

KHẢO SÁT TRƯỜNG DÒNG CHẢY TRONG BÁNH CÔNG TÁC MÁY BƠM BÙN SỬ DỤNG ĐỘNG LỰC HỌC CHẤT LỎNG TÍNH TOÁN (CFD)

INVESTIGATION THE FLOW FIELD IN THE IMPELLER OF A SLURRY PUMP USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Phan Trọng Đức

Phòng Khảo thí và Đảm bảo chất lượng, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 25/02/2024, chấp nhận đăng ngày 30/5/2024

Tóm tắt: Trong nghiên cứu này, bánh công tác của máy bơm bùn được thiết kế và khảo sát trường dòng chảy sử dụng động lực học chất lỏng tính toán (CFD). Để đảm bảo khả năng thoát khi vận chuyển bùn với nồng độ hạt rắn cao (lên đến 30%), bề rộng lá cánh tại lối vào và ra bánh công tác được lấy bằng nhau ($b_1=b_2$) và số lá cánh được lựa chọn là nhỏ với $Z=4$. Tác giả đã sử dụng mô hình vận chuyển ứng suất cắt SST $k-\omega$ để mô phỏng dòng chất lỏng chuyển động qua bánh công tác. Dựa vào kết quả mô phỏng trường vận tốc và áp suất trong bánh công tác, các đường đặc tính của bơm như đường đặc tính cột áp và đường đặc tính hiệu suất của bơm với các tốc độ quay khác nhau được khảo sát. Ngoài ra ảnh hưởng của kích thước và nồng độ hạt rắn đến hiệu suất và cột áp của bơm cũng được đánh giá. Kết quả chỉ ra rằng, khi tăng kích thước và nồng độ hạt thì cột áp và hiệu suất của máy bơm giảm xuống.

Từ khóa: Bơm bùn, bánh công tác, Ansys CFX, nồng độ hạt

Abstract: In this paper, the impeller of a slurry pump is designed, and the flow field is investigated using computational fluid dynamics (CFD). To ensure particle transportation with a solid particle concentration of up to 30%, the impeller is designed with equal blade widths at the entrance and outlet of the impeller ($b_1=b_2$) and a small number of blades ($Z=4$). The flow through the impeller is simulated using the shear stress transport model SST $k-\omega$. Based on the simulation results of the velocity and pressure fields in the impeller, performance curves such as the head curve and efficiency curve with different rotation speeds are built. In addition, the influence of size and particle concentration on the efficiency and head of the pump was also investigated. The results show that as the size and concentration of particles increase, the head and efficiency decrease.

Keywords: Slurry pump, impeller, Ansys CFX, particle concentration.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, máy bơm bùn ly tâm được áp dụng và nghiên cứu rộng rãi. Peng và cộng sự [1] đã nghiên cứu dòng bùn của máy bơm bùn. Kết quả cho thấy lưu lượng bơm rất không ổn định ở tốc độ dòng chảy thấp, lực cản dòng chảy tăng và hồi lưu tăng khi nồng độ hạt tăng. Zhao và cộng sự [2] đã mô phỏng dòng chất

lỏng - rắn trong máy bơm ly tâm và báo cáo rằng, với sự gia tăng nồng độ hạt, các đặc tính bên ngoài và động năng rời của máy bơm sẽ ngày càng bị ảnh hưởng nhiều hơn. Wang và cộng sự đã tiến hành nghiên cứu phân tích đặc tính dòng chảy bên trong và mài mòn của các hạt hỗn hợp trong bơm ly tâm dựa trên CFD-DEM [3]. Kết quả cho thấy rằng các hạt

rắn có kích thước lớn có tác động lớn hơn đến sự suy giảm hiệu suất của bơm ly tâm so với trường hợp các hạt nhỏ, đặc biệt là hiệu suất. Sự thay đổi tỷ lệ của các hạt sẽ ảnh hưởng đến quỹ đạo của các hạt nhỏ. Abdolahneja và cộng sự đã nghiên cứu tối ưu máy bơm bùn ly tâm sử dụng cánh chia phụ trong bánh công tác [4]. Khi sử dụng cánh chia phụ cột áp và hiệu suất của máy bơm khảo sát đều tăng lên. Hiệu suất cao nhất có thể đạt 67,2%.

