đặc điểm vỉa chứa và chất lưu, bài báo đề xuất một khung tiêu chí toàn diện, từ đó giúp giảm thiểu rủi ro, nâng cao độ tin cậy và hiệu quả kinh tế của các dự án khai thác.

2. Đặc điểm địa chất - vỉa chứa và chất lưu tầng Miocene giữa bể Cửu Long

2.1. Đặc điểm địa tầng và kiến trúc

Tầng trầm tích Miocene giữa bể Cửu Long được thành tạo chủ yếu trong môi trường từ châu thổ, sông ngòi tới vũng vịnh, với các thấu kính cát kết xen kẽ các lớp sét kết. Môi trường trầm tích đa dạng này tạo nên các tầng chứa có tính bất đồng nhất cao, phân lớp mỏng và biến đổi nhanh cả theo phương ngang và phương dọc. Các đứt gãy kiến tạo hoạt động mạnh vào giai đoạn Miocene muộn - Pliocene đã chia cắt bể thành các khối, tạo ra các bẫy kiến tạo - địa tầng phức tạp, đồng thời cũng ảnh hưởng đến tính liên tục và áp suất vỉa.

2.2. Tính chất vật lý vỉa chứa

Các tầng chứa Miocene giữa thường có chất lượng từ trung bình đến tốt:

- Độ rỗng: Phổ biến trong khoảng 15 - 25%, có nơi lên tới 28% [3].

- Độ thấm: Dao động mạnh, từ vài chục millidarcy (mD) đến hơn 1.000 mD, thể hiện tính bất đồng nhất rõ rệt.

- Áp suất vỉa: Chủ yếu đều thấp hơn áp suất thủy tĩnh nhưng có sự khác biệt giữa các khu vực.

2.3. Tính chất chất lưu

Đây là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp và sâu sắc nhất đến việc lựa chọn ESP:

- Tỷ trọng: Tỷ trọng dầu ở mức từ nặng đến trung bình (21- 32°API) [3].

- Độ nhớt: Tương đối cao, khoảng biến đổi lớn, thường từ 3,2 - 26,7 cP ở điều kiện vỉa [3].

- Tỷ số khí dầu (GOR): Nhìn chung tỷ số khí dầu dao động ở mức trung bình từ 71 - 658 scf/stb, thậm chí cao hơn ở một số khu vực (như đối tượng Miocene giữa mỏ Thỏ Trắng lên đến 2.116 scf/stb) [3].

- Áp suất bão hòa: Áp suất bão hòa thấp hơn không đáng kể so với áp suất vỉa ban đầu.

- Hàm lượng cát: Nhiều mỏ có xu hướng sinh cát do tính gắn kết của đá chứa không cao.

- Thành phần hóa học: Một số mỏ có sự hiện diện của CO_2 và H_2S ở mức độ nhẹ đến trung bình.

- Nhiệt độ vỉa: Thuộc loại nhiệt độ trung bình, phổ biến trong khoảng 70 - 110°C [3].

3. Các nhóm tiêu chí lựa chọn bơm điện chìm

Việc lựa chọn ESP cho tầng Miocene giữa dựa trên một quy trình phân tích đa tiêu chí, được chia thành các nhóm chính sau:

3.1. Nhóm tiêu chí về đặc điểm giếng và chất lưu

Việc lựa chọn một hệ thống ESP tối ưu không xuất phát từ các catalog thiết bị, mà bắt đầu từ việc phân tích sâu sắc chính đối tượng mà thiết bị sẽ vận hành: giếng và chất lưu. Đối với tầng Miocene giữa tại bể Cửu Long, đây là bước then chốt quyết định đến 80% sự thành công hay thất bại của cả dự án. Nhóm tiêu chí này đóng vai trò nền tảng, cung cấp các dữ liệu đầu vào quan trọng nhất cho mọi tính toán kỹ thuật tiếp theo, từ thiết kế cơ học đến đánh giá hiệu suất và kinh tế. Bỏ qua hoặc đánh giá sai bất kỳ yếu tố nào trong nhóm này đều có thể dẫn đến hệ quả nghiêm trọng như giảm sản lượng, hư hỏng thiết bị sớm và thậm chí là tốn kém chi phí sửa chữa để thay thế toàn bộ hệ thống.

Tiêu chí 1: Áp suất đáy giếng và phân tích nodal

Áp suất đáy giếng khi khai thác P_{wf} (flowing bottomhole pressure) không phải là một hằng số mà là một biến số phụ thuộc vào lưu lượng. Việc xác định chính xác mối quan hệ này thông qua phân tích nodal (nodal analysis) là bước đầu tiên và bắt buộc. Phân tích này cho phép dựng nên đường quan hệ giữa lưu lượng và áp suất, từ đó xác định được điểm vận hành tối ưu cho giếng. P_{wf} là yếu tố quyết định chính để tính toán tổng cột áp (TDH) - "sức mạnh" mà ESP cần phải tạo ra. Sai sót trong ước tính P_{wf} sẽ dẫn đến việc lựa chọn số tầng bơm không phù hợp: quá ít tầng sẽ không đạt được mục tiêu về lưu lượng, trong khi quá nhiều tầng sẽ khiến bơm vận hành ở vùng quá tải, gây quá tải cho motor và tiêu tốn điện năng.

