บทที่ 4
การอนุรักษ์พลังงานในระบบอื่นๆ
(ระบบการกลั่น การระเหย การควบแน่น และการอบแห้ง)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

ในกระบวนการผลิตทางวิศวกรรมเคมี อาหาร เครื่องดื่ม และยาหลายประเภท ต้องใช้กระบวนการในการแยกสารหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้นด้วยความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้หอกลั่น หม้อต้มระเหย และเครื่องควบแน่น ผู้ปฏิบัติงานต้องมีความสามารถเดินอุปกรณ์ให้ได้ผลผลิตตามคุณสมบัติที่ต้องการ แต่ในปัจจุบันนี้ การทำงานให้ได้ผลผลิตตามต้องการอย่างเดียวไม่เพียงพอ จำเป็นจะต้องจัดการกระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงการประหยัดพลังงานด้วย ผู้ปฏิบัติงานจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในหลักการทำงาน รู้จักการปรับปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเครื่อง รวมทั้งการนำความร้อนเหลือใช้จากส่วนต่างๆ ของหอกลั่นหรือหม้อต้มระเหยให้กลับมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

การอบแห้งและเครื่องอบแห้งมีความสำคัญในการลดความชื้นของวัตถุ ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่มชนิดผง ยา อุตสาหกรรมสีย้อม อุตสาหกรรมไม้ เป็นต้น การรู้จักชนิดของเครื่องอบแห้ง และการเลือกใช้ชนิดของเครื่องอบแห้งให้ตรงกับคุณสมบัติจำเพาะของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นเรื่องจำเป็น ขนาดของเครื่องอบ และเวลาที่ใช้ในการอบ จะส่งผลต่อปริมาณไฟฟ้า หรือปริมาณไอน้ำที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการ เมื่อโรงงานนำมาตรการอนุรักษ์พลังงานมาใช้ ผู้ปฏิบัติงานจึงจำเป็นต้องรู้พื้นฐานของการอบแห้ง และตู้อบแห้งเสียก่อน จึงจะสามารถนำมาตรการอนุรักษ์พลังงานมาใช้ให้ได้ประโยชน์สูงสุด

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. เพื่อให้เข้าใจหลักการอนุรักษ์พลังงานในระบบอื่นๆ ได้แก่ ระบบการกลั่นการระเหย และควบแน่น
2. เพื่อให้เข้าใจหลักการอนุรักษ์พลังงานในระบบการอบแห้ง

บทนำ (Introduction)

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการศึกษาถึงหลักการเบื้องต้นของหอกลั่น หม้อต้มระเหย และเครื่องควบแน่น โดยอาศัยหลักการของการดุลความร้อน และการถ่ายเทความร้อน รวมทั้งความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและการควบแน่น นอกจากนี้ยังอธิบายถึงวิธีการกลั่นของคู่ของผสมที่มีคุณสมบัติต่างกัน การใช้ประโยชน์จากการใช้อัตราส่วน Reflux ratio มาเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังอธิบายถึงหม้อต้มระเหยชนิดต่างๆ และการเลือกหม้อต้มให้ถูกกับการใช้งาน รวมทั้งการใช้เครื่องควบแน่นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ในระบบอบแห้งนั้นจะอธิบายหลักการเบื้องต้นของการอบแห้ง ลักษณะของการอบแห้งการคำนวณหาอัตราการอบแห้ง การอ่านกราฟที่อธิบายถึงช่วงของการอบแห้ง ตู้อบชนิดต่างๆ และมาตรการการอนุรักษ์พลังงานในการอบแห้ง

4.1 หลักการของการกลั่น

การกลั่น หมายถึง การแยกของเหลวผสมที่มีสารองค์ประกอบตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยใช้หลักการที่ว่าสารแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการระเหยเป็นไอได้ไม่เท่ากัน ณ อุณหภูมิและความดันเดียวกัน เมื่อให้ความร้อนจนของเหลวผสมกลายเป็นไอบางส่วน แล้วนำไอนั้นไปควบแน่นกลับให้เป็นของเหลว จะได้ของเหลวผสมหลังควบแน่นที่มีส่วนผสมแตกต่างจากของเหลวก่อนการกลั่น ด้วยเหตุนี้การกลั่นจึงสามารถใช้ในการทำให้ของเหลวมีความบริสุทธิ์ขึ้น หรือใช้แยกของเหลวผสมออกเป็นองค์ประกอบต่างๆ ได้

อนึ่ง สารองค์ประกอบในของเหลวผสมบางชนิดจะมีความสามารถในการระเหยได้ใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถแยกได้ด้วยการกลั่นธรรมดา ในกรณีนี้จะใช้วิธีพิเศษ ได้แก่ Extractive distillation หรือ azeotropic distillation เป็นต้น

หากไม่นับกรณีพิเศษแล้ว ส่วนใหญ่การกลั่นจะมีข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์มากกว่าวิธีอื่น จึงใช้กันอย่างแพร่หลายในการแยกสารพื้นฐานในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมเคมี

4.1.1 สมดุลของก๊าซและของเหลว

เมื่อให้ความร้อนแก่ของเหลวผสมโดยรักษาความดันให้คงที่ค่าหนึ่ง ส่วนผสมของไอระเหยที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเกิดสมดุลกับส่วนผสมของของเหลวในขณะนั้น ซึ่งจะสามารถหาความสัมพันธ์ทางกายภาพได้เรียกว่า สมดุลของก๊าซและของเหลวที่ความดันคงที่ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญที่สุดในการกลั่น

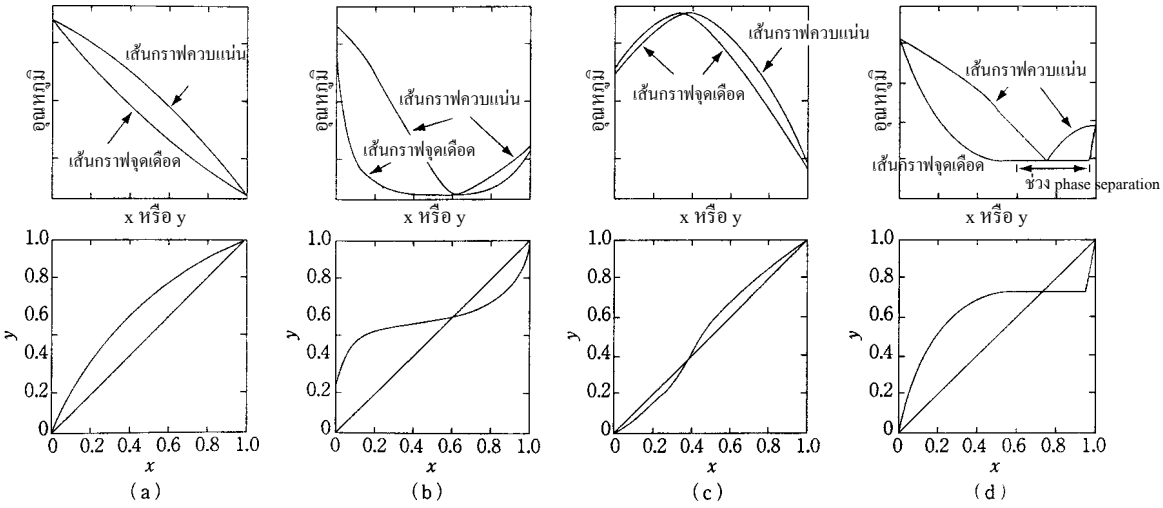
4.1.1.1 สมดุลของก๊าซ และของเหลวภายใต้ความดันคงที่ในระบบที่มีสารองค์ประกอบ 2 ชนิด

สมดุลของก๊าซ และของเหลวในระบบที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิดภายใต้ความดันคงที่ โดยทั่วไป จะแสดงด้วยเส้นกราฟจุดเดือด-เส้นกราฟควบแน่น โดยให้แกนนอนแสดงอัตราส่วนโดยโมลของสารองค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำกว่า และให้แกนตั้งแสดงอุณหภูมิ และสามารถปรับเป็นกราฟ x-y (x-y diagram) ได้ ในที่นี้ x = สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำกว่าในสถานะของเหลว และ y = สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำกว่าในสถานะก๊าซ

รูป 4.1 แสดงรูปแบบที่สำคัญของสมดุลของก๊าซ และของเหลวในระบบที่มีสารองค์ประกอบ 2 ชนิด โดย แบบ (a) เป็นสมดุลของก๊าซ และของเหลวของระบบทั่วไป

แบบ (b) และ (c) เป็นระบบที่ทำให้เกิด minimum azeotrope และ maximum azeotrope ตามลำดับ

แบบ (d) เป็นระบบที่ทำให้เกิด phase separation โดยในช่วงที่เส้นกราฟ x - y มีลักษณะเป็นเส้นระดับ จะเกิดสถานะก๊าซกับสถานะของเหลว 2 สถานะ



รูปที่ 4.1 รูปแบบของสมดุลของก๊าซและของเหลวในระบบที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิด

4.1.1.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของสมดุลของก๊าซและของเหลว

สมดุลของก๊าซ และของเหลวสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ 2 รูปแบบดังนี้

ก. ผลบวกของความดันไอ p_i ของแต่ละสารทุกสารจะเท่ากับความดันรวม π (กฎของ Dalton)

$$\pi = p_1 + p_2 + p_3 + \ldots = \sum p_i \qquad (4.1)$$

ข. ความดัน p_i ของไอระเหยสารองค์ประกอบ i จะเท่ากับผลคูณระหว่างความดันไอขององค์ประกอบบริสุทธิ์ P°_i กับสัดส่วนโดยโมลของเหลว x_i (กฎของ Raoult)

สารละลายที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เป็นจริง เรียกว่า สารละลายอุดมคติ

$$p_1 = x_1 P^\circ_1, \quad p_2 = x_2 P^\circ_2, \quad p_3 = x_3 P^\circ_3, \quad \ldots, \quad p_i = x_i P^\circ_i \qquad (4.2)$$

โดยในที่นี้ $\sum x_i = 1$ (4.3)

นอกจากนี้จะสามารถคำนวณสัดส่วนโดยโมลของไอระเหย, y_i ได้ดังนี้

$$y_i = \frac{p_i}{\pi} \qquad (4.4)$$

เมื่อนำสูตร (4.4) แทนค่าลงในสูตร (4.2) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมไอระเหยกับส่วนผสมของเหลวในสภาพสมดุล

$$y_i \pi = x_i P^\circ_i \qquad (4.5)$$

เนื่องจากความดันไอของสารบริสุทธิ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ หากทราบอุณหภูมิและ x_i แล้วจะสามารถคำนวณ y_i ได้ แต่เนื่องจากการกลั่น เราจะพิจารณาความสามารถในการระเหยเป็นไอของสารองค์ประกอบทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกัน ถ้าให้สารองค์ประกอบตัวที่มีจุดเดือดต่ำกว่า เป็น i และให้สารองค์ประกอบที่มีจุดเดือดสูงกว่าเป็น j จากสมการ (4.5) จะนิยามค่า relative volatility α_{ij} ได้ว่า อัตราส่วนระหว่างสัดส่วนโมลไอต่อของเหสวของสาร i กับสัดส่วนโมลไอต่อของเหลวของสาร j ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\alpha_{ij} = (y_i / x_i)/(y_j / x_j) = \frac{P^\circ_i}{P^\circ_j} \quad (4.6)$$

โดยค่า Relative volatility เป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิ แต่ถ้าการกลั่นเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิแคบๆ เรามักจะประมาณค่าให้ง่ายขึ้นโดยถือว่า α_{ij} มีค่าคงที่ แล้วนำมาใช้คำนวณการกลั่น สิ่งที่สำคัญเป็นพิเศษในการกลั่น ได้แก่ จุดเดือดและจุดควบแน่น จุดเดือดหมายถึงอุณหภูมิที่ของเหลวผสมได้รับความร้อนและระเหยกลายเป็นไอ จนไอระเหยอิ่มตัวสมดุลกับของเหลวผสมนั้น ภายใต้ความดันค่าหนึ่ง และผลบวกของส่วนผสมไอระเหยจะเท่ากับ 1 ดังนั้น จึงสามารถแสดงได้ด้วยสมการ (4.7) ดังนี้

$$1 = \sum y_i = \frac{\sum x_i P^\circ_i}{\pi} \quad (4.7)$$

กล่าวคือ จุดเดือดของส่วนผสมของเหลวใดๆ จะสอดคล้องกับสมการ (4.7) และจะหาค่าส่วนผสมไอระเหยได้อีกด้วย ในทางกลับกัน จุดควบแน่นหมายถึงอุณหภูมิที่ไออิ่มตัวถูกดึงความร้อนออก และควบแน่นกลายเป็นของเหลว จนของเหลวอิ่มตัวสมดุลกับส่วนผสมไอระเหยภายใต้ความดันค่าหนึ่ง ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$1 = \sum x_i = \frac{\sum y_i \pi}{P^\circ_i} \quad (4.8)$$

ในระบบสององค์ประกอบ เราจะมีเฉพาะสาร i และ สาร j เราจึงสามารถเขียนสมการ 4.7 และ 4.8 ใหม่ได้ดังนี้

$$y_j = 1 - y_i \qquad x_j = 1 - x_i \quad (4.9)$$

เมื่อเอาสมการ 4.9 มาแทนค่าในสมการ 4.6 เพื่อหาค่า Relative volatility จะสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่าง α_{ij}, x_i และ y_i ได้ดังนี้

$$y_i = \frac{\alpha_{i,j} x_i}{1 + (\alpha_{i,j} - 1)x_i} \quad (4.10)$$

ในระบบที่กฎของ Raoult ไม่เป็นจริง กล่าวคือ ในกรณีของสารละลายจริง จะต้องชดเชยสมการ (4.5) ด้วย activity coefficient, γ ซึ่งจะสามารถเขียนได้ตามสมการ 4.11

$$p_i = y_i \pi = x_i \gamma_i P^\circ_i \quad (4.11)$$

ดังนั้น หากทราบค่า Activity coefficient แม้จะเป็นของเหลวไม่อุดมคติ ก็สามารถหาความสัมพันธ์สมดุลของก๊าซ และของเหลวได้

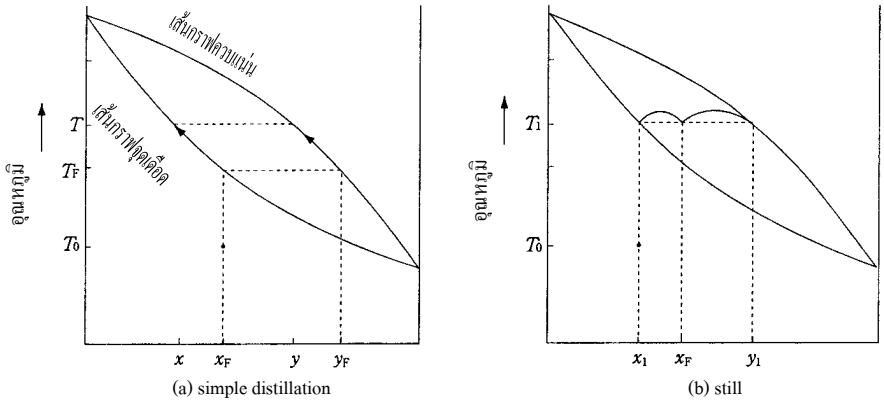
4.1.2 ประเภทของการกลั่น

4.1.2.1 การกลั่นในขั้นตอนเดียว Simple or batch distillation

y จะมีความสัมพันธ์ดังรูป 4.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลของก๊าซและของเหลวกับการกลั่นในขั้นตอนเดียว เมื่อนำของเหลวผสมที่มีสัดส่วนโดยโมลของสารองค์ประกอบที่ระเหยง่าย = x_F และมีอุณหภูมิ T_0 ใส่ในหม้อต้ม แล้วให้ความร้อน จนได้อุณหภูมิ T_F ของเหลวจะเดือด เกิดเป็นไอระเหยที่มีส่วนผสมขององค์ประกอบจุดเดือดต่ำปริมาณมากกว่าส่วนผสมตั้งต้น (ส่วนผสมไอระเหยเท่ากับ y_F) ถ้าให้ความร้อนต่อไป ส่วนผสมของเหลวจะเปลี่ยนไปในทิศทางอุณหภูมิสูงขึ้นตามเส้นกราฟจุดเดือดกลายเป็น T ซึ่งส่วนผสมของก๊าซ และของเหลวในขณะนั้นจะเท่ากับ x บนเส้นกราฟจุดเดือดและ y บนเส้นกราฟควบแน่น

ตามลำดับ ดังนั้น ด้วยผลรวมทั้งหมดของปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าไป (หรือดึงออกมา) จะทำให้ปริมาณของเหลวที่เหลือ ส่วนผสมของเหลว และส่วนผสมไอระเหยมีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ จากการดุลมวลปริมาณของเหลวที่เหลืออยู่ L ณ เวลาใดๆ (จากปริมาณตั้งต้น L_0) กับส่วนผสมของเหลว x และส่วนผสมไอระเหย กันดังต่อไปนี้

$$d(Lx) = y\,dL \qquad (4.12)$$



รูปที่ 4.2 การกลั่น Simple distillation กับ still

เมื่อจัดรูปและอินทิเกรตสมการ (4.12) แล้ว จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเหลวที่เหลืออยู่ L_1 กับส่วนผสมของเหลว x_1 ณ เวลาใดๆ ดังต่อไปนี้

$$\ln\left(\frac{L_1}{L_0}\right) = \ln(1-\beta) = \int_{X_F}^{X_1}\left[\frac{1}{y-x}\right]dx \qquad (4.13)$$

ทั้งนี้ β เป็นอัตราการกลั่น (= 1 –(L_1 / L_0)) อนึ่ง สมการ (8.13) เรียกว่า สมการ Rayleigh

เทอมทางขวามือสามารถแก้ได้ด้วยวิธีหาพื้นที่ใต้กราฟที่เขียนระหว่าง x กับ 1/(y-x) เมื่อเราทราบค่า y และ x ในบางกรณีเราอาจใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง y และ x มาใช้ ตามสมการ 4.10 ทำให้สามารถเขียนสมการ 4.13 ได้ใหม่ ดังนี้ (Coulson et al, Chemical engineering, vol.2, 1999, p437)

$$\ln\frac{L}{L_0} = \frac{1}{\alpha_{i,j}-1}\ln\left[\frac{x_1(1-x_F)}{X_F(1-x_1)}\right] + \ln\frac{1-x_F}{1-x_1} \qquad (4.14)$$

เนื่องจากการกลั่น Simple distillation เป็นกระบวนการขั้นเดียว จึงไม่สามารถแยกสารได้ดีนัก ปัจจุบันไม่ค่อยใช้กันในระดับใหญ่ๆ แต่ยังพบได้ในการทำ pot still ในการกลั่นวิสกี้ เป็นต้น

4.1.2.2 การกลั่นแบบต่อเนื่อง Continuous distillation (flash distillation)

เมื่อป้อนของเหลวผสมที่มีส่วนผสมของสารองค์ประกอบจุดเดือดต่ำเท่ากับ x_F ภายใต้ความดันค่าหนึ่งด้วยอัตรา F [kmol/s] แล้วให้ความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม Q [W] แล้ว จะสามารถแยกให้มีส่วนผสมของเหลว x_1 อัตราการไหล L_1 [mol/s] ออกจากส่วนผสมไอระเหย y_1 อัตราไหล V_1 [kmol/s]

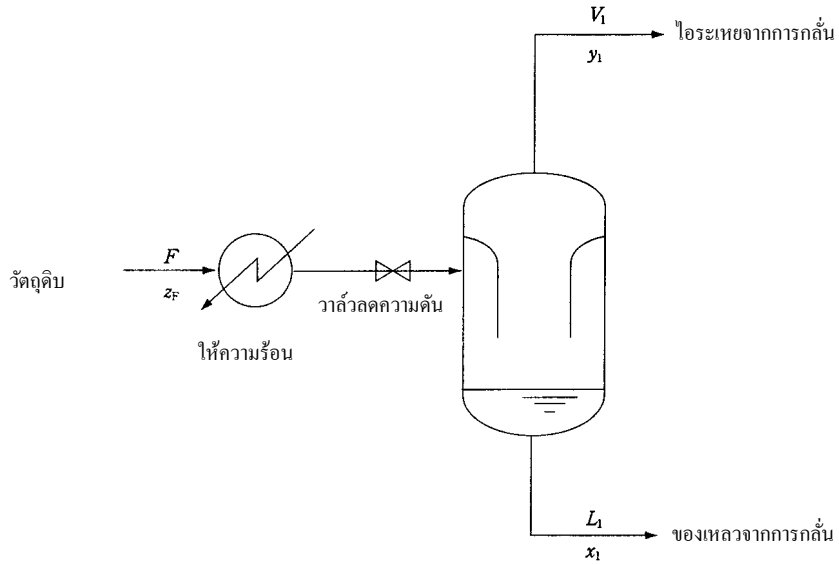
ได้ ในที่นี้ x_1 และ y_1 จะเกือบสมดุลกันอยู่ ในกรณีนี้ เนื่องจากมีการป้อนของเหลวผสมอย่างต่อเนื่อง จึงเกิดสภาวะคงที่ (steady state) เราสามารถเขียนสมการดุลมวลได้ดังนี้

$$F = L_1 + V_1 \tag{4.15}$$

$$F x_F = L_1 x_1 + V_1 y_1 \tag{4.16}$$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Continuous distillation เป็นกระบวนการขั้นเดียวเหมือนการกลั่นแบบ simple distillation แต่มีการเดินเครื่องอย่างคงที่และต่อเนื่อง จึงทำให้ไม่สามารถแยกสารได้ดีนัก