Trong nghiên cứu này, tác giả đã tiến hành thiết kế bánh công tác máy bơm bùn để đảm bảo khả năng thoát của hạt rắn và sử dụng mô phỏng CFD để tính toán và xây dựng đường đặc tính của máy bơm bùn. Ảnh hưởng của đường kính hạt và nồng độ hạt đến hiệu suất và cột áp của bánh công tác thiết kế cũng được khảo sát.

2. MÔ HÌNH TOÁN DÒNG CHẢY TRONG BÁNH CÔNG TÁC BƠM LY TÂM

Phương trình Navier-Stokes cho chất lỏng không nén được là gần đúng với dòng chảy hỗn loạn 3D phức tạp trong máy bơm ly tâm. Phương pháp mô phỏng số trung bình Reynolds (RANS) đã được áp dụng trong nghiên cứu này. Dạng chính của phương trình Navier-Stokes như sau:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó, u và p là áp suất và vận tốc trung bình theo thời gian, ρ_m là khối lượng riêng của hỗn hợp, μ là độ nhớt động năng, $\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$ là ứng suất Reynolds.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

Trong nghiên cứu này, môi trường vận chuyển là dòng chảy hai pha, do đó số pha: $n = 2$. Mô hình rối vận chuyển ứng suất cắt shear stress transport SST k- ω của Menter [5] xem xét đến sự truyền ứng suất cắt rối để có thể thu được kết quả chính xác hơn ở vùng gần tường và có dự đoán tốt hơn về sự tách dòng. Vì vậy, mô hình rối SST k- ω để mô tả chuyển động của dòng bùn trong bánh công tác máy bơm bùn đã được lựa chọn trong nghiên cứu này. Mô hình trên kết hợp ưu điểm của việc xử lý gần thành tường của mô hình k- ω và khả năng tính toán vùng bên ngoài của mô hình k- ϵ . Nguyên nhân là vì có một phương trình lai có thể kích hoạt mô hình k- ω ở vùng gần tường và khởi tạo mô hình k- ϵ ở vùng bên ngoài tương ứng. So với mô hình k- ω tiêu chuẩn, mô hình SST k- ω bổ sung thêm số hạng khuếch tán chéo D được nhúng vào phương trình ω ; Những cải tiến này làm cho mô hình SST k- ω có độ chính xác và độ tin cậy cao hơn để tính toán dòng chảy thực. Qua đó, mô hình SST k- ω phù hợp để dự đoán tốc độ quay cao và dòng chảy riêng biệt mạnh, đặc biệt trong bơm ly tâm. Các phương trình chủ đạo như sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (6)$$

Trong đó G_k là số hạng nguồn của động năng rối k , G_ω là số hạng nguồn của tần số tiêu tán ω , Γ_k và Γ_ω lần lượt là hệ số khuếch tán hiệu

dụng cho động năng rối k và tần số tiêu tán ω . Y_k và Y_ω là sự khuếch tán của động năng rối k và tần số tiêu tán ω gây ra bởi rối, D_ω là số hạng khuếch tán chéo, S_k và S_ω là số hạng nguồn do người dùng xác định.

Trong mô tả Eulerian-Eulerian về dòng chất lỏng, pha phân tán (Dispersed) của hạt được coi như một pha chất lỏng (Continuous) với giả định rằng pha hạt thâm nhập và tương tác với pha lỏng [6]. Pha rắn được coi là các hạt hình cầu đồng nhất và tính chất vật lý được coi là không thể thay đổi. Pha lỏng là nước ở điều kiện tiêu chuẩn.