Tiêu chí 2: Hàm lượng khí tự do tại cửa hút

Đây là tiêu chí quan trọng nhất và cũng là thách thức lớn nhất đối với ESP trong bể Cửu Long. Với GOR cao, một lượng lớn khí sẽ được giải phóng khi áp suất giảm xuống dưới áp suất bão hòa. Hệ số thể tích khí (gas void fraction - GVF) tại điểm hút của bơm thường vượt xa ngưỡng 10% mà ESP thông thường có thể xử lý hiệu quả [4, 6]. Hậu quả là hiện tượng "giam khí" (gas locking) khiến bơm ngừng hoạt động, hoặc hiệu suất thủy lực suy giảm nghiêm trọng. Giải pháp bắt buộc là tích hợp các thiết bị tiền xử lý như bộ tách khí ly tâm (RGS) hoặc bộ xử lý khí nâng cao (AGH). Các thiết bị này hoạt động như 1 máy ly tâm, tách khí ra khỏi dòng chất lưu và dẫn khí đã tách vào vành xuyến giữa ống khai thác và tubing để được đẩy lên độc lập, giúp giảm GVF tại cửa hút bơm xuống dưới ngưỡng nguy hiểm.

Tiêu chí 3: Xu hướng sinh cát (sand production)

Các tầng cát kết Miocene giữa thường có tính kết dính kém (poor consolidation). Khi áp suất vỉa suy giảm và lưu lượng dòng chảy tăng lên, lực kéo của dòng chất lưu có thể làm các hạt cát rời rạc di chuyển vào giếng. Cát là "kẻ thù" của ESP, mài mòn nghiêm trọng các bộ phận chuyển động với vận tốc cao như cánh bơm (impeller), bánh định hướng (diffuser) và các ổ đỡ (bearings). Điều này dẫn đến hiệu suất bơm giảm sút nhanh chóng và cuối cùng là hỏng hóc cơ học. Do đó, việc lựa chọn cấp độ chống mài mòn (abrasion resistance) phù hợp là cực kỳ quan trọng trong thiết kế và vận hành ESP. Các vật liệu có độ mài mòn cao như tungsten carbide dùng cho các ổ đỡ và bề mặt làm việc, hay các hợp kim đặc biệt được xử lý nhiệt, là sự lựa chọn bắt buộc để kéo dài tuổi thọ vận hành của ESP trong môi trường khắc nghiệt này.

Tiêu chí 4: Nhiệt độ vỉa và chất lưu

Nhiệt độ vỉa phổ biến là 70 - 110°C, cộng với nhiệt lượng sinh ra từ chính hoạt động của motor và ma sát thủy lực trong bơm, có thể đẩy nhiệt độ cục bộ tại motor lên rất cao. Nhiệt độ quá cao sẽ làm giảm tuổi thọ của dầu cách điện bên trong motor, dẫn đến cháy cách điện và cháy motor. Nhiệt độ cao cũng làm giảm độ bền cơ học của các vật liệu và làm tăng hệ số giãn nở nhiệt, gây khó khăn cho thiết kế cơ khí [4]. Vì vậy, việc lựa chọn dầu cách điện chịu nhiệt cao (ví dụ loại gốc polyalphaolefin - PAO) và cáp điện có lớp cách nhiệt đặc biệt (thường là lớp EPDM hoặc polypropylene) là bắt buộc. Các mô hình mô phỏng nhiệt nên được chạy để đảm bảo nhiệt độ motor luôn nằm trong ngưỡng cho phép của nhà sản xuất.

