

# Ứng dụng nguyên lý khóa thủy lực trong thiết kế bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa theo giới hạn tổn thất lọc

Application of the hydraulic lock principle to the design of self-washing floating-media filters at terminal head loss

> TS NGUYỄN THANH PHONG

Bộ môn Công nghệ Nước, Khoa KTHT&MT Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội  
Email: nguyenthanhphong73@gmail.com

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tính toán thiết kế bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa theo nguyên lý khóa thủy lực. Mô hình liên kết ba nội dung: tổn thất lớp lọc sạch, quy luật tăng tổn thất do tích lũy cặn và điều kiện hình học-thủy lực để siphon tự khởi động khi đạt giới hạn tổn thất. Từ đó xác định diện tích lọc, số ngăn, chiều sâu lớp hạt, cao trình đỉnh siphon, thể tích nước rửa và đường kính ống siphon. Ví dụ cho trạm 20 m<sup>3</sup>/h cho thấy phương án ba ngăn có tính khả thi và vận hành ổn định.

**Từ khóa:** Khóa thủy lực; siphon; vật liệu lọc nổi; tự rửa.

## ABSTRACT

This paper presents a design method for self-washing floating-media filters based on the hydraulic-lock principle. The model links three components: clean-bed head loss, head-loss growth caused by solids accumulation, and the geometric-hydraulic condition that initiates siphon backwashing at terminal head loss. The method is used to determine filtration area, number of cells, media depth, siphon crest elevation, backwash water volume, and siphon pipe diameter. A 20 m<sup>3</sup>/h case study shows that a three-cell configuration is feasible and hydraulically stable in operation.

**Keywords:** Hydraulic lock; siphon; floating media; self-washing.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong nhiều công trình lọc nhanh truyền thống, chu kỳ rửa được xác định theo thời gian cài đặt sẵn hoặc theo lệnh vận hành, trong khi mức độ bẩn thực tế của lớp lọc thay đổi đáng kể theo chất lượng nước đầu vào, chế độ keo tụ và dao động lưu lượng. Cách tiếp cận này làm phát sinh hai hệ quả trái ngược: hoặc rửa quá sớm, gây lãng phí nước rửa và giảm hiệu suất sử dụng thiết bị; hoặc rửa quá muộn, làm tăng nguy cơ xuyên thủng lớp lọc, suy giảm chất lượng nước

sau lọc. Vì vậy, xu hướng điều khiển chu kỳ rửa theo tổn thất cột nước của lớp lọc ngày càng được coi là tiếp cận hợp lý hơn về công nghệ và kinh tế.

Trong nhóm thiết bị rửa lọc tự động bằng thủy lực, giá trị cốt lõi nằm ở việc dùng chính chênh lệch mực nước phát sinh qua lớp vật liệu như tín hiệu vận hành. Khi tổn thất qua lớp lọc tăng tới ngưỡng thiết kế, tạo điều kiện môi dòng và phát động chu kỳ rửa. Toàn bộ trình tự đóng - mở được thực hiện nhờ cấu tạo hình học và cột nước, không cần cảm biến áp suất điện tử hay hệ thống van điều khiển phức tạp. Cơ chế này đặc biệt hấp dẫn đối với các trạm vừa và nhỏ, các công trình ở khu vực thiếu nhân lực vận hành hoặc các hệ thống yêu cầu độ tin cậy cơ học cao.

Ở Việt Nam, một số thử nghiệm pilot đối với bể lọc vật liệu nổi tự rửa đã cho thấy khả năng vận hành ổn định, tự rửa theo chu kỳ tổn thất và đạt hiệu quả xử lý tốt. Tuy nhiên, trong thực tế thiết kế, nhiều hồ sơ vẫn mô tả công nghệ theo hướng định tính mà chưa xây dựng được quy trình tính toán đủ chặt chẽ để chuyển từ yêu cầu công nghệ sang các thông số hình học cụ thể khi áp dụng kết quả nghiên cứu của khóa thủy lực. Đây chính là khoảng trống mà bài báo hướng tới.

Mục tiêu của bài báo là đề xuất trình tự tính toán bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa khi đạt giới hạn tổn thất lọc, trong đó nguyên lý khóa thủy lực được coi là phần tử trung tâm liên kết chế độ lọc với chế độ rửa. Trên cơ sở tổng hợp lý thuyết dòng chảy qua lớp hạt, quy luật tăng tổn thất do bám cặn và điều kiện khởi động siphon, bài báo xây dựng một trình tự thiết kế có thể sử dụng cho bước thiết kế sơ bộ và tiền khả thi; đồng thời minh họa bằng ví dụ số cụ thể để người thiết kế có thể áp dụng trực tiếp.