3. MÔ PHỎNG SỐ DÒNG CHẤT LỎNG CHUYỂN ĐỘNG QUA BÁNH CÔNG TÁC

3.1. Tính toán thiết kế bánh công tác máy bơm ly tâm bơm bùn

Đầu tiên, thực hiện việc thiết kế bánh công tác máy bơm bùn với các thông số: cột áp $H = 20$ m, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{h}$, $n = 1450$ vòng/phút. Dựa trên các thông số đầu vào này sẽ xác định số vòng quay đặc trưng của máy bơm theo công thức [7]:

$$N_s = 3,65 \cdot N \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

$$= 3,65 \cdot 1450 \frac{\sqrt{120/3600}}{20^{3/4}} = 102,17 \text{ (vòng/phút)}$$

Trong đó N_s là số vòng quay đặc trưng, N là số vòng quay của bánh công tác, Q là lưu lượng máy bơm tính bằng m^3/s và H là cột áp của máy bơm tính bằng m.

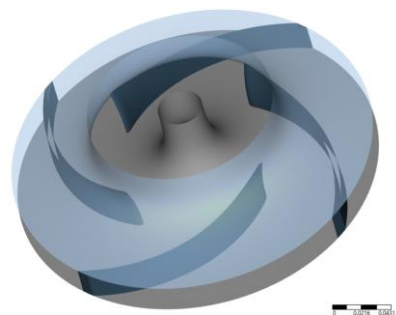
Cánh bơm được thiết kế dựa trên phương pháp Gulich [7] cho thiết kế cánh bơm ly tâm và kết quả các thông số hình học tính toán được liệt kê dưới đây trong Bảng 1. Đối với bánh công tác của bơm bùn, để đảm bảo khả năng thoát của hỗn hợp khí đi qua máng dẫn của bánh công tác, bề rộng lối vào và bề rộng

cánh lối ra được lấy bằng nhau ($b_1 = b_2$). Ngoài ra, số lá cánh Z cũng được chọn ít hơn so với máy bơm nước, trong nghiên cứu này số lá cánh được chọn bằng 4 cánh. Dựa trên tài liệu được đưa ra trong tài liệu tính toán của Gulich [7], góc thoát của cánh và số lượng cánh được xem xét để thiết kế bánh công tác. Các kích thước chính của bơm được thống kê ở bảng 1.

Bảng 1. Các thông số hình học của bánh công tác

Tên thông số	Trị số	Đơn vị
Đường kính trục	70	mm
Đường kính moayơ	100	mm
Đường kính mép vào	170	mm
Đường kính lối vào	170	mm
Bề rộng lối vào	26	mm
Góc đặt cánh tại lối vào	20	Độ
Bề rộng lối ra	26	mm
Góc đặt cánh tại lối ra	17,5	Độ
Số cánh	4	cánh

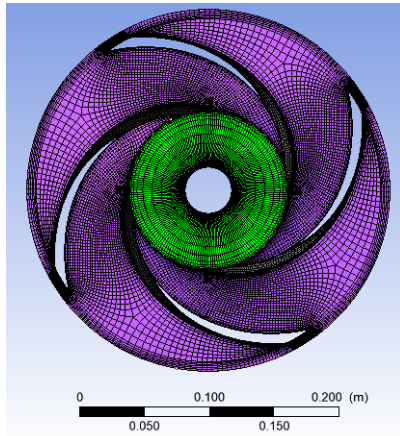
Từ kết quả thiết kế, mô hình học học ba chiều của bánh công tác được dựng bằng như dưới đây (hình 1).