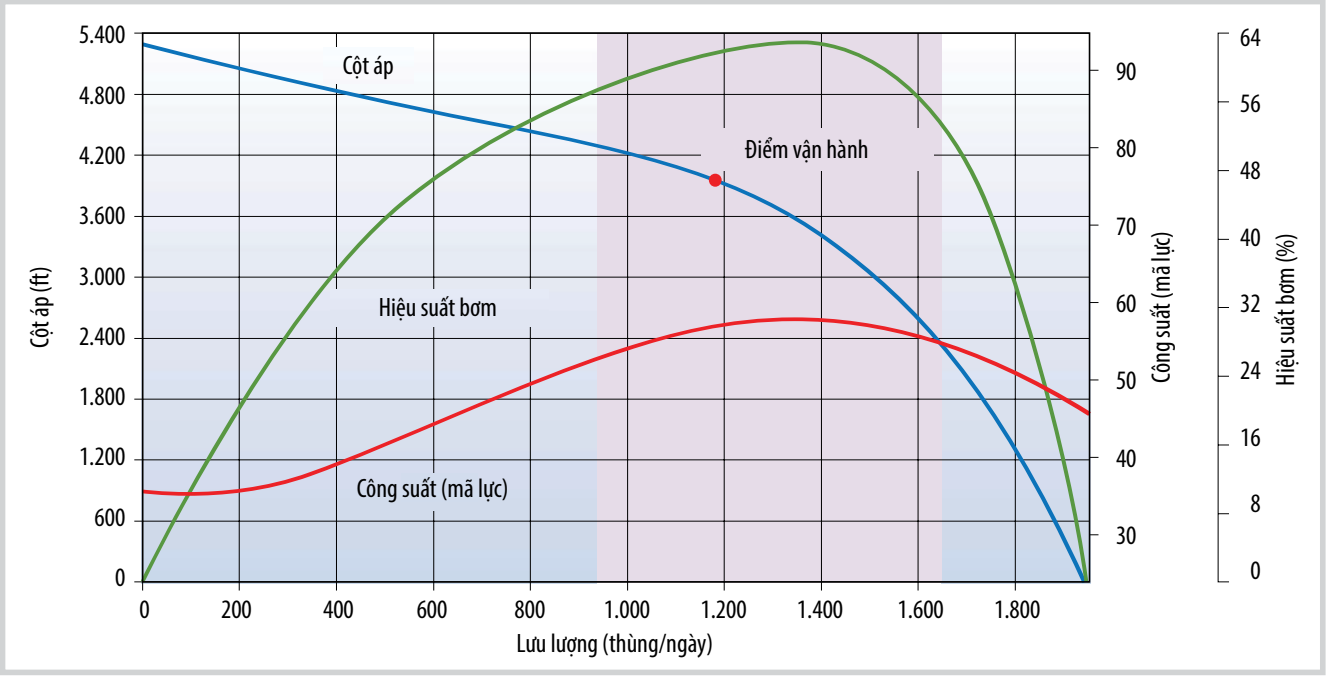
Tiêu chí 5: Tính ăn mòn của chất lưu

Mặc dù không phải là vấn đề của tất cả các mỏ, nhưng sự hiện diện của các chất khí như H_2S, CO_2 và nước mặn trong chất lưu tạo ra môi trường ăn mòn hóa học. Ăn mòn có thể làm mỏng thành kim loại, gây nứt vỡ do ứng suất (sulfide stress cracking - SSC), và cuối cùng là dẫn đến hỏng hóc nặng. Xác định được tiêu chí này sẽ quyết định việc lựa chọn vật liệu cho tất cả các bộ phận tiếp xúc với chất lưu, từ vỏ bơm, trục bơm đến các thành phần của motor và cáp. Các vật liệu như thép không gỉ duplex (ví dụ 22Cr và 25Cr) hoặc super duplex thường được ưu tiên cho các môi trường có H_2S. Việc đánh giá rủi ro ăn mòn phải dựa trên phân tích chi tiết thành phần chất lưu, áp suất và nhiệt độ vỉa.

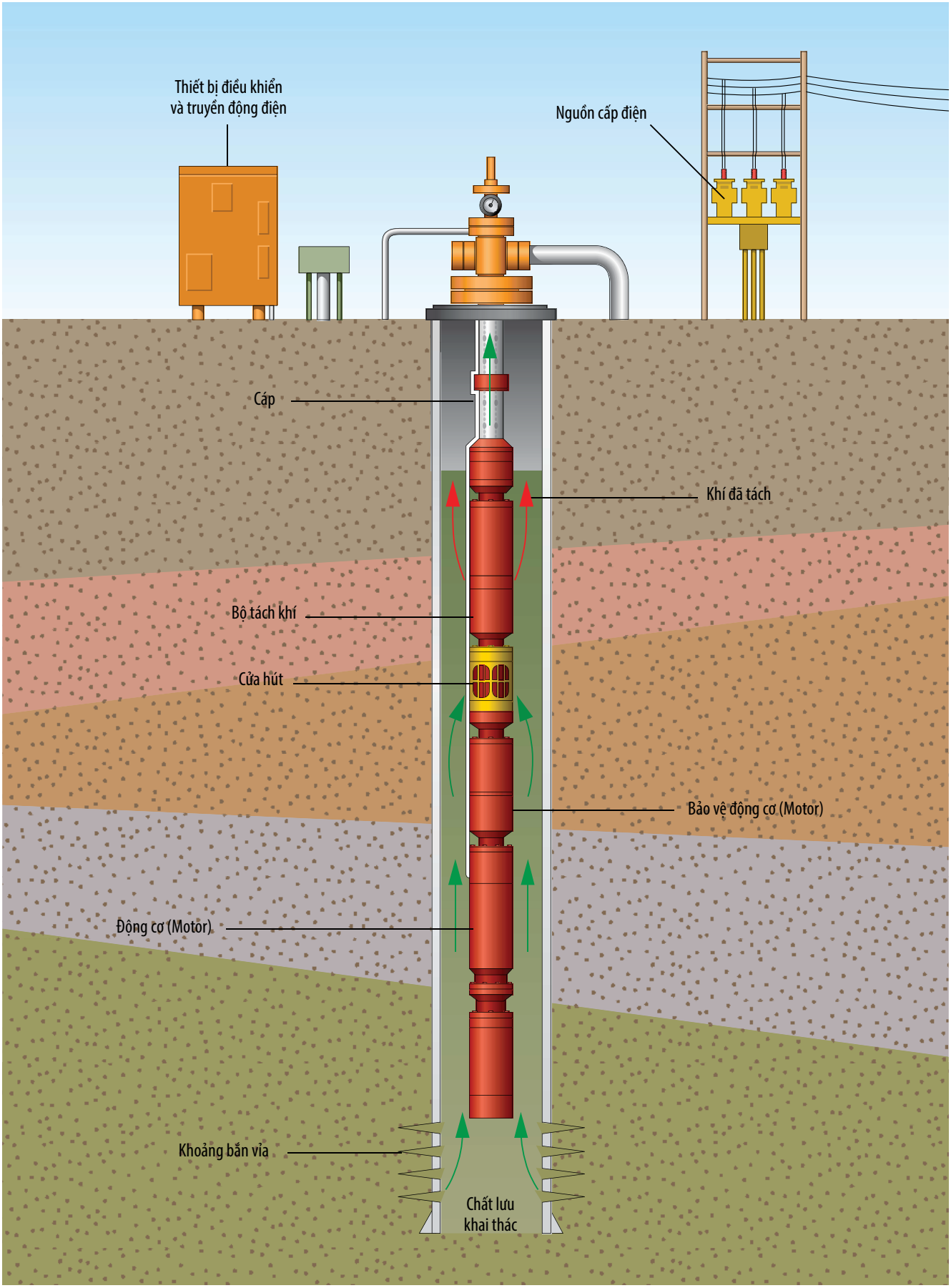
Tiêu chí 6: Lưu lượng khai thác và độ suy giảm áp suất vỉa

