

Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nước phun và chênh lệch nhiệt độ tối thiểu đến hệ số năng suất của hệ thống khử muối bằng phương pháp phun tách ẩm

- **Võ Kiến Quốc***
- **Lê Chí Hiệp**
- **Nguyễn Văn Tuyên**
- **Nguyễn Thị Minh Trinh**

Trường Đại Học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

(Bản nhận ngày 23 tháng 02 năm 2016, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 06 tháng 04 năm 2016)

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu lý thuyết quá trình trao đổi nhiệt giữa nước phun và không khí trong hệ thống khử muối bằng phương pháp phun tách ẩm. Kết quả nghiên cứu cho thấy ứng với mỗi giá trị nhiệt độ nước phun khác nhau và các giá trị Δt_{min} khác nhau sẽ tồn tại một tỷ lệ lưu lượng giữa nước phun và không khí để hệ số năng suất GOR là lớn nhất. So sánh

với kết quả nghiên cứu trước đây của chúng tôi [7] và Hou [1] thì tỷ lệ lưu lượng khối lượng tối ưu giữa nước phun và không khí để hệ số GOR đạt giá trị cực đại và hiệu suất thu hồi nhiệt cực đại là hoàn toàn giống nhau. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy nhiệt độ nước phun tối ưu khi $\Delta t_{min}=5^{\circ}C$ nằm trong khoảng từ $70-75^{\circ}C$.

Từ khóa: phun tách ẩm, khử muối, thu hồi nhiệt, hệ số năng suất, chênh lệch nhiệt độ tối thiểu, tỷ lệ lưu lượng khối lượng

Danh mục các ký hiệu

C_{pw} : nhiệt dung riêng của nước ngọt [kJ/(kgK)]

C_{sw} : nhiệt dung riêng của nước biển [kJ/(kgK)]

w_a : độ chứa hơi của không khí bão hòa [kg/kg]

\dot{m}_a : lưu lượng khối lượng không khí [kg/s]

\dot{m}_w : lưu lượng khối lượng nước phun [kg/s]

\dot{m}_{pw} : lưu lượng khối lượng nước ngưng [kg/s]

\dot{m} : tỷ lệ lưu lượng khối lượng nước phun và không khí

h_a : entanpi của không khí [kJ/kg]

h_{fg} : ẩn nhiệt ngưng tụ của hơi nước [kJ/kg]

h_w : entanpi của nước [kJ/kg]

Q_{in} : nhiệt lượng cấp vào [kJ]

t_a : nhiệt độ không khí [$^{\circ}C$]

t_{pw} : nhiệt độ nước ngưng [$^{\circ}C$]

t_w : nhiệt độ nước biển [$^{\circ}C$]

w_a : độ chứa hơi của không khí [kg/kg]

Δt_{min} : Độ chênh nhiệt độ tối thiểu [$^{\circ}C$]

1. GIỚI THIỆU

Khử muối bằng phương pháp phun tách ẩm là một quá trình sản xuất nước ngọt bằng phương pháp thay đổi pha. Quá trình khử muối bao gồm 2 giai đoạn là phun ẩm và tách ẩm ở 2 thiết bị riêng biệt. Thiết bị phun ẩm có cấu tạo tương tự như một tháp giải nhiệt, trong đó nước nóng được phun sương trên bề mặt lớp đệm, không khí sẽ tuần hoàn theo chiều ngược lại. Trong thiết bị phun ẩm diễn ra quá trình trao đổi nhiệt và chất giữa nước phun và không khí. Không khí ra khỏi thiết bị phun ẩm là không khí ẩm bão hòa có nhiệt độ và độ chứa hơi cao [1-5]. Sau đó không khí đi vào thiết bị tách ẩm nhà nhiệt hiện và nhiệt ẩn cho nước giải nhiệt và hơi nước trong không khí sẽ ngưng tụ lại. Không khí sau khi ra khỏi thiết bị tách ẩm sẽ đi vào thiết bị phun ẩm thực hiện một chu kỳ mới. Nước giải nhiệt sau khi được gia nhiệt sơ cấp bởi không khí sẽ được tiếp tục gia nhiệt rồi phun vào thiết bị phun ẩm. Sơ đồ của hệ thống khử muối bằng phương pháp phun tách ẩm được trình bày trong hình 1.