Hình 1. Hình học bánh công tác máy bơm bùn

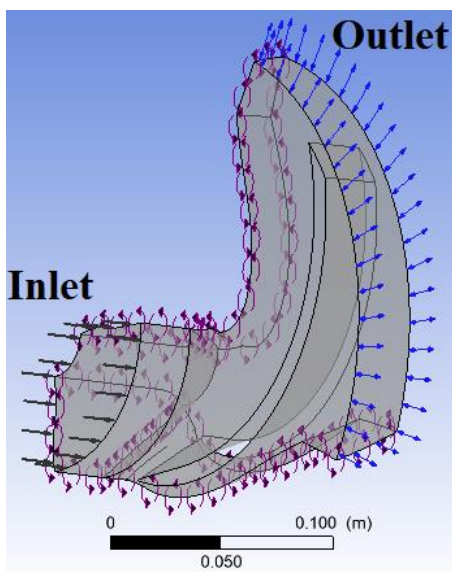
Sau khi đã xây dựng được hình học của bánh công tác máy bơm, tác giả sẽ sử dụng động lực học chất lỏng tính toán CFD để mô phỏng dòng chảy qua bánh công tác của máy bơm. Từ đó xây dựng các đường đặc tính cột áp và hiệu suất của máy bơm bùn thiết kế.

3.2. Chia lưới và điều kiện biên



Hình 2. Chia lưới cho miền tính toán

Phần mềm Turbogrid của Ansys workbench đã được sử dụng trong nghiên cứu này để tạo lưới cho miền tính toán. Ở đây lưới kết cấu đã được lựa chọn để tăng hiệu quả và giảm thời gian tính toán với số phần tử là 71244, số nút là 82446. Để đảm bảo dòng chảy lớp biên thì lưới gần khu vực thành tường cũng như đầu cánh được tinh chỉnh mịn hơn, bề dày được lũy tiến từ gần thành ra ngoài. Hệ số độ lệch (skewness) được lựa chọn là 0,45 và hệ số độ mịn (smoothness) được lựa chọn là 1,0 [8, 9] để đảm bảo chất lượng của lưới khi tính toán. Kết quả chia lưới được thể hiện như trong hình 2.



Hình 3. Điều kiện biên của bánh công tác

Trên cơ sở khảo sát điều kiện thực tế, điều kiện biên lưu lượng được áp dụng ở đầu vào của bánh công tác $Q=120 \text{ m}^3/\text{h}$. Tại lõi ra của bánh công tác điều kiện biên áp suất được sử dụng (cột áp 20 mét cột nước hay $p=196127,66 \text{ Pa}$ (hình 3)). Bánh công tác quay với vận tốc 1450 vòng/phút. Hỗn hợp chất lỏng vận chuyển là bùn với nồng độ hạt rắn chiếm 20%, các hạt rắn có hình dạng đồng nhất với kích thước 0,05 mm. Để giải phương trình chuyển động của dòng chảy rối trong bánh công tác chúng tôi sử dụng thuật toán SIMPLE, độ chính xác hội tụ là 10^{-5} . Mô hình dòng chảy rối là mô hình vận chuyển ứng suất cắt SST k- ω . Bước thời gian được lựa chọn là 0,01 giây và số bước lặp là 1000 bước.

3.3. Tính toán cột áp và hiệu suất

Thông số cột áp H của máy bơm bùn được tính theo công thức sau:

$$H = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho g} \quad (7)$$

Trong đó, p_{out} (Pa) là tổng áp suất của đầu ra, p_{in} (Pa) là tổng áp suất của đầu vào bánh công tác, ρ (kg/m^3) là khối lượng riêng của chất lỏng và g (m/s^2) là gia tốc trọng trường.

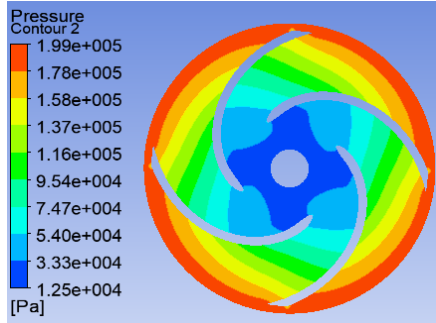
Hiệu suất chung của máy bơm η được tính như sau:

$$\eta = \left(\frac{1}{\eta_v \eta_h} + \frac{\Delta P_d}{P_e} + 0.03 \right)^{-1} \quad (8)$$

Trong đó P_e là công suất thủy lực (Pa), $P_e = \rho g Q H$, ΔP_d là tổn thất do ma sát đĩa (Pa), phương pháp tính toán được mô tả trong nghiên cứu của Gulich [7] η_h là hiệu suất thủy lực và η_v là hiệu suất thể tích. Kết quả tính toán mô phỏng cột áp và hiệu suất của bơm bùn được trình bày trong mục 4.2.

