

MÔ HÌNH HÓA THÁP CHUNG CẤT 2 THÀNH PHẦN 3 TẦNG CHO CÔNG NGHỆ DẦU KHÍ

MODELLING THE TWO COMPOSITION – THREE STAGE DISTILLATION COLUMNS FOR PETROCHEMICAL TECHNOLOGY

Nguyễn Quốc Định

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; ngdinh@dut.udn.vn

Tóm tắt - Mô hình quá trình tháp chưng cất là một mô hình đa biến, tác động xen kênh và tính phi tuyến mạnh. Xây dựng mô hình toán tháp chưng cất là vấn đề quan trọng trong việc đưa ra sách lược điều khiển phù hợp nhằm nâng cao chất lượng hệ thống tháp chưng cất. Bài báo trình bày kết quả xây dựng mô hình toán học của tháp chưng cất 2 thành phần dựa trên cấu hình LV và mô phỏng mô hình toán học này dựa trên phần mềm Matlab Simulink. Từ kết quả mô phỏng có thể nhận thấy ảnh hưởng của các thành phần L, V đến các thành phần cấu tử trong tháp chưng cất. Nghiên cứu này sẽ là tiền đề cho việc ứng dụng các phương pháp điều khiển thông minh nhằm nâng cao chất lượng điều khiển tháp chưng cất 2 thành phần.

Từ khóa - tháp chưng cất; mô hình hóa; động học; thành phần; phân tách.

1. Đặt vấn đề

Ngày nay cũng với sự phát triển vượt bậc của nền công nghiệp thế giới và nước nhà, các ngành công nghiệp rất cần nhiều hóa chất có độ tinh khiết cao. Chưng cất là phương pháp được thực hiện để phân tách hỗn hợp hóa học gồm nhiều thành phần thành những dòng sản phẩm tinh khiết hơn. Sự phân tách dựa trên sự khác nhau về “tính chất dễ bay hơi” giữa những thành phần hóa học khác nhau. Để thực hiện được sự chưng cất người ta dùng tháp chưng cất. Các cấu tử dễ bay hơi (cấu tử nhẹ) được rời đi khỏi đỉnh tháp, còn cấu tử khó bay hơi hơn (cấu tử nặng) được rời đi từ đáy tháp.

Chưng cất được phân thành chưng cất nhiều thành phần và chưng cất hai thành phần. Chưng cất nhiều thành phần là quá trình phân tách hỗn hợp nhiều chất hóa học thành nhiều dòng sản phẩm. Chưng cất hai thành phần là chưng cất có dòng nguyên liệu vào tháp được tách thành 2 dòng sản phẩm. Ngoài ra còn phân theo chưng cất liên tục hay chưng cất theo mẻ.

Nghiên cứu động học để xây dựng mô hình toán tháp chưng cất là vấn đề quan trọng trong việc điều khiển và giám sát tháp chưng cất. Nhiều công trình đã nghiên cứu về động học tháp chưng cất, kể cả trong phòng thí nghiệm và cả trong các nhà máy. Theo [4], tác giả Đặng Văn Chí (2012) đã đề xuất giải pháp dùng mạng neuron để ước lượng nồng độ thành phần đỉnh tháp, đáy tháp và vùng cấp liệu để cho ra X_D và Y_B . Ngoài ra, năm 2011, Asha Rani và cs đã sử dụng bộ ước lượng Adaline và LM so với kết quả thực trong tháp chưng cất phản ứng và chưng cất nhiều thành phần [5].

2. Xây dựng mô hình toán tháp chưng cất hai thành phần

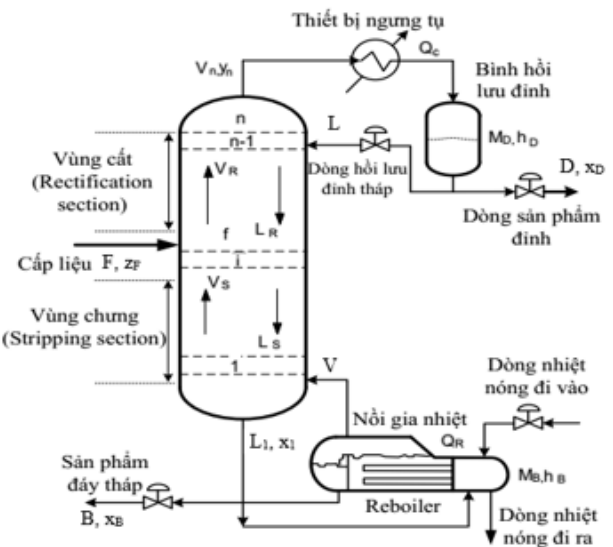
Thiết bị đun sôi là một bộ trao đổi nhiệt đặt tại đáy tháp,