Hệ số năng suất (Gain Output Ratio) của hệ thống phụ thuộc vào nhiệt lượng bổ sung để gia nhiệt cho nước cấp sau khi ra khỏi thiết bị tách ẩm (điểm 2) đến nhiệt độ làm việc (điểm 3). Ta có công thức xác định hệ số năng suất như sau:

$$GOR = \frac{\dot{m}_{pw} \cdot h_{fg}}{Q_{in}} \quad (1)$$

Trong đó:

$$Q_{in} = \dot{m}_w \cdot C_{sw} \cdot (t_{w3} - t_{w2}) \quad (2)$$

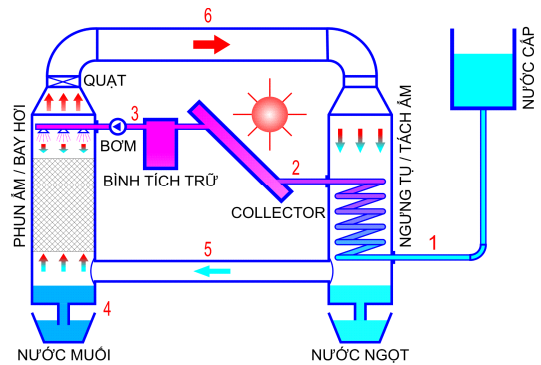
$$h_{fg} = 2501,8971440379 - 2,407064037 \cdot t + 1,192217 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 1,5863 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 \quad (3)$$

$$\dot{m}_{pw} = \dot{m}_a (w_{a6} - w_{a5}) \quad (4)$$

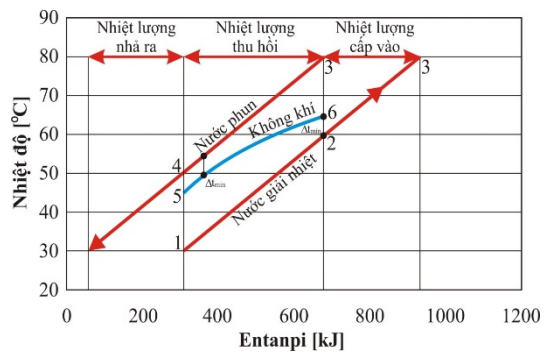
$$w_a = 2,19 \cdot t^3 \cdot 10^{-6} - 1,85 \cdot t^2 \cdot 10^{-4} + 7,06 \cdot t \cdot 10^{-3} - 0,077 \quad (5)$$

Phạm vi ứng dụng công thức (5) khi $t \geq 30^\circ\text{C}$

Như vậy hệ số năng suất tỷ lệ nghịch với nhiệt lượng cấp vào. Nhiệt lượng cấp vào càng nhiều thì hệ số năng suất càng thấp và ngược lại. Để cho nhiệt lượng cấp vào càng ít thì nhiệt lượng thu hồi ở thiết bị tách ẩm phải càng nhiều. Để đạt được điều này thì chênh lệch nhiệt độ tối thiểu Δt_{min} của nước và không khí trong thiết bị phun ẩm và tách ẩm phải càng thấp.



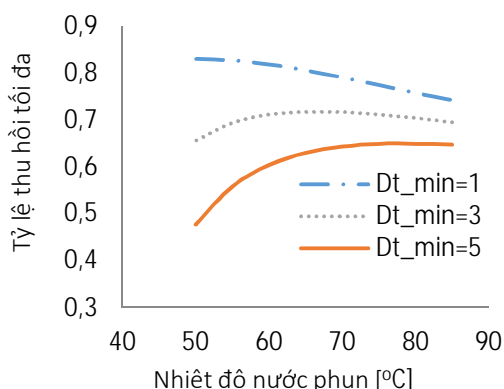
Hình 1. Sơ đồ hệ thống khử muối phun tách ẩm, không khí tuần hoàn kín, nước hồ, gia nhiệt nước



Hình 2. Phân tích Pinch cho hệ thống khử muối HDH khi $\dot{m} = 3$ ở nhiệt độ nước phun là 80°C và nhiệt độ nước giải nhiệt là 30°C .

Hình 2 mô tả quá trình trao đổi nhiệt giữa nước phun, không khí và nước giải nhiệt trong hệ thống khử muối phun tách ẩm. Quá trình gia nhiệt cho nước cấp trong thiết bị tách ẩm được thể hiện

bằng đường 1-2. Quá trình nhả nhiệt của nước trong thiết bị phun ẩm được thể hiện bằng đường 3-4. Quá trình nhận nhiệt và nhả nhiệt của không khí trong thiết bị phun ẩm và tách ẩm được thể hiện bằng đường 5-6 và 6-5. Quá trình trao đổi nhiệt của nước trong thiết bị phun ẩm và tách ẩm chủ yếu là trao đổi nhiệt hiện cho nên các đường biểu diễn 1-2 và 3-4 có thể xem là những đường thẳng tuyến tính. Quá trình trao đổi nhiệt của không khí thì bao gồm trao đổi nhiệt hiện và nhiệt ẩn cho nên các đường biểu diễn 5-6 và 6-5 là những đường cong phi tuyến.



Hình 3. Tỷ lệ thu hồi nhiệt tối ưu theo nhiệt độ nước phun ở nhiệt độ nước giải nhiệt là 30°C.