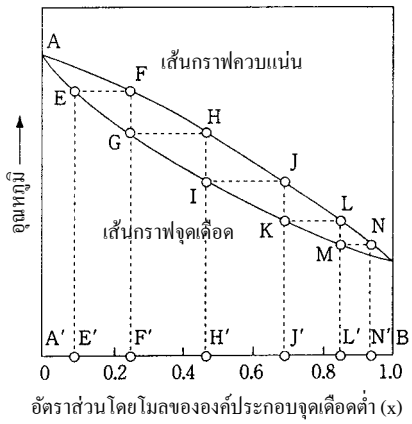
แต่ในทางปฏิบัติจริง จะมีการป้อนของเหลวผสมภายใต้ความดันสูง และอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดในความดันบรรยากาศ ของเหลวทั้งหมดจะอยู่ในสถานะของเหลว เมื่อป้อนเข้าหอกลั่น จะลดความดันลงจนเท่ากับความดันบรรยากาศ ไอของสารผสมจะระเหยแยกออกจากของเหลวไปทันที ดังรูป 4.3 จึงเรียกกระบวนการนี้ว่า flash distillation



รูปที่ 4.3 การกลั่น Continuous distillation

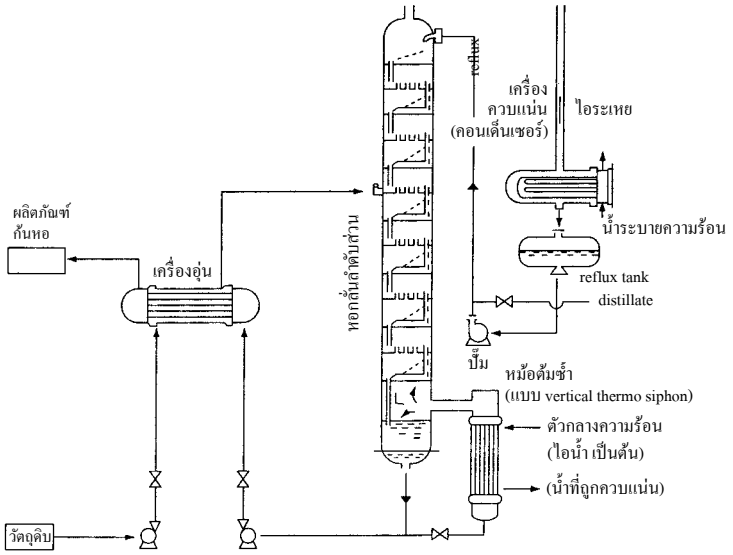
4.1.2.3 การกลั่นลำดับส่วน

การกลั่น flash distillation ขั้นเดียว กล่าวคือการแยกสารด้วยสมดุลเพียง 1 ครั้ง ไม่สามารถแยกสารที่มีค่า relative volatility ใกล้เคียงกันมากให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ ตัวอย่างเช่น ในรูป 4.4 การกลั่นขั้นเดียวจะทำให้สารละลายเข้มข้นขึ้นจาก E ⟶ G เท่านั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลิตภัณฑ์เข้มข้น G นี้ไปกลั่นอีกครั้งที่อุณหภูมิต่างกันออกไป และควบแน่นไอระเหย H จะทำให้เข้มข้นขึ้นจาก G ⟶ I เมื่อทำการกลั่นขั้นเดียวซ้ำหลายๆ ครั้งเช่นนี้ สารที่กลั่นได้จะค่อยๆ มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น แต่สารที่ต้องการจะได้ออกมาทีละน้อยมากๆ และของเหลวจากการกลั่นจะออกมาในทุกขั้นตอน จึงไม่เหมาะจะใช้ในทางปฏิบัติ



รูปที่ 4.4 กราฟสมดุลของก๊าซและของเหลวในระบบที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิด

หากใช้วิธีดังรูปที่ 4.5 โดยในหอ vapor-liquid contact plate tower หลายชั้น นำ distillate ส่วนหนึ่งป้อนกลับไปที่ยอดหอ ให้ความร้อนจากก้นหอให้ไอระเหยที่เกิดขึ้นสวนทางไปสัมผัสกับ distillate แล้วจะได้องค์ประกอบจุดเดือดต่ำ และองค์ประกอบจุดเดือดสูงที่ยอดหอ และก้นหอตามลำดับ การนำ distillate ส่วนหนึ่งป้อนกลับไปที่ยอดหอ เรียกว่าการ reflux และวิธีการ reflux พร้อมๆ กับกลั่นซ้ำเพื่อแยกให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น เรียกว่าการกลั่นลำดับส่วน ในทางปฏิบัติจะไม่มีการกลั่นใดที่ไม่มีการ reflux ดังนั้นโดยมากในทางปฏิบัติมักจะใช้คำว่าการกลั่นกับการกลั่นลำดับส่วนในความหมายเดียวกัน



รูปที่ 4.5 หอ Vapor-liquid contact plate tower

4.1.3 หลักการของการกลั่นลำดับส่วน

ในหอกลั่นลำดับส่วนต่อเนื่องในรูป 4.6 จะป้อนสารละลายผสมที่มีส่วนผสมองค์ประกอบจุดเดือดต่ำเท่ากับ x_F ด้วยอัตรา F [kmol/s] เกิดเป็น distillate ด้วยอัตรา D [kmol/s] และ bottom product ที่มีส่วนผสม x_W ด้วยอัตรา W [kmol/s] นอกจากนี้ ยังนำของเหลวที่ควบแน่นที่เครื่องควบแน่นส่วนหนึ่ง มาทำ reflux กลับไปที่ยอดหอด้วยอัตรา L_R [kmol/s]

เมื่อคำนวณสมดุลมวลทั้งหมดในหอกลั่นลำดับส่วนแล้ว จะได้ว่า

$$F = D + W \tag{4.17}$$

สำหรับการดุลสารองค์ประกอบจุดเดือดต่ำจะได้ว่า

$$Fx_F = Dx_D + Wx_W \tag{4.18}$$

องค์ประกอบจุดเดือดต่ำจะออกมาจากยอดหอ ตั้งแต่ชั้นที่อยู่เหนือชั้นที่ป้อนวัตถุดิบเข้าไป องค์ประกอบจุดเดือดต่ำจะมีความเข้มข้นมากขึ้น จึงเรียกว่า Enriching section ส่วนชั้นที่ต่ำกว่าชั้นที่ป้อนวัตถุดิบเข้าไป จะมีการนำองค์ประกอบจุดเดือดต่ำกลับคืนมา จึงเรียกว่า stripping section

ถ้าหอกลั่นลำดับส่วนไม่ได้รับความร้อน และความเย็นจากผนังหอเลย ของเหลวบนชั้นจะเกิดการเดือดด้วยความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอระเหยจากชั้นล่าง เกิดเป็นไอระเหยขึ้นมาอีก ถ้าสมมติว่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่อโมล [J/kmol] ขององค์ประกอบทั้งสองมีค่าเท่ากัน อัตราการเกิดไอระเหย V [kmol/s] ของแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้น อัตราไหลของของเหลวลงชั้นล่าง L [kmol/s] จึงมีค่าเท่ากันด้วย ในทางปฏิบัติสารที่จะกลั่นลำดับส่วนเป็นสารที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกัน การประมาณว่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่อโมลมีค่าเท่ากันจึงสามารถทำได้

$$V = L + D \tag{4.19}$$

$$Vy_{n+1} = Lx_n + Dx_D \tag{4.20}$$

นอกจากนี้ ที่ยอดหอ $V_1 = L_R + D$ และ $L_R = L$

ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของเหลวบนชั้นใดๆ x_n กับส่วนผสมไอระเหยที่เข้ามาจากด้านล่างของชั้นนั้น y_{n+1} จะแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$y_{n+1} = \frac{L}{L+D}x_n + \frac{D}{L+D}x_D \tag{4.21}$$

ถ้านำ reflux ratio R = L / D แทนค่าเข้าไปในสมการ (4.21) แล้วจะได้สมการ (4.22) โดยสมการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของเหลวกับส่วนผสมไอระเหยที่ชั้นล่างถัดมาใน enriching section เรียกว่า enriching section operating line หรือ enriching line

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1}x_n + \frac{1}{R+1}x_D \tag{4.22}$$

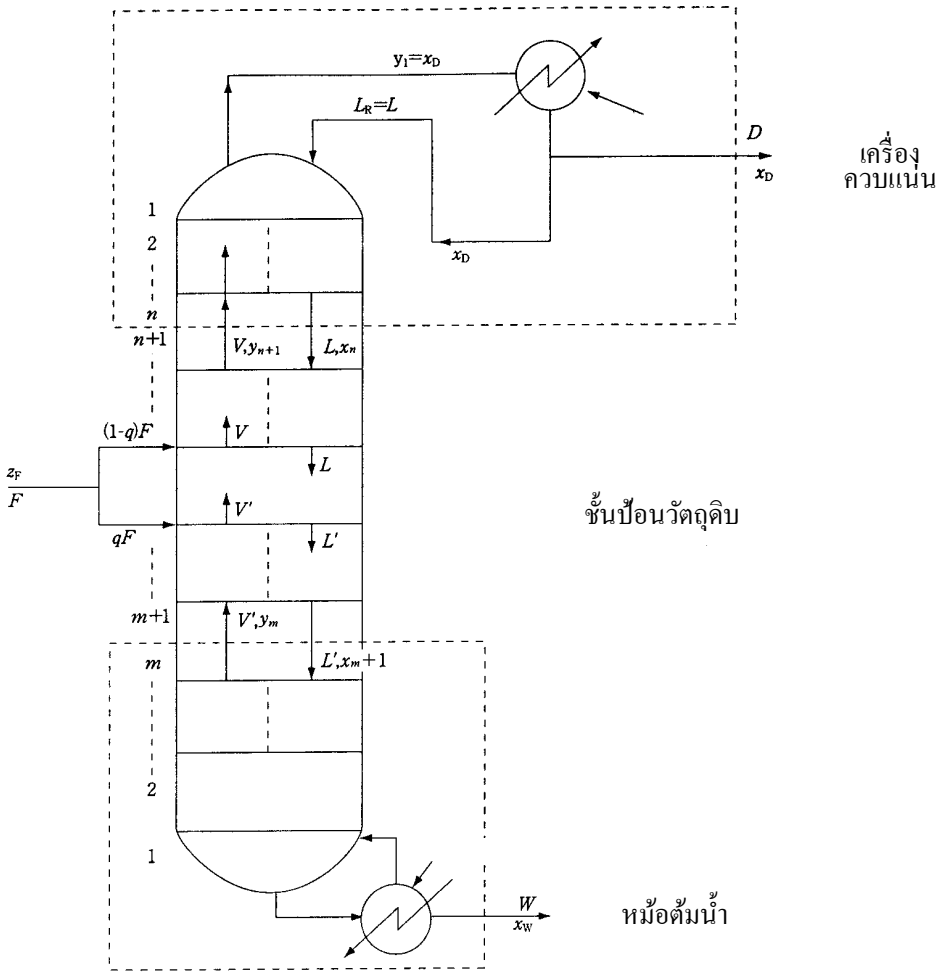
สำหรับ Stripping section ก็สามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน โดยปริมาณไอระเหยที่เกิดขึ้นเท่ากับ V′ [kmol/s] และปริมาณของเหลวที่ไหลลง L′ [kmol/s] จะสามารถประมาณได้ว่ามีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับระดับชั้น ดังนั้น เมื่อคำนวณสมดุลมวลในกรอบเส้นประ จะได้ว่า

$$V' = L' + W \tag{4.23}$$

$$V'y_m = L'x_{m+1} - Wx_w \tag{4.24}$$

ส่วนวัตถุดิบจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิบนชั้นป้อนวัตถุดิบ หากวัตถุดิบ 1 mol ถูกป้อนเป็นของเหลว q mol และป้อนเป็นไอระเหย 1 - q mol แล้ว บนชั้นป้อนวัตถุดิบจะมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$L' = L + qF \tag{4.25}$$



รูปที่ 4.6 อธิบายสัญลักษณ์ในการคำนวณจำนวนขั้นตามทฤษฎีของหอกลั่นลำดับส่วน

$$V' = V - (1 - q) F \qquad (4.26)$$

จึงได้สมการแสดง Stripping section operating line หรือที่เรียกว่า stripping line ดังต่อไปนี้

$$y_m = \frac{R + q\frac{F}{D}}{R + 1 - (1-q)\frac{F}{D}} x_{m+1} - \frac{\frac{F}{D} - 1}{R + 1 - (1-q)\frac{F}{D}} x_W \qquad (4.27)$$

นอกจากนี้ ถ้าให้ส่วนผสมของเหลวในวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปเท่ากับ x ให้ส่วนผสมไอระเหยเท่ากับ y แล้ว

$$qx + (1 - q)\, y = x_F \qquad (4.28)$$

สมการนี้เรียกว่า q Line หรือสายป้อน

4.1.3.1 การวิเคราะห์กราฟโดยวิธี McCabe-Thiele

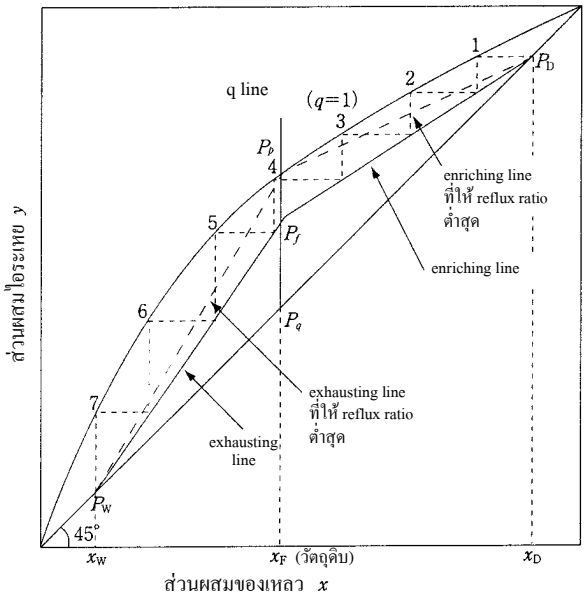
วิธีกำหนดจำนวนขั้นตามทฤษฎีด้วยการวิเคราะห์กราฟ McCabe-Thiele จะเริ่มจากการวาดกราฟ x-y แสดงสมดุลของก๊าซ และของเหลวก่อน จากนั้นจะวาดเส้นทแยงมุม y = x และ operating line ทั้งสองเส้น ในที่นี้ enriching line จะเป็นเส้นตรงที่ลากผ่านจุด P_D บนเส้นทแยงมุมด้วยความชัน R / (R + 1) และ stripping line จะเป็นเส้นตรงที่ลากผ่านจุด P_W บนเส้นทแยงมุมด้วยความชัน [R + q (F / D)] / [R

+ 1 – (1 – q) (F / D)] โดย enriching line กับ stripping line จะตัดกันบน q line จุด P_D และจุด P_W แสดงถึงสัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบที่ระเหยง่ายในด้านผลิตภัณฑ์ยอดหอ และผลิตภัณฑ์ก้นหอตามลำดับ

เมื่อลากส่วนของเส้นตรงจากจุด P_D ที่ยอดหอไปขนานกับแกน x จนชนเส้นสมดุล แล้วลากลงมาตั้งฉากกับแกน x จนชนเส้น enriching line จะได้เป็นขั้นบันได เมื่อทำไปเรื่อยๆ จะได้จำนวนขั้นออกมา (รูป 4.7) ค่าที่หาได้ตามข้างต้นเรียกว่า จำนวนขั้น S ซึ่งจะเท่ากับจำนวนขั้นตามทฤษฎี N บวกด้วยชั้นสมดุลอีก 1 ขั้นซึ่งหมายถึง reboiler กล่าวคือ

$$S = N + 1 \qquad (4.29)$$

(จำนวนขั้นตามทฤษฎี 6 + Reboiler)



รูปที่ 4.7 กราฟ McCabe-Thiele

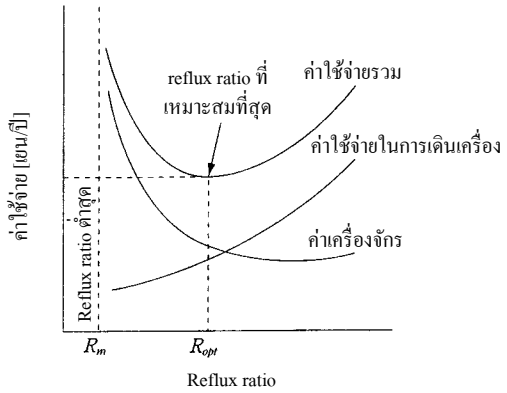
4.1.3.2 จำนวนขั้นตามทฤษฎีกับ Reflux ratio

จำนวนขั้นตามทฤษฎี : การดุลสารในแต่ละขั้น ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าในแต่ละชั้น ก๊าซและของเหลวได้สัมผัสกันอย่างเพียงพอ และเกิดสมดุล จำนวนขั้นที่ต้องใช้ในการกลั่นลำดับส่วนให้ได้ความบริสุทธิ์ที่ต้องการตามสมมติฐานนี้ เรียกว่า จำนวนขั้นตามทฤษฎี ในทางปฏิบัติอาจไม่เกิดสมดุลของก๊าซ และของเหลว หรืออาจมีเหตุผลอื่นๆ ที่ทำให้ต้องใช้จำนวนขั้นมากกว่าจำนวนขั้นตามทฤษฎี

จำนวนขั้นต่ำสุดตามทฤษฎี : ยิ่ง reflux ratio, R มีค่ามากเท่าใด การกลั่นลำดับส่วนจะยิ่งมีประสิทธิผลสูงและแยกสารได้ดีเท่านั้น ดังนั้น กรณีที่นำของเหลวทั้งหมดจากยอดหอในเครื่องควบแน่นไปทำ reflux หรือที่เรียกว่า total reflux จะทำให้แยกสารได้บริสุทธิ์ที่สุด จำนวนขั้นที่ต้องใช้ในการนี้ เรียกว่า จำนวนขั้นต่ำสุดตามทฤษฎี

ค่า Reflux ratio ต่ำสุด: ในทางกลับกัน หาก R มีค่าน้อย จำนวนขั้นตามทฤษฎีที่ต้องใช้จะมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อ R น้อยกว่าค่าต่ำสุดค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะเพิ่มจำนวนขั้นอีกเท่าใดก็ตาม จะไม่สามารถแยกสารให้มีความบริสุทธิ์ตามที่ต้องการได้ ค่าต่ำสุดนี้เรียกว่า ค่า reflux ratio ต่ำสุด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นกราฟสมดุลของก๊าซ และของเหลว ส่วนผสมของวัตถุดิบ และอัตราการแยกสาร

ความสัมพันธ์ระหว่าง reflux ratio กับจำนวนขั้น :เมื่อเพิ่ม reflux ratio จำนวนขั้นตามทฤษฎีจะลดลง แต่อัตราไหลของไอระเหยในหอจะเพิ่มขึ้น รวมทั้งภาระความร้อนของเครื่องควบแน่น และ boiler จะเพิ่มขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองค่าสาธารณูปโภคเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกัน หาก reflux ratio เข้าใกล้ค่า reflux ratio ต่ำสุด อัตราไหลของไอระเหยในหอจะลดลง เส้นผ่านศูนย์กลางของหอจะเล็กลง ทำให้สิ้นเปลืองค่าสาธารณูปโภคลดลง แต่จำนวนขั้นที่ต้องใช้จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเครื่องจักรสูงขึ้น ดังนั้น reflux ratio จึงมีค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ ซึ่งจะหาได้จากค่าเครื่องจักร และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง (รูป 4.8)



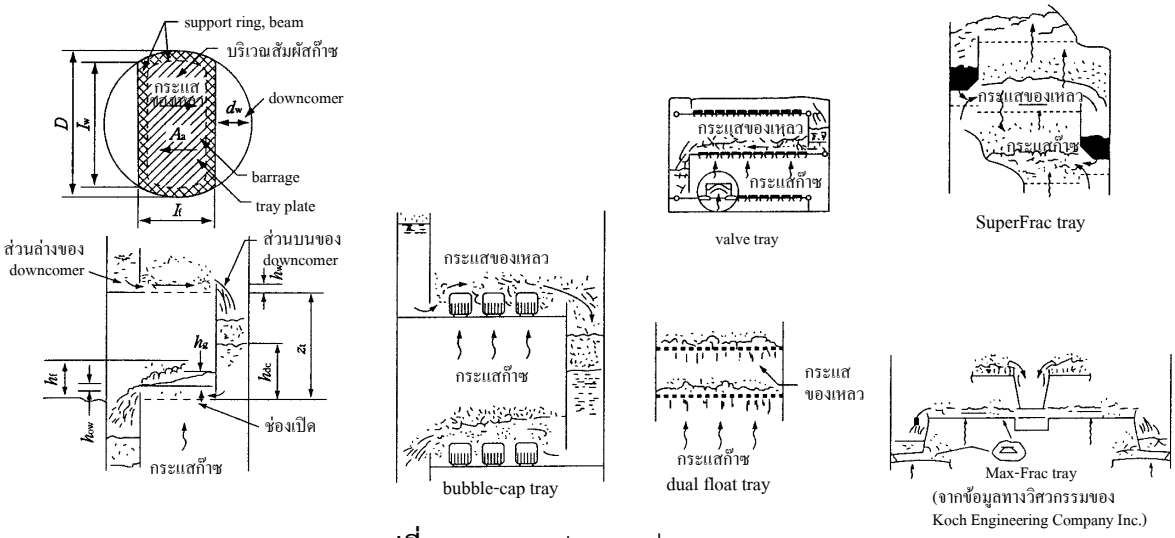
รูปที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายกับค่า Reflux ratio ที่เหมาะสมที่สุด