Abstract - The model of distillation column process, actually, is a model of multivariable, inter-channel effects and strong nonlinearity. Modelling distillation column is important to provide the most appropriate control strategies in order to improve performance of distillation columns. This paper presents the mathematical model of two composition distillation columns. The simulation schema has been developed on the Matlab - Simulink. From the obtained simulation results, we can see how the compositions L, V affect other composition of distillation columns. Moreover, this research results will be the first step for applying the intelligent control methods, such as fuzzy, neural networks or GA, to enhance the control quality of this kind of distillation columns.

Key words - Distillation column, modelling, dynamic, composition, separation.

tại đó nhiệt được truyền vào để hóa hơi 1 phần chất lỏng cấu tử nhẹ còn trong dung dịch từ đáy tháp.

Tháp chưng cất hai thành phần có cấu tạo gồm 3 bộ phận chính (Hình 1): thiết bị đun sôi, thân tháp và thiết bị ngưng tụ.



Hình 1. Sơ đồ tháp chưng cất hai thành phần

Thiết bị ngưng tụ là bộ trao đổi nhiệt để hóa lỏng hơi rời khỏi đỉnh tháp. Chất lỏng từ thiết bị ngưng tụ rơi xuống bể chứa sản phẩm ngưng tụ. Sản phẩm đỉnh được rời đi từ bể này. Một dòng chất lỏng hồi lưu được cấp trở lại vào đỉnh tháp để hóa lỏng hơi các cấu tử nặng còn lẫn trong đỉnh khay.

Thân tháp được cấu tạo từ các khay, các khu vực ở giữa các đĩa gọi là các tầng. Đánh số thứ tự từ đáy tháp “1” đến đỉnh “N”, khay cấp là F. Những khay này sẽ tạo điều kiện

cho các cấu tử nhẹ ở thể hơi đi lên đỉnh tháp và cấu tử nặng trong thể lỏng đi xuống đáy tháp.

Bảng 1. Các kí hiệu

Kí hiệu	Nghĩa kí hiệu
F	Lưu lượng dòng nạp liệu (kmol/ph)
z _F	Phần mol của hợp chất nhẹ trong dòng nguyên liệu nạp (%)
D	Lưu lượng dòng sản phẩm đỉnh (kmol/ph)
B	Lưu lượng dòng sản phẩm đáy (kmol/ph)
N	Số đĩa lý thuyết
L _n , V _n	Tốc độ dòng mol toàn phần của pha lỏng và pha hơi tương ứng khi rời khỏi đĩa N (kmol/ph)
x _D	Phần mol chất nhẹ trong sản phẩm đỉnh (%)
x _B	Phần mol chất nhẹ trong sản phẩm đáy (%)
x _i , y _i	Phần mol hợp chất nhẹ của pha lỏng, pha hơi trên đĩa thứ i (%)
L	Dòng hồi lưu ở đỉnh tháp (kmol/ph)
V	Dòng hơi hồi lưu vào đáy tháp (kmol/ph)
M _i	Lượng chất lỏng đọng lại trên đĩa thứ i (kmol)

Để đơn giản trong việc mô tả hệ thống, ta đưa ra các giả thiết sau (Các giả thiết này không làm ảnh hưởng đến tính tổng quát mô hình hóa tháp chưng cất):

- Các đĩa lọc trong tháp làm việc với hiệu suất 100%.
- Lượng lỏng trên đĩa không thay đổi trong chế độ quá độ.
- Chất lỏng trong tháp ở nhiệt độ sôi, hơi ở trạng thái bão hòa.
- Chưng cất được thực hiện trong điều kiện cân bằng pha lỏng - hơi.
- Tổn thất nhiệt từ tháp ra môi trường xung quanh được bỏ qua.