Sau khi ra khỏi thiết bị tách ẩm nước giải nhiệt (nước cấp) có nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ làm việc cho nên cần phải cung cấp cho nước một nhiệt lượng để đạt đến nhiệt độ làm việc. Chênh lệch nhiệt độ tối thiểu giữa các đường 1-2 và 3-4 với đường 5-6 được gọi là Δt_{\min} . Giá trị Δt_{\min} có thể điều chỉnh bằng cách tịnh tiến các đường 1-2 và 3-4 theo phương ngang. Về nguyên tắc thì Δt_{\min} càng thấp thì hiệu suất của thiết bị càng tăng. Tuy nhiên để đạt được giá trị Δt_{\min} thấp thì thiết bị phải có kích thước rất lớn. Điều này có thể làm tăng chi phí vận hành và đầu tư hệ thống, cho nên trong thực tế đối với những hệ thống làm

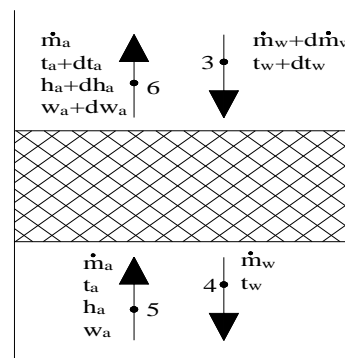
việc ở nhiệt độ thấp (dưới 100°C) thì giá trị Δt_{\min} được chọn là 5°C.

Trong một nghiên cứu trước đây [7], chúng tôi đã ứng dụng công nghệ Pinch để tối ưu hóa quá trình trao đổi nhiệt trong hệ thống khử muối phun tách ẩm. Kết quả nghiên cứu cho thấy ứng với một giá trị nhiệt độ nước phun và nhiệt độ nước giải nhiệt thì có một tỷ lệ lưu lượng tối ưu giữa nước phun và không khí tối ưu để hiệu quả trao đổi nhiệt là tốt nhất. Từ đó xây dựng được mối quan hệ giữa nhiệt độ nước phun và Δt_{\min} đến hiệu suất thu hồi nhiệt để xác định nhiệt độ nước phun hợp lý ứng với mỗi giá trị Δt_{\min} khác nhau. Trong bài báo này chúng tôi sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nước phun và Δt_{\min} đến hệ số năng suất GOR từ đó kết luận nhiệt độ nước phun hợp lý cho hệ thống khử muối phun tách ẩm.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Như đã trình bày ở phần trên thì trạng thái của không khí tuần hoàn trong hệ thống luôn là trạng thái bão hòa cho nên các công thức liên quan đến không khí ẩm trình bày sau đây được tính cho không khí ẩm bão hòa.

Cân bằng nhiệt và chất ở thiết bị phun ẩm



Hình 4. Cân bằng nhiệt và chất ở thiết bị phun ẩm

- Phương trình cân bằng khối lượng

$$\dot{m}_w + d\dot{m}_w + \dot{m}_a(1 + w_a) = \dot{m}_w + \dot{m}_a(1 + w_a + dw_a) \quad (6)$$

$$\rightarrow d\dot{m}_w = \dot{m}_a dw_a \quad (7)$$

- Phương trình cân bằng năng lượng

$$\dot{m}_a h_a + (\dot{m}_w + d\dot{m}_w) C_{sw} (t_w + dt_w) = \dot{m}_a (h_a + dh_a) + \dot{m}_w C_{sw} t_w \quad (8)$$

$$\rightarrow \dot{m}_w C_{sw} dt_w + d\dot{m}_w C_{sw} (t_w + dt_w) = \dot{m}_a dh_a \quad (9)$$

$$\rightarrow (\dot{m}_w + d\dot{m}_w) C_{sw} dt_w + d\dot{m}_w C_{sw} t_w = \dot{m}_a dh_a \quad (10)$$

Cân bằng nhiệt và chất ở thiết bị tách ẩm

- Phương trình cân bằng khối lượng:

$$\dot{m}_a w_a + \dot{m}_w = \dot{m}_a (w_a - dw_a) + \dot{m}_w + d\dot{m}_{pw} \quad (11)$$

$$\dot{m}_a dw_a = d\dot{m}_{pw} \quad (12)$$

- Phương trình cân bằng năng lượng

$$\dot{m}_a h_a + \dot{m}_w C_{sw} t_w = \dot{m}_a (h_a - dh_a) + \dot{m}_w C_{sw} (t_w + dt_w) + d\dot{m}_{pw} C_{pw} t_{pw} \quad (13)$$

$$\rightarrow \dot{m}_a dh_a = \dot{m}_w C_{sw} dt_w + d\dot{m}_{pw} C_{pw} t_{pw} \quad (14)$$

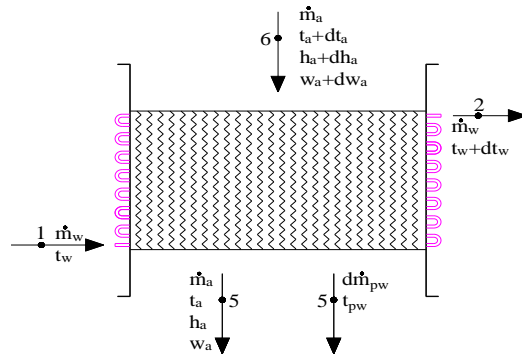
$$\rightarrow \dot{m}_a (h_{a6} - h_{a5}) = \dot{m}_w C_{sw} (t_{w2} - t_{w1}) + \dot{m}_{pw} C_{pw} t_{pw} \quad (15)$$