## 2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ NGUYÊN LÝ LÀM VIỆC

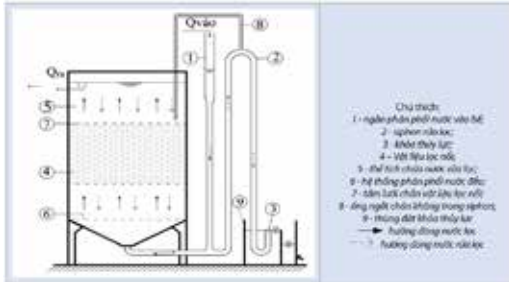
### 2.1. Cấu tạo chung của bể lọc vật liệu nổi tự rửa theo nguyên lý khóa thủy lực

Cấu tạo của bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa khởi động bằng thiết bị khóa thủy lực được thể hiện ở Hình 1.

### 2.2. Nguyên lý khóa thủy lực và điều kiện tự khởi động rửa lọc

Khóa thủy lực trong công nghệ này hoạt động như một phần tử kích hoạt tự động, sử dụng chính chênh lệch mực nước do tổn thất qua lớp lọc tạo ra. Khi lớp lọc còn sạch, tổn thất nhỏ nên mực nước trong ống phân phối nước vào chưa đạt đến đỉnh siphon; toàn bộ hệ thống vẫn ở trạng thái lọc ổn định. Khi cặn tích tụ, tổn thất tăng dần làm mực

nước tương ứng trong ống phân phối nước vào dâng lên. Đến giá trị giới hạn khi mực nước vượt qua đỉnh ống siphon một khoảng bằng đúng chiều cao khóa thủy lực, siphon sẽ được mở và dòng nước rửa bắt đầu hình thành. Do đó, cao trình đỉnh siphon, chiều cao khóa thủy lực không chỉ là chi tiết kết cấu mà còn là biểu hiện hình học của giá trị tổn thất giới hạn đã chọn trong thiết kế [1], [5].



Hình 1. Cấu tạo bể lọc vật liệu lọc nổi rửa khởi động bằng thiết bị khóa thủy lực [1]

Sau khi siphon bắt đầu làm việc, nước trong khoang chứa chảy qua ống siphon với lưu lượng đủ lớn để tạo cường độ rửa cho lớp hạt. Đồng thời, mực nước trong khoang chứa giảm dần. Khi mực nước tụt xuống tới vị trí đáy của ống ngắt chân không trong siphon, không khí lọt vào đỉnh ống, dòng liên tục bị ngắt và chu kỳ rửa kết thúc. Cơ chế tự dừng này là ưu điểm quan trọng của khóa thủy lực vì nó giúp chu kỳ rửa trở nên hữu hạn và lặp lại, không cần thiết bị đóng cắt chủ động. Việc tính đúng cao trình ngắt siphon do đó quan trọng không kém việc xác định cao trình khởi động [1], [5].

Về mặt thiết kế, hệ khóa thủy lực phải thỏa mãn hai yêu cầu: khởi động chắc chắn tại đúng giới hạn tổn thất mong muốn; và ngắt siphon ổn định sau khi đã xả ra lượng nước rửa đủ kiến. Nếu chỉ chú ý đến điều kiện khởi động mà bỏ qua điều kiện ngắt siphon, hệ thống có thể tự mỗi nhưng không hoàn nguyên tốt lớp lọc hoặc ngược lại kéo dài thời gian rửa quá mức, làm lãng phí nước sạch [1], [5].

### 2.3. Đặc trưng của lớp vật liệu lọc nổi

Khác với cát và anthracite có khối lượng riêng lớn hơn nước, vật liệu lọc nổi thường là các hạt polymer xốp hoặc đặc, nhẹ, có đường kính từ khoảng 0,8 - 3,0 mm tùy mục đích sử dụng. Do khối lượng riêng nhỏ, lực nổi đóng vai trò quyết định trong tổ chức lớp lọc. Hạt càng nhẹ thì yêu cầu đối với lưới giữ càng cao, nhưng đồng thời cường độ rửa cần thiết để giãn nở hoặc khuấy lớp hạt có thể thấp hơn so với lớp cát lọc truyền thống. Mặt khác, các hạt polymer cũng có bề mặt khác nhau về độ nhám và tính ưa nước, dẫn tới khả năng bám cặn khác nhau [1], [3].

Trong thực hành thiết kế, các thông số vật liệu cần quan tâm gồm: đường kính hiệu dụng  $d_p$ , hệ số đồng nhất, khối lượng riêng biểu kiến của hạt, độ rỗng ban đầu của lớp lọc, chiều sâu lớp vật liệu lọc L và độ bền cơ học trong quá trình lặp lại các chu kỳ rửa. Đối với bài toán tự rửa bằng khóa thủy lực, ngoài hiệu quả lọc còn cần quan tâm đến khối lượng nước rửa cần thiết để làm sạch lớp vật liệu, vì chính đại lượng này sẽ chi phối dung tích khoang chứa và tiết diện của ống siphon [1], [3].