Phương trình toán ở trạng thái xác lập [1], [3]

Ở trạng thái cân bằng pha, nồng độ thành phần phải được cân bằng trong cả pha hơi và pha lỏng:

$$y_i P_T = x_i P_i \quad \gamma_i \quad (1)$$

Hằng số cân bằng pha:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (2)$$

Nhiệt độ ở đáy tháp thỏa mãn phương trình:

$$\sum_{i=1}^{N_c} K_i x_i = \sum_{i=1}^{N_c} y_i = 1 \quad (3)$$

Hệ số bay hơi tương đối được dùng để đánh giá khả năng phân tách của các cấu tử trong công đoạn chưng:

$$\alpha_{jk} = \frac{y_j / x_j}{y_k / x_k} \quad (4)$$

Phương trình cân bằng về nồng độ thành phần:

$$Fz_F = Dx_D + Bx_B \quad (5)$$

Các phương trình toán động học

Phương trình cân bằng khối lượng tại các đĩa

Tại thiết bị ngưng tụ:

$$\frac{dM_D}{dt} = V_n - (L + D) \quad (6)$$

Tại đĩa thứ n trên cùng:

$$\frac{dM_n}{dt} = V_{n-1} - V_n + L - L_n \quad (7)$$

Tại đĩa thứ i bất kì:

$$\frac{dM_i}{dt} = V_{i-1} - V_i + L_{i+1} - L_i \quad (8)$$

Tại đĩa cấp liệu F:

$$\frac{dM_f}{dt} = V_{f-1} - V_f + L_{f+1} - L_f + F \quad (9)$$

Tại đĩa ở đáy tháp chưng cất:

$$\frac{dM_1}{dt} = V_B - V_1 + L_2 - L_1 \quad (10)$$

Tại nồi tái đun:

$$\frac{dM_B}{dt} = -V_B + L_1 - B \quad (11)$$

Phương trình cân bằng về nồng độ thành phần

Tại thiết bị ngưng tụ:

$$\frac{dM_D x_D}{dt} = V_n y_n - (L + D) x_D \quad (12)$$

Tại đĩa thứ n trên cùng:

$$\frac{dM_n x_n}{dt} = V_{n-1} y_{n-1} - V_n y_n + L x_D - L_n x_n \quad (13)$$

Tại đĩa thứ i bất kì:

$$\frac{dM_i x_i}{dt} = V_{i-1} y_{i-1} - V_i y_i + L_{i+1} x_{i+1} - L_i x_i \quad (14)$$

Tại đĩa cấp liệu F:

$$\frac{dM_f x_f}{dt} = V_{f-1} y_{f-1} - V_f y_f + L_{f+1} x_{f+1} - L_f x_f + F z_f \quad (15)$$

Tại đĩa ở đáy tháp chưng cất:

$$\frac{dM_1 x_1}{dt} = V_B y_B - V_1 y_1 + L_2 x_2 - L_1 x_1 \quad (16)$$

Tại nồi tái đun:

$$\frac{dM_B x_B}{dt} = -V_B y_B + L_1 x_1 - B x_B \quad (17)$$

Từ các phương trình trên, ta có:

$$\begin{aligned} \frac{d(M_i x_i)}{dt} &= M_i \frac{dx_i}{dt} + x_i \frac{dM_i}{dt} \\ &= L_{i+1} x_{i+1} - L_i x_i + V_{i-1} y_{i-1} - V_i y_i \end{aligned} \quad (18)$$

Do đó:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= \frac{1}{M_i} \left(\frac{d(M_i x_i)}{dt} - x_i \frac{dM_i}{dt} \right) \\ \frac{dx_i}{dt} &= \frac{1}{M_i} (L_{i+1} x_{i+1} - L_i x_i + V_{i-1} y_{i-1} - V_i y_i) \\ &\quad - \frac{1}{M_i} (L_{i+1} x_i - L_i x_i + V_{i-1} x_i - V_i x_i) \end{aligned} \quad (19)$$

Từ đây ta có phương trình toán học tổng quát của tháp chưng cất:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = f(X, U) \\ Y = g(X, U) \end{cases} \quad (20)$$

Trong đó:

Biến trạng thái: $X = [x_B, x_1, x_2, \dots, x_N, x_D]^T$

Véc tơ đầu vào: $U = [L \ V]^T$

Véc tơ đầu ra: $Y = [x_D, x_B]^T$

Mô hình toán tháp chưng cất hai thành phần 3 tầng

Ở đây, bài báo minh họa một tháp chưng cất đơn giản với 3 tầng và nghiên cứu các nguyên tắc cơ bản của mô hình động học của tháp 3 tầng này.