- Entanpi của nước [kJ]

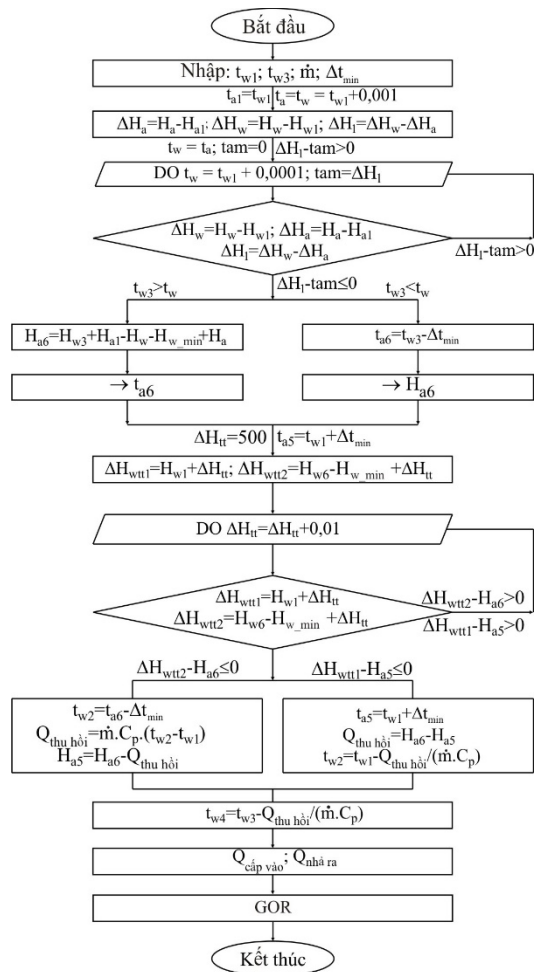
$$h_w = 4,1868 \cdot \dot{m}_w \cdot t_w \quad (16)$$

- Entanpi của không khí ẩm bão hòa [kJ]

$$h_a = \text{Exp}(2,39329 + 0,10648 \cdot t_a - 0,00135 \cdot t_a^2 + 0,000010058 \cdot t_a^3) \quad (17)$$



Hình 5. Cân bằng nhiệt và chất ở thiết bị tách ẩm

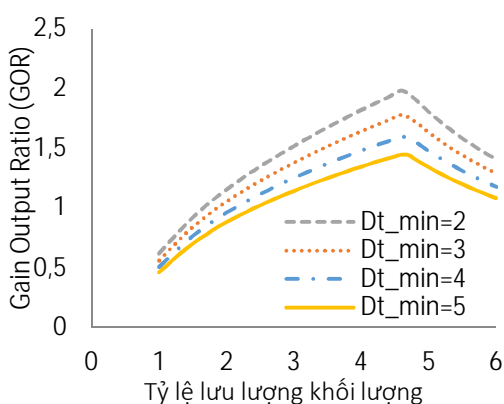


Hình 6. Sơ đồ khối quá trình mô phỏng

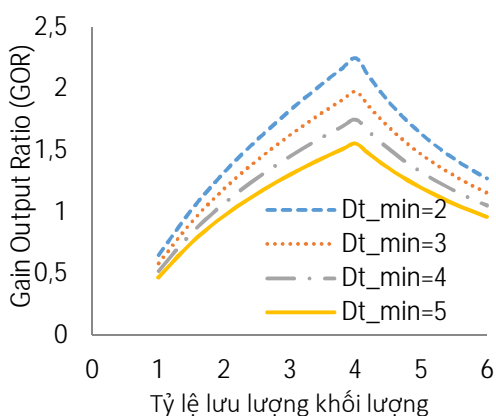
3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Chương trình mô phỏng được thực hiện bằng ngôn ngữ lập trình Visual Basic dựa trên các bước thể hiện trên sơ đồ khối ở hình 6. Bằng cách thay đổi nhiệt độ nước phun, Δt_{min} và tỷ lệ lưu lượng khối lượng giữa nước phun và không khí thì nhiệt độ nước và không khí ra khỏi thiết bị phun ẩm và tách ẩm được xác định một cách dễ dàng. Từ kết quả này, hệ số năng suất được xác định dựa trên phương trình (1).

