หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

# ทฤษฎีเบื้องต้นของการกลั่น

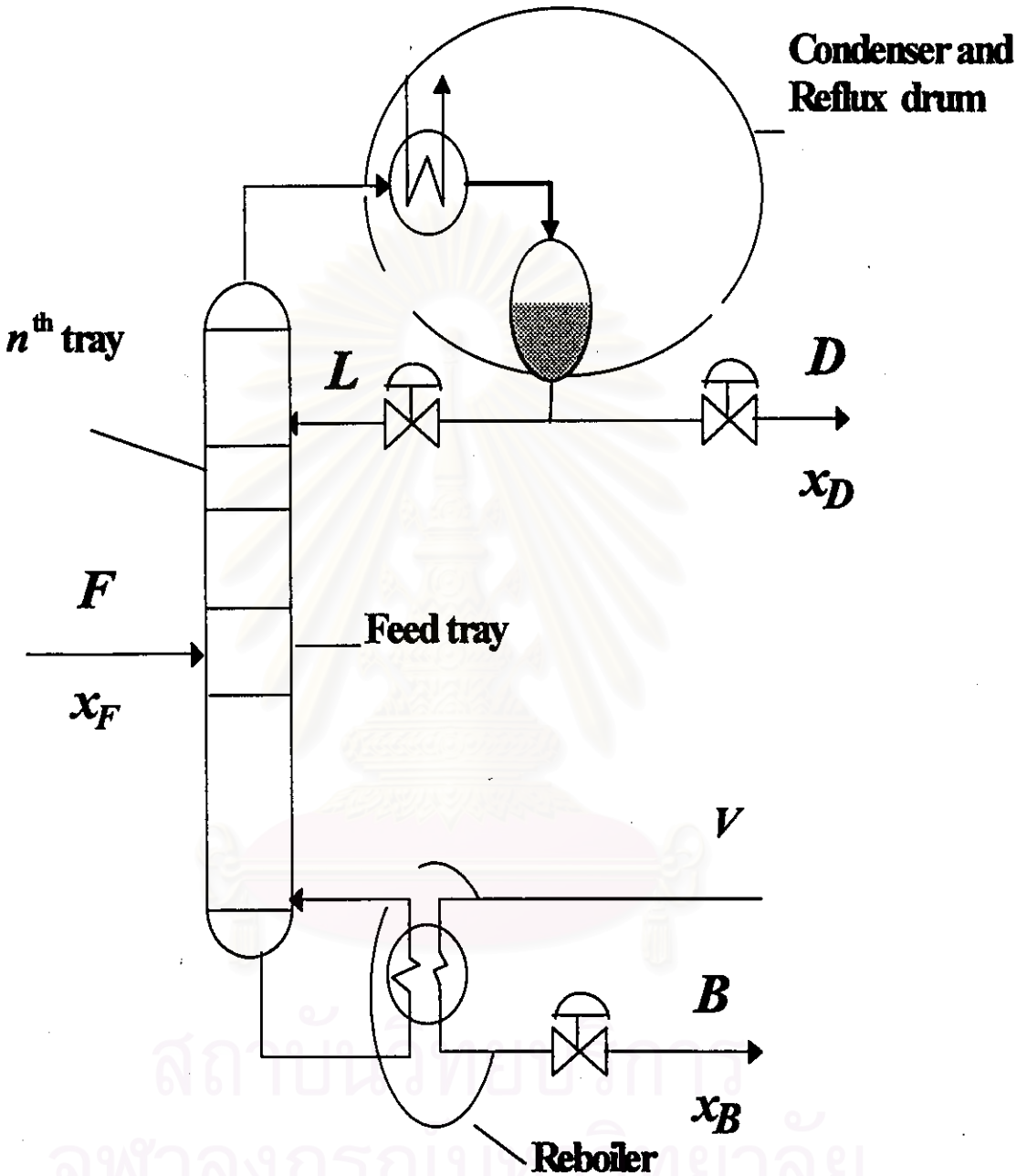
## 3.1 บทนำ

โครงสร้างหอกลั่นแบบง่าย ประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องควบแน่น (Condenser), ถังรีฟลักซ์ (Reflux drum), และหม้อต้มซ้ำ (Reboiler) เมื่อป้อนสารป้อน (Feed) เข้าทางเทรย์ป้อน (Feed tray) ของหอกลั่น สารป้อนจะไหลลงจากเทรย์ป้อนมายังเทรย์ด้านล่าง และจะได้รับพลังงานความร้อนจากหม้อต้มซ้ำที่มีไอร้อนไหลสวนทางขึ้นมา ทำให้สารผสมกลายเป็นไอ. ไอและของเหลวจะถ่ายเทความร้อน และถ่ายเทมวลสารกันบนเทรย์ สารระเหยง่ายในของเหลวจะระเหยออกมา ส่วนสารหนักในไอก็จะควบแน่นลงมาในชั้นของเหลว ซึ่งจะทำให้ไอบริสุทธิ์มากขึ้น ของเหลวจะไหลลงมายังด้านล่างของหอกลั่นแล้วไหลเข้าไปในหม้อต้มซ้ำ ภายในหม้อต้มซ้ำ ของเหลวจะได้รับความร้อนทำให้บางส่วนกลายเป็นไอกลับเข้าไปในหอกลั่น ของเหลวที่เหลือจะถูกนำออกจากหอกลั่นเป็นผลิตภัณฑ์ก้นหอ (Residue or Bottom) ซึ่งจะมีองค์ประกอบหลักเป็นสารหนักที่ระเหยยาก ตำแหน่งจากเทรย์ป้อนถึงหม้อต้มซ้ำ จะเป็นส่วนที่สารระเหยง่ายส่วนใหญ่ถูกไล่ออกจากของเหลว ของเหลวจะมีสารหนักมากขึ้นเรื่อยๆ ตามชั้นที่ไหลลงมา และมากที่สุดที่หม้อต้มซ้ำ

ตำแหน่งจากเทรย์ป้อนถึงหม้อต้มซ้ำ เรียกว่า ส่วนไล่สารระเหย (Stripping or exhausting section) ส่วนจากเหนือเทรย์ป้อนขึ้นไป สารหนักส่วนใหญ่จะถูกควบแน่นออกจากไอทำให้ไอบริสุทธิ์มากขึ้นเรื่อยๆ ส่วนนี้เรียกว่า ส่วนเพิ่มความเข้มข้น (Enriching or rectifying section) ไอทั้งหมดจะถูกควบแน่นเป็นของเหลวภายในเครื่องควบแน่นที่ยอดหอ ของเหลวบางส่วนจะนำกลับเข้าในหอกลั่น เรียกว่า รีฟลักซ์ (Reflux) ของเหลวที่เหลือถูกนำออกจากหอเรียกว่า ดิสทิลเลต (Distillate)