Chúng ta tách 2 thành phần, áp suất không đổi và giữ hơi ở mức cao không đáng kể, điều khiển hoàn hảo về mức bằng cách sử dụng cấu hình LV, dòng chảy toàn bộ không đổi (thay cho cân bằng năng lượng), cân bằng lỏng – hơi của tất cả các tầng, bỏ qua dòng chảy động học trong tháp.

Từ phương trình (4), ta có:

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} \quad (21)$$

Áp dụng khai triển Taylor để tuyến tính hóa phương trình (4):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} &= \frac{\alpha}{(1 + (\alpha - 1)x_1)^2} \approx k_1 \\ \frac{\Delta y_2}{\Delta x_2} &= \frac{\alpha}{(1 + (\alpha - 1)x_2)^2} \approx k_2 \end{aligned} \quad (22)$$

Các phương trình trạng thái của tháp chưng cất hai thành phần có 3 tầng như sau:

Thiết bị đun sôi đáy tháp:

$$M_1 \frac{dx_1}{dt} = L_2 x_2 - B x_1 - V_1 y_1 \quad (23)$$

Trong đó:

$$L_2 = L + F$$

$$V_1 = V$$

$$B = L + F - V$$

$$M_1 \frac{dx_1}{dt} = (L + F)x_2 - (L + F - V)x_1 - V y_1 \quad (24)$$

Đĩa cấp liệu:

$$M_2 \frac{dx_2}{dt} = F z_F + V_1 y_1 + L_3 x_3 - V_2 y_2 - L_2 x_2 \quad (25)$$

Trong đó:

$$L_2 = L + F$$

$$L_3 = L$$

$$V_1 = V_2 = V$$

$$M_2 \frac{dx_2}{dt} = F z_F + V y_1 + L x_3 - V y_2 - (L + F)x_2 \quad (26)$$

Thiết bị ngưng tụ:

$$M_3 \frac{dx_3}{dt} = V_2 y_2 - L_3 x_3 - D x_3 \quad (27)$$

Trong đó:

$$L_3 = L$$

$$D = V - L$$

$$M_3 \frac{dx_3}{dt} = V y_2 - V x_3 \quad (28)$$

Áp dụng phép khai triển Taylor và kết hợp phương trình (22), tuyến tính hóa các phương trình trên:

$$\begin{aligned} M_1 \frac{dx_1}{dt} &= (-B - V k_1) \Delta x_1 + (L + F) \Delta x_2 + (x_2 - x_1) \Delta L \\ &\quad + (x_1 - y_1) \Delta V + (x_2 - x_1) \Delta F \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 \frac{dx_2}{dt} &= V k_1 \Delta x_1 - (L + F + V k_2) \Delta x_2 + L \Delta x_3 \\ &\quad + (x_3 - x_2) \Delta L + (y_1 - y_2) \Delta V \\ &\quad + (z_F - x_2) \Delta F + F \Delta z_F \end{aligned}$$

$$M_3 \frac{dx_3}{dt} = V k_2 \Delta x_2 - V \Delta x_3$$

y_i, x_i, L_i, V_i là các giá trị ở trạng thái ổn định của hệ tại thời điểm hoạt động thứ i . Và bằng cách viết x thay cho Δx , mô hình trạng thái của tháp ở dạng vi phân:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu + Ed \\ y = Cx \end{cases} \quad (29)$$

Trong đó:

$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ là biến trạng thái;

$u = [L \ V]^T$ là biến đầu vào;

$y = [x_D \ x_B]^T$ là biến đầu ra;

$d = [F, z_F]^T$ là nhiễu của mô hình.

Các ma trận:

$$A = \begin{bmatrix} (-B - V k_1) / M_1 & (L + F) / M_1 & 0 \\ V k_1 / M_2 & (-L - F - V k_2) / M_2 & L / M_2 \\ 0 & V k_2 / M_3 & -V / M_3 \end{bmatrix};$$