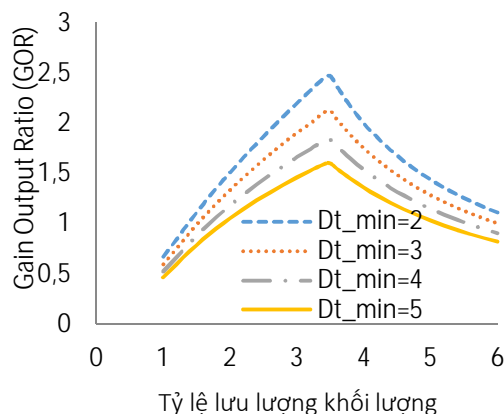
3.1 Ảnh hưởng của Δt_{min} đến hệ số GOR ở nhiệt độ nước giải nhiệt là 30°C.



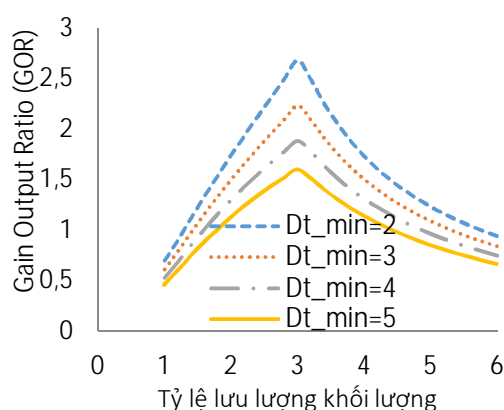
Hình 7. Nhiệt độ nước phun 85°C



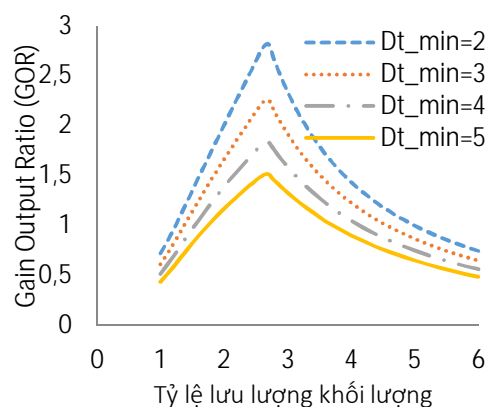
Hình 8. Nhiệt độ nước phun 80°C



Hình 9. Nhiệt độ nước phun 75°C



Hình 10. Nhiệt độ nước phun 70°C

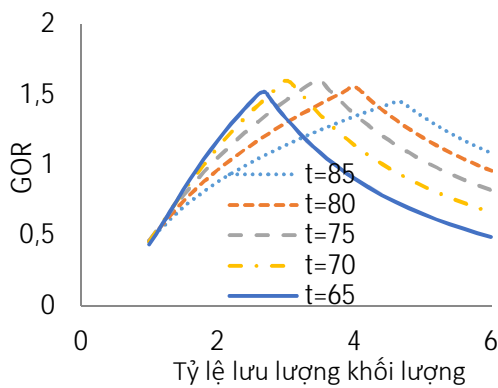


Hình 11. Nhiệt độ nước phun 65°C

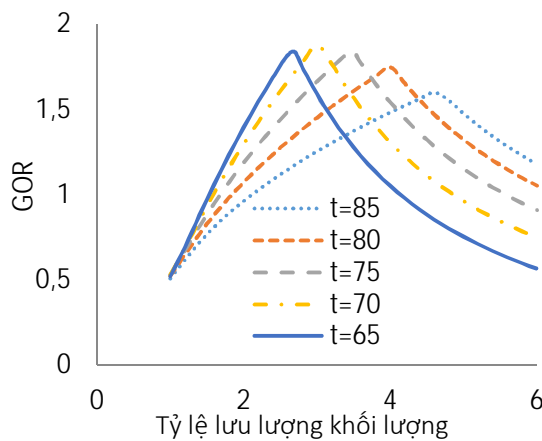
Kết quả mô phỏng trên các hình 7-11 cho thấy hệ số GOR cũng thay đổi theo tỷ lệ lưu

lượng khối lượng và chênh lệch nhiệt độ tại điểm Pinch. Δt_{min} càng thấp thì hệ số GOR càng cao. Tương tự như hiệu suất thu hồi nhiệt [7] thì tại tỷ lệ lưu lượng khối lượng giữa nước phun và không khí tối ưu thì hệ số GOR cũng đạt giá trị cực đại. Tỷ lệ lưu lượng tối ưu giữa nước phun và không khí cũng không phụ thuộc vào giá trị Δt_{min} . Điều này đã củng cố lại kết luận là ứng với một giá trị nhiệt độ nước phun sẽ có một tỷ lệ lưu lượng tối ưu để hiệu suất thu hồi nhiệt và hệ số GOR lớn nhất.