## 3. MÔ HÌNH TÍNH TOÁN THIẾT KẾ

### 3.1. Xác định diện tích lọc và số ngăn

Với lưu lượng thiết kế Q (m<sup>3</sup>/h) và vận tốc lọc bề mặt  $v_f$  (m/h), tổng diện tích lọc yêu cầu của hệ là:

$$A_t = \frac{Q}{v_f}$$

Nếu hệ có n ngăn và cho phép 1 ngăn tạm dừng để tự rửa trong khi các ngăn còn lại vẫn đảm nhận toàn bộ lưu lượng thiết kế, diện tích hữu ích của mỗi ngăn phải thỏa mãn điều kiện:

$$A_1 \geq \frac{Q}{(n-1) \cdot v_f}$$

Đây là điều kiện dự phòng công suất tối thiểu. Trên thực tế, nên bố trí hệ số dư nhất định để bù dao động lưu lượng, sai số phân phối dòng và sự suy giảm hiệu quả thủy lực theo thời gian vận hành.

### 3.2. Tổn thất qua lớp vật liệu lọc

#### Tổn thất với lớp vật liệu sạch:

Khi không có số liệu Pilot, với các tính toán thiết kế sơ bộ, tổn thất ban đầu của lớp vật liệu nổi có thể được mô tả bằng phương trình Ergun khi cần xét đồng thời thành phần nhớt và quán tính:

$$H_0 = \frac{150(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu v L}{\rho g d_p^2} + \frac{1.75(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{v^2 L}{g d_p}$$

Trong đó  $\epsilon$  là độ rỗng lớp hạt;  $\mu$  là độ nhớt động lực của nước;  $\rho$  là khối lượng riêng nước;  $g$  là gia tốc trọng trường;  $v$  là vận tốc bề mặt;  $L$  là chiều sâu lớp lọc;  $d_p$  là đường kính tương đương của hạt [5].

Dùng phương pháp mô hình hóa quá trình lọc cho phép thu được lời giải đầy đủ chính xác, và biểu diễn được ở dạng thuận tiện hơn cho việc tính toán thực tế, đồng thời rút gọn rất nhiều khối lượng tính toán, mục đích để thiết lập được biểu đồ thông số thực nghiệm như (Hình 2.). Theo lý thuyết lọc qua lớp VLL dạng hạt của D.M.Mins ta có tổn thất qua lớp VLL sạch [1].

$$H_0 = S_0 \cdot L \cdot v = S \cdot v$$

Trong đó:  $H_0$  - tổn thất qua lớp VLL sạch (cm);  $S_0$  - là hệ số tổn thất riêng của lớp VLL sạch;  $L$  - chiều dày lớp VLL (m);  $S_0 \cdot L = S$  - là hệ số tổn thất qua lớp VLL sạch có chiều dày là  $L$ . Trong thực tế  $S_0$  phụ thuộc vào độ rỗng của VLL (m), đường kính tương đương của lớp VLL, hệ số hình dạng  $\alpha$  và độ nhớt của nước  $\mu$ .

#### Tổn thất với nước bẩn trong quá trình lọc:

Xác định hệ số gia tăng tổn thất theo thời gian (k). Theo lý thuyết lọc dạng hạt của Minz D.M. tốc độ gia tăng tổn thất tỷ lệ thuận với hệ số tổn thất riêng ( $S_0$ ), tỷ lệ thuận với bình phương vận tốc lọc và tỷ lệ với hệ số k đặc trưng cho: (1) nồng độ chất lơ lửng trong nước lọc; (2) sự phân bố chất lơ lửng trong lớp VLL mà do đó nó sẽ thay đổi độ rỗng của lớp VLL. Hệ số k được xác định bằng thực nghiệm theo công thức sau:

$$\Delta h = S_0 \cdot k \cdot v^2 \cdot t \Rightarrow k = \frac{\Delta h}{S_0 \cdot v^2 \cdot t}$$

Có thể viết lại phương trình trên theo biểu đồ tăng tổn thất áp lực lọc theo thời gian mô tả trên Hình 2.

$$H = H_0 + tg\alpha \cdot t; (m)$$

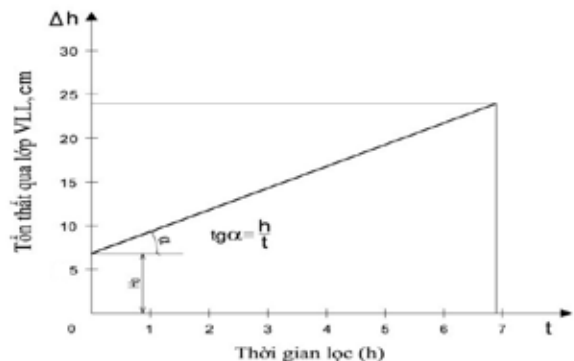
Trong đó:

H: tổng tổn thất áp lực sau thời gian của một chu kỳ lọc; m.