### 3.2 แบบจำลองเชิงพลวัตของหอกลั่น

แบบจำลองเชิงพลวัตของหอกลั่น สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการ อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการกลั่นมีความซับซ้อน อาจจะไม่สามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ได้อย่างสมบูรณ์ครบถ้วน ดังนั้น จึงต้องมีการตั้งสมมติฐานเพื่อกำหนดพฤติกรรมบางอย่างของกระบวนการกลั่น คือ แต่ละเทรย์ภายในหอกลั่นอยู่ในสถานะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ ของเหลวและไอที่อยู่บนเทรย์อยู่ในภาวะสมดุลซึ่งกันและกัน และไม่มีโฮลด์อัพของไอ แบบจำลองเชิงพลวัตของหอกลั่นสามารถแสดงได้ ดังนี้ (Deshpande, 1985)




รูปที่ 3.1 แบบจำลองเชิงพลวัตของหอกลั่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.1 เครื่องควบแน่น และ ถังรีฟลักซ์ (Condenser and reflux drum)

ไอที่เข้าเครื่องควบแน่นถือว่าเป็นไออิ่มตัวที่อุณหภูมิจุดเดือด และของเหลวอิ่มตัวออกจากเครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้น พลังงานความร้อนที่ถูกดึงออกจากกระบวนการควบแน่น จะเท่ากับพลังงานแฝงของการกลายเป็นไอของสาร และสมมติว่า ในถังรีฟลักซ์ไม่มีไอออกมาจากถัง ไม่มีความร้อนที่ เข้าและออกจากถังรีฟลักซ์

สมการดุลมวลสารรอบเครื่องควบแน่นและถังรีฟลักซ์ ในรูปที่ 3.1 เท่ากับ

$$\frac{dM_D}{dt} = V_{N_T} - L_{N_T+1} - D \qquad (1)$$

สมการดุลองค์ประกอบของสาร A เท่ากับ

$$\frac{dM_D x_{D,A}}{dt} = V_{N_T} y_{N_T,A} - L_{N_T+1}\, x_{N_T+1,A} - D x_{D,A} \qquad (2)$$