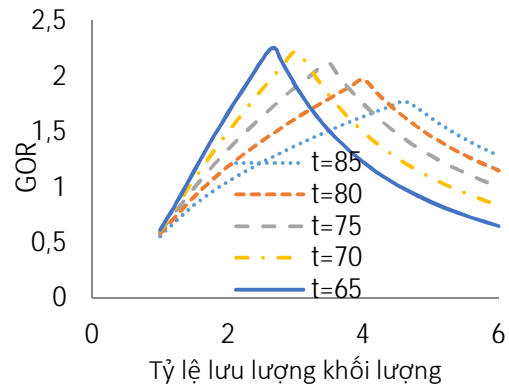
3.2 Ảnh hưởng của nhiệt độ nước phun và tỷ lệ lưu lượng khối lượng giữa nước phun và không khí đến hệ số GOR



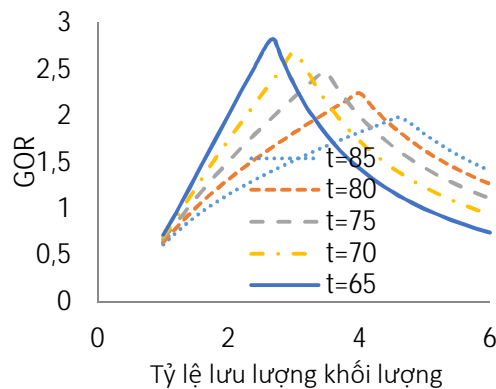
Hình 12. $\Delta t_{min}=5^{\circ}\text{C}$



Hình 13. $\Delta t_{min}=4^{\circ}\text{C}$



Hình 14. $\Delta t_{min}=3^{\circ}\text{C}$



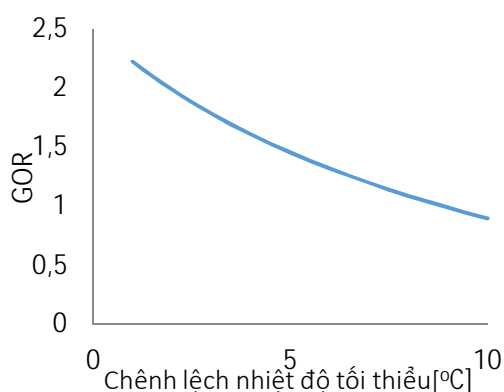
Hình 15. $\Delta t_{min}=2^{\circ}\text{C}$

Kết quả mô phỏng trên các hình 12-15 cho thấy hệ số GOR cũng phụ thuộc vào nhiệt độ nước phun. Ở cùng một giá trị Δt_{min} khi nhiệt độ thay đổi thì hệ số GOR cũng thay đổi. Tuy nhiên sự thay đổi của hệ số GOR theo nhiệt độ không giống nhau khi Δt_{min} thay đổi. Trên hình 12 ta thấy rằng ở giá trị $\Delta t_{min}=5^{\circ}\text{C}$ thì tại nhiệt độ nước phun là 70°C và 75°C thì hệ số GOR là cao nhất. Khi nhiệt độ nước phun lớn hơn 75°C và nhỏ hơn 70°C thì hệ số GOR sẽ giảm xuống. Như vậy nếu xét về phương diện hiệu quả năng lượng thì nhiệt độ nước phun hợp lý khi $\Delta t_{min}=5^{\circ}\text{C}$ là từ $70-75^{\circ}\text{C}$. Tương tự trên hình 13 ta thấy rằng ở giá trị $\Delta t_{min}=4^{\circ}\text{C}$ thì khi nhiệt độ nước phun là 70°C thì hệ số GOR là cao nhất khi nhiệt độ nước phun lớn hơn hoặc nhỏ hơn giá trị này thì hệ số GOR giảm. Khi giá trị $\Delta t_{min}\leq 3^{\circ}\text{C}$ thì hệ số GOR là lớn

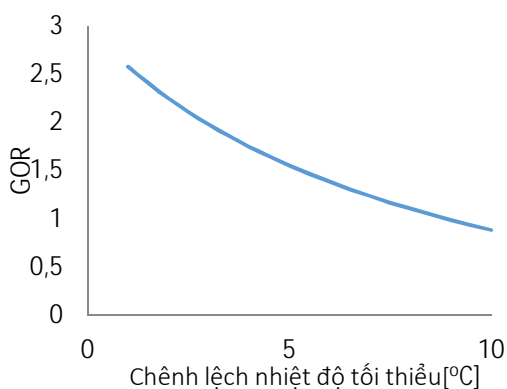
nhất khi nhiệt độ nước phun là 65°C. Như vậy ta nhận thấy một quy luật là khi giá trị Δt_{\min} càng giảm thì nhiệt độ nước phun cũng sẽ giảm để hệ số GOR đạt giá trị cao nhất. Tuy nhiên để đạt được giá trị Δt_{\min} càng thấp thì thiết bị trao đổi nhiệt phải có hiệu suất càng cao, điều này là rất khó khăn đối với các thiết bị trao đổi nhiệt.

Tóm lại ứng với giá trị $\Delta t_{\min}=5^{\circ}\text{C}$ thì nếu xét cả 2 phương diện: hiệu quả thu hồi nhiệt [7] và hệ số GOR thì nhiệt độ nước phun tối ưu để 2 thông số trên là tối đa nằm trong khoảng từ 70-75°C. Với giá trị nhiệt độ này thì các collector mặt trời dạng phẳng hoàn toàn có khả năng đáp ứng.