4.1.3.3 เครื่องกลั่นลำดับส่วน

เครื่องกลั่นลำดับส่วนประกอบด้วยหอกลั่นลำดับส่วน เครื่องควบแน่น เครื่อง reboiler ฯลฯ ดังรูป 4.5

หอกลั่นลำดับส่วนมีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ คือหอกลั่นที่มีชั้นวางเป็นขั้นๆ และหอกลั่นที่บรรจุวัสดุที่เรียกว่า Packing ไว้เต็มหอ หอกลั่นทั้งสองจะมีบริเวณแลกเปลี่ยนมวลสาร และความร้อนเช่นเดียวกัน เรียกว่า Internal

Internal: บริเวณที่ก๊าซ และของเหลวสัมผัสกันจริงๆ เรียกว่า Internal ซึ่งจะใช้ Tray หรือ Packing แต่สำหรับเครื่องกลั่นที่ใช้ในอุตสาหกรรม จะต้องคำนึงถึงการยึด และประกอบ Internal ในทางกายภาพ รวมทั้งความสะดวกในการซ่อมบำรุงด้วย ทั้ง tray และ packing มีใช้กันหลายประเภท แต่ระยะหลังนี้มีความสนใจที่จะนำ structured packing มาใช้กับหอกลั่นขนาดใหญ่



รูปที่ 4.9 Tray ประเภทต่างๆ

โครงสร้างของ Tray: tray แบ่งตามทิศทางกระแสของก๊าซ และของเหลวบนชั้น

ออกเป็น Cross flow tray กับ counter flow tray ตัวอย่างของแบบแรกได้แก่ bubble-cap tray, sieve tray, valve tray ซึ่งใช้กันมานานแล้ว รวมทั้ง SuperFrac tray และ Max-Frac tray ที่พัฒนาขึ้นมาระยะหลังนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสัมผัสที่บริเวณใกล้ๆ กับ downcomer อีกด้วย ตัวอย่างของแบบหลัง ได้แก่ dual float tray ซึ่งไม่มี downcomer เป็นต้น รูป 4.9 แสดงโครงสร้างของ tray ที่สำคัญตาราง 4.1 จะเปรียบเทียบหอกลั่นแบบ tray กับหอกลั่นแบบ packing

ตารางที่ 4.1 หอกลั่นแบบ Tray กับหอกลั่นแบบ packing

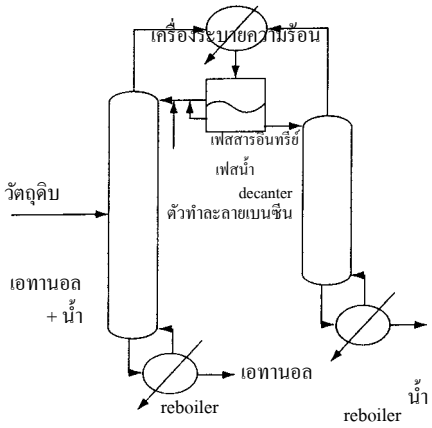
เงื่อนไข	tray						packing	
	sieve	bubble-cap	valve	dual flow	SuperFrac	Max-Frac	random	structured
เส้นผ่านศูนย์กลางหอ < 800 mm	○	△	○	○	○	○	◎	◎
เส้นผ่านศูนย์กลางหอ > 800 mm	◎	◎	◎	○	◎	◎	○	◎
ระบบความดันสูง (ระบบ L/V สูง)	◎	○	◎	◎	◎	◎	△	×
ระบบความดันต่ำ (ระบบ L/V ต่ำ)	○	△	○	○	○	○	○	◎
turndown	○	◎	◎	△	◎	◎	○	○
ความดันสูญเสีย	○	△	○	○	○	○	◎	◎
ประสิทธิภาพของการสัมผัส	○	○	○	△	○	○	○	◎
ความสกปรกและ slurry	△	△	△	○	△	△	×	×
อิสระในการเลือกใช้วัสดุ	○	○	○	○	○	○	◎	◎
ค่าใช้จ่ายต่อความสูงหอ	◎	○	○	◎	○	○	△	△
ความสะดวกในการซ่อมบำรุง	○	×	○	◎	○	○	○	○
ผลกระทบของการกัดกร่อน	○	○		◎	△	△	○	○
entrainment	○	×	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ) ◎ : ดีมาก ○ : ดี △ : ใช้ได้ × : ใช้ไม่ได้

4.1.4 ประเภทของระบบกลั่นนอกเหนือจากการกลั่นตามปกติ

4.1.4.1 การกลั่น Azeotropic distillation

กรณีที่ของเหลวผสมที่ต้องการแยกมี Azeotropic point หรือมีคู่สารที่มี relative volatility ใกล้เคียงกับ 1 จะไม่สามารถแยกสารให้บริสุทธิ์ได้โดยใช้หอกลั่นเพียงหอเดียว ดังนั้น จึงใช้วิธีเติม Entrainer ซึ่งเป็นองค์ประกอบตัวที่ 3 ที่มีสมบัติระเหยง่าย และสามารถทำให้เกิด azeotropic mixture กับองค์ประกอบทั้งสองตัวหรือตัวใดตัวหนึ่ง นำไปกลั่น

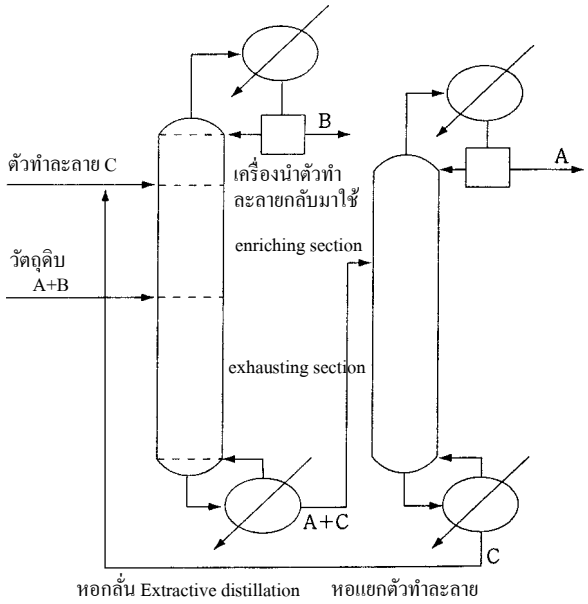


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างระบบกลั่น Azeotropic distillation (โดยใช้ decanter)

ซึ่งจะได้ Azeotropic mixture จากยอดหอกลั่น และได้สารที่เกือบจะบริสุทธิ์จากก้นหอกลั่น โดย entrainer ที่มีอยู่ใน azeotropic mixture ที่ได้จากยอดหอกลั่นสามารถนำไปใช้ใหม่ได้ด้วยวิธีการที่เหมาะสม รูป 4.10 แสดงตัวอย่างการกลั่น azeotropic distillation ที่ใช้เบนซีนเป็น entrainer ในการแยกเอทานอลกับน้ำ

4.1.4.2 การกลั่น Extractive distillation

การกลั่น Extractive distillation จะใช้วิธีเดียวกับ Azeotropic distillation กล่าวคือใช้องค์ประกอบตัวที่ 3 (ตัวทำละลาย) ในการทำให้สมดุลของก๊าซ และของเหลวเปลี่ยนแปลงไปเพื่อแยกของผสม กรณีของ azeotropic distillation องค์ประกอบตัวที่ 3 จะทำให้เกิด Azeotrope กับองค์ประกอบตัวใดตัวหนึ่งในของผสม แต่ในกรณีของExtractive distillation จะเติมองค์ประกอบที่ 3 หรือสาร C (ตัวทำละลาย) ที่มีจุดเดือดสูงกว่าองค์ประกอบของของผสม รวมทั้งมี Chemical affinity กับองค์ประกอบตัวใดตัวหนึ่ง (A) ในองค์ประกอบทั้งสองนั้นสูงมาก เพื่อลดการระเหยขององค์ประกอบตัวใดตัวหนึ่ง แล้วจึงนำไปกลั่น องค์ประกอบ B จะได้ออกมาจากยอดหอ ของเหลวผสมระหว่างองค์ประกอบ A และ C จะได้ออกมาจากก้นหอ แล้วนำของเหลวจากก้นหอไปกลั่นหรือใช้วิธีอื่นในการแยกองค์ประกอบ A ออกจากตัวทำละลาย การกลั่น Extractive distillation โดยทั่วไปจะมีความสิ้นเปลืองความร้อนน้อยกว่า azeotropic distillation และสามารถแยกองค์ประกอบที่ 3 ออกมาได้ง่ายกว่า (รูป 4.11)



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างระบบกลั่น Extractive distillation

4.1.4.3 การกลั่นโดยใช้ไอน้ำ Steam distillation

เมื่อนำของเหลวที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิดซึ่งไม่ละลายซึ่งกัน และกันมากวนไปเรื่อยๆ องค์ประกอบแต่ละตัวจะมีความดันไอเท่ากับเมื่อมีองค์ประกอบนั้นอยู่เดี่ยวๆ ความดันไอรวมจะเท่ากับผลบวกของความดันไอของทั้งสอง กรณีที่ความดันไอรวมเท่ากับความดันบรรยากาศ องค์ประกอบแต่ละตัวจะเดือดที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเดือดภายใต้ความดันบรรยากาศ วิธีกลั่นที่อาศัยหลักการนี้ด้วยการพ่นไอน้ำเข้าไปในของเหลวผสมที่ไม่ละลายน้ำเพื่อให้ความร้อน ซึ่งจะได้องค์ประกอบที่ระเหยง่ายในวัตถุดิบออกมาพร้อมกับน้ำ

เรียกว่า การกลั่น steam distillation โดย distillate จะแบ่งเป็นชั้นของน้ำกับชั้นขององค์ประกอบที่ต้องการ จึงสามารถแยกสารทั้งสองออกจากกันได้โดยง่าย

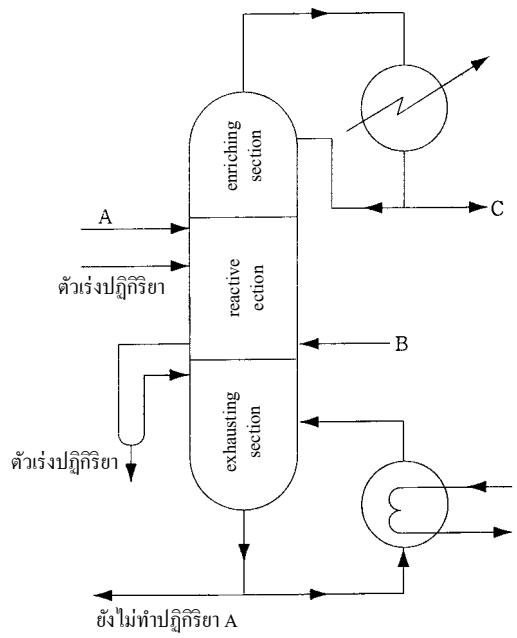
การกลั่น Steam distillation เหมาะจะใช้กลั่นในกรณีที่ต้องการแยกสารที่มีความดันไอต่ำมาก ซึ่งในการกลั่นธรรมดาต้องใช้อุณหภูมิสูงมากหรือต้องใช้สุญญากาศสูงมากจึงจะทำให้ระเหยออกมาได้ ออกจากสารที่ระเหยยาก หรือกรณีที่ต้องการกำจัดสารเจือปนที่มีความดันต่ำออกจากสารที่ต้องการซึ่งระเหยยาก วิธีนี้ใช้กันมากในอุตสาหกรรม

4.1.4.4 การกลั่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ vacuum distillation

สารบางชนิดที่อยู่ในของเหลวผสม หากให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงจะสลายตัวหรือทำปฏิกิริยา ในกรณีเช่นนี้ จะใช้การกลั่น Vacuum distillation กล่าวคือ ทำการกลั่นของเหลวผสมภายใต้สภาวะลดความดัน จะทำให้สารนั้นระเหย และเดือดที่อุณหภูมิต่ำได้ โดยทั่วไปเมื่อลดความดันจะทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเพิ่มความดันเทียบกับความดันที่เปลี่ยนไปเท่ากัน อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์นี้หมายความว่าหากเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันเพียงเล็กน้อย จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกสารอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องมีมาตรการลดความดันสูญเสียที่แต่ละชั้นของหอกลั่นและในท่อให้น้อยลง

4.1.4.5 การกลั่นที่มีปฏิกิริยาร่วม reactive distillation

การกลั่น Reactive distillation เป็นการแยกด้วยการกลั่นในกระบวนการกลั่น พร้อมๆ กับให้ทำปฏิกิริยาเคมีไปด้วย โดยทั่วไปเมื่อได้ผลิตภัณฑ์ และผลพลอยได้จากวัตถุดิบในกระบวนการทำปฏิกิริยาแล้ว จึงจะนำมาแยกผลิตภัณฑ์ และผลพลอยได้ออกจากกันในกระบวนการกลั่น แต่ในการกลั่น reactive distillation นี้จะป้อนวัตถุดิบเข้าไปที่ชั้นที่เหมาะสมของหอกลั่น แล้วแยกสารที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา A ผลพลอยได้ และผลิตภัณฑ์ออกจากกัน โดยแต่ละตัวจะออกมาจากแต่ละส่วนของหอกลั่น รูป 4.12 แสดงรูปแบบพื้นฐานของการทำงาน



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างระบบกลั่น Reactive distillation

4.2 การอนุรักษ์พลังงานของหอกลั่น

4.2.1 เทคโนโลยีที่เป็นปัจจัยในการอนุรักษ์พลังงาน

หอกลั่นเป็นวิธีแยกสารที่ต้องใช้ความร้อนค่อนข้างมาก โดยทั่วไปกล่าวกันว่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมาก อย่างไรก็ตาม ยังมีการใช้หอกลั่นกันอย่างแพร่หลายในการแยกสาร เนื่องจากความสะดวกในการออกแบบและเดินเครื่อง รวมทั้งความยืดหยุ่นต่อเงื่อนไขการเดินเครื่องที่อาจเปลี่ยนแปลงไป

เทคโนโลยีที่เป็นปัจจัยในการอนุรักษ์พลังงานของหอกลั่นแสดงไว้ในตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 เทคโนโลยีที่เป็นปัจจัยในการอนุรักษ์พลังงานของหอกลั่น

1. การปรับปรุง operating line
1) กำหนด reflux ratio ให้เหมาะสมที่สุด
2) กำหนดชั้นป้อนวัตถุดิบและอุณหภูมิให้เหมาะสมที่สุด
3) มีระบบ intercooler / inter-reboiler
4) ระบบหลายหอกลั่น
2. การปรับปรุงสมดุลของก๊าซและของเหลว
1) กำหนดความดันเดินเครื่องให้เหมาะสมที่สุด
2) การกลั่น extractive distillation การกลั่น azeotropic distillation การกลั่น salt distillation
3. การอนุรักษ์พลังงานด้วยการนำความร้อนกลับมาใช้ในกระบวนการ
1) ติดตั้งระบบแลกแปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมที่สุด
2) pump around
3) นำไปใช้งานหลายๆ อย่าง
4) ปั๊มความร้อน
4. การใช้ร่วมกับระบบอื่น
1) กำเนิดไอน้ำ
2) นำแรงขับเคลื่อนกลับมาใช้ด้วย Rankine cycle
3) นำความเย็นกลับมาใช้ด้วยการทำความเย็นแบบดูดกลืน

4.2.2 การกำหนด reflux ratio ให้เหมาะสมที่สุด

กรณีที่จะติดตั้งหอกลั่นเครื่องใหม่ หลังจากที่กำหนดความดันเดินเครื่องแล้ว จะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขั้นตามทฤษฎีกับ Reflux ratio แล้วเลือกใช้จำนวนขั้นตามทฤษฎีที่จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของ reflux ratio มีผลต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด

กรณีของหอกลั่นที่มีอยู่แล้ว หากลด Reflux ratio ลง ทั้งปริมาณความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ใน reboiler ที่ก้นหอจะลดลง และปริมาณความร้อนที่ต้องระบายความร้อนเครื่องควบแน่นที่ยอดหอยังลดลงอีกด้วย จึงสามารถลดค่าสาธารณูปโภคได้

วิธีลด Reflux ratio ได้แก่ (1) เพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างก๊าซ และของเหลว (2) กำหนดจำนวนขั้นป้อนวัตถุดิบ และอุณหภูมิให้เหมาะสมที่สุด (3) ใช้ระบบควบคุมขั้นสูงที่เหมาะสมที่สุด

(1) การปรับปรุงประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว

ด้วยการวิเคราะห์ทำความเข้าใจการเคลื่อนไหวของก๊าซ และของเหลวในแต่ละชั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างก๊าซ และของเหลว กรณีที่ช่องว่างของ Cap หรือขนาดของรูไม่เหมาะสมกับการไหลของไอระเหย จะทำให้ก๊าซ และของเหลวสัมผัสกันได้ไม่ดี ดังนั้น สิ่งที่สำคัญคือต้องกำจัด scale ที่ชั้นและบำรุงรักษาโครงสร้างเชิงกลให้อยู่ในสภาพที่ออกแบบไว้อยู่เสมอ

นอกจากนี้ ระยะหลังนี้ยังมีการพัฒนารูปแบบของ Tray และ packing ที่มีประสิทธิภาพสูง ด้วยการเลือกใช้รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดกับการแยกสารที่ต้องการ หากสามารถเพิ่มประสิทธิของหอกลั่นได้จะสามารถลด reflux ratio ลงได้ ทำให้ลดความร้อนที่ต้องใช้ในหม้อต้มซ้ำได้

(2) กำหนดจำนวนชั้นป้อนวัตถุดิบและอุณหภูมิให้เหมาะสมที่สุด

วัตถุดิบจะต้องป้อนเข้าไปที่ชั้นที่เหมาะสมกับส่วนผสม เพื่อไม่ให้จำนวนขั้นกลายเป็นความสูญเปล่า เนื่องจากบ่อยครั้งที่วัตถุดิบมักจะไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงต้องใช้ Process simulator เพื่อตรวจสอบว่าชั้นที่ป้อนวัตถุดิบนั้นเหมาะสมที่สุดหรือไม่ ด้วยการเปลี่ยนชั้นที่ป้อนวัตถุดิบให้เป็นชั้นที่เหมาะสมที่สุด จะทำให้มีจำนวนขั้น effective มากขึ้นในทางปฏิบัติ จึงสามารถลด reflux ratio ลงได้

นอกจากนี้ในระบบกลั่นยังมักจะมีการนำความร้อนกลับมาใช้ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุดิบกับผลิตภัณฑ์ที่ก้นหอกลั่น อย่างไรก็ตาม ในการนำความร้อนกลับมาใช้จะต้องพิจารณาอุณหภูมิที่ป้อนวัตถุดิบโดยคำนึงถึงกระบวนการทั้งกระบวนการด้วย

(3) ใช้ระบบควบคุมขั้นสูง

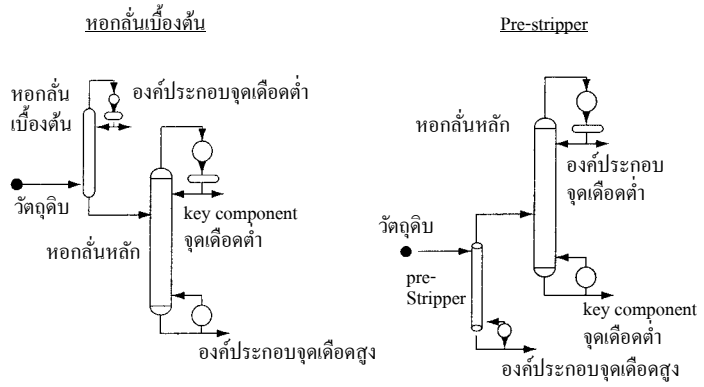
โดยมากหอกลั่นจะเดินเครื่องด้วย reflux ratio สูงกว่าที่คำนวณไว้เล็กน้อย เพื่อเป็นการประกันว่าส่วนผสมของของเหลวที่ยอดหอกลั่นหรือของเหลวที่ก้นหอกลั่นยังได้ความบริสุทธิ์ตามต้องการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการเดินเครื่อง หากทำการควบคุมการเดินเครื่องด้วยระบบควบคุมขั้นสูง เช่น multi-variable predictive control ฯลฯ แล้ว จะสามารถเดินเครื่องที่จุดใกล้ๆ กับขีดจำกัดของส่วนผสมที่ต้องการได้ บางครั้งจะสามารถลดความร้อนที่ต้องใช้ในหม้อต้มซ้ำได้

4.2.3 การติดตั้งระบบ Inter-reboiler / intercooler

การพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละจุดในหอกลั่น ว่าสามารถใช้พลังงานความร้อนคุณภาพต่ำได้หรือไม่ก็เป็นสิ่งที่สำคัญ นอกจากเครื่องควบแน่นที่ยอดหอ และหม้อต้มซ้ำที่ก้นหอแล้ว หากติดตั้ง Inter-reboiler หรือ intercooler ที่ตรงกลางหอกลั่นแล้ว บางกรณีจะทำให้สามารถให้ความร้อนโดยใช้แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำ หรือนำความร้อนจากสายผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ได้

4.2.4 ระบบหอกลั่นหลายหอ

วิธีติดตั้งหอกลั่นเบื้องต้นร่วมกับหอกลั่นเสริมมีพื้นฐานแนวคิดว่าการปรับปรุงการแยกสารซึ่งเดิมใช้หอกลั่นเพียง 1 ตัว โดยติดตั้งหอกลั่นเบื้องต้นเข้าไปเพื่อทำการแยกหยาบก่อน แล้วนำวัตถุดิบที่ผ่านหอกลั่นเบื้องต้นป้อนให้หอกลั่นหลัก เพื่อลดภาระในการแยกของหอกลั่นหลัก รูป 4.13 แสดงหอกลั่นเบื้องต้นซึ่งทำงานโดยแยกองค์ประกอบจุดเดือดต่ำออกจากยอดหอก่อน ส่วน Pre-stripper จะทำงานโดยแยกองค์ประกอบจุดเดือดสูงออกมาจากก้นหอก่อน