Lưu lượng khai thác mục tiêu không chỉ là một con số cố định cho toàn bộ vòng đời giếng. Áp suất vỉa sẽ suy giảm theo thời gian, và để duy trì lưu lượng, P_{wf} cần phải hạ thấp hơn nữa, đồng nghĩa với việc TDH sẽ thay đổi. Hình 2 biểu diễn đường đặc tính bơm (pump performance curve). Điểm vận hành "Operating point" là vị trí giao nhau giữa đường đặc tính bơm và đường đặc tính giếng (chính là điểm cân bằng lưu lượng - áp suất). Đây là điểm vận hành hiện tại của ESP [2]. Nếu được thiết kế cứng nhắc cho một điểm vận hành cố định, ESP sẽ nhanh chóng trở nên kém hiệu quả. Do đó, ESP cần được thiết kế để hoạt động trong một dải lưu lượng rộng, với điểm thiết kế ban đầu nằm trong vùng hiệu suất tối ưu (best efficiency point - BEP) nhưng vẫn có khả năng vận hành an toàn ở các lưu lượng thấp hơn hoặc cao hơn trong tương lai [4]. Điều này thường được giải quyết bằng việc sử dụng biến tần (variable speed drive - VSD) để điều chỉnh tốc độ động cơ, cho phép "di chuyển" đường đặc tính bơm để phù hợp với đường đặc tính giếng đang thay đổi.

Nhóm tiêu chí về đặc điểm giếng và chất lưu là tập hợp các yếu tố đầu vào có tính quyết định, là đặc điểm riêng của mỗi giếng khai thác tại tầng Miocene giữa, bể Cửu Long. 6 tiêu chí then chốt: (1) Áp suất đáy giếng; (2) Hàm lượng khí tự do; (3) Xu hướng sản sinh cát; (4) Nhiệt độ; (5) Tính ăn mòn và (6) Lưu lượng cùng độ suy giảm áp suất vỉa - không tồn tại độc lập mà có mối quan hệ tương



Hình 2. *Ví dụ về đường đặc tính bơm điện chìm [2].*



Hình 3. *Cấu hình điển hình của bơm điện chìm [2].*

tác chặt chẽ với nhau. Một thiết kế ESP thành công phải là kết quả của một sự phân tích tổng thể và đồng bộ tất cả các tiêu chí này. Chỉ khi nào những đặc tính nền tảng này được hiểu rõ và định lượng chính xác, các kỹ sư mới có thể chuyển sang bước tiếp theo là lựa chọn cấu hình thiết bị phù hợp, nhằm biến thách thức của thiên nhiên thành cơ hội khai thác hiệu quả và bền vững.

3.2. Nhóm tiêu chí về thiết kế và cấu hình hệ thống ESP

Sau khi thu thập và phân tích đầy đủ các đặc trưng của giếng và tính chất của chất lưu, bước tiếp theo là chuyển hóa các dữ liệu đó thành một thiết kế kỹ thuật cụ thể cho hệ thống ESP. Hình 3 mô tả cấu tạo và nguyên lý hoạt động tổng quát của hệ thống ESP, trong đó năng lượng điện từ mặt đất được truyền qua cáp xuống động cơ đặt dưới đáy giếng để vận hành bơm, đưa chất lỏng khai thác từ vỉa lên bề mặt. Đây là cơ sở để thiết kế cấu hình hệ thống bơm. Nhóm tiêu chí về thiết kế và cấu hình đóng vai trò là cầu nối, biến những thách thức từ lòng giếng thành các giải pháp công nghệ khả thi. Quá trình này bao gồm việc lựa chọn từng thành phần, tính toán các thông số vận hành và tối ưu sự kết hợp giữa các bộ phận nhằm tạo ra một hệ thống hoạt động ổn định, hiệu quả và bền vững. Một thiết kế tốt không chỉ đáp ứng được nhu cầu khai thác trước mắt mà còn phải có tính dự phòng và khả năng thích ứng với sự suy giảm của vỉa trong tương lai.

Tiêu chí 1: Tính toán chính xác tổng cột áp (total dynamic head - TDH)

TDH là thông số cốt lõi trong mọi thiết kế ESP, biểu thị tổng năng lượng mà bơm phải cung cấp để đưa chất lưu từ điểm hút lên tới bề mặt. Việc tính toán TDH sai lệch sẽ dẫn đến việc lựa chọn số tầng bơm không chính xác, kéo theo hàng loạt vấn đề nghiêm trọng.

TDH được tính toán dựa trên công thức:

TDH = Áp suất đầu giếng (chuyển đổi sang mét) + Chênh lệch độ sâu + Tổn thất áp suất do ma sát trong ống - Áp suất tại điểm hút (chuyển đổi sang mét).

Trong đó, áp suất tại điểm hút (P_{wf}) và tổn thất ma sát là các biến số phức tạp, phụ thuộc vào lưu lượng, độ nhớt và đặc tính của ống. Việc sử dụng các phần mềm mô phỏng chuyên dụng là bắt buộc để có kết quả chính xác. Nếu TDH tính toán thấp hơn thực tế, bơm sẽ không đủ sức đẩy dòng chất lưu, dẫn đến lưu lượng thấp. Ngược lại, nếu TDH tính toán cao hơn, bơm sẽ vận hành ở vùng quá tải phía bên phải của đường đặc tính, gây ra hiện tượng xâm thực (cavitation), quá tải motor và tiêu hao năng lượng vô ích.