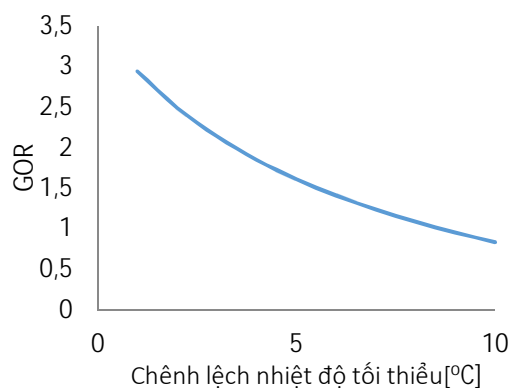
3.3 Ảnh hưởng của Δt_{\min} đến hệ số GOR



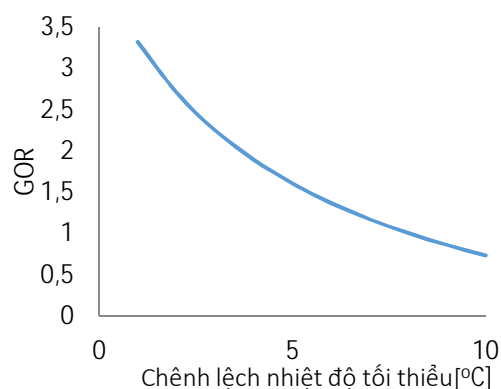
Hình 16. Ảnh hưởng của Δt_{\min} đến GOR ở nhiệt độ nước phun là 85°C và \dot{m} tối ưu



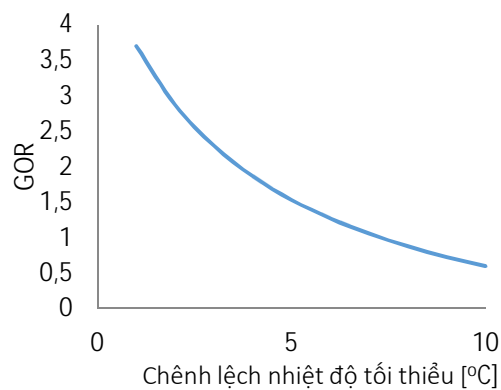
Hình 17. Ảnh hưởng của Δt_{\min} đến GOR ở nhiệt độ nước phun là 80°C và \dot{m} tối ưu



Hình 18. Ảnh hưởng của Δt_{\min} đến GOR ở nhiệt độ nước phun là 75°C và \dot{m} tối ưu



Hình 19. Ảnh hưởng của Δt_{\min} đến GOR ở nhiệt độ nước phun là 70°C và \dot{m} tối ưu



Hình 20. Ảnh hưởng của Δt_{\min} đến GOR ở nhiệt độ nước phun là 65°C và \dot{m} tối ưu

Kết quả mô phỏng trên các hình 16-20 cũng cho thấy khi giá trị Δt_{\min} càng thấp, nếu nhiệt độ nước phun càng thấp thì hệ số GOR càng cao và ngược lại khi giá trị Δt_{\min} càng cao, nếu nhiệt độ nước phun càng cao thì hệ số GOR càng cao. Như vậy nếu thiết bị trao đổi nhiệt có hiệu suất thấp (Δt_{\min} cao) thì nên chọn nhiệt độ nước phun cao để cho hệ số GOR cực đại.

Dựa vào kết quả trên chúng tôi nhận thấy rằng nếu $\Delta t_{\min} \geq 10^\circ\text{C}$ thì nhiệt độ nước phun là 85°C sẽ có hệ số GOR cao hơn ở nhiệt độ nước phun là 80°C . Nếu $\Delta t_{\min} \geq 7^\circ\text{C}$ thì nhiệt độ nước phun là 80°C sẽ có hệ số GOR cao hơn ở nhiệt độ nước phun là 75°C . Nếu $\Delta t_{\min} \geq 5^\circ\text{C}$ thì nhiệt độ nước phun là 75°C sẽ có hệ số GOR cao hơn ở nhiệt độ nước phun là 70°C . Nếu $\Delta t_{\min} \geq 3,5^\circ\text{C}$ thì nhiệt độ nước phun là 70°C sẽ có hệ số GOR cao hơn ở nhiệt độ nước phun là 65°C .