$H_0$ : tổn thất qua lớp VLL sạch xác định bằng thực nghiệm; m.

$tg\alpha = S_0 \cdot k \cdot v^2$ : trị số xác định bằng thực nghiệm; m/h.

t: thời gian của một chu kỳ lọc.



Hình 2. Biểu đồ tăng tổn thất qua lớp VLL theo thời gian [1]

Khi đó, thời gian của một chu kỳ lọc là:

$$t = \frac{H - H_0}{\text{tg}\alpha}$$

Bảng 1. Bảng tra các thông số xác định tổn thất áp lực lọc theo thời gian đối với nguồn nước mặt sau lắng [1]

STT	Hạt VLL nổi	Vận tốc lọc, (m/h)	Tổn thất qua lớp VLL sạch $H_0$ , (cm)	$\text{tg}\alpha$ (cm/h)
1	Polystyrene	5	3,15	0,99
		9,6	9,10	1,09
		13,8	10,40	1,26
2	PE	5	4,95	0,69
		9,6	10,52	0,81
		13,6	18,78	1,41

### 3.3. Giới hạn tổn thất lọc và điều kiện khởi động siphon theo nguyên lý khóa thủy lực

Giới hạn tổn thất lọc  $\Delta h_{gh}$  là giá trị mà tại đó bề phải chuyển từ chế độ lọc sang chế độ rửa ứng với thời gian bảo vệ của lớp vật liệu lọc. Về bản chất,  $\Delta h_{gh}$  được xác định theo thời gian của một chu kỳ lọc, trên cơ sở kết hợp giữa yêu cầu chất lượng nước sau lọc, độ ổn định của lớp hạt và hiệu quả kinh tế của chu kỳ vận hành. Trong hệ dùng siphon, đại lượng này được chuyển hóa trực tiếp thành cao trình đỉnh siphon, chiều cao khóa thủy lực và cao trình mực nước dâng lên trong ngăn phân phối nước và để thẳng tổng tổn thất qua lớp vật liệu lọc. Ở mức sơ bộ, điều kiện khởi động có thể biểu diễn như sau:

$$\Delta h_{gh} = z_c - z_r + H_k$$

Ở đây,  $z_c$  là cao trình đỉnh siphon;  $z_r$  là cao trình mốc thủy lực tham chiếu tại khoang thu nước sau lọc;  $H_k$  là chiều cao khóa thủy lực. Từ công thức này có thể thấy việc lựa chọn  $\Delta h_{gh}$  đồng thời quyết định hình học của khóa thủy lực. Theo kết quả nghiên cứu về thông số khóa thủy lực để khởi động xi phông tự rửa lọc, rút ra biểu thức quan hệ giới hạn giữa chiều cao khóa thủy lực  $H_k$  và đường kính khóa thủy lực  $D_k$  theo điều kiện:

$$5 < \frac{H_k}{D_k} < 10$$

Quan hệ này được dùng để tính toán thiết kế chiều cao khóa tương ứng với các đường kính khác nhau, bảo đảm siphon khởi động ổn định và phù hợp với tổn thất áp lực thiết kế [1].

### 3.4. Lưu lượng rửa, thể tích nước rửa và đường kính ống siphon

Khi chọn cường độ rửa  $q_r$  ( $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ) và thời gian rửa  $t_r$ , lưu lượng rửa cho một ngăn được tính:

$$Q_r = q_r A_1$$

Thể tích nước rửa cho một chu kỳ là:

$$V_r = Q_r t_r$$

Nếu nước rửa được cấp nhờ ống siphon từ khoang chứa đặt cao, lưu lượng rửa sơ bộ có thể tính từ phương trình Bernoulli với hệ số lưu lượng  $C_d$ :

$$Q_r = C_d A_s \sqrt{2gH}$$

Suy ra diện tích tiết diện dòng và đường kính ống siphon:

$$A_s = \frac{Q_r}{C_d \sqrt{2gH}}$$

$$D_s = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}}$$

Các phương trình này là cầu nối trực tiếp giữa yêu cầu công nghệ rửa với kích thước thực của khóa thủy lực. [1], [4].

## 4. TRÌNH TỰ THIẾT KẾ ĐỀ XUẤT

Bước 1: Xác định lưu lượng thiết kế, dao động lưu lượng giờ lớn nhất, số ngăn dự kiến và chế độ dự phòng. Đây là bước đặt khung

cho toàn bộ bài toán vì quyết định diện tích lọc cần thiết và cách phân chia mô-đun công trình.

Bước 2: Chọn vận tốc lọc căn cứ vào loại nguồn nước, mức SS đầu vào, khả năng keo tụ - tạo bông phía trước và kinh nghiệm vận hành với vật liệu lọc nổi. Với lọc nước mặt sau bể lắng, vận tốc lọc nên chọn trong khoảng 5 - 10 m/h tương ứng với chu kỳ lọc 72 - 36 giờ.