รูปที่ 4.13 วิธีติดตั้งหอกลั่นเบื้องต้น

การกำหนดลำดับการแยกสารในระบบที่มีองค์ประกอบหลายตัวให้เหมาะสมที่สุด : การกำหนดลำดับการแยกสารจะมีความสัมพันธ์กับต้นทุนเครื่องจักรและต้นทุนการเดินเครื่องอย่างมาก จึงต้องกำหนดลำดับที่เหมาะสมที่สุดโดยคำนึงถึงสมบัติของสาร ปริมาณที่ต้องแยก ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น หลักจากประสบการณ์ที่ใช้ในการกำหนดลำดับมีดังต่อไปนี้

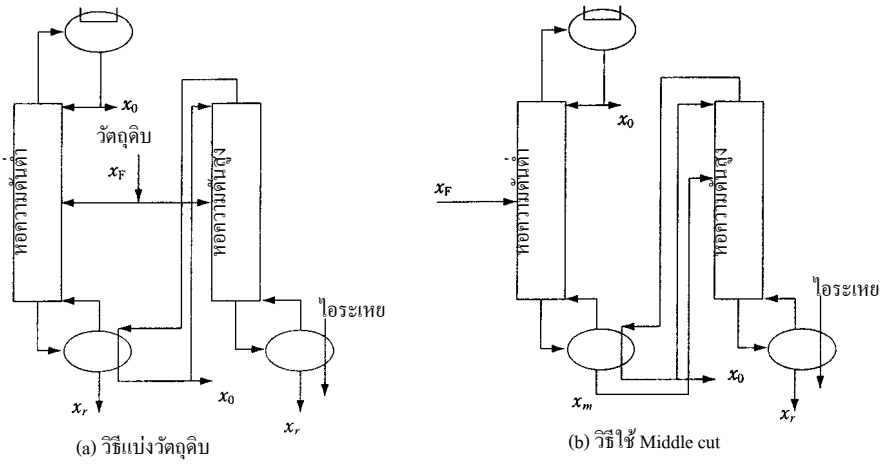
(a) แยกองค์ประกอบที่ระเหยง่ายสามารถแยกออกได้ง่ายๆ ก่อนองค์ประกอบที่แยกได้ยากเอาไว้ทีหลัง

(b) แยกองค์ประกอบที่มีอยู่มากในวัตถุดิบออกมาก่อน

(c) ทำให้มีจำนวนหอกลั่นน้อยที่สุด

4.2.5 ระบบ Multiple-effect

กรณีที่สามารถแยกสารได้โดยใช้หอกลั่นเพียง 1 ตัว วิธีนี้จะแยกหอกลั่นจาก 1 ตัวเป็น 2 ตัว แล้วเปลี่ยนความดันในหอกลั่นแต่ละตัว นำความร้อนที่ระบายจากหอความดันสูงป้อนให้ reboiler ของหอความดันต่ำ เพื่อใช้แหล่งความร้อนอย่างมีประสิทธิผล มีวิธีทำหลายแบบเช่นที่แสดงรูป 4.14



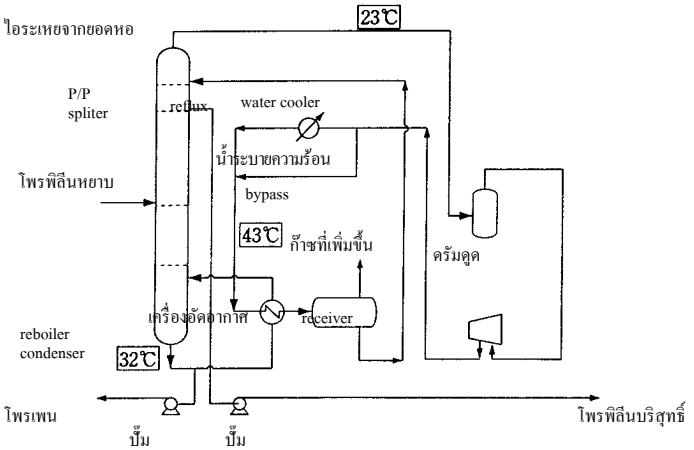
รูปที่ 4.14 ระบบ Multiple effects

4.2.6 การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้

วิธีนี้เป็นการนำ (1) ความร้อนที่มีอยู่ในไอระเหยที่ยอดหอกลั่น หรือ (2) ความร้อนที่มีอยู่ในของเหลวผลิตภัณฑ์มาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิผล

ข้อ (1) เป็นการใช้ประโยชน์จากความร้อนแฝงของการควบแน่นที่มีอยู่ในไอระเหยที่ยอดหอกลั่น เนื่องจากหอกลั่นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมาก หากนำความร้อนแฝงของการควบแน่นนี้ทิ้งไปในน้ำระบายความร้อนจะเป็นการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ การนำความร้อนทิ้งนี้กลับมาใช้งานมีหลายวิธี วิธีที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ การแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอระเหยจากยอดหอเพื่อใช้กำเนิดไอน้ำหรือใช้อุ่นสารอื่นๆ

นอกจากนี้ ยังมีวิธีใช้เครื่องอัดอากาศอัดไอระเหยที่ยอดหอกลั่นให้มีอุณหภูมิสูง แล้วติดตั้งปั๊มความร้อนซึ่งใช้เครื่อง reboiler เป็นแหล่งความร้อน รูป 4.15 เป็นตัวอย่างในกรณีที่นำปั๊มความร้อนแบบอัดไอไปใช้กับหอกลั่นแยกโพรพิลีนกับโพรเพน ปั๊มความร้อนนี้จะอัดไอระเหยที่ยอดหออุณหภูมิ 23°C ให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 43°C แล้วนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนของ reboiler อุณหภูมิ 32°C



รูปที่ 4.15 ยูนิตกลั่นโพรพิลีน (P/P spliter) ที่ติดตั้งปั๊มความร้อนด้วย

ส่วนข้อ (2) มีวิธีการนำความร้อนที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มาใช้ประโยชน์อย่างหนึ่ง ได้แก่ การนำไปอุ่นของไหลในกระบวนการผลิต อุณหภูมิที่ป้อนวัตถุดิบโดยมากจะมีค่าไม่เกินจุดเดือด เมื่อป้อนด้วยอุณหภูมิไม่เกินจุดเดือด เครื่อง Reboiler จะมีภาระความร้อนสูงขึ้น นอกจากนั้นของไหลผลิตภัณฑ์เมื่อนำไปเก็บในถังหรืออื่นๆ มักจะต้องทำให้เย็นด้วย ตัวอย่างเช่น หากนำความร้อนนี้ไปใช้ในการอุ่นของไหลที่ป้อนเข้าไปเป็นวัตถุดิบ ทำให้ของไหลที่ป้อนเข้าไปเป็นวัตถุดิบมีอุณหภูมิเข้าใกล้จุดเดือด (กล่าวอย่างเที่ยงตรงแล้วคือ อุณหภูมิของชั้นที่ป้อน) แล้วจะสามารถลดภาระของ reboiler ได้

4.3 ระบบการระเหย หลักการของการระเหยและการควบแน่น

ในอุตสาหกรรมเคมี มักจะมีการให้ความร้อนหรือลดความดันสารละลายที่ได้จากการทำปฏิกิริยาหรือจากการกลั่น เพื่อแยกสารที่ระเหยยากซึ่งละลายอยู่ออกจากตัวทำละลาย เครื่องระเหยมีหน้าที่นำตัวทำละลายกลับมาใช้ หรือเพื่อให้ได้ตัวถูกละลายในลักษณะของแข็งหรือของเหลวเข้มข้น เครื่องนี้ทำงานโดยการระเหยตัวทำละลายออกไป การระเหยตัวทำละลายเท่ากับเป็นการเพิ่มความเข้มข้นให้กับตัวถูกละลายในตัวทำละลาย ดังนั้น การระเหยจึงมีการทำงานเหมือนกับการเคี่ยว

การระเหยที่สำคัญในอุตสาหกรรม ได้แก่ การระเหยน้ำที่เป็นตัวทำละลาย เพื่อทำสารละลายเจือจางของเกลือแกง ซูโครส น้ำผลไม้ กรดกำมะถัน ฯลฯ ในน้ำให้เข้มข้นขึ้น บางครั้งยังทำให้เข้มข้นจนตัวถูกละลายตกผลึกอีกด้วย

การระเหยแบ่งเป็นการระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด และการระเหยที่จุดเดือด ซึ่งจะเลือกใช้ให้เหมาะกับเงื่อนไข เช่น เงื่อนไขข้อจำกัดของสารละลาย ประสิทธิภาพในการเดินเครื่อง เป็นต้น วิธีการให้ความร้อนส่วนใหญ่จะใช้วิธีให้ความร้อนทางอ้อมผ่านผนังถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก แต่บางครั้งก็ใช้วิธีนำแหล่งความร้อนใส่ไปในสารละลายโดยตรง

แหล่งให้ความร้อนจะใช้ไอน้ำกันมาก เนื่องจากมีข้อดีหลายประการคือ ไม่เพียงแต่จะจัดหาได้ง่ายเท่านั้น แต่ความร้อนแฝงของการควบแน่นยังมีค่าสูง สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สะดวกด้วยการควบคุมความดัน มีอุณหภูมิคงที่ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อควบแน่นยังมีค่าสูงอีกด้วย

4.3.1 การถ่ายเทความร้อนในการระเหย

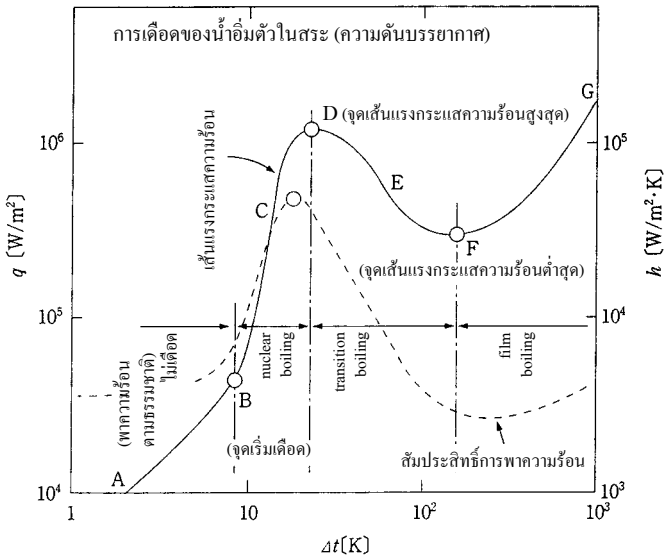
ความสามารถในการระเหยของเครื่องระเหย จะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ให้เข้าไปในสารละลายผ่านพื้นผิวให้ความร้อน ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในเครื่องระเหย q [W] สามารถแสดงได้ด้วยสมการข้างล่าง

$$q = UA\Delta T \qquad (4.30)$$

ในที่นี้ U เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [W/(m^2·K)], A เป็นพื้นที่ถ่ายเทความร้อน [m^2], ΔT เป็นผลต่างอุณหภูมิระหว่างสารละลายกับตัวกลางความร้อน

วิธีให้ความร้อนในการระเหย เกือบทุกกรณีจะใช้วิธีให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่ไหลอยู่ในท่อซึ่งจมอยู่ในของเหลว อุณหภูมิของไอน้ำสำหรับให้ความร้อนสามารถประมาณค่าได้ว่ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัว ส่วนอุณหภูมิของของเหลวที่ต้องการทำให้เข้มข้นถ้าของเหลวนั้นไม่เข้มข้นมาก จะประมาณให้อุณหภูมิเดือดเท่ากับอุณหภูมิควบแน่นของไอระเหยที่ความดันเดินเครื่องภายในหม้อระเหย แต่ในทางปฏิบัติ เมื่อของเหลวเข้มข้นขึ้น อุณหภูมิจุดเดือดจะสูงขึ้นกว่าเดิม จึงต้องชดเชยผลกระทบของจุดเดือดที่สูงขึ้นเนื่องจากการมีตัวถูกละลายละลายอยู่ และสภาพการผสมของสารละลาย ฯลฯ ด้วยข้อมูลที่หาได้จากการทดลองของคนอื่นๆ

เมื่อ ΔT มีค่าเพิ่มขึ้น ไม่จำเป็นว่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะเพิ่มขึ้นเสมอไป ขณะที่สารละลายมีอุณหภูมิไม่เกินจุดเดือด จะเกิดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ เมื่อสารละลายมีอุณหภูมิตั้งแต่จุดเดือดขึ้นไป ฟองก๊าซที่ลอยขึ้นมาจะไปกวนผิวหน้าถ่ายเทความร้อนให้ปั่นป่วน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หาก ΔT มีค่าเพิ่มขึ้นไปอีก ฟองก๊าซจะรวมตัวกันทำให้มีไอระเหยคลุมอยู่ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงมีค่าต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพ้นปรากฏการณ์เปลี่ยนผ่านนี้ไปแล้ว สุดท้ายแล้วจะกลายเป็น film boiling ซึ่งจะมีชั้นของไอระเหยคลุมอยู่บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าต่ำมาก การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 เส้นกราฟการเดือด (เส้นทึบ : เส้นแรงกระแสความร้อน q เส้นประ: สัมประสิทธิ์การนำความร้อน h)

4.3.2 อุณหภูมิของจุดเดือดสูงขึ้นเมื่อสารละลายเข้มข้นขึ้น

การที่จุดเดือดมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Boiling point raise) เกิดขึ้นจากในสารละลายมีตัวถูกละลายละลายอยู่หรือเกิดจากความดันสถิตของสารละลาย

4.3.2.1 จุดเดือดมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากมีตัวถูกละลายละลายอยู่

สารละลายที่ประกอบด้วยตัวทำละลาย และตัวถูกละลาย จะมีความดันไอต่ำกว่าตัวทำละลายบริสุทธิ์ สารละลายจึงเดือดที่อุณหภูมิสูงกว่าตัวทำละลายบริสุทธิ์ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของสารละลายกับอุณหภูมิของตัวทำละลายบริสุทธิ์ที่มีความดันเท่ากัน ก็คือ การที่จุดเดือดมีอุณหภูมิสูงขึ้นนั่นเอง

(1) กฎของ Raoult

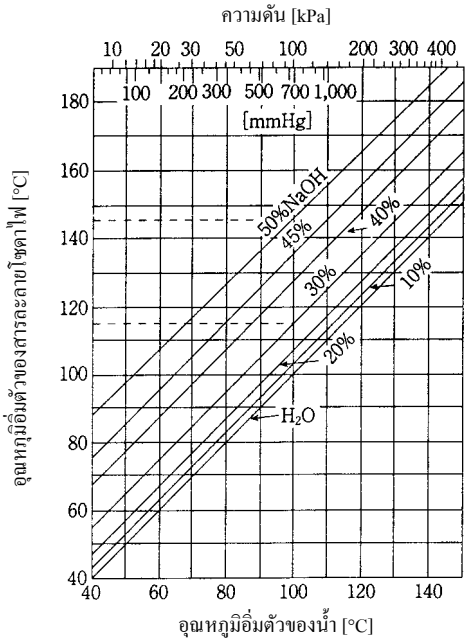
เมื่อนำกฎของ Raoult มาแปลงรูป จะได้สมการ (4.31)

$$p = \alpha P^{o} \qquad (4.31)$$

ในที่นี้ p เป็นความดันไอของสารละลาย P^{o} เป็นความดันไอของตัวทำละลายบริสุทธิ์ α เป็นสัมประสิทธิ์ไม่มีหน่วย โดยทั่วไปจะหาได้จากการทดลอง

(2) Dürhring chart

Dürhring chart เป็นกราฟที่สร้างขึ้นซึ่งจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของสารละลายใดๆ (หรือตัวทำละลายบริสุทธิ์) กับสารละลายมาตรฐานที่มีความดันไอเท่ากัน ซึ่งจะได้กลุ่มของเส้นตรงที่เกือบขนานกัน ทำให้สะดวกในการวาดและในการหาจุดเดือด สารละลายมาตรฐานควรเลือกใช้สารละลายที่มีขั้ว สำหรับสารละลายในน้ำโดยทั่วไปจะเลือกใช้น้ำ รูป 4.17 เป็น Dürhring chart ของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.17 Dürhring chart ของโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.3.2.2 จุดเดือดของของเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องจากเฮดสถิตของของเหลว

ความดัน P ที่กระทำต่อของเหลวที่อยู่ที่ความลึก H จากผิวหน้าของเหลว จากสูตร (4.29) จะเห็นว่าจะเพิ่มขึ้นเฉพาะความดันสถิตเท่านั้น จึงเดือดที่อุณหภูมิสูงกว่าผิวหน้าของเหลว

$$P = P^0 + \rho gH \qquad (4.32)$$

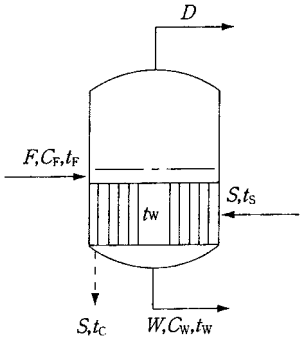
ในที่นี้ ให้ความลึกจากผิวหน้าของเหลวถึงผิวหน้าที่กลายเป็นไอเท่ากับ H ให้ความหนาแน่นเฉลี่ยของของเหลวตั้งแต่ผิวหน้าของเหลวถึงผิวหน้าที่กลายเป็นไอเท่ากับ ρ ให้ความดัน operating pressure ที่กระทำต่อผิวหน้าของเหลวเท่ากับ P^o และให้ g เป็นความเร่งแรงโน้มถ่วง

ในทางปฏิบัติความดันนี้จะต้องบวกด้วยความดันสูญเสียระหว่างก๊าซกับของเหลวจากผิวหน้าที่กลายเป็นไอถึงผิวหน้าของเหลวด้วย ค่า P จึงมีค่าสูงขึ้นไปอีก ทำให้จุดเดือดยิ่งมีค่าสูงขึ้น

ในทางปฏิบัติ ความลึกจากพื้นผิวถ่ายเทความร้อนในเครื่องระเหยจะไม่คงที่ จึงใช้ความลึกเฉลี่ย H ในการคำนวณ ในการระเหยภายใต้ความดันบรรยากาศ การสูงขึ้นของจุดเดือดเนื่องจากความลึกจะมีน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ แต่ยิ่งเข้าใกล้สุญญากาศมากเท่าใด อิทธิผลของจุดเดือดที่สูงขึ้นเนื่องจากความลึกจะยิ่งมีผลมากขึ้นเท่านั้น ทำให้ผลต่างอุณหภูมิระหว่างการถ่ายเทความร้อนมีผลต่อการระเหยลดลง ในการเคี่ยวของเหลวที่ไวต่อความร้อน เช่น ผลิตภัณฑ์นม น้ำผลไม้ ฯลฯ ในสุญญากาศ จึงต้องใช้หม้อระเหยก้นตื้น

4.3.3 สมดุลมวลและสมดุลความร้อนในหม้อระเหย

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทมาให้ตัวทำละลายในหม้อระเหยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลมวลกับสมดุลความร้อน ตัวอย่างหม้อระเหยแบบหม้อเดี่ยวจะแสดงในรูป 4.18



รูปที่ 4.18 สมดุลมวลของหม้อระเหย

ให้ปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนให้ต่อวินาที ปริมาณตัวทำละลายที่ระเหยไปต่อวินาที และปริมาณของเหลวเข้มข้นที่ได้ออกมาต่อวินาทีเท่ากับ F, D และ W [kg/s] ตามลำดับ ถ้าให้สัดส่วนโดยมวลของตัวถูกละลายในวัตถุดิบและในของเหลวเข้มข้นเท่ากับ C_F และ C_W ตามลำดับแล้ว สมดุลมวลทั้งหมดในหม้อระเหยและสมดุลมวลของตัวถูกละลายจะแสดงได้ดังนี้

$$F = D + W \tag{4.33}$$

$$FC_F = WC_W \tag{4.34}$$

เมื่อแทนค่า W จากสมการ 4.30 ลงในสมการ4.31 แล้ว จะได้สมการแสดงปริมาณตัวทำละลายที่ระเหยออกมา

$$D = F\left(1 - \frac{C_F}{C_W}\right) \tag{4.35}$$

ถ้าให้อุณหภูมิของวัตถุดิบเท่ากับ T_F [K] ให้ความร้อนจำเพาะเท่ากับ c_F [kJ/(kg·K)] ให้จุดเดือดของของเหลวเข้มข้นในหม้อเท่ากับ T_W [K] ให้ความร้อนแฝงของการระเหยของตัวทำละลายที่อุณหภูมิ T_W เท่ากับ λ_W [kJ/kg] ให้ปริมาณไอน้ำที่ป้อนให้เท่ากับ S [kg/s] ให้อุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำอิ่มตัวเท่ากับ T_S [K] ให้ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิ T_S เท่ากับ λ_S [kJ/kg] ให้อุณหภูมิของไอน้ำที่ระบายออกจากเครื่องให้ความร้อนเท่ากับ T_C [K] และให้ความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ c_W [kJ/(kg·K)] แล้ว จากสมดุลความร้อนของหม้อระเหยทั้งใบ จะคำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อน q หนึ่งหน่วยเวลาได้ดังต่อไปนี้