Tiêu chí 2: Lựa chọn loại cánh bơm và số tầng bơm

Không phải tất cả các loại ESP đều giống nhau. Ứng với các điều kiện chất lưu khác nhau, các nhà sản xuất phát triển các kiểu thiết kế cánh bơm (stages) khác nhau, chủ yếu thuộc 3 dòng chính: hướng trục (axial flow), hướng kính (radial flow) và kiểu hỗn hợp (mixed flow). Đối với điều kiện của bể Cửu Long, nơi có lưu lượng trung bình và quan trọng nhất là một số đối tượng có hàm lượng khí khá cao, các loại cánh bơm hỗn hợp hoặc hướng kính có thiết kế đặc biệt để xử lý khí (thường có góc cánh rộng hơn, kênh dẫn dòng rộng hơn) là sự lựa chọn tối ưu. Chúng có khả năng chống "giam khí" tốt hơn và có vùng hiệu suất tối ưu (BEP) rộng hơn. Số tầng bơm được xác định bằng cách lấy TDH chia cho cột áp do một tầng bơm tạo ra tại lưu lượng thiết kế (thông số này do nhà sản xuất cung cấp).

Việc lựa chọn này phải đảm bảo điểm vận hành nằm trong vùng hiệu suất cao nhất của đường đặc tính bơm.

Tiêu chí 3: Tính toán công suất và lựa chọn motor

Motor là thiết bị cung cấp năng lượng cho toàn hệ thống. Công suất motor yêu cầu được tính toán dựa trên công thức:

Công suất (HP) = (TDH (ft) x Lưu lượng (BPD) x Trọng lượng riêng (SG))/(3960 x Hiệu suất bơm).

Tuy nhiên, đây mới chỉ là công suất thủy lực. Để đảm bảo độ tin cậy, motor được chọn phải có công suất định mức lớn hơn công suất yêu cầu, với một hệ số dự phòng có tính đến các yếu tố khắc nghiệt như:

- Nhiệt độ: Motor bị giảm công suất ở môi trường nhiệt độ cao.

- Độ nhớt: Chất lưu nhớt cao làm tăng ma sát và công suất tiêu thụ.

- Hàm lượng cát: Cũng làm tăng ma sát và công suất.

Thông thường, sẽ áp dụng hệ số dự phòng từ 10% đến 20%. Ngoài ra, việc lựa chọn điện áp vận hành (thường là 1.500 V, 2.000 V, 2.500 V hoặc cao hơn) cũng rất quan trọng. Điện áp cao hơn sẽ giúp giảm dòng điện, từ đó giảm tổn thất điện năng trên đường cáp và cho phép sử dụng cáp có tiết diện nhỏ hơn.

Tiêu chí 4: Lựa chọn bộ bảo vệ (protector/seal section)

Bộ bảo vệ là một trong những thành phần tinh vi và quan trọng nhất của hệ thống ESP, có nhiệm vụ:

1. Ngăn chặn chất lưu từ giếng xâm nhập vào khoang chứa dầu cách điện của motor.

2. Truyền chuyển động quay từ trục motor sang trục bơm.

3. Bù đắp sự giãn nở nhiệt của dầu motor khi nhiệt độ thay đổi.

4. Cân bằng áp suất bên trong motor với áp suất giếng.

Đối với môi trường nhiệt độ cao và nhiều khí, việc lựa chọn bộ bảo vệ phù hợp là rất quan trọng. Các thiết kế Tandem hoặc Chambered Tandem Bag (CTB) thường được ưu tiên nhờ cấu trúc nhiều tầng bảo vệ, cung cấp khả năng bù áp và ngăn chặn khí tốt hơn so với các thiết kế đơn giản. Chất lượng cơ cấu (labyrinth) và ổ đỡ trong bộ bảo vệ quyết định trực tiếp đến tuổi thọ của toàn bộ hệ thống.

Tiêu chí 5: Thiết kế hệ thống cáp điện

Cáp ESP là đường truyền cung cấp năng lượng cho motor dưới đáy giếng và cần phải chịu được những điều kiện khắc nghiệt: nhiệt độ cao, áp suất lớn, môi trường có thể ăn mòn và các tác động cơ học (bị nén và cọ xát). Việc lựa chọn cáp dựa trên 3 yếu tố chính:

1. Kích cỡ (AWG): được tính toán để tổn thất điện áp trên chiều dài cáp nằm trong giới hạn cho phép (thường <30V/1.000ft), đảm bảo điện áp tại motor đủ để khởi động và vận hành.

2. Vật liệu cách điện và vỏ bọc: chịu được nhiệt độ vượt quá nhiệt độ giếng dự kiến. Vỏ bọc thường làm bằng vật liệu chống ăn mòn như chì (lead), cao su nitrile hoặc EPDM.

3. Cấu trúc: Cáp ba lõi (dẹt hoặc tròn) thường được sử dụng. Cáp cần được trang bị lớp bảo vệ cơ học (armor) để chống lại lực nén và mài mòn trong quá trình lắp đặt và vận hành.

Tóm lại, xác định nhóm tiêu chí về thiết kế và cấu hình hệ thống ESP chính là quá trình hiện thực hóa các yêu cầu kỹ thuật thành một hệ thống phần cứng đồng bộ. 5 tiêu chí trụ cột – (1) Tính toán TDH chính xác, (2) Lựa chọn loại cánh bơm và số tầng phù hợp, (3) Chọn motor có công suất và điện áp tối ưu, (4) Sử dụng bộ bảo vệ đủ tin cậy, và (5) Thiết kế hệ thống cáp bền vững – phải được xem xét một cách tổng thể và có mối liên hệ chặt chẽ với nhau. Mỗi sai sót trong bất kỳ mắt xích nào của chuỗi thiết kế này đều có thể làm giảm hiệu suất, gây hư hỏng thiết bị và dẫn đến những thiệt hại kinh tế đáng kể. Do đó, một thiết kế thành công phải là sự kết hợp tổng thể giữa tính toán lý thuyết chính xác, kinh nghiệm thực tiễn từ các mỏ tương tự và sự lựa chọn các thành phần có độ tin cậy đã được chứng minh.