สมการดุลพลังงาน เท่ากับ

$$\frac{dM_D h_D}{dt} = V_{N_T} h_C - L_{N_T+1}\, h_D - D h_D + Q_C \qquad (3)$$

โดยที่ $M_D$ คือ โฮลด์- อัพของของเหลวในถังรีฟลักซ์

$V_{N_T}$ คือ อัตราการไหลของไอที่ออกจากชั้นบนสุดของหอกลั่น

$L_{N_T+1}$ คือ อัตราการไหลของของเหลวที่ไหลกลับเข้าหอกลั่น

$x_{D,A}$ คือ เศษส่วนโดยโมลของ A ในผลิตภัณฑ์ยอดหอ

$y_{N_T,A}$ คือ เศษส่วนโดยโมลของ A ในไอที่ออกจากชั้นบนสุดของหอกลั่น

$x_{N_T+1,A}$ คือ เศษส่วนโดยโมลของ A ในของเหลวที่ไหลกลับเข้าหอ

$h_C$ คือ เอนทาลปีของไอที่ออกจากชั้นบนสุดของหอกลั่น

$h_D$ คือ เอนทาลปีของของเหลวในถังรีฟลักซ์

$Q_C$ คือ ความร้อนที่ออกจากเครื่องควบแน่น

### 3.2.2 เทรย์ที่ *n*

สมการดุลมวลสารของสารรอบเทรย์ที่ *n* ในรูปที่ 3.1 เท่ากับ

$$\frac{dM_n}{dt} = L_{n+1} - L_n + V_{n-1} - V_n \tag{4}$$

สมการดุลมวลสารขององค์ประกอบที่ระเหยง่าย A เท่ากับ

$$\frac{d(M_n x_{n,A})}{dt} = L_{n+1}x_{n+1,A} - L_n x_{n,A} + V_{n-1}y_{n-1,A} - V_n y_{n,A} \tag{5}$$

สมการดุลพลังงาน เท่ากับ

$$\frac{d(M_n h_n)}{dt} = L_{n+1}h_{n+1} + V_{n-1}H_{n-1} - L_n h_n - V_n H_n \tag{6}$$

โดยที่ $M_n$ คือ โฮลด์อัพของของเหลวบนเทรย์ที่ *n*

$V_n$ คือ อัตราการไหลของไอที่ออกจากเทรย์ *n*

$L_n$ คือ อัตราการไหลของของเหลวที่ไหลออกจากเทรย์ที่ *n*

$x_n$ คือ เศษส่วนโดยโมลของ A ในเฟสของเหลวที่ไหลออกจากเทรย์ที่ *n*

$y_n$ คือ เศษส่วนโดยโมลของ A ในไอที่ออกจากเทรย์ที่ *n*

$h_n$ คือ เอนทาลปีของเหลวที่เทรย์ที่ *n*

$H_n$ คือ เอนทาลปีของไอที่เทรย์ที่ *n*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.3 เทรย์ป้อน (Feed tray)

จากสมการที่ (4) (5) และ (6) สามารถหาสมการที่เทรย์ป้อน ได้โดยการแทนเทรย์ที่ $n$ ด้วยเทรย์ป้อน $N_F$ โดยกำหนดให้ $F$ เป็นมวลของสารที่เข้าหอกลั่น

สมการดุลมวลสารรอบเทรย์ป้อน เท่ากับ

$$\frac{dM_{N_F}}{dt} = L_{N_F+1} - L_{N_F} + V_{N_F-1} - V_{N_F} + F \tag{7}$$

สมการดุลมวลสารขององค์ประกอบที่ระเหยง่าย $A$ เท่ากับ

$$\frac{d(M_{N_F}x_{N_F,A})}{dt} = L_{N_F+1}x_{N_F+1,A} - L_{N_F}x_{N_F,A} + V_{N_F-1}y_{N_F-1,A} - V_{N_F}y_{N_F,A} + Fx_{F,A} \tag{8}$$

สมการดุลพลังงาน เท่ากับ

$$\frac{d(M_{N_F}h_{N_F})}{dt} = L_{N_F+1}h_{N_F+1} + V_{N_F-1}H_{N_F-1} - L_{N_F}h_{N_F} - V_{N_F}H_{N_F} + Fh_F \tag{9}$$