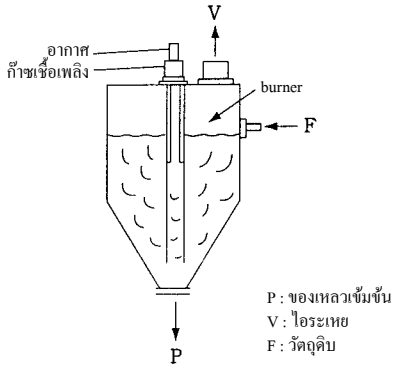
$$\begin{aligned} q &= F \cdot c_F(T_W - T_F) + D \cdot \lambda_W \\ &= S\{\lambda_S + c_W(T_S - T_C)\} \end{aligned} \tag{4.36}$$

ในที่นี้ถ้าให้ $T_S = T_C$ แล้ว

$$S \cdot \lambda_S = F \cdot c_F(T_W - T_F) + D \cdot \lambda_W \tag{4.37}$$

4.3.4 เครื่องระเหย

การระเหยมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับวิธีการให้ความร้อน โครงสร้างของพื้นผิวให้หรือถ่ายเทความร้อน และวิธีไหลของของเหลว วิธีให้ความร้อนแบ่งเป็นวิธีให้ความร้อนภาชนะที่ใส่สารละลายโดยตรงด้วยเปลวไฟหรือก๊าซอุณหภูมิสูง วิธีให้ความร้อนในของเหลว (รูป 4.19) โดยการส่งก๊าซร้อนเข้าไปในของเหลวหรือติดตั้ง burner ไว้ในของเหลวเพื่อให้ความร้อน และวิธีใช้ท่อให้ความร้อนโดยติดตั้งให้ความร้อนผ่านท่อที่มีตัวกลางให้ความร้อนไหลผ่านซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ไอน้ำ



รูปที่ 4.19 วิธีให้ความร้อนในของเหลว

รูปแบบของเครื่องระเหยที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรม ได้แก่ การใช้ท่อให้ความร้อนซึ่งมีไอน้ำเป็นตัวกลางให้ความร้อน เหตุผลที่ใช้ไอน้ำกันมากมีดังต่อไปนี้

(1) ของเหลวจะได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ไม่ต้องกังวลว่าจะร้อนมากเกินไป

(2) สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สะดวกด้วยการควบคุมความดัน

(3) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเมื่อมีการควบแน่นของไอน้ำมีค่าสูงมาก

ส่วนข้อเสียมีดังต่อไปนี้

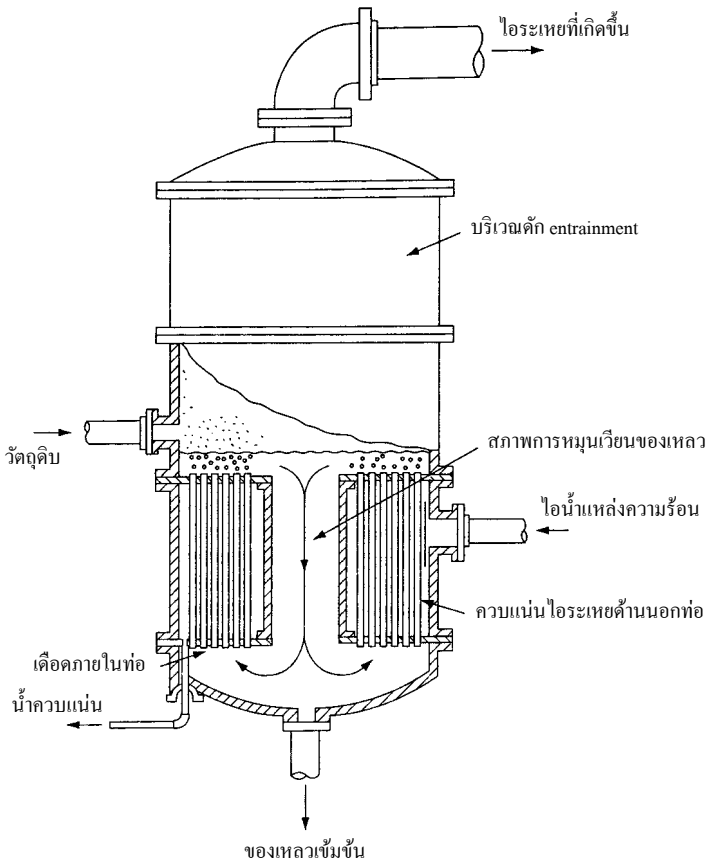
(1) โดยทั่วไปจะจำเป็นต้องมีหม้อไอน้ำสำหรับกำเนิดไอน้ำ ความดันของหม้อไอน้ำมักจะไม่สามารถกำเนิดไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงมากได้ นอกจากนั้น การใช้ไอน้ำอุณหภูมิสูงยังมีต้นทุนสูงอีกด้วย

(2) ในไอน้ำให้ความร้อนหากมีก๊าซที่ไม่ควบแน่น เช่น อากาศ เข้าไปปนอยู่ด้วย จะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าต่ำลงมาก

หม้อไอน้ำที่ใช้กันมีหลายชนิด แต่ถ้าแบ่งตามลักษณะการไหลภายในหม้อแล้ว จะแบ่งได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบ Natural circulation แบบ forced circulation และแบบ liquid film นอกจากนี้ลักษณะของท่อให้ความร้อน หากไม่นับท่อลักษณะพิเศษ เช่น แบบคอยล์หรือแบบท่อเฉียง ฯลฯ แล้วโดยพื้นฐานจะแบ่งได้เป็นแบบนอนกับแบบตั้ง

4.3.4.1 หม้อระเหยแบบมาตรฐาน

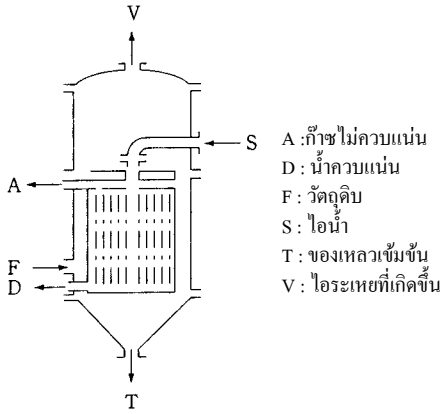
รูป 4.20 แสดงหม้อระเหยแบบ Natural circulation ที่มีท่อให้ความร้อนแบบตั้ง ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้กันเป็นมาตรฐานที่สุด ที่ด้านล่างของหม้อระเหยจะติดตั้งท่อให้ความร้อนที่ค่อนข้างสั้นไว้ในแนวตั้ง แล้วให้ไอน้ำไหลผ่านในท่อนั้นเพื่อเคี่ยวสารละลายให้เข้มข้นขึ้น แต่ที่กลางกลุ่มท่อจะติดตั้ง downtake ซึ่งทำให้สารละลายสามารถหมุนเวียนได้ตามธรรมชาติ หม้อระเหยแบบนี้จะทำความสะอาดได้ไม่สะดวก จึงใช้กับสารละลายที่ไม่ทำให้เกิดตะกรันและไม่กัดกร่อนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 4.20 หม้อระเหยแบบมาตรฐาน

4.3.4.2 หม้อระเหยแบบ Basket

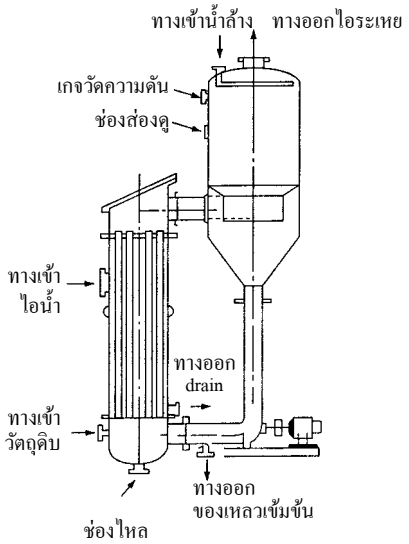
หม้อระเหยแบบ Basket มีลักษณะคล้ายกับหม้อระเหยแบบมาตรฐาน แต่มีโครงสร้างที่สามารถถอดท่อให้ความร้อน (basket) ออกมาเพื่อสับเปลี่ยนกับท่อสำรองได้ จึงสะดวกในการซ่อมบำรุง เช่น ทำความสะอาด เป็นต้น และยังลดระยะเวลาที่ต้องหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดอีกด้วย ในหม้อระเหยแบบนี้ ของเหลวจะไหลลงด้านล่างทางช่องว่างระหว่างกลุ่มท่อให้ความร้อนกับผนังหม้อ โดยโครงสร้างแล้วจะสามารถใช้กับหม้อระเหยขนาดเล็กที่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนไม่เกิน100 ตารางเมตร เท่านั้น



รูปที่ 4.21 หม้อระเหยแบบ Basket

4.3.4.3 หม้อระเหยแบบท่อยาวตั้งแบบ Forced circulation

หม้อระเหยแบบนี้แสดงไว้ในรูป 4.22 โดยจะใช้ปั๊มในการบังคับของเหลวให้เกิดการหมุนเวียน เพิ่มความเร็วกระแสของของเหลวที่ไหลผ่านในท่อให้ความร้อน เพื่อให้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เครื่องให้ความร้อนจะติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวหน้าของเหลวภายในหม้อระเหย ดังนั้น ของเหลวจึงแทบไม่เดือดในท่อให้ความร้อนเลยเนื่องจากความดันของของเหลว แต่เมื่อถูกส่งเข้าไปในห้องระเหยแล้วจะระเหยอย่างรวดเร็ว วิธีทำให้ระเหยเช่นนี้ เรียกว่า Flash evaporation หม้อระเหยที่ใช้วิธีนี้จะหมุนเวียนของเหลวด้วยความเร็วสูง จึงไม่ค่อยมีตะกรัน ไปเกาะที่หม้อให้ความร้อน เหมาะจะใช้กับการเคี่ยวสารละลายที่เกิดตะกรัน หรือตกผลึกได้ง่าย



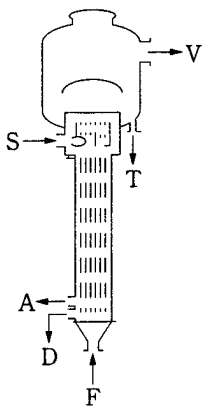
รูปที่ 4.22 หม้อระเหยแบบท่อยาวตั้งแบบ Forced circulation

4.3.4.4 หม้อระเหยแบบแผ่นฟิล์มแบบท่อตั้ง

เป็นหม้อระเหยแบบที่ทำงานด้วยการทำให้ของเหลวมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางแล้วให้สัมผัสกับพื้นผิวให้ความร้อน มีทั้งแบบ Raising film และ falling film

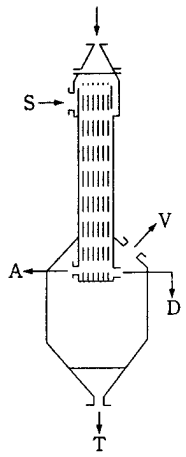
รูป 4.23 (a) แสดงหม้อระเหยแบบ raising film ของเหลวที่ป้อนเข้ามาอย่างต่อเนื่องจากปลายล่างสุดของบริเวณให้ความร้อน จะเกิดการเดือดภายในท่อให้ความร้อน เข้าไปผสมกับไอระเหยที่เกิดขึ้นลอยขึ้นตามท่อให้ความร้อนเข้าไปในห้องระเหย แล้วถูกแยกออกจากไอระเหย กลายเป็นของเหลวเข้มข้นไหลออกมานอกท่อ เมื่อมีของเหลวไหลในท่อให้ความร้อน ปริมาณไอระเหยที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้น กลายเป็นกระแสผสมระหว่างก๊าซ และของเหลว มีความเร็วกระแสมากขึ้น ที่ส่วนบนของหม้อของเหลวจะกลายเป็นแผ่นฟิล์มบางไต่ขึ้นไปตามผนังหม้อ ส่วนไอระเหยจะไหลผ่านกลางหม้อด้วยความเร็วสูง ดังนั้น สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงมีค่าสูง รวมทั้งของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวให้ความร้อนเป็นระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น จึงเหมาะที่จะใช้กับการเคี่ยวน้ำผลไม้ นม และสารละลายที่มีสารที่สลายตัวจากความร้อนได้ง่าย เช่น วิตามิน เป็นต้น

รูป 4.23 (b) แสดงหม้อระเหยแบบ falling film วัตถุดิบจะป้อนเข้าไปจากด้านบนของบริเวณให้ความร้อนของท่อยาวตั้ง แล้วไหลลงมาเป็นรูปแผ่นฟิล์มบางตามผนังด้านของท่อให้ความร้อนและเกิดการระเหยทำให้เข้มข้นขึ้นระหว่างที่ไหลลงมาจนออกจากปลายท่อด้านล่าง ในห้องระเหยที่ด้านล่างของเหลวจะถูกแยกออกจากไอระเหยที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ของเหลวเข้มข้นออกมา หม้อแบบนี้มีข้อดีคือ สามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูงได้มากกว่าหม้อแบบ raising film และจะไม่มีตะกรัน หรือเกลือเกาะที่ผนังท่อ



A : ก๊าซไม่ควบแน่น F : วัตถุดิบ
T : ของเหลวเข้มข้น D : น้ำควบแน่น
S : ไอน้ำ V : ไอระเหยที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.23 (a) หม้อระเหยแบบ raising film ท่อตั้ง



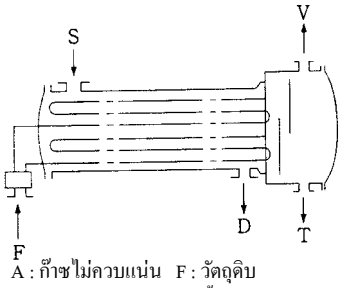
A : ก๊าซไม่ควบแน่น F : วัตถุดิบ
T : ของเหลวเข้มข้น D : น้ำควบแน่น
S : ไอน้ำ V : ไอระเหยที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.23 (b) หม้อระเหยแบบ falling film ท่อตั้ง

4.3.4.5 หม้อระเหยแบบท่อนอน

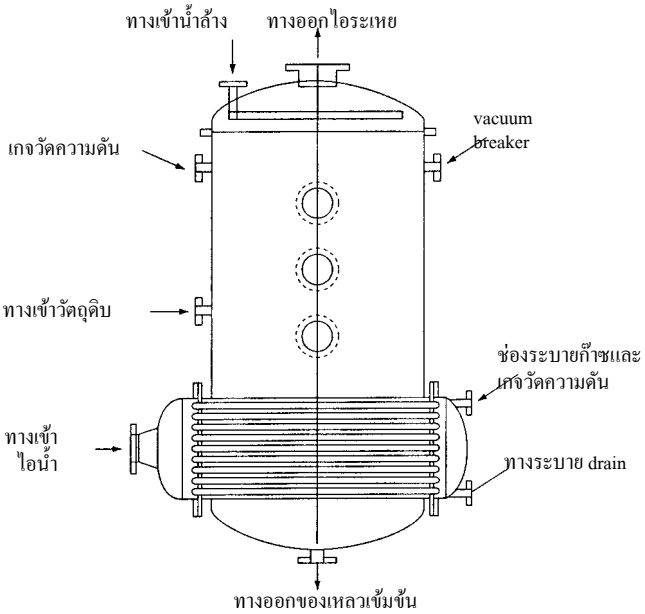
หม้อระเหยแบบท่อนอนซึ่งมีโครงสร้างเกือบเหมือนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งเป็นแบบที่มีสารละลายไหลภายในท่อและแบบภายนอกท่อ รูป 4.24 (a) แสดงแบบแรก ซึ่งสารละลายและไอระเหยที่เกิดขึ้นระหว่างที่ไหลผ่านภายในท่อจะกลายเป็นกระแสสถานะผสมระหว่างก๊าซ และของเหลวไหลผ่านภายในท่อด้วยความเร็วสูง แล้วไปกระทบ baffle plate ในห้องแยกก๊าซ-ของเหลวอย่างรุนแรงทำให้ก๊าซแยกตัวจากของเหลว

รูป 4.24 (b) แสดงหม้อแบบที่ท่อให้ความร้อนแช่มิดอยู่ในสารละลาย ซึ่งของเหลวจะมีความลึกไม่มาก ทำให้มีจุดเดือดสูงขึ้นเนื่องจากความดันสถิตไม่มาก มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาก แต่เนื่องจากทำความสะอาดได้ยาก จึงเหมาะกับของเหลวที่ไม่ค่อยเกิดตะกรัน



A : ก๊าซไม่ควบแน่น F : วัตถุดิบ
T : ของเหลวเข้มข้น D : น้ำควบแน่น
S : ไอน้ำ V : ไอระเหยที่เกิดขึ้น

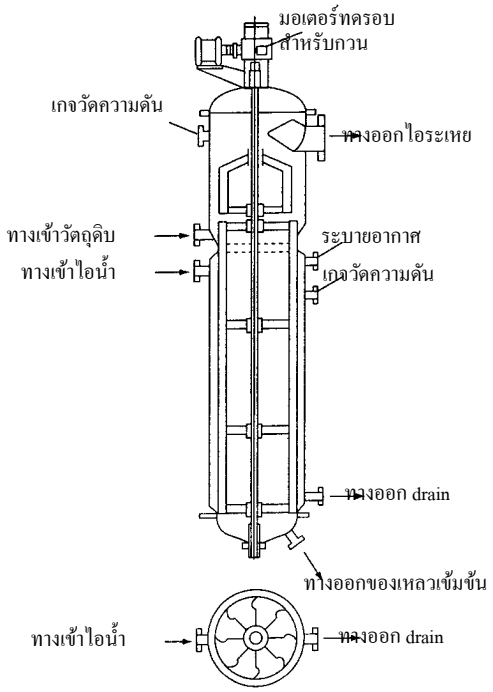
รูปที่ 4.24 (a) หม้อระเหยแบบท่อนอน



รูปที่ 4.24 (b) หม้อระเหยแบบท่อสั้นนอน

4.3.4.6 หม้อระเหยแบบกวน

หม้อระเหยแบบกวนแสดงไว้ในรูป 4.25 หม้อแบบนี้ทำงานโดยให้ของเหลวไหลลงไปเป็นแผ่นฟิล์มบางตามผนังด้านในท่อให้ความร้อนตั้ง ระหว่างนั้นก็ใช้ใบพัดหมุนกวนแผ่นฟิล์มของเหลวไปด้วยหม้อไอน้ำแบบนี้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงมาก เหมาะกับการเคี่ยวสารละลายที่มีความหนืดสูง และไวต่อความร้อน



รูปที่ 4.25 หม้อระเหยแบบกวน

4.4 อุปกรณ์ประกอบของหอกลั่นและเครื่องระเหย

อุปกรณ์ประกอบของเครื่องระเหย ได้แก่ เครื่องระบายอากาศ-ลดความดัน เครื่องควบแน่น เครื่องดักฟองของเหลว (Entrainment) เป็นต้น

4.4.1 เครื่องระบายอากาศ-ลดความดัน

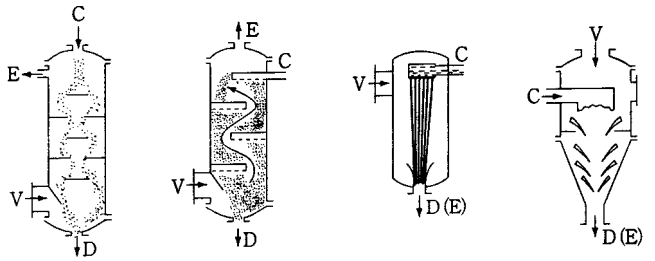
ในการระเหย หากในของเหลววัตถุดิบหรือในไอน้ำมีอากาศหรือก๊าซที่ไม่ควบแน่นรวมอยู่ จะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดลงเมื่อเกิดการควบแน่น นอกจากนี้การควบคุมสภาวะของไอระเหย เช่น ความดัน ฯลฯ จะทำได้ไม่สะดวก ดังนั้น จึงต้องระบายอากาศออก นอกจากนี้ถ้าต้องการทำให้การระเหยมีประสิทธิภาพสูงที่สุดที่อุณหภูมิต่ำที่สุด จะต้องทำการลดความดันให้เหมาะสม เครื่องลดความดันโดยพื้นฐานแล้วแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบปั๊มสุญญากาศเชิงกลและแบบพ่นน้ำเพื่อดึงอากาศออก (Ejector)

4.4.2 เครื่องควบแน่น

เครื่องควบแน่นที่ใช้ในการระเหย แบ่งเป็นเครื่องควบแน่นพื้นผิว (Surface condenser) และเครื่องควบแน่นแบบสัมผัส (contact condenser)

เครื่องควบแน่นแบบพื้นผิวจะให้ความเย็นผ่านผนังกั้นเช่นเดียวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไป โดยให้ไอระเหยและน้ำระบายความร้อนไม่สัมผัสกันโดยตรง แต่เนื่องจากตัวเครื่องมีราคาสูง จึงใช้ในกรณีที่ต้องเดินเครื่องภายใต้สุญญากาศ (ความดันต่ำมาก ๆ) หรือกรณีที่ต้องนำของเหลวควบแน่นกลับมาใช้ใหม่โดยไม่ให้น้ำเย็นเข้าไปปนกับของเหลวควบแน่น หรือต้องนำของเหลวควบแน่นออกไปแปรรูปต่อ

เครื่องควบแน่นแบบสัมผัสเป็นเครื่องควบแน่นที่จะให้ไอระเหยสัมผัสกับน้ำระบายความร้อนจำนวนมากโดยตรง มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก และยังมีประสิทธิภาพในการควบแน่นดีจึงเคยใช้กันมากที่สุดในการระเหย แต่ปัจจุบันเนื่องจากก่อปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงไม่ใช้กันอีกแล้ว เครื่องควบแน่นแบบสัมผัสมีวิธีสัมผัสทั้งแบบไหลทางเดียวกันและไหลสวนกัน ตัวอย่างแสดงไว้ในรูป 4.26