3.3. Nhóm tiêu chí về vận hành và giám sát

Hệ thống ESP được thiết kế tối ưu nhưng cũng sẽ không hiệu quả nếu không được vận hành và giám sát một cách bài bản. Trong quá trình khai thác, điều kiện vỉa và chất lưu luôn biến động, nhóm tiêu chí về vận hành và giám sát không đơn thuần là một thủ tục kỹ thuật mà chính là yếu tố then chốt để bảo vệ khoản đầu tư, tối đa hóa tuổi thọ thiết bị và đảm bảo sản lượng [6]. Đây là quá trình liên tục thu thập dữ liệu, phân tích xu hướng và đưa ra các điều chỉnh kịp thời, biến hệ thống ESP từ một thiết bị cứng nhắc thành một công cụ khai thác linh hoạt và thông minh.

Tiêu chí 1: Ứng dụng biến tần VSD

Việc sử dụng VSD không còn là một tùy chọn mà gần như là bắt buộc đối với ESP khai thác tại tầng Miocene giữa. VSD cung cấp 3 lợi ích chiến lược. Thứ nhất, VSD cho phép điều chỉnh tốc độ động cơ để di chuyển điểm vận hành của bơm trên đường đặc tính, giúp hệ thống luôn thích ứng với sự suy giảm áp suất vỉa và thay đổi GOR theo thời gian mà không cần phải tháo lắp thiết bị lòng giếng để thay đổi số tầng bơm. Thứ hai, VSD cho phép khởi động mềm (soft start), giảm thiểu ứng suất cơ học lên trục bơm cũng như sốc điện lên lưới điện, qua đó kéo dài tuổi thọ thiết bị. Thứ ba, và cũng là yếu tố quan trọng nhất, khả năng điều chỉnh tốc độ giúp tối ưu hóa quá trình xử lý khí. Bằng cách giảm bớt tốc độ bơm khi hàm lượng khí tăng đột biến, kỹ sư vận hành có thể cho phép bộ tách khí hoạt động hiệu quả hơn, ngăn ngừa hiện tượng "giam khí" và duy trì sự ổn định cho toàn hệ thống.

Tiêu chí 2: Hệ thống giám sát đáy giếng và phân tích dữ liệu

Dữ liệu chính xác và theo thời gian thực là công cụ quan sát phục vụ quá trình ra quyết định của kỹ sư vận hành. Các cảm biến đáy giếng (downhole sensor) đo đạc các thông số quan trọng như áp suất, nhiệt độ đáy giếng (P/T), nhiệt độ motor, rung động, rò rỉ dòng điện [5]. Việc theo dõi liên tục áp suất đáy giếng cho phép xác định chính xác điểm làm việc trên đường đặc tính giếng, phát hiện sớm các hiện tượng như nghẹt bơm, suy giảm năng suất vỉa, hoặc sự xâm nhập của nước. Nhiệt độ motor là chỉ số cảnh báo sớm cho thấy các vấn đề về làm mát, có thể

do lưu lượng quá thấp hoặc bộ tách khí hoạt động kém hiệu quả. Dữ liệu này không chỉ để theo dõi mà phải được phân tích xu hướng (trend analysis). Sự sụt giảm dần về áp suất kèm theo nhiệt độ motor tăng nhẹ có thể là dấu hiệu của sự suy giảm vỉa hoặc bơm bắt đầu bị mòn, cho phép lên kế hoạch bảo dưỡng chủ động thay vì chờ đợi sự cố xảy ra.

Tiêu chí 3: Chiến lược vận hành và xử lý sự cố

Một hệ thống giám sát dù hoàn hảo cũng không thể hiệu quả nếu không được hỗ trợ bởi các quy trình vận hành và xử lý sự cố được chuẩn hóa. Các quy trình này bao gồm: Quy trình khởi động đặc biệt cho giếng nhiều khí, chẳng hạn như xả khí ban đầu qua đường vòng (bypass) hoặc khởi động ở tốc độ thấp để "làm sạch" khí trước khi tăng dần tốc độ lên mức vận hành. Các bảng chỉ dẫn (operating envelopes) được thiết lập rõ ràng, xác định các ngưỡng an toàn cho dòng điện, nhiệt độ, áp suất và lưu lượng, giúp người vận hành biết khi nào cần can thiệp. Kịch bản ứng phó với các sự cố thường gặp như "giam khí", nghẹt bơm, hoặc mất pha điện phải được đào tạo và diễn tập thường xuyên. Việc ghi chép nhật ký vận hành (logbook) đầy đủ là vô cùng quan trọng để xác định nguyên nhân sự cố và cải thiện hiệu suất cho các lần lắp đặt tiếp theo.

Nhóm tiêu chí về vận hành và giám sát là yếu tố then chốt biến một thiết kế ESP lý thuyết thành một công cụ khai thác hiệu quả và tin cậy trong thực tế. Ba trụ cột chính - (i) Ứng dụng linh hoạt biến tần (VSD), (ii) Giám sát đáy giếng và phân tích xu hướng dữ liệu và (iii) Chiến lược vận hành và xử lý sự cố chủ động - tạo nên một quy trình khép kín: theo dõi, phân tích, điều chỉnh và tối ưu hóa. Các yếu tố này không chỉ giúp kéo dài tuổi thọ của ESP mà còn là chìa khóa để khai thác tối đa tiềm năng của vỉa, đặc biệt là trong điều kiện phức tạp của các mỏ thuộc tầng Miocene giữa, bể Cửu Long. Đầu tư vào công nghệ giám sát và đào tạo con người vận hành luôn mang lại hiệu quả đầu tư cao nhất.