Bước 3: Chọn vật liệu lọc nổi và các thông số ban đầu: đường kính hiệu dụng, chiều sâu lớp lọc, độ rỗng, khối lượng riêng biểu kiến và loại lưới chặn. Nếu có số liệu pilot trên chính nguồn nước nghiên cứu thì ưu tiên sử dụng bộ thông số đó.

Bước 4: Xác định tổn thất lớp lọc sạch bằng phương trình Ergun hoặc Darcy - Kozeny khi không có số liệu thực nghiệm.

Bước 5: Chọn giới hạn tổn thất  $\Delta h_{gh}$  từ yêu cầu công nghệ và điều kiện vận hành. Giá trị này được biến đổi thành cao trình đỉnh siphon, cao trình khoang thu nước sau lọc và chiều cao khóa thủy lực.

Bước 6: Xác định tốc độ tăng tổn thất  $\text{tg}\alpha$  hoặc đường cong tăng tổn thất theo thời gian; từ đó tính chu kỳ lọc và kiểm tra tính hợp lý so với yêu cầu khai thác công trình.

Bước 7: Chọn cường độ rửa và thời gian rửa, từ đó xác định lưu lượng rửa, thể tích khoang chứa nước rửa và đường kính ống siphon rửa lọc và siphon môi và thông số khóa thủy lực.

Bước 8: Kiểm tra tổng thể ở các trạng thái biên: đầu chu kỳ lọc, cuối chu kỳ lọc, thời điểm chuyển sang rửa và cuối chu kỳ rửa. Việc kiểm tra này đặc biệt quan trọng để tránh tình trạng hệ thống tự mỗi nhưng không tự phá siphon hoặc ngược lại.

Bảng 2. Ký hiệu chính và quy ước chỉ số dùng trong tính toán

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
Q	$\text{m}^3/\text{h}$	Lưu lượng thiết kế của trạm hoặc cụm lọc
$v_f$	m/h	Vận tốc lọc bề mặt
$A_t$	$\text{m}^2$	Tổng diện tích lọc yêu cầu
$A_l$	$\text{m}^2$	Diện tích của một ngăn lọc
L	m	Chiều sâu lớp vật liệu lọc
$d_p$	m	Đường kính tương đương của hạt lọc
$\varepsilon$	-	Độ rỗng của lớp vật liệu
$H_0$	m	Tổn thất của lớp lọc sạch
$\Delta h_{gh}$	m	Giới hạn tổn thất kích hoạt rửa
$\text{tg}\alpha$	m/h	Tốc độ tăng tổn thất theo thời gian
$Q_r$	$\text{m}^3/\text{s}$	Lưu lượng rửa của một ngăn
$V_r$	$\text{m}^3$	Thể tích nước rửa cho một chu kỳ
$D_s$	m	Đường kính trong của ống siphon

## 5. VÍ DỤ TÍNH TOÁN THIẾT KẾ

### 5.1. Số liệu ban đầu

Xét thiết kế sơ bộ một cụm lọc hoàn thiện cho lọc nước mặt có keo tụ sau bể lắng trong với lưu lượng trung bình giờ lớn nhất  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Yêu cầu đặt ra là bề phải tự rửa lọc hoàn toàn tự động theo nguyên lý khóa thủy lực.

Căn cứ số liệu pilot đối với bể lọc polystyrene nổi, chọn vận tốc lọc mục tiêu  $v_f = 5 \text{ m/h}$ ; chiều sâu lớp lọc  $L = 1,2 \text{ m}$ ; đường kính hiệu dụng hạt  $d_p = 1,22 \text{ mm}$ ; độ rỗng ban đầu  $\varepsilon = 0,40$ ; khối lượng riêng biểu kiến của vật liệu  $45 \text{ kg/m}^3$ . Tổn thất của lớp lọc sạch  $H_0 = 0,0315 \text{ m}$ ; giới hạn tổn thất kích hoạt rửa chọn  $\Delta h_{gh} = 0,7 \text{ m}$ . Tốc độ tăng tổn thất trung bình  $\text{tg}\alpha = 0,99 \text{ cm/h}$ . Cường độ rửa chọn  $q_r = 12 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ , thời gian rửa  $t_r = 4 \text{ phút}$  [1], [3].

Để đảm bảo khả năng vận hành liên tục, chọn hệ gồm 3 ngăn lọc, cho phép 1 ngăn dừng để tự rửa hoặc sửa chữa trong khi 2 ngăn còn lại chịu toàn bộ lưu lượng thiết kế.