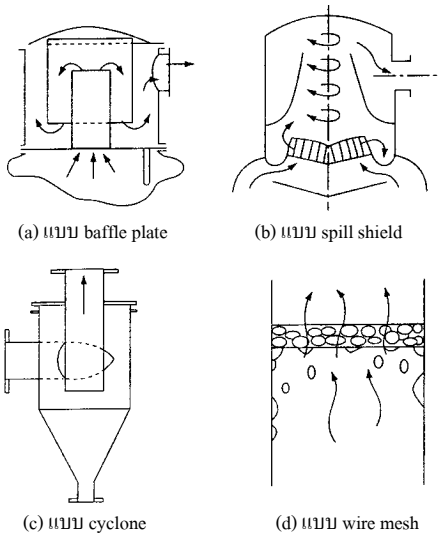


C : น้ำระบายความร้อน D : น้ำที่ระบายออก E : ก๊าซไม่ควบแน่น V : ไอระเหย

รูปที่ 4.26 เครื่องควบแน่นแบบสัมผัส

4.4.3 เครื่องดักฟองของเหลว (Entrainment)

ในไอระเหยที่เกิดจากการเดือดจะมีละอองของเหลวอยู่ด้วย ละอองนี้จะไหลออกมาพร้อมกับไอระเหยที่เกิดขึ้น เรียกว่า Entrainment ซึ่งเป็นทั้งความสูญเสียองค์ประกอบเข้มข้น และตัวทำละลายบางชนิดอาจจะทำให้อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เกิดการผุกร่อนและเป็นคราบได้อีกด้วย จึงต้องพยายามป้องกันให้ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้น ที่ทางออกของหม้อระเหยจึงติดตั้งเครื่องดัก entrainment ดังที่แสดงไว้ในรูป 4.27



รูปที่ 4.27 เครื่องดัก Entrainment ชนิดต่างๆ

เครื่องดักของเหลวที่ติดมากับฟอง (Entrainment) มีหลายชนิด ทำงานด้วยการให้ Entrainment ที่ออกมากับไอระเหยชนกับ baffle plate โดยตรง หรือให้เลี้ยวเป็นมุมหักศอก หรือใช้ประโยชน์จากแรงเหวี่ยง หรือจับละอองของเหลวด้วย wire mesh screen เพื่อแยกไอระเหยออกจากหยดของเหลว อนึ่ง เครื่องดัก Entrainment ต้องมีประสิทธิภาพในการดักสูงและต้องมีความดันสูญเสียน้อยอีกด้วย

4.5 การอนุรักษ์พลังงานด้วยวิธีปรับการระเหย

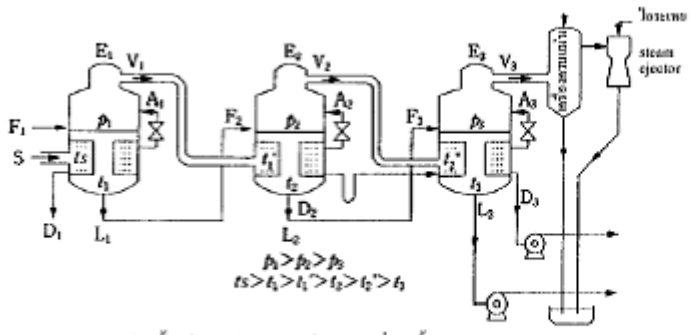
4.5.1 วิธี Multiple-effect

ปริมาณความร้อนส่วนใหญ่ของแหล่งความร้อนจะถูกนำออกไปกับไอระเหยที่เกิดขึ้น หากสามารถนำความร้อนนี้กลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในการระเหยสารละลายอีกครั้งได้ จะสามารถลดปริมาณความร้อนที่ต้องป้อนให้แก่อุปกรณ์ แต่เนื่องจากของเหลวที่เดือด และไอระเหยที่เกิดขึ้นจะมีอุณหภูมิเท่ากัน จึงไม่สามารถใช้ในการกำเนิดไอระเหยได้ทันที วิธีการหนึ่งคือนำไอระเหยที่เกิดขึ้นในหม้อที่ 1 ไปเป็นแหล่งความร้อนของหม้อที่ 2 ซึ่งเดินเครื่องที่ความดันต่ำกว่า (ของเหลวจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่า เมื่ออยู่ในความดันต่ำกว่า) แล้วนำไอระเหยที่เกิดขึ้นจากหม้อที่สองไปเป็นแหล่งความร้อนของหม้อที่ 3 ซึ่งเดินเครื่องที่ความดันต่ำลงไปอีกหม้อ ระเหยแบบนี้เรียกว่า Multi-effect evaporator จำนวนของหม้อระเหย เรียกว่า number of effects กรณีที่ใช้หม้อระเหย n หม้อต่อกัน แล้วนำไอระเหยจากหม้อสุดท้ายไปผ่านเครื่องควบแน่นให้ระบายออกมา ไอน้ำใหม่ที่จะใช้เป็นแหล่งความร้อนจะป้อนให้เฉพาะหม้อที่ 1 เท่านั้นก็พอ กล่าวคือหากให้ไอน้ำสำหรับให้ความร้อนเท่ากับ 1 เท่าแล้ว ตามทฤษฎีแล้วจะสามารถระเหยน้ำได้เป็นปริมาณเท่ากับ n เท่านั่นเอง

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจะไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากมีความร้อนสูญเสีย และการที่อุณหภูมิของจุดเดือดสูงขึ้น ในอุปกรณ์จริงๆ นั้น จำนวนของหม้อต้มจะขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างค่าเครื่องจักรกับค่าใช้จ่ายใน

การเดินเครื่อง ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่แล้วจะใช้ 4 หม้อเท่านั้น รูป 4.28 แสดงตัวอย่างของหม้อระเหย Triple-effect ที่มีการป้อนตามกัน (forward current)

ประเภทของหม้อระเหยแบบ Multi-effect มีการจัดเรียงอยู่ 4 ประเภทดังรูป 4.29 แต่ละประเภทมีสมบัติดังต่อไปนี้



F : วัตถุดิบ S : ไอน้ำให้ความร้อน V : ไอระเหยที่เกิดขึ้น D : drain
A : pent L : ของเหลวข้นข้น p : ความดัน t : อุณหภูมิอิ่มตัว t' : อุณหภูมิอิ่มตัว

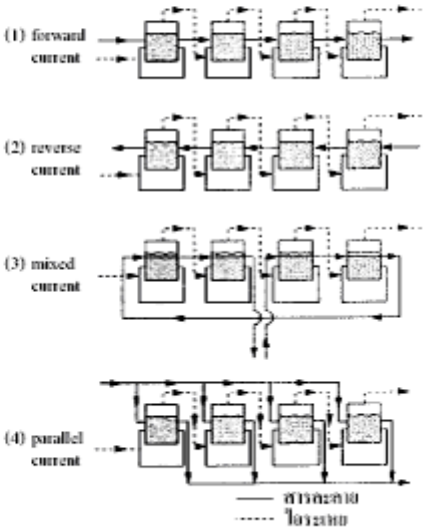
รูป 4.28 หม้อระเหยแบบ triple-effect

forward current : ส่งของเหลวและไอระเหยไปในทิศทางเดียวกัน จึงติดตั้งปั๊มที่หม้อที่ 1 และหม้อสุดท้ายเท่านั้น กรณีที่อุณหภูมิที่ป้อนมีค่าสูงจะคุ้มค่าทางความร้อนมากกว่าแบบ reverse current

reverse current : ของเหลวกับไอระเหยจะไหลในทิศทางตรงข้ามกัน ต้องติดตั้งปั๊มทุกๆ หม้อ กรณีที่ของเหลวข้นข้นมีอุณหภูมิสูงและวัตถุดิบมีอุณหภูมิต่ำจะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ forward current

mixed current : นำสมบัติของแบบ forward current กับ reverse current มาผสมกันอย่างเหมาะสม ซึ่งทำให้ได้เปรียบกว่าเมื่อวัตถุดิบมีอุณหภูมิปานกลาง

parallel current : ของเหลวจะป้อนเข้าไปที่ทุกหม้อพร้อมๆ กัน แต่ละหม้อจะทำงานเหมือนกับหม้อเดี่ยวๆ แต่ไอระเหยสำหรับให้ความร้อนจะเป็นแบบ multi-effect

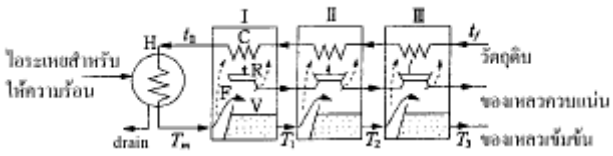


รูป 4.29 การจัดเรียงหม้อระเหยแบบ multi-effect

4.5.2 การระเหยแบบ multistage flash

หลักการของการระเหยแบบ Multistage flash คือการป้อนสารละลายที่ให้ความร้อนแล้ว ให้แก่ภาชนะที่มีความดันอิ่มตัวต่ำกว่าตัวมัน ทำให้เกิดการเดือด และระเหยด้วยความดันที่ลดลงเพียงอย่างเดียว แล้วนำไอระเหยที่เกิดขึ้นไปอุ่นของเหลวที่ต้องการเคี่ยว เพื่อนำความร้อนแฝงของการควบแน่นกลับมาใช้

วิธีระเหยแบบ multistage flash มีการนำมาใช้จริงกับการทำน้ำทะเลให้เป็นน้ำจืดดังรูป 4.30 เมื่อนำของวัตถุดิบที่อุ่นจนมีอุณหภูมิ T_1 แล้ว ไปอุ่นจนมีอุณหภูมิ T_m ด้วยเครื่องให้ความร้อน H แล้วนำไปผ่าน flash box F เพื่อให้เกิดการระเหยอย่างรวดเร็วในห้อง I ที่รักษาอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิอิ่มตัว T_1 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิ T_m แล้วแยกไอระเหย-ของเหลวเข้มข้นที่ห้องระเหย V ไอระเหยที่ได้นี้ จะนำไปอุ่นวัตถุดิบที่ไหลผ่านในเครื่องควบแน่นด้วยเครื่องควบแน่นสำหรับอุ่นวัตถุดิบ ตัวไอระเหยจะควบแน่นไปรวมที่ห้องรับ receiver R ส่วนของเหลวเข้มข้นที่เกิดการระเหยที่ห้อง I จะถูกรวบรวมนำไประเหยอีกครั้งที่ห้อง II และ III ซึ่งรักษาอุณหภูมิไว้ให้ต่ำกว่าเป็นลำดับเพื่อเพิ่มความเข้มข้นให้สูงยิ่งขึ้น

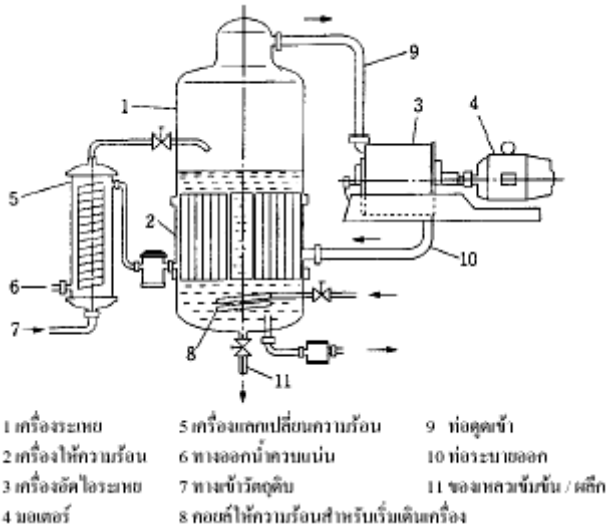


รูปที่ 4.30 เครื่องระเหยแบบ multi-stage flash

4.5.3 การอัดไอระเหย

เมื่อนำไอระเหยไปอัด อุณหภูมิจะสูงขึ้นตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ ด้วยหลักการนี้จะสามารถเพิ่มอุณหภูมิของไอระเหยที่เกิดขึ้นแล้วนำไปใช้ในการให้ความร้อนของเหลวได้

เมื่อใช้พลังงานกลในการอัดไอน้ำ ในแง่ของอุปกรณ์ให้ความร้อนแล้ว อาจเรียกว่าเป็นปั๊มความร้อนชนิดหนึ่ง ในทางปฏิบัติจะใช้เครื่องอัดอากาศแบบเทอร์โบหรืออินเจ็กเตอร์ก็ได้ รูป 4.31แสดงตัวอย่างของการติดตั้งปั๊มความร้อนนี้ในท่อส่งไอระเหยจากหม้อระเหย



รูปที่ 4.31 เครื่องระเหยแบบปั๊มความร้อน

4.5.4 การควบคุมพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

หากที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนเกิดตะกรันขึ้น ความสามารถในการระเหยจะลดลงอย่างมาก และต้องสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เพื่อให้เกิดการระเหยได้ในอัตราที่เท่าเดิม ทั้งนี้เนื่องจากตะกรันจะทำตัวเหมือนฉนวนความร้อน ในกรณีของหม้อไอน้ำ จะสามารถป้องกันการเกิดตะกรัน ได้ด้วยวิธีเติมสารเคมีขณะเดินเครื่อง แต่ในหม้อระเหยโดยทั่วไปจะต้องการได้ของเหลวเข้มข้นออกมา จึงไม่สามารถป้องกันด้วยวิธีการเติมสารเคมีได้ โดยหากเกิดตะกรันเป็นคราบในระดับหนึ่ง จะต้องหยุดหม้อระเหย แล้วทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมีหรือวิธีทางกายภาพ

ความสกปรกที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนนอกจากการเกิดตะกรันแล้วยังมีอีกหลายชนิดขึ้นอยู่กับประเภทของเหลวที่ต้องระเหย และสภาวะการเดินเครื่อง ตาราง 4.3 แสดงลักษณะของความสกปรกที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน องค์ประกอบหลัก และวิธีควบคุมที่ใช้กันทั่วไป

ตารางที่ 4.3 ความสกปรกที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน และวิธีควบคุม-กำจัด

ลักษณะ	องค์ประกอบ		การควบคุม (ระหว่างเดินเครื่อง)	การกำจัด (ระหว่างหยุดเครื่อง)
sludge โคลนเลน	สารแขวนลอย		ทำความสะอาดด้วย sponge ball ให้สนามไฟฟ้า-สนามแม่เหล็ก	jet wash ขัดด้วยแปรง
scale	เกลือที่ละลายยาก	scale แข็ง	เติม seed crystal กำจัด Ca^{2+}	hammering แช่ในกรดฟอสฟอรัสเจือจางแล้วทำ pickling
		scale อ่อน	ควบคุม pH เติมสารควบคุม (ใช้ร่วมกับทำความสะอาดด้วย sponge ball : ได้ผลดีมาก)	pickling
slime	จุลินทรีย์		ทำความสะอาดด้วย sponge ball เติมคลอรีน เติมโอโซน ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต สกรีน	jet wash ขัดด้วยแปรง
biofoulants	สัตว์น้ำ			

4.6 สัญลักษณ์

A พื้นที่การถ่ายเทความร้อน

C ความเข้มข้นของสารผสม

D อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดึงออกที่ยอดหอ, distillate

F อัตราการไหลของสายป้อน

g ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

H ความสูงหรือความลึกของระดับของเหลว

L อัตราการไหลของของเหลวในหอกลั่น

P^o ความดันไอของสารบริสุทธิ์

p_i ความดันไอระเหยของสารองค์ประกอบตัวที่ i

Q ปริมาณความร้อนทั้งหมด

q อัตราการถ่ายเทความร้อน

q_F อัตราส่วนของของเหลวในสายป้อนต่อสายป้อนทั้งหมด

R อัตราส่วนของของเหลวที่ป้อนกลับหอกลั่นด้านยอดหอต่อผลิตภัณฑ์ยอดหอ, reflux ratio

S อัตราการไหลของไอน้ำ

T อุณหภูมิสัมบูรณ์

U สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

V อัตราการไหลของกาซหรือไอภายในหอกลั่น

W อัตราการไหลของของไหลที่ดึงออกที่ก้นหอกลั่น หรือผลิตภัณฑ์ก้นหอ

x สัดส่วนโดยโมลของสารผสมในสถานะของเหลว

y สัดส่วนโดยโมลของสารผสมในสถานะกาซ

α_{ij} ความสามารถในการระเหยสัมพัทธ์, relative volatility

β อัตราส่วนการกลั่น

γ_i activity coefficient ของสาร i

λ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

π ความดันไอรวม

ρ ความหนาแน่น

ตัวห้อย

D คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ยอดหอ

F คุณสมบัติของสารป้อน

i, j องค์ประกอบของสารชนิด i และ j ที่เวลาใดๆ

o คุณสมบัติของสารที่จุดเริ่มต้น

R คุณสมบัติของของเหลวที่ป้อนกลับมาที่ยอดหอ

W คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ก้นหอ

4.7 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ การเอาน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (ความชื้นลดลง) โดยส่วนใหญ่วัสดุนั้นจะอยู่ในสถานะของแข็ง น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัสดุนั้นเพื่อดึงน้ำออกมา วัสดุจะแห้งได้มาก-น้อยจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของมันด้วย ในการอบเมื่อทำให้ของเหลวในวัตถุดิบระเหยเป็นไอ จะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีสัดส่วนของของเหลวต่ำลง ซึ่งนอกจากจะมีกรณีที่วัตถุดิบมีสภาพเป็นของแข็งที่เปียกชื้นแล้ว ยังมีกรณีที่อบของเหลวข้น (slurry) หรือของเหลวใสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงอีกด้วย

เครื่องอบโดยมากมักจะเป็นส่วนสุดท้ายของกระบวนการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่อบแล้วจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จทันที ดังนั้น การอบไม่สม่ำเสมอ เช่น ไม่แห้งหรือแห้งเกินไป และรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เช่น วัตถุดิบเป็นก้อน รวมทั้งปริมาณผลได้ (Yield) จึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสนใจ นอกจากนี้ความร้อนแฝงของการระเหยของของเหลวจะมีค่าสูง การอบจึงสิ้นเปลืองพลังงานมาก การจัดการพลังงานความร้อนจึงเป็นปัญหาที่สำคัญ

4.7.1 อัตราความชื้น

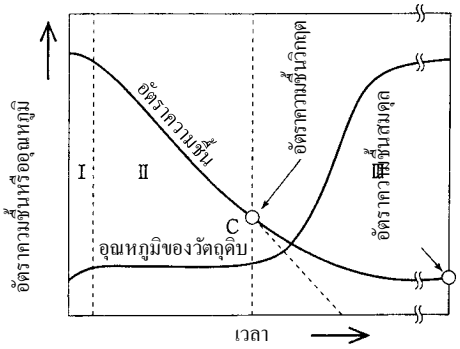
ในการแสดงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ จะสามารถแสดงได้ด้วยปริมาณน้ำต่อปริมาณมวลรวมเปียก (ค่า Wet base) หรือปริมาณน้ำต่อปริมาณวัตถุดิบแห้ง (ค่า dry base) ในขณะที่อบมวลรวมจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อคำนวณความชื้นแบบ wet basis จะทำให้ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการคำนวณทางอุตสาหกรรม จะใช้ค่าความชื้น ที่คำนวณแบบ dry basis ซึ่งมวลแห้งเป็นฐานในการคำนวณ เนื่องจากมวลแห้งนี้มีค่าคงที่ตลอดการอบ จึงมีความสะดวกมากกว่า ถ้าให้ความชื้นที่ wet basis เท่ากับ ω_w และให้ความชื้นที่ dry basis เท่ากับ ω_d แล้ว ค่าทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้

$\omega_w =$ [kg-น้ำ/kg-วัตถุดิบเปียก] (4.38)

$\omega_d =$ [kg-น้ำ/kg-วัตถุดิบแห้ง] (4.39)

4.7.2 อัตราเร็วในการอบกับเส้นกราฟแสดงสมบัติการอบ

เมื่อนำวัตถุดิบที่จะอบซึ่งเปียกชื้นอย่างเพียงพอถึงผิวหน้ามาแขวนไว้ในกระแสลมร้อน แล้วติดตามตรวจวัดอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบนั้น โดยทั่วไปจะได้ผลลัพธ์ดังรูป 4.32 โดยทั่วไปกลไกการอบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะที่มีลักษณะแตกต่างกันดังรูป 4.32 กล่าวคือ (I) ช่วงอุ่นวัตถุดิบ (II) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ (III) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง



รูป 4.32 การเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบ

4.7.2.1 ช่วงอุ่นวัตถุดิบ

ช่วง I เป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัตถุดิบจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้น (อุณหภูมิห้อง) จนถึงอุณหภูมิสมดุลที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการอบ เรียกว่า ช่วงอุ่นวัตถุดิบ ในกรณีที่วัตถุดิบได้รับความร้อนด้วยการพาความร้อนโดยลมร้อน อุณหภูมิสมดุลนี้จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนนั้น

4.7.2.2 ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่

ในช่วง II วัตถุดิบจะมีอุณหภูมิคงที่ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้รับจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นเท่านั้น ชั้นของการระเหยจะเกิดที่ผิวหน้าของวัตถุดิบโดยอัตราเร็วในการอบจะมีค่าคงที่ ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งจะดำเนินไปตราบเท่าที่มีความชื้นอิสระให้ระเหยอยู่ที่ผิวหน้าของวัตถุดิบ โดยอัตราความชื้นของวัตถุดิบจะลดลงด้วยอัตราเร็วคงที่