3.4. Nhóm tiêu chí về kinh tế và độ tin cậy

Trong một dự án khai thác dầu khí, mọi quyết định kỹ thuật cuối cùng đều cần được đánh giá dưới góc độ kinh tế. Nhóm tiêu chí về kinh tế và độ tin cậy đóng vai trò là chỉ số tổng hợp, định lượng hóa giá trị của một hệ thống ESP trong suốt vòng đời vận hành, từ lúc lắp đặt đến khi ngừng hoạt động. Đối với các mỏ ngoài khơi như tại bể Cửu Long, chi phí vận hành (OPEX) và chi phí sửa chữa (workover) đặc biệt cao, việc lựa chọn ESP chỉ dựa trên chi phí đầu tư ban đầu (CAPEX) là tiềm ẩn rủi ro. Do đó, nhóm tiêu chí này buộc các kỹ sư và nhà quản lý phải đánh giá tổng thể, cân bằng giữa chi phí đầu tư ban đầu với hiệu suất năng lượng, độ tin cậy, tính sẵn sàng vận hành của hệ thống, nhằm tối ưu hóa hiệu quả kinh tế trong suốt vòng đời của mỏ.

Tiêu chí 1: Phân tích chi phí vòng đời (life cycle cost - LCC)

Phân tích LCC là phương pháp toàn diện nhất để đánh giá hiệu quả kinh tế tổng thể của một hệ thống ESP. LCC không chỉ phản ánh giá mua thiết bị ban đầu, mà còn bao gồm toàn bộ các chi phí phát sinh trong suốt vòng đời của hệ thống, cụ thể:

- Chi phí đầu tư ban đầu: giá mua thiết bị (bơm, motor, cáp, biến tần), chi phí vận chuyển và lắp đặt.

- Chi phí vận hành: chi phí điện năng tiêu thụ (lớn nhất), chi phí bảo dưỡng định kỳ.

- Chi phí hư hỏng và sửa chữa: chi phí vận hành giàn khoan để thả/kéo thiết bị (đặc biệt tốn kém trong điều kiện ngoài khơi), chi phí thay thế linh kiện hỏng.

- Chi phí mất sản lượng (lost production revenue): phần doanh thu bị mất trong thời gian giếng ngừng hoạt động để sửa chữa.

Một hệ thống ESP có giá mua ban đầu cao hơn nhưng hiệu suất năng lượng vượt trội và độ tin cậy cao (dẫn đến ít lần can thiệp giếng hơn) thường có LCC thấp hơn hẳn so với một hệ thống giá rẻ nhưng kém hiệu quả và hay hỏng hóc.

Tiêu chí 2: Độ tin cậy và thời gian hoạt động trung bình giữa 2 lần hỏng hóc

Độ tin cậy là thước đo xác suất mà hệ thống ESP hoạt động không gặp sự cố trong một khoảng thời gian nhất định dưới các điều kiện vận hành xác định. Chỉ số này được định lượng hóa thông qua thời gian hoạt động trung bình giữa hai lần hỏng hóc (mean time between failures – MTBF). MTBF cao phản ánh một thiết kế vượt trội, chất lượng chế tạo tốt và phù hợp với điều kiện giếng. Tại bể Cửu Long, chi phí cho một lần can thiệp giếng có thể lên tới hàng triệu USD, việc nâng cao MTBF thậm chí chỉ vài tháng cũng mang lại hiệu quả kinh tế đáng kể. Độ tin cậy không phải là yếu tố may rủi mà là kết quả của việc lựa chọn đúng vật liệu (chống mài mòn, ăn mòn), thiết kế động lực học chất lỏng phù hợp (xử lý khí tốt) và quy trình lắp ráp, bảo dưỡng nghiêm ngặt. Đánh đổi một khoản CAPEX cao hơn để có được MTBF cao hơn gần như luôn là lựa chọn kinh tế hợp lý.

Tiêu chí 3: Khả năng ứng phó sự cố và hỗ trợ kỹ thuật từ nhà cung cấp

Yếu tố con người và dịch vụ hậu mãi là tiêu chí kinh tế quan trọng nhưng thường bị xem nhẹ. Một nhà cung cấp uy tín không chỉ bán thiết bị mà còn cung cấp "gói giải pháp" toàn diện, thường bao gồm:

- Hỗ trợ kỹ thuật 24/7: Khả năng có mặt và xử lý sự cố kịp thời, đặc biệt là trong các tình huống khẩn cấp.

- Thời gian phản hồi và sự sẵn có của phụ tùng thay thế: Khoảng thời gian từ lúc đặt hàng đến khi linh kiện có mặt tại hiện trường quyết định trực tiếp đến thời gian ngừng khai thác của giếng. Một nhà cung cấp có kho phụ tùng tại địa phương (ví dụ, ở Vũng Tàu) sẽ được ưu tiên hơn nhiều.

- Dịch vụ phân tích dữ liệu và giám sát từ xa: Nhiều nhà cung cấp hàng đầu cung cấp dịch vụ theo dõi hiệu suất hệ thống từ trung tâm điều hành, đưa ra cảnh báo sớm và đề xuất tối ưu hóa, giúp ngăn ngừa sự cố trước khi chúng xảy ra [6].

Chi phí cho các dịch vụ này có thể được tính vào CAPEX hoặc OPEX. Tuy nhiên, các dịch vụ này mang lại giá trị rất lớn trong việc giảm thiểu rủi ro và thời gian ngừng khai thác.

Nhóm tiêu chí về kinh tế và độ tin cậy cho thấy bức tranh toàn cảnh, các quyết định kỹ thuật phải được định lượng bằng chi phí và rủi ro. Ba yếu tố không thể tách rời, là cơ sở cho quyết định đầu tư thông minh gồm: (i) Phân tích chi phí vòng đời (LCC) giúp đánh giá hiệu quả trong dài hạn; (ii) Ưu tiên độ tin cậy và MTBF cao để giảm thiểu chi phí sửa chữa và mất sản lượng và (iii) Lựa chọn nhà cung cấp dựa trên năng lực hỗ trợ kỹ thuật và dịch vụ hậu mãi góp phần đảm bảo vận hành hiệu quả và bền vững.