### 5.2. Xác định diện tích và kích thước hình học của một ngăn

Tổng diện tích lọc yêu cầu của toàn hệ:

$$A_t = \frac{20}{5} = 4 \text{ m}^2$$

Do một ngăn có thể nghỉ để rửa hoặc sửa chữa, diện tích tối thiểu của mỗi ngăn là:

$$A_1 = \frac{20}{(3-1) \cdot 5} = 2 \text{ m}^2$$

Nếu chọn ngăn tròn, đường kính hữu ích của mỗi ngăn được xác định:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2}{3,1416}} \approx 1,595 \text{ m}$$

Làm tròn theo kích thước thi công, chọn  $D = 1,6 \text{ m}$ . Khi đó diện tích thực của một ngăn là  $2,01 \text{ m}^2$ .

### 5.3. Tính tổn thất lớp lọc sạch

Chọn nước ở khoảng  $20 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$  với  $\mu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Đối vận tốc lọc  $5 \text{ m/h}$  thành  $0,001389 \text{ m/s}$ . Thay các giá trị này vào phương trình Ergun cho lớp hạt có  $\varepsilon = 0,40$ ;  $d_p = 0,00122 \text{ m}$ ;  $L = 1,2 \text{ m}$ , tính được tổn thất của bản thân lớp hạt sạch [3], [5].

Khi có số liệu thực nghiệm, trị số tổn thất qua lớp vật liệu sạch đối với nguồn nước nghiên cứu sẽ chính xác hơn (Bảng 1.). Với nguồn nước mặt có trộn hóa chất sau bể lắng và vận tốc lọc  $5 \text{ m/h}$ , tổn thất qua lớp vật liệu lọc sạch là  $0,0315 \text{ m}$ , tương ứng tốc độ tăng tổn thất  $t_{g\alpha} = 0,99 \text{ cm/h}$ .

### 5.4. Tính chu kỳ lọc theo giới hạn tổn thất

Độ tăng tổn thất cho phép trước khi kích hoạt tự rửa là:

$$\Delta h_{cp} = 0,7 - 0,0315 = 0,6685 \text{ m}$$

Đối tốc độ tăng tổn thất  $t_{g\alpha} = 0,99 \text{ cm/h}$  thành  $0,0099 \text{ m/h}$ , ta có chu kỳ lọc sơ bộ:

$$t = \frac{0,6685}{0,0099} = 67,5 \text{ h}$$

Như vậy, một ngăn có thể vận hành khoảng 2,8 ngày trước khi tự chuyển sang chu kỳ rửa. Nếu ba ngăn được bố trí vận hành lệch pha, toàn trạm sẽ chỉ có một ngăn bước sang rửa sau khoảng 22 h - 23 h, tránh hiện tượng nhiều ngăn cùng rửa làm xáo trộn chế độ cấp nước [1], [3].

### 5.5. Xác định cao trình kích hoạt của khóa thủy lực

Với giới hạn tổn thất đã chọn  $\Delta h_{gh} = 0,7 \text{ m}$ , mực nước trong khoang phân phối tại cuối chu kỳ lọc phải đạt tới đỉnh siphon tương

ứng với chênh cột nước này. Nếu lấy cao trình mốc thủy lực  $z_r$  tại mặt nước hiệu dụng trong khoang thu, có thể xem  $z_c$  cao hơn mốc tham chiếu  $z_r$  một khoảng là  $(\Delta h_{gh} - H_k)$ . Trong thiết kế kỹ thuật, giá trị này cần được hiệu chỉnh sau khi tính đầy đủ tổn thất mỗi, tổn thất cục bộ trong đoạn uốn cong và hệ số an toàn lắp đặt [1]

Thực chất, việc đặt cao trình  $z_c$  chính là việc “cơ khí hóa” quyết định công nghệ về thời điểm rửa. Giá trị  $z_c$  quá thấp sẽ làm bể rửa quá sớm, trong khi  $z_c$  quá cao sẽ kéo dài chu kỳ lọc tới mức nước sau lọc có thể xấu đi hoặc lớp cặn nén chặt quá mức. Vì vậy, đây là thông số hình học nhưng phải được lựa chọn từ góc nhìn công nghệ xử lý nước [3].

### 5.6. Tính lưu lượng rửa, thể tích nước rửa và ống siphon rửa lọc và siphon mỗi

Với cường độ rửa  $q_r = 12 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2 = 0,012 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$  và diện tích thực của một ngăn  $A_{th} = 2,01 \text{ m}^2$ , lưu lượng rửa cho một ngăn là:

$$Q_r = 0,012 \cdot 2,01 = 0,02412 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hay tương đương khoảng  $86,8 \text{ m}^3/\text{h}$ . Với thời gian rửa  $t_r = 4 \text{ phút} = 240 \text{ s}$ , thể tích nước rửa cho một chu kỳ là:

$$V_r = 0,02412 \cdot 240 = 5,79 \text{ m}^3$$

Giả sử cột nước hữu hiệu của siphon  $H_h = 2,5 \text{ m}$  và hệ số lưu lượng  $C_d = 0,128$ , diện tích tiết diện thủy lực của ống siphon được tính [1]:

$$A_s = \frac{0,02412}{0,128 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2,5}} \approx 0,0269 \text{ m}^2$$

Suy ra đường kính trong yêu cầu của ống siphon:

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0269}{\pi}} \approx 0,185 \text{ m}$$

Với đường kính ống siphon rửa lọc  $D = 185 \text{ mm}$ , việc thiết kế khóa thủy lực với chiều cao  $\geq 0,925 \text{ m}$  lắp liền với ống siphon rửa lọc là không phù hợp. Do vậy, cần thiết kế siphon mỗi để thuận tiện cho lắp đặt, đồng thời tạo khả năng điều chỉnh tăng hoặc giảm thời gian của một chu kỳ lọc phù hợp với thời gian bảo vệ của lớp vật liệu lọc và yêu cầu chất lượng nước sau lọc.