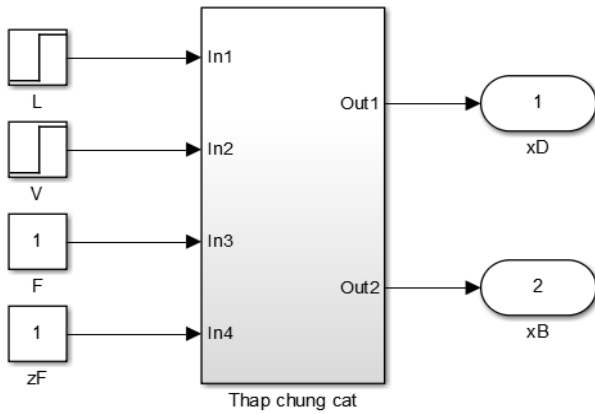
$$B = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) / M_1 & (x_1 - y_1) / M_1 \\ (x_3 - x_2) / M_2 & (y_1 - y_2) / M_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$E = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) / M_1 & 0 \\ (z_F - x_2) / M_2 & F / M_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Mô phỏng hệ thống tháp chưng cất hai thành phần 3 tầng

Từ hệ phương trình (29) ta xây dựng mô hình tháp chưng cất hai thành phần 3 tầng như Hình 2.



Hình 2. Mô hình tháp chưng cất hai thành phần 3 tầng

Các dữ liệu về tháp được lấy từ nghiên cứu của Sigurd Skogestad [2] về động học và điều khiển tháp chưng cất.

Bảng 2. Các tham số mô hình của tháp chưng cất hai thành phần 3 tầng

N	N _t	N _F	F	Z _F	α	D	L	V	x _D	x _B	M _i
2	3	2	1	0.5	10	0.5	3.55	3.55	0.9	0.1	1

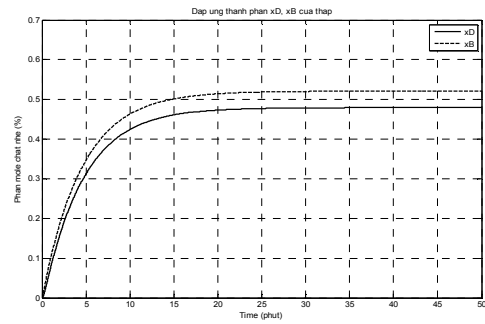
Bảng 3. Các dữ liệu thành phần 3 tầng ở trạng thái cân bằng của tháp

Tầng	I	L _i	V _i	x _i	y _i
Bình ngưng	3	3.05		0.9	
Đĩa cấp liệu	2	4.05	3.55	0.4737	0.9
Nồi hơi	1		3.55	0.1	0.5263

Kết quả mô phỏng với $d = [1, 0.5]^T$, $u = [3.05, 3.55]^T$

Nhận xét kết quả mô phỏng: Từ đáp ứng thành phần x_D , x_B của tháp chưng cất như trên Hình 3, ta có thể thấy rằng x_D , x_B đã nhanh chóng tiến đến giá trị xác lập với sai số nhỏ nằm trong phạm vi cho phép ($< 5\%$ giá trị xác lập, sai số

này được xác định trên mô phỏng Matlab - Simulink).



Hình 3. Đáp ứng thành phần x_D , x_B của tháp chưng cất

4. Kết luận

Từ những nghiên cứu về nguyên lý hoạt động, động học của tháp chưng cất hai thành phần, ta đã xây dựng được mô hình toán cho tháp chưng cất thành phần gồm n đĩa lý thuyết và từ đó đưa ra cấu hình LV cụ thể cho tháp chưng cất hai thành phần 3 tầng,

Thực hiện mô phỏng tháp chưng cất hai thành phần 3 tầng cho thấy thành phần cấu từ x_D và x_B thay đổi theo dòng phản hồi L và V.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Page S. Buckley, William L. Luyben, Joseph P. Shunta, *Design of distillation column control systems*, Publishers Creative Services Inc, New York, 1985.
- [2] Sigurd Skogestad: "Dynamics and control of Distillation Columns", *Chemical Engineering*, Norwegian University of Science and Technology N-7034 Trondheim, Norway, 1997.
- [3] William L. Luyben: *Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers*, McGraw – Hill, 1990.
- [4] Đặng Văn Chí, *Nghiên cứu các giải pháp để nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu suất làm việc của tháp chưng cất trong công nghiệp dầu mỏ*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường đại học Mỏ - Địa chất, 2012.
- [5] Asha Rani, Vijander Singh, J.R.P Gupta, "Soft sensor based on adaptive linear network for distillation process", *International journal of computer applications* (0975-8887), Volume 36-No. 1, 2011.

(BBT nhận bài: 14/12/2016, hoàn tất thủ tục phản biện: 30/12/2016)