4.7.2.3 ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง

เมื่ออบไปเรื่อยๆ จนปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าวัตถุดิบแห้งลง และความชื้นภายในเนื้อวัตถุดิบเริ่มลดลง ความชื้นอิสระภายในตัววัตถุดิบจะซึมขึ้นมาทดแทน ให้ทันกับอัตราเร็วในการระเหยที่ผิวหน้า จึงเริ่มเข้าสู่ช่วงที่ III ได้แก่ ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง ชั้นของการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบ อุณหภูมิของวัตถุดิบจะเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของลมร้อนจากบริเวณพื้นผิว ในการอบความร้อนจะต้องเข้าไปถึงภายในเนื้อวัตถุดิบ นอกจากนี้ความร้อนส่วนหนึ่งยังต้องใช้ไปในการให้ความร้อนตัววัตถุดิบเองอีกด้วย อัตราเร็วในการอบจึงค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป

(1) ค่าความชื้นวิกฤต

ความชื้นที่รอยต่อระหว่างช่วง II กับ III เรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤต ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบเครื่องอบ ค่านี้เป็นค่าเฉพาะตัวของวัตถุดิบ นอกจากนี้ สำหรับวัตถุดิบชนิดเดียวกัน หากวิธีอบแตกต่างกัน เช่นใช้อุณหภูมิไม่เท่ากัน หรือใช้อากาศร้อนที่มีความชื้นไม่เท่ากัน จะทำให้ค่าความชื้นวิกฤตจะแตกต่างกันมาก โดยทั่วไปการพยากรณ์ค่านี้เป็นเรื่องยาก มักจะต้องหาค่าด้วยการวัดจากการทดลองเท่านั้น

(2) ความชื้นสมดุล

กรณีที่วัตถุดิบที่มีน้ำอยู่ในรูปมีพันธะกับโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น (Bonding moisture) การอบวัตถุดิบภายใต้เงื่อนไขการอบใดๆ ที่ใช้ลมร้อนที่ยังมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ ทำให้เมื่ออบจนความชื้นลดลงมาถึงระดับหนึ่งแล้ว วัตถุดิบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลไม่สามารถอบให้แห้งมากขึ้นอีกได้ ความชื้นในขณะนั้นเรียกว่า ความชื้นสมดุล ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และความชื้นของลมร้อนที่ใช้

(3) ความชื้นอิสระ

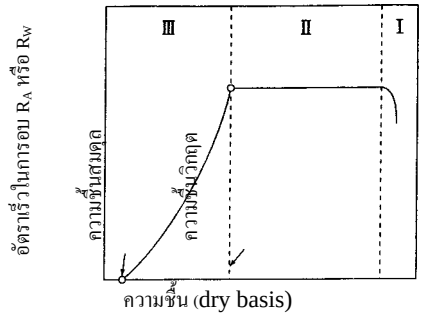
ในวัตถุดิบชื้น ปริมาณน้ำที่สามารถไล่ออกได้ด้วยการอบ จะเท่ากับผลต่างของความชื้นของวัตถุดิบกับความชื้นสมดุลในขณะนั้น ค่านี้เรียกว่า อัตราความชื้นอิสระที่เงื่อนไขนั้นๆ

(4) เส้นกราฟคุณลักษณะการอบ

ในการแสดงอัตราเร็วของการอบภายใต้เงื่อนไขการอบประการหนึ่ง เราจะใช้ค่าอัตราการอบแห้งจำเพาะ R_A [kg-น้ำ/(s·m^2-พื้นที่อบ)] ต่อพื้นที่อบหนึ่งหน่วย หรือใช้ค่า R_W [kg-น้ำ/(s·kg-วัตถุดิบแห้ง)] ต่อวัตถุดิบแห้งหนึ่งหน่วย ถ้าให้พื้นที่ระเหยจำเพาะเท่ากับA_D [m^2] และให้มวลของวัตถุดิบแห้งเท่ากับ W_D [kg] แล้ว ค่า R_A และ R_W จะมีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้

$$R_A = R_W \frac{W_D}{A_D} \qquad (4.40)$$

อัตราเร็วในการอบสามารถหาได้จากความชันของอัตราความชื้นในรูป 4.32 และเมื่อหาความสัมพันธ์กับอัตราความชื้นแล้วจะได้รูป 4.33 รูปนี้เรียกว่า เส้นกราฟคุณลักษณะการอบ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการออกแบบเครื่องอบ



รูปที่ 4.33 เส้นกราฟคุณลักษณะการอบ

4.7.3 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุชื้น กับกลไกการเคลื่อนที่

สภาพของความชื้นที่มีอยู่ภายในวัตถุดิบชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลต่อกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้น ในวัตถุดิบเปียกนอกจากจะมีความชื้นในรูปน้ำอิสระแล้ว ยังมีน้ำ Adsorption water ที่เกาะติดกับพื้นผิวของแข็ง ความชื้น bonding water และไอน้ำในช่องว่างอีกด้วย

ตาราง 4.4 จะแบ่งความชื้นในวัตถุดิบออกตามสภาพของความชื้น โดยอธิบายความสามารถในการอุ้มน้ำภายในวัตถุดิบ กลไกการเคลื่อนที่ของความชื้น และความดันไอของน้ำของวัตถุดิบต่างๆ ต่อไปนี้จะอธิบายโดยละเอียด

ตารางที่ 4.4 สภาพการอุ้มความชื้นภายในวัตถุดิบเปียก

				ประเภทของน้ำที่มีอยู่	การอุ้มน้ำ	กลไกการเคลื่อนที่ของความชื้น	ความดันไอ p	ตัวอย่างวัตถุดิบ
วัตถุดิบเปียก	เนื้อผสม	non-hydrophilic		น้ำเกาะติดผิวหน้า	แรงตึงผิว	การแพร่ของไอน้ำ	$p = p_w$ *1	พื้นผิวอนุภาคหยาบ
			capillary water	funicular water	capillary suction force	การเคลื่อนที่ในสถานะของเหลว	$p = p_w$ *2	ชั้นอนุภาค อิฐ ของแข็งมีรูพรุน
				suspended water	แรงตึงผิว	การแพร่ของไอน้ำ	$p = p_w$ *2	
				osmotic water (ในสภาพแขวนลอย)	osmotic suction force	การเคลื่อนที่ในสถานะของเหลว	$p = p_w$	ชั้นอนุภาคละเอียด slag ดินเหนียวที่ชื้นมากๆ
		hydrophilic*3		adsorption water	adsorption power	การแพร่ของไอน้ำ	$p < p_w$	activated alumina
				bonding water	affinity ระหว่างพื้นผิวของอนุภาคกับน้ำ	การเคลื่อนที่ในสถานะของเหลว การแพร่ของไอน้ำ	$p < p_w$	ดินเหนียว (ใกล้จะแห้ง)
	เนื้อเดียว			bonding water (ที่ผ่านสภาพเป็นเจลแล้ว)	affinity ระหว่างโมเลกุลกับน้ำ	การแพร่ของความชื้น	$p < p_w$	สารละลายไฮโพลิเมอร์
				การละลาย		การแพร่ของความชื้น	$p < p_w$	สารละลายในน้ำของสารอินทรีย์ สารละลายในน้ำของเกลือต่างๆ
วัตถุดิบแช่แข็ง				น้ำแข็ง		การแพร่ของไอน้ำ (การไหลของไอน้ำ)	$p = p_{ice}$ *4	

*1 p_w : ความดันไออิ่มตัวของน้ำอิสระ
*2 ในหลอด capillary ที่มีขนาดเล็กมากๆ (รัศมี $r < 10^{-8}$ m = 100 Å) แล้ว $p < p_w$
*3 ในช่วงที่มีความชื้นสูงโดยมากจะแสดงพฤติกรรมเหมือนกับความชื้น (น้ำอิสระ) ในวัสดุ non-hydrophilic
*4 p_{ice} : ความดันไออิ่มตัวของน้ำแข็ง

4.7.3.1 วัสดุ Non-hydrophilic

หมายถึงกรณีที่พื้นผิวที่เป็นองค์ประกอบของของแข็งไม่สามารถดูดความชื้น หรือดูดความชื้นได้น้อยมาก จนปริมาณความชื้นสูงสุด (ปริมาณน้ำ) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลสัมบูรณ์ของของแข็ง น้ำที่เกาะอยู่บนผิวของวัสดุเหล่านี้จะมีลักษณะดังนี้ ถ้าวัสดุนั้นมีลักษณะ

<u>ของแข็งตันผิวมัน</u> : น้ำจะอยู่ในสภาพน้ำเกาะผิวหน้าที่ทำให้พื้นผิวอนุภาคเปียก

<u>ของแข็งผิวหยาบ</u> : ภายในของแข็งที่มีรูพรุน เช่น อิฐ จะเสมือนมีหลอด capillary ขนาดต่างๆ เป็นจำนวนมาก ด้วยแรง capillary suction force ที่เกิดจากแรงตึงผิวของน้ำ จะดึงดูดน้ำไว้ในสภาพ capillary water เมื่อการอบดำเนินไป น้ำ capillary water นี้จะเคลื่อนที่ไปในสถานะของเหลว เหลือแต่น้ำ suspended water ในช่องว่าง น้ำที่เหลือนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปในสถานะของเหลวได้ โดยทั่วไปจะระเหยเป็นไอไปในช่วงการอบด้วยอัตราเร็วลดลง ณ ตำแหน่งเดิม แล้วไอน้ำจะแพร่ไปในรูเล็กๆ ออกไปที่พื้นผิว

ของแข็งผิวละเอียด : กรณีที่มีอนุภาคคอลลอยด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1 μm แขวนลอยอยู่ในน้ำ ระหว่างอนุภาคจะมีแรงผลักทางไฟฟ้าซึ่งเกิดจากประจุขั้วเดียวกันบนพื้นผิวอนุภาค ซึ่งจะทำพยายามให้อนุภาคอยู่ห่างจากกันและดูดน้ำเข้ามา แรงดึงดูดนี้เรียกว่า osmotic suction force

4.7.3.2 วัสดุ hydrophilic

หมายถึงวัสดุที่พื้นผิวของแข็งที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุมีสมบัติดูดความชื้น หรือวัสดุที่ตัวของแข็งเองมีสมบัติ Adsorption กับน้ำ โดยน้ำที่เกาะอยู่บนผิวของวัสดุเหล่านี้จะมีลักษณะดังนี้ ถ้าวัสดุนั้นมีลักษณะ

<u>ของแข็งมีรูพรุน</u> : น้ำที่มีอยู่ในช่องว่างในวัสดุในช่วงความชื้นสูงจะเป็นน้ำอิสระ ซึ่งมีพฤติกรรมเหมือนกับกรณีของวัสดุ non-hydrophilic เมื่ออัตราความชื้นลดลง น้ำอิสระนี้จะหายไปก่อน หลังจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ และระเหยของน้ำ bonding water (น้ำ adsorption water และ absorption water) ความดันไอของน้ำนั้นจะขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิและอัตราความชื้น

<u>วัสดุที่มีลักษณะเป็น Cytoplasm</u>: กรณีที่เซลล์หนึ่งๆ อิ่มตัวอยู่ด้วยน้ำอย่างเพียงพอ ทั้ง cytoplasm และช่องว่างภายในเซลล์จะอิ่มตัวไปด้วยน้ำ เมื่ออัตราความชื้นลดลง น้ำในช่องว่างภายในเซลล์จะหายไปก่อน หลังจากนั้นน้ำใน cytoplasm ซึ่งจะเริ่มหายไป และ cytoplasm จะเกิดการหดตัว

4.7.3.3 วัสดุเนื้อเดียว (Homogenous)

โมเลกุลน้ำในวัสดุเนื้อเดียว เช่น สารละลายไฮโพลิเมอร์ สบู่ ฯลฯ โดยทั่วไปจะละลาย หรือเกิด Affinity กับองค์ประกอบของแข็ง ขณะที่น้ำมีความเข้มข้นสูง จะมีความดันไอเกือบเท่ากับน้ำอิสระ แต่เมื่อน้ำมีความเข้มข้นลดลง ความดันไอจะลดลงอย่างรวดเร็ว และปริมาตรของวัตถุดิบจะหดตัวจนมีค่าเท่ากับปริมาตรเมื่อไม่มีน้ำ

4.7.4 อัตราเร็วในการอบ (Drying rate)

4.7.4.1 อัตราเร็วในการอบคงที่

ในช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ ปริมาณความร้อนที่ได้รับทั้งหมดจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้น เกิดเป็นสภาพสมดุลจลน์ขึ้น โดยวัตถุดิบจะมีอุณหภูมิคงที่ที่ T_m และอัตราเร็วในการอบจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขภายนอกเป็นส่วนใหญ่ คืออุณหภูมิ T และความชื้น H ของลมร้อน อัตราเร็วในการอบคงที่ R_A จะสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_A = -\frac{W}{A}\frac{d\omega}{d\theta} = k_H(H_m - H) \cong \frac{\alpha}{\lambda}(T - T_m) \qquad (4.41)$$

ในที่นี้สัญลักษณ์ θ แทนเวลา [s] สัญลักษณ์ α แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [W/(m^2·K)] สัญลักษณ์ k_H แทน mass transfer coefficient [kg/(s·m^2·(kg-น้ำ/kg-อากาศแห้ง))] สัญลักษณ์ λ แทนความร้อนแฝงของการระเหย [J/kg-น้ำ]

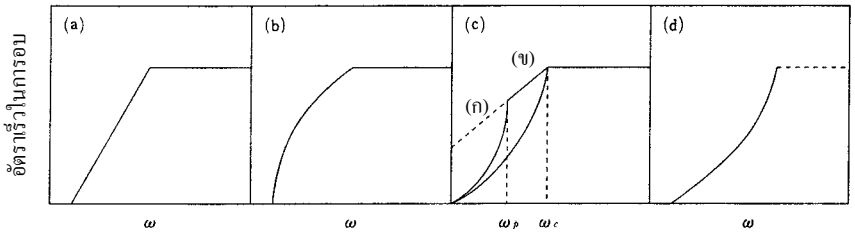
กรณีที่ได้รับความร้อนจากลมร้อนเท่านั้น T_m จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก T_w ของลมร้อน

$$R_A = \frac{\alpha(T - T_w)}{\lambda} \qquad (4.42)$$

อัตราเร็วในการอบจะคำนวณได้จากสูตรข้างต้น ในที่นี้ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ λ [J/kg-น้ำ] จะใช้ค่าที่อุณหภูมิ T_w (อุณหภูมิกระเปาะเปียก)

4.7.4.2 อัตราเร็วในการอบด้วยอัตราเร็วลดลง

อัตราเร็วในการอบวัตถุดิบของแข็ง จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุดิบ และเงื่อนไขการอบ แต่รูปร่างของเส้นกราฟคุณลักษณะการอบในช่วงอัตราเร็วลดลงนี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขภายใน ได้แก่ ลักษณะของวัตถุดิบ สมบัติของความชื้นภายในวัตถุที่มีอยู่ ฯลฯ มากกว่าเงื่อนไขการอบภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วของลมร้อน ฯลฯ เมื่อทำการวัดเส้นกราฟอัตราเร็วในช่วงอัตราเร็วลดลงของวัสดุต่างๆ จะแบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังรูป 4.34



รูปที่ 4.34 เส้นกราฟอัตราเร็วในการอบในช่วงอัตราเร็วลดลง

ในจำนวนประเภทต่างๆ ข้างต้น รูป (a) จะพบได้ในกรณีที่อนุภาคของวัตถุดิบมีน้ำอยู่ในรูปที่ค่อนข้างเป็นอิสระ กล่าวคือ การอบหยดของเหลว เยื่อบาง อนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 mm เป็นต้น รูป (b) พบได้ในอนุภาคขนาดจิ๋วที่มีสมบัติ non-hydrophilic หรือวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นๆ เป็นต้น ทั้งรูป (a) และ (b) เป็นวัสดุที่น้ำจะเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าด้วยแรง capillary ช่วงอัตราเร็วลดลงขั้นที่ 1 รูป (d) โดยมากจะพบในการอบสารเนื้อเดียว เช่น สบู่ กาว เจลาติน ฯลฯ ซึ่งไม่มีช่วงอบด้วยอัตราคงที่ โดยอัตราความชื้นที่ผิวจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเท่ากับอัตราความชื้นสมดุลกับลมร้อน หลังจากนั้น การแพร่ของน้ำภายในวัตถุดิบจะมีอิทธิพลเด่นชัดที่สุด การอบรูป (c) วัตถุดิบมีสมบัติระหว่าง (a), (b) กับ (d) โดยช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะมี 2 ช่วง คือหลังจากเกิดช่วงอัตราเร็วลดลงขั้นที่ 1 แล้วจะเข้าสู่ช่วงอัตราเร็วลดลงขั้นที่ 2 โดยกรณี (ก) จะพบในวัสดุที่มี osmotic water เช่น ดินเหนียว และกรณี (ข) เป็นรูปที่ทั่วไปที่สุด พบได้ในวัสดุหล่อ ชั้นตะกอน เป็นต้น

ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการอบโดยคร่าวๆ สำหรับรูป (a), (b) จะแปรผันตามความหนาของวัสดุ ขณะที่รูป (d) จะแปรผันตามความหนาของวัตถุดิบกำลังสอง ส่วนรูป (c) จะอยู่ระหว่างทั้งสองแบบข้างต้น

4.7.5 ประเภทของเครื่องอบกับการเลือกใช้

4.7.5.1 ขั้นตอนการเลือก

ลักษณะของวัตถุดิบที่จะนำมาอบจะมีความหลากหลาย ในการเลือกตู้อบจะยึดตามลักษณะความชื้นของวัตถุดิบเป็นหลัก หลังจากนั้นจึงพิจารณาถึงปริมาณการผลิต รูปแบบของกระบวนการ (ต่อเนื่องหรือ batch) รวมทั้งคุณลักษณะของกระบวนการ และคุณลักษณะของตู้อบ เพื่อกำหนดเงื่อนไขการเดินเครื่อง พิจารณาขนาดกำลังการผลิตของตู้อบ เลือกอุปกรณ์ประกอบต่างๆ รวมทั้งเครื่องป้อน-ถ่ายวัตถุดิบออกจากตู้อบ แล้วคำนวณค่าเครื่องจักร และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง เมื่อออกแบบพื้นฐานได้เป็นรูปธรรมแล้วยังต้องทำการทดสอบอบภายใต้เงื่อนไขที่ใกล้เคียงที่สุดกับเงื่อนไขการอบที่คาดการเอาไว้อีกด้วย ในการทดสอบจะทำการตรวจสอบคุณลักษณะการอบ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ พฤติกรรมของวัตถุดิบภายในเครื่องอบ ฯลฯ ผลจากการทดสอบ อาจทำให้ต้องย้อนกลับไปพิจารณาเลือกชนิดของตู้อบใหม่เลยก็ได้ การทดสอบจะเป็นสิ่งที่สำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ไม่สามารถคาดการเกี่ยวกับคุณลักษณะของวัตถุดิบได้

4.7.5.2 การแบ่งประเภท

ตาราง 4.5 จะแบ่งประเภทตู้อบเอาไว้ตามวิธีการรับความร้อน และสภาพของวัตถุดิบภายในตู้อบ ในจำนวนตู้อบประเภทต่างๆ จะมีสมบัติที่สำคัญดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 เครื่องอบประเภทต่างๆ

	สภาพของวัตถุดิบ	เครื่องอบ	การเดินเครื่อง	กระแสของลมร้อน	กำลังผลิต	วัตถุดิบที่เหมาะสม	
						ดีมาก	ดี
รับความร้อนด้วยลมร้อน	ปลิวไปกับลมร้อน	flash dryer	ต่อเนื่อง	กระเจิง	สูง	2, 3	
		spray dryer	ต่อเนื่อง	กระเจิง	สูง	1, 2	
	กวน	drying tumbler,through-flow drying tumbler	ต่อเนื่อง	ขนาน ไหลผ่าน กระเจิง	สูง	3, 4, 5	
		bezel stirring dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน (ขนาน)	สูง	3	
		fluidized bed dryer	batch หรือต่อเนื่อง	กระเจิง	สูง	3	
		multistage disk dryer	ต่อเนื่อง	ขนาน	สูง		3
	วางนิ่ง	tray dryer	batch	ขนาน	ต่ำ	7	2, 4
				ไหลผ่าน		2, 5, 6	3, 4, 7
	เคลื่อนที่	tunnel dryer	ต่อเนื่อง	ขนาน	สูง	2, 7, 8	4, 5, 9
		nozzle jet dryer	ต่อเนื่อง	กระแสชนกัน	สูง	8, 9	
		band dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	สูง	2, 5, 6	3, 4, 7
		turbo dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	สูง	3	
		vertical dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	สูง	3, 4	
รับความร้อนด้วยการนำความร้อน	กวน	bezel, disk stirring dryer (ความดันปกติ สุญญากาศ)	batch หรือต่อเนื่อง		ต่ำ	2, 3	
		steam heated tube bundle drying tumbler	ต่อเนื่อง		สูง	3, 4, 5	
	วางนิ่ง	vacuum,freeze tray dryer	batch		ต่ำ	10	2, 3
	เคลื่อนที่	drum dryer	ต่อเนื่อง		ต่ำ	1, 2	
		multi-disk dryer	ต่อเนื่อง		สูง	8	
อื่นๆ	เครื่องอบอินฟราเรด		batch หรือต่อเนื่อง		ทั้งต่ำและสูง	9	8
	เครื่องอบไมโครเวฟ		batch หรือต่อเนื่อง		ทั้งต่ำและสูง		7