### 3.2.4 หม้อต้มซ้ำ (Reboiler)

สมการดุลมวลสารรอบหม้อต้มซ้ำ ในรูปที่ 3.1 เท่ากับ

$$\frac{dM_B}{dt} = L_1 - V_B - B \tag{10}$$

สมการดุลองค์ประกอบของสาร A เท่ากับ

$$\frac{dM_Bx_{B,A}}{dt} = L_1x_{1,A} - V_By_{B,A} - Bx_{B,A} \tag{11}$$

สมการดุลพลังงาน เท่ากับ

$$\frac{dh_B M_B}{dt} = h_1 L_1 - H_B V_B - h_B B + Q_R \qquad (12)$$

$Q_R$ คือ อัตราการให้ความร้อนแก่หม้อต้มซ้ำ

### 3.2.5 ไฮดรอลิคส์ของเทรย์ (Tray hydrolics)

สมการที่ใช้แสดงไฮดรอลิคส์ของเทรย์ จะเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของเหลวท่วมฝายบนเทรย์ที่ $n$ กับอัตราที่ของเหลวไหลออกจากเทรย์ที่ $n$ (ได้จาก Francis Weir Formula) ความสัมพันธ์เป็น ดังนี้

$$h_{ow} = 750\left[\frac{L_n}{\rho_L \; l_w}\right]^{2/3} \qquad (13)$$

เมื่อ $l_w$ คือ ความยาวฝาย (Weir length) , เมตร (m)

$h_{ow}$ คือ ระดับของของเหลวที่ท่วมฝาย(Height above weir) , มิลลิเมตร (mm)

$L_n$ คือ อัตราที่ของเหลวไหลออกจากเทรย์ที่ $n$ , กิโลกรัมต่อวินาที (kg/s)

$\rho_L$ คือ ความหนาแน่นของของเหลว, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($kg/m^3$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.6 สมดุลระหว่างเฟส (Phase equilibrium)

จากกฎของราอูลท์ (Raoult) สำหรับสารอุดมคติ

$$p_{n,A} = P_{n,A} x_{n,A} \quad (14)$$

จากกฎของดาลตัน (Dalton) สำหรับก๊าซอุดมคติ

$$p_{n,A} = P_T y_{n,A} \quad (15)$$

จะได้ ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโดยโมลในชั้นไอกับเศษส่วนโดยโมลในชั้นของเหลวที่อยู่ในสถานะสมดุล ดังนี้

$$y_{n,A} = \frac{P_{n,A}}{P_T} x_{n,A} \quad (16)$$

$$y_{n,A} = K_{n,A}\, x_{n,A} \quad (17)$$

$$K_{n,A} = \frac{y_i}{x_i} = \frac{p_{n,A}/P_T}{p_{n,A}/P_i} = \frac{P_{n,A}}{P_T} \quad (18)$$

เมื่อ $p_{n,A}$ คือ ความดันย่อยในชั้นไอขององค์ประกอบ $A$ ที่เทรย์ที่ $n$

$P_{n,A}$ คือ ความดันไอของของเหลวบริสุทธิ์ $A$ ที่เทรย์ที่ $n$

$P_T$ คือ ความดันรวม

$K_{n,A}$ คือ อัตราส่วนสมดุลขององค์ประกอบ $A$ ที่เทรย์ที่ $n$

จาก สมการแอนโทอิน (Antoine)

$$ln\,(P_{v,i}) = A_i - \frac{B_i}{T + C_i} \tag{19}$$

$T$ คือ อุณหภูมิ

$A_i$, $B_i$, และ $C_i$ คือ ค่าคงที่จำเพาะของแต่ละสาร

### 3.2.7 เอนทาลปี (Enthalpy)

เอนทาลปีของเหลวและเอนทาลปีของไอ คำนวณจาก

$$h_i = \sum_{j=1}^{nc} x_{i,j}\, h_j^*(T_i) \tag{20}$$

$$H_i = \sum_{j=1}^{nc} y_{i,j}\, H_j^*(T_i) \tag{21}$$

$h_j^*$ เป็นโมลาร์เอนทาลปีของของเหลว และ $H_j^*$ เป็นโมลาร์เอนทาลปีของไอ คำนวณจาก

$$h_j^*(T) = a_j + b_j\, T + c_j\, T^2 \tag{22}$$

$$H_j^*(T) = A_j + B_j\, T + C_j\, T^2 \tag{23}$$

เมื่อ $a_j, b_j, c_j$ เป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการหาเอนทาลปีของของเหลว

$A_j, B_j, C_j$ เป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการหาเอนทาลปีของไอ

$T$ เป็นอุณหภูมิ