Chọn khóa thủy lực có đường kính  $D = 30 \text{ mm}$  và chiều cao khóa  $H_k = 0,2 \text{ m}$ , sẽ xác định được cao trình đỉnh siphon rửa lọc  $z_c = 0,7 - 0,2 = 0,5 \text{ m}$  so với cao trình mốc tham chiếu  $z_r$  ở khoang thu nước sau lọc.

Bảng 3. Tóm tắt kết quả ví dụ tính toán

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Nhận xét
Lưu lượng thiết kế	Q	20 m <sup>3</sup> /h	Lưu lượng của toàn hệ
Số ngăn lọc	n	3	Cho phép 1 ngăn ngừng; 2 ngăn còn lại làm việc
Vận tốc lọc	v <sub>r</sub>	5 m/h	Phù hợp với dữ liệu pilot
Đường kính ngăn	D	1,6 m	Diện tích thực A <sub>th</sub> = 2,01 m <sup>2</sup> /ngăn
Tổn thất đầu chu kỳ	H <sub>0</sub>	0,0315m	Tổn thất của lớp lọc sạch
Giới hạn tổn thất	Δh <sub>gh</sub>	0,7 m	Ngưỡng kích hoạt tự rửa
Thời gian của một chu kỳ lọc	t	67,5 h	Khoảng 2,8 ngày
Cường độ rửa	q <sub>r</sub>	12 l/s·m <sup>2</sup>	Trong vùng khuyến nghị
Lưu lượng rửa	Q <sub>r</sub>	0,02412 m <sup>3</sup> /s	Khoảng 86,8 m <sup>3</sup> /h
Thể tích nước rửa	V <sub>r</sub>	5,79 m <sup>3</sup>	Chưa kể dự trữ an toàn
Đường kính siphon	D <sub>s</sub>	185 mm	Có thể chọn DN200

## 6. PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ THIẾT KẾ

Tham số ảnh hưởng mạnh nhất đến kích thước công trình là vận tốc lọc. Nếu tăng vận tốc lọc trong khi vẫn giữ nguyên lưu lượng thiết kế, diện tích lọc giảm nhưng tổn thất lớp sạch tăng và tốc độ tích lũy tổn thất do bẩn thường cũng tăng. Điều này rút ngắn chu kỳ lọc và kéo theo số lần tự rửa tăng lên.

Chiều sâu lớp lọc L là tham số ảnh hưởng hai chiều. Khi tăng L, khả năng chứa cặn của lớp hạt tăng và chu kỳ lọc có thể kéo dài, nhưng tổn thất lớp sạch cũng tăng. Với vật liệu nổi tăng vừa phải chiều sâu lớp hạt thường có lợi cho độ ổn định vận hành.

Đường kính hạt d<sub>p</sub> ảnh hưởng đồng thời đến khả năng bắt giữ cặn và tổn thất thủy lực. Hạt nhỏ giúp tăng diện tích bề mặt và khả

năng giữ cặn mịn, nhưng làm tăng nhanh tổn thất qua lớp hạt sạch. Hạt lớn giảm tổn thất nhưng có thể làm suy giảm hiệu quả lọc tinh. Vì vậy, việc chọn cỡ hạt phải dựa trên mục tiêu chất lượng nước sau lọc và mức tiền xử lý của nguồn nước đầu vào.

Giới hạn tổn thất  $\Delta h_{gh}$  là tham số công nghệ có ảnh hưởng trực tiếp đến chu kỳ lọc và gián tiếp đến hình học khóa thủy lực. Nếu tăng  $\Delta h_{gh}$ , chu kỳ lọc kéo dài, nhưng đồng thời cần tăng cao trình đỉnh siphon hoặc tăng chiều cao phần nước làm việc, dẫn tới công trình cao hơn.

Cuối cùng, cường độ rửa  $q_r$  quyết định chất lượng hoàn nguyên lớp vật liệu. Nếu  $q_r$  quá thấp, lớp hạt chỉ được xáo trộn một phần, cặn không được loại bỏ triệt để và chu kỳ kế tiếp sẽ ngắn đi nhanh chóng. Ngược lại,  $q_r$  quá cao có thể gây thất thoát hạt, làm tăng tải cho máng thu nước rửa và đòi hỏi dung tích khoang chứa lớn hơn đáng kể. Do đó,  $q_r$  phải được chọn cùng với thời gian rửa để vừa bảo đảm hiệu quả hoàn nguyên vừa giữ cho thể tích nước rửa ở mức kinh tế.