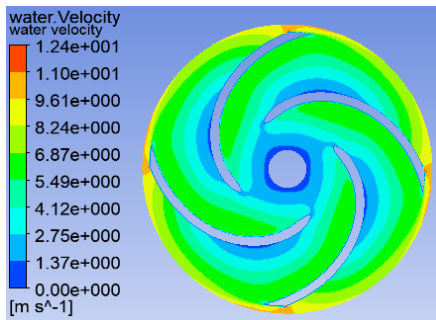
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Trường vận áp suất và vận tốc trong bánh công tác



Hình 4. Contour của áp suất trong máy bơm bùn

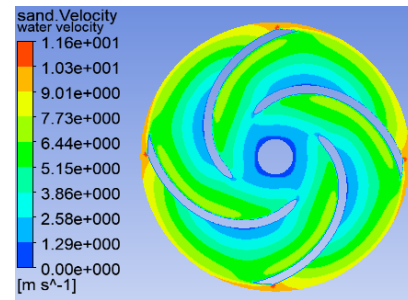
Hình 4 cho thấy, áp suất trong bánh công tác từ lõi vào đến lõi ra sẽ tăng dần từ $1,25 \times 10^4$ Pa đến $1,99 \times 10^4$ Pa. Nguyên nhân của hiện tượng này là do khi làm việc, ở cửa vào của máy bơm sẽ có áp suất nhỏ, trong khi áp suất của bể chứa lớn hơn, dẫn đến chất lỏng liên tục được đẩy vào bơm tạo nên quá trình hút. Trong khi, ở quá trình đẩy của bơm, dưới tác dụng của lực ly tâm, dòng chất lỏng ở trong bánh công tác sẽ có xu hướng bị đẩy từ trong ra ngoài, chuyển động theo các máng dẫn và đi vào ống đẩy với áp suất cao hơn tạo nên vùng áp cao ở phần ngoài của bánh công tác.



Hình 5. Contour vận tốc của nước trong máy bơm bùn

Hình 5 thể hiện kết quả trường vận tốc của nước. Từ đó nhận thấy vận tốc của nước trong máy bơm phân bố tăng dần từ trong ra ngoài và đạt giá trị lớn nhất bằng 12,4 m/s. Ngoài ra, ở mặt trước cánh dẫn, vận tốc có xu hướng tăng dần từ trục bơm đến điểm xa nhất của

cánh dẫn. Trong khi, ở mặt sau thì vận tốc ít có sự thay đổi. Nguyên nhân của hiện tượng này là do dòng chảy trong bánh công tác là dòng liên tục, trong khi ở đây có sự chênh lệch áp suất giữa mặt trước và mặt sau của cánh dẫn, cùng với đó là sự thay đổi vận tốc, do đó tạo ra dòng xoáy cục bộ trong máng dẫn bánh công tác, dẫn đến vận tốc ở mặt sau cánh dẫn ít có sự thay đổi.



Hình 6. Contour vận tốc của cát trong máy bơm bùn

Vận tốc của cát phân bố tăng dần từ trong ra ngoài, giá trị vận tốc lớn nhất của cát đạt 11,6 m/s (hình 6). Lý do của hiện tượng này là do cát là các hạt rời rạc và có kích thước nhất định, ngoài ra cát còn có khối lượng riêng là 1600 kg/m^3 cao hơn 1,6 lần so với nước (khối lượng riêng của nước đạt xấp xỉ 1000 kg/m^3) chính vì thế cát có vận tốc nhỏ hơn so với vận tốc của nước.