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu chúng tôi rút ra một số kết luận như sau:

- Ứng với mỗi giá trị nhiệt độ nước phun khác nhau và chênh lệch nhiệt độ tối thiểu Δt_{\min} khác nhau sẽ tồn tại một tỷ lệ lưu lượng tối ưu giữa nước phun và không khí để hệ số GOR là lớn nhất. Kết quả này cũng giống với kết quả nghiên cứu về hiệu quả thu hồi nhiệt trong hệ thống của chúng tôi [7] và Hou [1].
- Ứng với mỗi giá trị Δt_{\min} thì sẽ tồn tại một khoảng nhiệt độ nước phun hợp lý để hệ số GOR tốt nhất. Δt_{\min} thấp thì nhiệt độ nước phun thấp và ngược lại. Với giá trị $\Delta t_{\min} = 5^\circ\text{C}$ thì nhiệt độ nước phun hợp lý là khoảng từ $70-75^\circ\text{C}$ thì hệ số GOR là tốt nhất. Về mặt

thu hồi nhiệt ở giá trị $\Delta t_{\min} = 5^\circ\text{C}$ thì trong [7] chúng tôi xác định được nhiệt độ nước phun hợp lý trong khoảng từ $65-85^\circ\text{C}$. Như vậy nếu kết hợp cả 2 mặt thì vùng chung của nhiệt độ nước phun để hiệu quả thu hồi nhiệt và hệ số GOR tốt nhất là từ $70-75^\circ\text{C}$.

- Với mỗi giá trị Δt_{\min} khác nhau thì dãy nhiệt độ nước phun hợp lý để hiệu quả thu hồi nhiệt và hệ số GOR tốt nhất cũng sẽ khác nhau. Để lựa chọn giá trị Δt_{\min} hợp lý cho hệ thống thì cần phải có một nghiên cứu chi tiết về chi phí đầu tư và vận hành thiết bị. Theo Linhoff March [6] thì đối với những thiết bị vận hành ở dãy nhiệt thế thấp (dưới 100°C) thì giá trị Δt_{\min} tối ưu khoảng bằng 5°C . Do đó chúng tôi kết luận rằng với nhiệt độ nước phun hợp lý nằm trong khoảng từ $70-75^\circ\text{C}$ thì hệ thống khử muối phun tách ẩm hoàn toàn có thể sử dụng năng lượng mặt trời để cấp nhiệt.
- Hệ số năng suất của hệ thống khử muối phun tách ẩm phụ thuộc vào nhiệt độ nước phun, nhiệt độ nước giải nhiệt và tỷ lệ lưu lượng khối lượng giữa nước phun và không khí. Khi các giá trị này thay đổi thì điểm đạt giá trị Δt_{\min} cũng sẽ thay đổi theo, do đó việc xác định điểm đạt giá trị Δt_{\min} sẽ mất rất nhiều thời gian. Chương trình mô phỏng đã giải quyết được vấn đề khó khăn này, từ đó tính toán được hệ số năng suất của hệ thống một cách dễ dàng.

Theoretical study on the influence of sprayed water temperature and minimum temperature difference to the efficiency of a humidification – dehumidification desalination unit

- Vo Kien Quoc
- Le Chi Hiep
- Nguyen Van Tuyen
- Nguyen Thi Minh Trinh

Ho Chi Minh City University of Technology, VNU-HCM

ABSTRACT

The main content of the paper focuses on the theoretical study of the heat exchange between sprayed water and air in a humidification – dehumidification unit. The gained results [7] have been validated by using Hou data [1] and show that, in order to achieve the maximum

GOR, the mass flow rate ratio between sprayed water and air depends on the sprayed water temperature and the minimum temperature difference Δt_{min} . Particularly, the sprayed water temperature should be from 70°C to 75°C when the minimum temperature difference $\Delta t_{min} = 5^\circ\text{C}$.

Keywords: Humidification, Dehumidification, Desalination, Heat recovery, Minimum Temperature Difference, Mass Flow Rate Ratio.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hou, S., S. Ye, and H. Zhang, *Performance optimization of solar humidification–dehumidification desalination process using Pinch technology*. Desalination, 2005. **183**(1–3): p. 143-149.
- [2]. Narayan, G.P., et al., *The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(4): p. 1187-1201.
- [3]. Nawayseh, N.K., et al., *A simulation study to improve the performance of a solar humidification-dehumidification desalination unit constructed in Jordan*. Desalination, 1997. **109**(3): p. 277-284.

- [4]. Farid, M.M., et al., *Solar desalination with a humidification-dehumidification cycle: mathematical modeling of the unit*. Desalination, 2003. **151**(2): p. 153-164.
- [5]. Orfi, J., et al., *Experimental and theoretical study of a humidification-dehumidification water desalination system using solar energy*. Desalination, 2004. **168**(0): p. 151-159.
- [6]. March, L., *Introduction to Pinch Technology*. 1998, Targeting House, Gadbrook Park, Northwich, Cheshire, CW9 7UZ, England.
- [7]. Võ Kiên Quốc, Lê Chí Hiệp, Nguyễn Văn Tuyên, *Ứng dụng phân tích Pinch để tối ưu hóa thu hồi nhiệt trong hệ thống khử muối bằng phương pháp phun tách ẩm cấp nhiệt bằng năng lượng mặt trời*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ các trường Đại học Kỹ thuật, 10/2015.