## 7. THẢO LUẬN

Phương pháp được trình bày trong bài báo có ưu điểm lớn là biến một công nghệ thường được mô tả định tính thành một quy trình thiết kế có thể lượng hóa từng bước. Nhờ xem giới hạn tổn thất như biến trung tâm, người thiết kế có thể liên kết trực tiếp yêu cầu chất lượng nước sau lọc với cao trình đỉnh siphon, dung tích ngăn chứa và chu kỳ rửa. Điều này làm rõ hơn đáng kể cơ sở lựa chọn thông số so với cách làm chỉ dựa vào kinh nghiệm hoặc sao chép cấu hình công trình đi trước.

Tuy nhiên, phương pháp cũng có giới hạn rõ ràng. Thứ nhất, mô hình tăng tổn thất tuyến tính chỉ phù hợp cho giai đoạn sơ bộ và đối với nguồn nước tương đối ổn định. Thứ hai, hệ số lưu lượng của siphon và tổn thất cục bộ trong toàn bộ chu trình rửa phụ thuộc nhiều vào chi tiết cấu tạo; vì vậy, các giá trị tính toán vẫn cần kiểm chứng bằng mô hình pilot hoặc giai đoạn chạy thử.

Dù vậy, bài toán sơ bộ vẫn có ý nghĩa rất lớn trong thực hành. Nó cho phép nhanh chóng kiểm tra xem một phương án tự rửa bằng khóa thủy lực có khả thi hay không, liệu chiều cao công trình có nằm trong giới hạn cho phép, dung tích nước rửa có quá lớn so với không gian bố trí hay không. Khi những kiểm tra ban đầu này cho kết quả hợp lý, việc chuyển sang thiết kế chi tiết và thí nghiệm hiệu chỉnh sẽ tiết kiệm hơn nhiều.

## 8. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một khung tính toán tích hợp cho thiết kế bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa khi đạt giới hạn tổn thất lọc, trong đó nguyên lý khóa thủy lực được xem là phần tử trung tâm kết nối giữa chế độ lọc và chế độ rửa. Khung tính toán này bao gồm: xác định diện tích lọc và số ngăn; tính tổn thất lớp hạt sạch; lựa chọn giới hạn tổn thất; mô hình hóa sự tăng tổn thất theo thời gian; và tính lưu lượng rửa, thể tích nước rửa cùng kích thước ống siphon, cao trình đỉnh ống siphon.

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng nguyên lý khóa thủy lực trong thiết kế bể lọc vật liệu nổi không chỉ giúp đơn giản hóa vận hành mà còn tạo ra một ngôn ngữ thiết kế thống nhất, trong đó giá trị tổn thất giới hạn được chuyển hóa trực tiếp thành hình học công trình. Điều này có giá trị thực tiễn cao đối với thiết kế sơ bộ, lựa chọn phương án và xây dựng các thí nghiệm pilot phục vụ hiệu chỉnh thông số.

Để nâng cao độ tin cậy của thiết kế chi tiết, tác giả kiến nghị mọi dự án áp dụng công nghệ này cần có bước hiệu chỉnh bằng số liệu pilot hoặc chạy thử trên chính nguồn nước dự kiến xử lý, đặc biệt khi nguồn nước có biến động lớn về SS hoặc đặc tính bông cặn. Việc

hiệu chỉnh sẽ giúp xác lập chính xác hơn tốc độ tăng tổn thất, cường độ rửa tối ưu và điều kiện môi – ngắt siphon trong điều kiện thực tế.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Thanh Phong, Nghiên cứu quá trình tự rửa bể lọc vật liệu lọc nổi dùng cho các trạm cấp nước quy mô nhỏ, luận án tiến sĩ kỹ thuật cơ sở hạ tầng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 2017.
- [2] Trần Thanh Sơn, Nguyễn Thanh Phong và nhóm nghiên cứu, Nghiên cứu công nghệ tự rửa bể lọc VLL nổi xử lý nước cấp cho sinh hoạt, Đề tài nghiên cứu độc lập cấp nhà nước mã số ĐTĐL.2009/T02, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, 2014.
- [3] Trần Thanh Sơn, Phạm Văn Dương, Advanced wastewater treatment by hydraulic automatic floating media filter, Vietnam Journal of Science and Technology, 2017.
- [4] Trịnh Xuân Lai, Xử lý nước thiên nhiên cấp cho sinh hoạt và công nghiệp, NXB Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội, 2002.
- [5] SUEZ, Water Treatment Handbook, phần Filtration: Fundamental equations. SUEZ, 1991.