4.2. Đường đặc tính của máy bơm

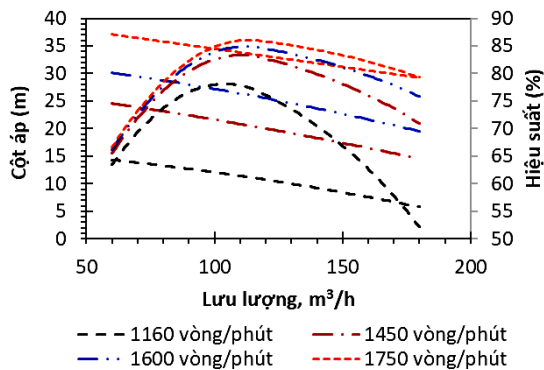
Hình 7 thể hiện mối quan hệ của cột áp H và hiệu suất η theo lưu lượng của máy bơm bùn theo số vòng quay khác nhau. Kết quả cho thấy có sự gia tăng tổng cột áp và hiệu suất khi số tăng tốc độ quay của máy bơm.

Để so sánh ảnh hưởng của các điều kiện khác nhau như kích thước hạt rắn, nồng độ hạt rắn đến đặc tính làm việc của máy bơm bùn, hệ số ảnh hưởng cột áp φ_1 và hệ số ảnh hưởng hiệu suất φ_2 được xác định như sau:

$$\varphi_1 = \frac{H - H_p}{H} \quad (9)$$

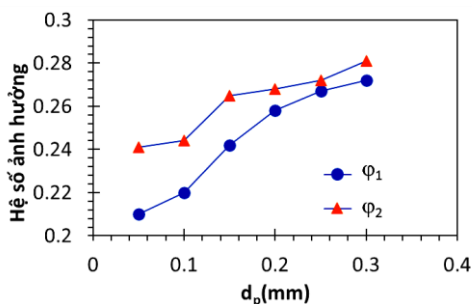
$$\varphi_1 = \frac{\eta - \eta_p}{\eta} \quad (10)$$

Trong đó H là cột áp bơm ly tâm truyền nước sạch, H_p là cột áp bơm ly tâm vận chuyển bùn, η là hiệu suất vận chuyển nước sạch của bơm, η_p là hiệu suất vận chuyển bùn của bơm ly tâm.



Hình 7. Thông số cột áp của máy bơm bùn

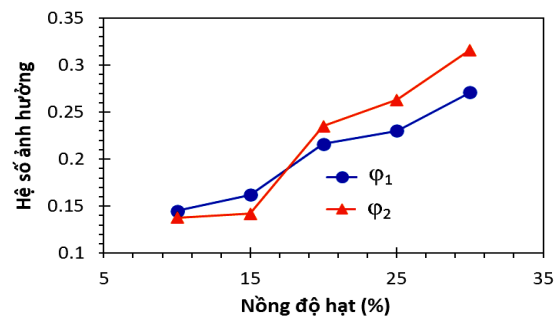
Sự thay đổi hệ số ảnh hưởng của cột áp và hiệu suất theo kích thước hạt đã được phân tích để nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước hạt đến hiệu suất của bơm ly tâm. Pha rắn với đường kính hạt khác nhau bao gồm 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 và 0,3 mm được mô phỏng ở nồng độ thể tích hạt 20%. Hình 8 biểu diễn sự thay đổi hệ số ảnh hưởng cột áp và hiệu suất theo kích thước hạt. Việc tăng kích thước hạt làm cho hệ số ảnh hưởng cột áp và hiệu suất tăng lên, nghĩa là kích thước hạt tăng dẫn đến cột áp và hiệu suất giảm và ảnh hưởng của kích thước hạt đến hiệu suất lớn hơn so với cột áp.