Để khai thác tầng Miocene giữa, việc lựa chọn hệ thống ESP "rẻ nhất" ban đầu thường là giải pháp "đắt nhất" khi xét đến tổng thể vòng đời dự án. Ngược lại, đầu tư có tính toán vào công nghệ cao, độ tin cậy đã được chứng minh và dịch vụ hậu mãi mang lại hiệu quả kinh tế tối ưu và bền vững.

4. Kết luận và khuyến nghị

Việc lựa chọn hệ thống ESP cho các tầng chứa Miocene giữa tại bể Cửu Long đòi hỏi cách tiếp cận toàn diện và có hệ thống, dựa trên sự hiểu biết sâu sắc về đặc điểm địa chất - vỉa chứa và tính chất chất lưu đặc thù của khu vực.

Các tiêu chí quan trọng có thể được tóm tắt như sau:

- Xử lý khí là ưu tiên số 1: Bắt buộc tích hợp các thiết bị tiền xử lý khí hiệu suất cao (RGS/AGH) vào thiết kế ESP tiêu chuẩn.

- Chống mài mòn là bắt buộc: Lựa chọn vật liệu cấp độ cao (tungsten carbide) cho các bộ phận chịu mài mòn do xu hướng sinh cát.

- Chịu được nhiệt độ cao: Motor và cáp phải được thiết kế đặc chủng cho nhiệt độ vỉa từ 70 - 110°C.

- Linh hoạt trong vận hành: Biến tần VSD và hệ thống giám sát đáy giếng là những công nghệ không thể tách rời để tối ưu hóa sản lượng và bảo vệ thiết bị.

- Phân tích kinh tế kỹ thuật: Lựa chọn phương án tối ưu chi phí vòng đời, cân bằng giữa hiệu suất, độ tin cậy và khả năng hỗ trợ kỹ thuật.

Để đạt được hiệu quả khai thác tối đa, các nhà điều hành cần hợp tác chặt chẽ với các nhà cung cấp ESP để mô phỏng và tối ưu hóa thiết kế bằng các phần mềm chuyên dụng, đồng thời xây dựng cơ sở dữ liệu vận hành chi tiết cho từng mỏ, từng giếng. Việc áp dụng một cách bài bản các tiêu chí nêu trên sẽ góp phần quan trọng vào mục tiêu kéo dài tuổi thọ giếng, nâng cao hệ số thu hồi dầu và đảm bảo tính bền vững cho hoạt động khai thác tại bể Cửu Long.

Tài liệu tham khảo

[1] Bruno Cortes, Leandro R. Araujo, and Débora R.R. Penido, "Electrical submersible pump system model to assist oil lifting studies", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 174, pp. 1279 - 1289, 2019. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.11.055.

[2] Rick von Flatern, "Electrical submersible pump", *Oilfield Review*, 2015.

[3] Viện Dầu khí Việt Nam (VPI), *"Tổng kết, đánh giá công tác tìm kiếm thăm dò dầu khí ở Việt Nam giai đoạn 2011 - 2015 và phương hướng tìm kiếm thăm dò tiếp theo"*, 2017.

[4] Sherif Fakher, Abdelaziz Khlaifat, and Hashim Nameer, "Improving electric submersible pumps efficiency and mean time between failure using permanent magnet motor", *Upstream Oil and Gas Technology*, Volume 9, 2022. DOI: 10.1016/j.upstre.2022.100074.

[5] Mohammed A. AL-Hejjaj, Dhifaf J. Sadeq, and Omar Al-Fatlawi, "A review of the electrical submersible

pump development chronology", *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, Volume 24, Issue 2, pp. 123 - 135, 2023. DOI: 10.31699/IJCPE.2023.2.14.

[6] Michael C. Romer, Mark E. Johnson, Pat C. Underwood, Amanda L. Albers, and Russ M. Bacon, "Offshore ESP section criteria: An industry study", *SPE Deepwater Drilling and Completion Conference, Galveston*, Texas, *USA, 20 - 21 June 2012*.

CRITERIA FOR SELECTING ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPS (ESP) FOR OIL PRODUCTION FROM MIDDLE MIOCENE RESERVOIRS IN THE CUU LONG BASIN

Le Vu Quan[1], Nguyen Minh Quy[1], Nguyen Van Do[1], Tran Nguyen Long[2]
[1]Vietnam Petroleum Institute (VPI)
[2]Vietsovpetro Joint Venture (Vietsovpetro)
Email: quanlv@vpi.pvn.vn

Summary

The paper analyzes the technical criteria for selecting and designing Electrical Submersible Pump (ESP) systems to optimize production rates, enhance recovery factors, and ensure economic efficiency for oilfields in the Cuu Long basin. The authors propose a comprehensive ESP selection workflow that integrates key criteria related to well conditions, fluid properties, equipment specifications, operating parameters, and overall economic performance.

To overcome the specific geological and operational challenges of the Cuu Long basin, the study presents detailed recommendations on equipment configuration - including gas separators, wear-resistant materials, and high-temperature motors - as well as operational strategies such as the application of Variable Speed Drives (VSDs) to adjust pump frequency and maintain optimal performance. The outcomes of this study provide a scientific and practical basis for designing reliable, efficient production systems, thereby contributing to the effective and sustainable production of the Middle Miocene reservoirs in the Cuu Long basin.

Key words: Electrical submersible pump (ESP), ESP selection, Middle Miocene, Cuu Long basin.