Hình 8. Ảnh hưởng của kích thước hạt

Sự thay đổi hệ số ảnh hưởng của cột áp và

hiệu suất ở các nồng độ hạt khác nhau cũng được phân tích để nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ thể tích hạt đến hiệu suất của bơm ly tâm. Các tỷ lệ của pha rắn ở các nồng độ thể tích hạt khác nhau, cụ thể là 0%, 10%, 15%, 20%, 25% và 30%, được mô phỏng ở kích thước hạt 0,1 mm. Hình 9 cho thấy sự thay đổi hệ số ảnh hưởng của cột nước và hiệu suất theo nồng độ hạt. Sự gia tăng nồng độ hạt sẽ làm tăng hệ số ảnh hưởng của cột áp và hiệu suất, nghĩa là, sự gia tăng nồng độ hạt sẽ làm tăng giá trị giảm của cột áp và hiệu suất. Khi nồng độ thể tích của các hạt nhỏ hơn 15%, sự thay đổi nồng độ hạt ít ảnh hưởng đến hiệu suất hơn so với cột áp, trong khi khi nồng độ thể tích lớn hơn 15% thì ảnh hưởng của nồng độ hạt đến hiệu suất bơm nhiều hơn.



Hình 9. Ảnh hưởng của nồng độ hạt

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, bánh công tác của máy bơm bùn được thiết kế và trường dòng chảy được khảo sát bằng động lực học chất lỏng tính toán CFD. Ảnh hưởng của kích thước hạt và nồng độ thể tích hạt rắn đối với cột áp và hiệu suất của máy bơm bùn cũng được khảo sát. Qua đó có thể rút ra được một số kết luận sau:

- Khi tăng kích thước hạt, hệ số ảnh hưởng của cột áp và hiệu suất cũng tăng, và sự thay đổi kích thước hạt có ảnh hưởng đến hiệu suất nhiều hơn so với cột áp.
- Khi tăng nồng độ hạt sẽ làm tăng hệ số ảnh

hướng của cột áp và hiệu suất. Với nồng độ thể tích của các hạt nhỏ hơn 15%, sự thay đổi nồng độ hạt ít ảnh hưởng đến hiệu suất hơn so với sự thay đổi ở cột áp; khi nồng độ thể tích lớn hơn 15% thì ngược lại.

▪ Ở cùng một nồng độ hạt, kích thước hạt càng nhỏ thì số lượng hạt càng lớn và va chạm giữa các hạt sẽ càng dữ dội. Tổng cột áp trong bơm giảm khi tăng kích thước hạt, nhưng nó tăng khi tăng nồng độ hạt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Peng G, Huang X, Zhou L, Zhou G, Zhou H. Solid-liquid two-phase flow and wear analysis in a large-scale centrifugal slurry pump. Eng Fail Anal 2020;114:104602. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104602>
- [2] Zhao W, Zhao G. Numerical investigation on the transient characteristics of sediment-laden two-phase flow in a centrifugal pump. J Mech Sci Technol 2018;32:167–76. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-1218-6>
- [3] Wang Y, He T, Ding Q, Gao P, Tao R, Zhu Z. Analysis of Internal Flow and Wear Characteristics of Binary Mixture Particles in Centrifugal Pump Based on CFD-DEM. Processes 2022;10:1–16. <https://doi.org/10.3390/pr10040681>
- [4] Abdollahnejad E, Moghimi M, Derakhshan S. Optimization of the centrifugal slurry pump through the splitter blades position. Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci 2022;236:191–207. <https://doi.org/10.1177/09544062211027608>
- [5] Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA J 1994;32:1598–605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [6] Brennen CE. Fundamentals of Multiphase Flows. California: Cambridge University Press 2005, 2005.
- [7] Gulich JF. Centrifugal pumps. 4th ed. Villeneuve, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020.
- [8] ANSYS Inc. ANSYS Fluent Meshing User's Guide. vol. 15317. Ansys, 2015.
- [9] Madenci E, Guven I. The finite element method and applications in engineering using Ansys. Springer, 2015.

Thông tin liên hệ:

Phan Trọng Đức

Điện thoại: 0904511223 - Email: ptduc@uneti.edu.vn

Phòng Khảo thí và Đảm bảo chất lượng, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.