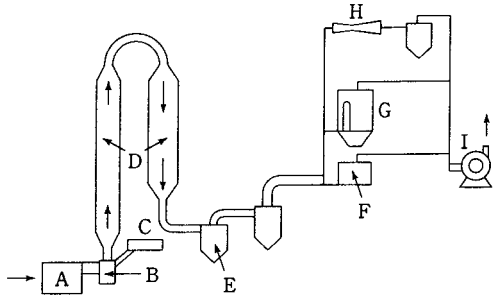
(หมายเหตุ) ประเภทของวัตถุดิบ 1. วัตถุดิบที่เป็นของเหลวหรือ Slurry 2. วัตถุดิบที่เป็นครีม 3. วัตถุดิบที่เป็นผง 4. วัตถุดิบที่เป็นก้อน 5. วัตถุดิบที่เป็นเกล็ด 6. วัตถุดิบที่เป็นเส้นใยสั้นๆ 7. วัตถุดิบหล่อ 8. วัตถุดิบที่เป็นแผ่นบางต่อเนื่อง 9. ผิวที่ทาเคลือบไว้ 10. วัตถุดิบแช่แข็ง

(1) วิธีรับความร้อนด้วยลมร้อน

(1.1) ตู้อบแบบแฟลช (Flash dryer)

ตู้อบแบบนี้จะใช้วิธีเป่าวัตถุดิบที่เป็นผงชื้นเข้าไปในกระแสลมอุณหภูมิสูงภายในท่อตั้งลมจะเป่าวัตถุดิบให้ปลิวฟุ้งเพื่ออบให้แห้งอย่างรวดเร็ว ผงวัตถุดิบเมื่อแห้งแล้วจะลอยออกไปกับลมร้อน และเข้าสู่กระบวนการแยกด้วยการกรอง หรือใช้ไซโคลนอีกขั้นตอนหนึ่ง ตู้อบชนิดนี้เป็นมีโครงสร้างง่ายที่สุด แต่เนื่องจากมีระยะเวลาอบสั้นเพียงไม่กี่วินาที จึงไม่เหมาะกับการอบขั้นสุดท้าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัตถุดิบจะปลิวฟุ้งอยู่ในกระแสอากาศ อัตราความชื้นวิกฤตจึงมีค่าต่ำมาก นอกจากนั้น ยังเดินเครื่องด้วยกระแส

ราบเรียบ จึงสามารถใช้ลมร้อนอุณหภูมิสูง 400-600°C ได้ ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพความสูง รูป 4.35 แสดงตัวอย่างของเครื่องอบแบบนี้

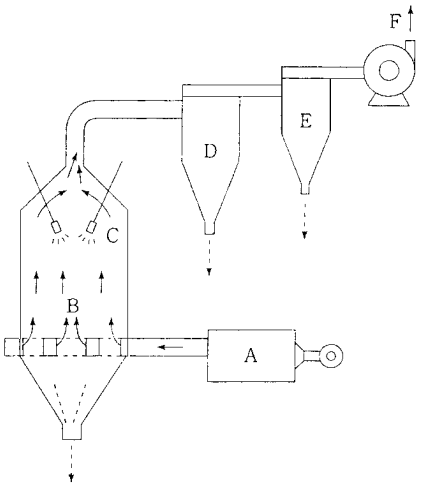


A.	hot blast stove	E.	cyclone
B.	beater หรือ disperser	F.	Cottrell dust collector
C.	เครื่องป้อนวัตถุดิบ	G.	bag filter
D.	flash tube (ท่อขึ้นหรือท่อลง)	H.	ventury scrubber
		I.	exhaust fan

รูปที่ 4.35 เครื่องอบ flash dryer

(1.2) ตู้อบแบบสเปรย์ (Spray dryer)

วิธีอบของเครื่องอบแบบสเปรย์ จะใช้กับสารละลาย และวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้น (slurry) และครีม ดังนั้น จึงมีวิธีการแตกต่างไปจากวิธีอบน้ำที่เกาะบนอนุภาคทั่วไป โดยนำวัตถุดิบเหล่านี้ไปพ่นเป็นละอองในกระแสอากาศให้ความร้อน เพื่อให้แห้งเป็นผงก่อนที่จะตกลงมา เนื่องจากในช่วงแรกวัตถุดิบจะมีอัตราความชื้นสูง จึงต้องใช้ปริมาณความร้อนในการระเหยต่อผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วยมวลที่มีค่าสูง แต่การอบจะเสร็จสิ้นในเวลารวดเร็วมาก และอนุภาคของผลิตภัณฑ์จะไม่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิสูง วิธีนี้จึงสามารถอบสารที่ไม่เสถียรต่อความร้อนได้ ทำให้ได้อนุภาคเป็นเม็ดกลมกลางอากาศ และยังสามารถปรับขนาดของอนุภาคได้สะดวกด้วยการปรับหัวพ่นละออง และด้วยสมบัติที่ดีเหล่านี้ จึงนำตู้อบแบบนี้มาใช้กับการอบอาหาร ผงซักฟอก เป็นต้น หลักการทำงานแสดงไว้ในรูป 4.36



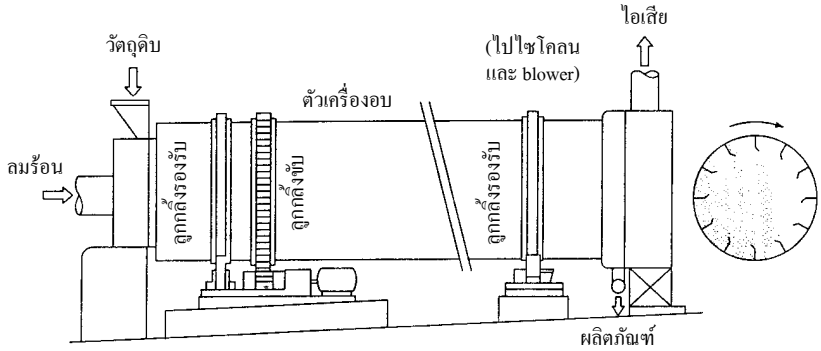
A.	hot blast stove	D.	primary cyclone
B.	spray dryer	E.	secondary cyclone
C.	pressure nozzle	F.	exhaust fan

รูปที่ 4.36 ตู้อบ spray dryer

(1.3) ตู้อบ Drying tumbler

ตู้อบ Drying tumbler เป็นเครื่องอบแบบต่อเนื่องที่สำคัญแบบหนึ่ง การเดินเครื่องจะมีเสถียรภาพสูง ใช้กับการอบผงวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำ (ปุ๋ยถ่านหินสีอนินทรเป็นต้น) และมีปริมาณวัตถุดิบมาก

หลักการทำงานแสดงไว้ในรูป 4.37 โดยภายในทรงกระบอกซึ่งวางเอียงจะมีครีบสำหรับกวนวัตถุดิบ และเพื่อให้วัตถุดิบสัมผัสกับลมร้อนที่เป่าเข้ามา ทิศทางการป้อนวัตถุดิบ และลมร้อนแบ่งเป็นแบบสวนทาง (countercurrent flow) กับแบบป้อนทางเดียวกัน (concurrent flow) วัตถุดิบในตู้จะหล่นลงมาจากครีบกวนเพื่อสัมผัสกับลมร้อนเป็นครั้งๆ



รูปที่ 4.37 เครื่องอบ drying tumbler

ตู้อบแบบ Concurrent flow วัตถุดิบจะสัมผัสกับลมร้อนอุณหภูมิสูง แต่อุณหภูมิของวัตถุดิบจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนนั้น ที่ส่วนท้ายของเครื่องอบซึ่งวัตถุดิบเกือบแห้งแล้ว จะมีการลดอุณหภูมิของลมร้อนลง จึงช่วยรักษาคุณภาพของวัตถุดิบได้ แต่จะทำให้ลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ให้ต่ำลงมากๆ ได้ยาก แต่ถ้าใช้ตู้อบแบบ countercurrent flow จะสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำได้ตามต้องการ แต่ไม่เหมาะสมจะใช้กับวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อน เพราะจะวิธีนี้จะทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิสูงอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของตู้

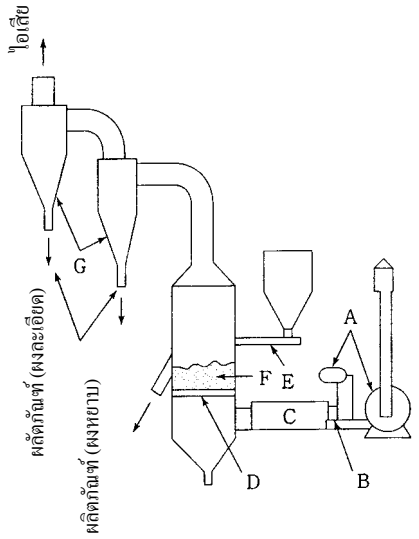
(1.4) ตู้อบแบบ Fluidized bed dryer

ใช้วิธีเป่าลมร้อนเข้าไปจากด้านล่างของชั้นวัตถุดิบที่เป็นผงที่วางบนแผ่นที่มีรูพรุน เพื่อให้ผงวัตถุดิบลอยขึ้นและมีการเคลื่อนไหวเสมือนตัวมันเป็นของไหล ตัวอย่างแสดงไว้ในรูป 4.38 ตู้อบแบบนี้จะมีจุดเด่นดังต่อไปนี้

- ผงวัตถุดิบจะสัมผัสกับก๊าซอย่างรุนแรงจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง และเนื่องจากอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรของผงวัตถุดิบมีค่ามาก จึงมีการถ่ายเทความร้อนรวมได้มาก
- แต่ละอนุภาคจะกระทบกันอย่างรุนแรงในขณะที่ถูกกวนไปมา ทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ
- ระยะเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในเครื่องอบสามารถปรับให้เป็นเท่าใดก็ได้ จึงเหมาะกับวัตถุดิบที่ต้องใช้เวลานานในการอบหรือผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราความชื้นต่ำ

ส่วนข้อเสียมีดังต่อไปนี้

- ไม่สามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงและมีการเกาะตัว / รวมตัวสูง เพราะจะไม่สามารถทำให้เกิดสภาพ Fluidized ได้
- อนุภาคจะกระเด็นออกมาพร้อมกับก๊าซได้ง่าย
- แผ่นกระจายก๊าซและ Fluidized bed ทำให้เกิดความดันสูญเสียสูงจึงต้องใช้ blower เพื่อเป่าอากาศที่มีกำลังสูง

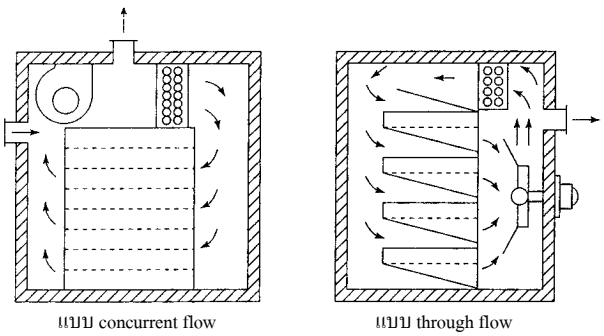


A. blower
B. burner
C. air heater
D. fluidized bed baseplate
E. เครื่องป้อนวัตถุดิบ
F. Fluidized bed
G. Cyclone

รูปที่ 4.38 ตู้อบแบบ fluidized bed dryer

(1.5) ตู้อบแบบถาด (Tray dryer)

ตู้อบแบบนี้ จะนำวัตถุดิบวางไว้ในถาด ตะแกรง หรือแผ่นที่มีรูพรุน แล้วเป่าลมร้อนขนานไปกับผิวหน้าวัตถุดิบ หรือเป่าตั้งฉากกับก้นถาดที่ยอมให้ลมผ่านได้ ลมร้อนจะผ่านเข้าไปในชั้นวัตถุดิบ เนื่องจากจะใช้ลมร้อนที่มีความเร็วไม่สูงนัก วัตถุดิบจึงยังอยู่นิ่ง ไม่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือการกระแทกใดๆ ไม่เกิดความเสียหายจากการแตกหัก ตู้อบแบบนี้จะทำงานแบบกะ (Batch) จึงเหมาะกับวัตถุดิบที่ต้องการอบด้วยการควบคุมภายใต้เงื่อนไขการอบเข้มงวด หรืออบวัตถุดิบหลายๆ ชนิดแต่จำนวนน้อยๆ หรือใช้กับการควบคุมแบบโปรแกรมซึ่งค่อยๆ ปรับอุณหภูมิไปตามความเหมาะสม รูป 4.39 แสดงตัวอย่างของ tray dryer



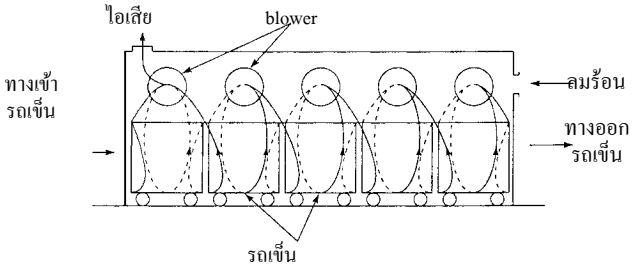
รูปที่ 4.39 เครื่องอบ tray dryer

(1.6) ตู้อบแบบอุโมงค์ (Tunnel dryer) และ แบบสายพาน (band dryer) แบบต่อเนื่อง

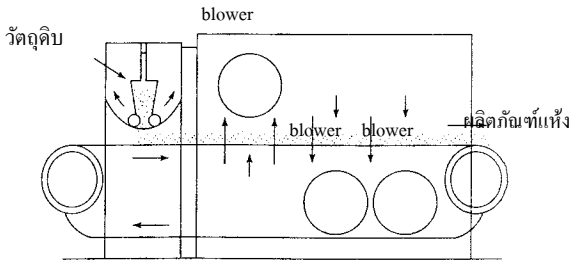
ตู้อบแบบอุโมงค์ จะมีรถเข็น (รูป 4.40) สำหรับเข็นพาวัตถุดิบเข้าในอุโมงค์ แต่ถ้าวัตถุดิบเป็นแผ่นบาง เช่น กระดาษ จะสอดวัตถุดิบผ่านลูกกลิ้งบน-ล่าง ให้ลูกกลิ้งดึงวัตถุดิบเข้าไป แล้วเป่าลมร้อนให้วัตถุดิบเพื่ออบให้แห้ง

ตู้อบแบบสายพานลำเลียง จะวางวัตถุดิบไว้บนสายพานที่ทำจากแผ่นโลหะหรือยางที่มีรูพรุน ซึ่งถูกขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ผ่านมู่เลย์ เพื่อให้วัตถุดิบเคลื่อนตัวสัมผัสกับลมร้อนแล้วทำการอบอย่างต่อเนื่อง รูป 4.41 แสดงเครื่องอบแบบสายพานลำเลียง

ในเครื่องอบแบบอุโมงค์ และ แบบสายพานลำเลียง จะมีการติดตั้ง Blower ที่ส่วนต่างๆ ของเครื่องอบ แล้วใช้ blower แต่ละตัวในการดูดหรือระบายลมร้อนเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการอบ หรือมีการพ่นลมร้อนส่วนหนึ่งแบบ Concurrent flow หรือ Countercurrent flow กับวัตถุดิบเพื่อหมุนเวียนลมร้อนด้วย blower แต่ละตัว



รูป 4.40 เครื่องอบ tunnel dryer



รูปที่ 4.41 เครื่องอบ through-flow band dryer

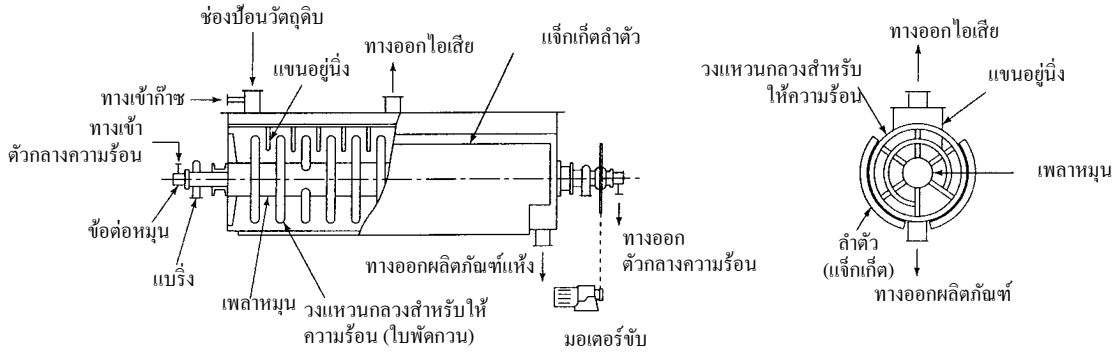
(1.7) ตู้อบ Nozzle jet dryer

เป็นตู้อบที่ใช้อบวัตถุดิบลักษณะแผ่นบางหรือของเหลวที่เคลือบผิวหน้าวัตถุ โดยการพ่นลำลมร้อนจาก Slot หรือ nozzle ลงไปให้ตั้งฉากกับเป้าหมาย วัตถุดิบจะถูกอบระหว่างที่เคลื่อนที่ไปบนลูกกลิ้ง แต่จะเป็นการอบเพียงด้านเดียว ซึ่งจะแบ่งเป็นแบบ arch vent แบบสายพานนอน ส่วนในการอบสองด้านจะใช้แบบ floating

(2) วิธีรับความร้อนด้วยการนำความร้อน

(2.1) ตู้อบแบบ Bezel stirring dryer

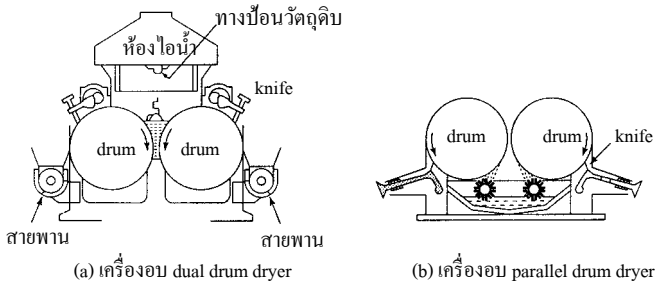
ตู้อบนี้จะมีของเหลวซึ่งเป็นตัวกลางให้ความร้อนไหลอยู่ในใบพัดและแจ็คเก็ตซึ่งข้างในกลวง ขณะที่ให้ความร้อนจะมีการกวน โดยตัวใบพัดกวนจะทำหน้าที่เป็นพื้นผิวถ่ายเทความร้อน พื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรภาชนะจึงมีค่าสูง ไม่ต้องใช้ลมแรง ดังนั้นจึงสามารถระบายอากาศออกได้ง่าย และมีประสิทธิภาพความร้อนสูง ตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ตู้อบแบบ bezel stirring dryer

(2.2) เครื่องอบแบบถังหมุน Drum dryer

เครื่องอบ Drum dryer เป็นเครื่องอบที่ทำหน้าที่อบวัตถุดิบที่เป็นของเหลว เป็นครีม หรือเป็นโคลนให้แห้งจนเป็นของแข็ง โดยป้อนวัตถุดิบที่ต้องการให้ทำให้แห้งมาเคลือบเป็นชั้นบางที่ผิวหน้าของถังหมุน ขณะที่ถังกำลังหมุน จะมีการป้อนไอน้ำเข้าไปภายในถังหมุน ความร้อนจะส่งผ่านผนังถัง ส่วนวัตถุดิบที่แห้งแล้วจะถูกขูดออกโดยใช้ knife edge การอบแบบนี้จะใช้เวลาในการอบสั้น และมีอัตราเร็วในการอบสูงจึงได้เปรียบกว่าในการใช้กับวัตถุดิบที่เสื่อมสภาพจากความร้อนได้ง่าย รูป 4.43แสดงเครื่องอบ drum dryer

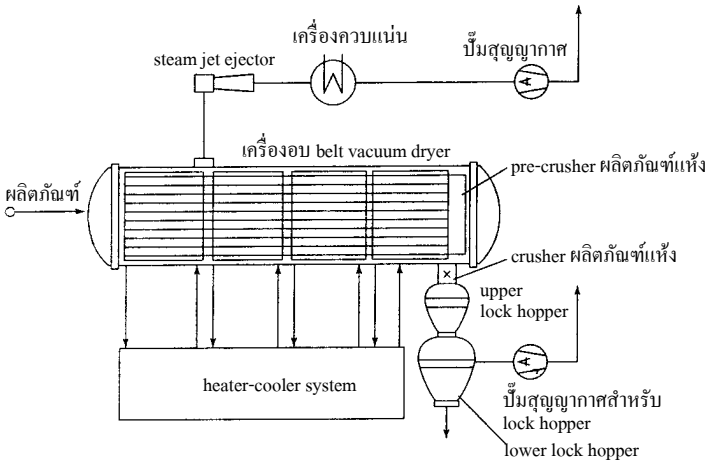


รูปที่ 4.43 เครื่องอบ drum dryer

(2.3) เครื่องอบภายใต้สุญญากาศ (Vacuum dryer)

เครื่องอบ vacuum dryer จะใช้หลักการว่า เมื่อวางวัตถุดิบที่จะอบไว้ในสุญญากาศอ่อนๆ แล้วให้ความร้อน ผลต่างความดันระหว่างความดันไอของตัวทำละลายกับสุญญากาศที่ผิวหน้าตัวทำละลายจะทำให้ตัวทำละลายในวัตถุดิบระเหยเป็นไอออกมา และเนื่องจากอุณหภูมิระเหยจะขึ้นอยู่กับระดับความเป็นสุญญากาศ ดังนั้น จึงเหมาะกับวัตถุดิบที่เสื่อมสภาพง่ายต่อความร้อน จึงใช้การอบแบบนี้ในอุตสาหกรรมเวชภัณฑ์และอาหาร โดยทั่วไปอุตสาหกรรมเวชภัณฑ์จะมีการผลิตเป็นจำนวนไม่มาก จึงมักเดินเครื่องอบแบบ

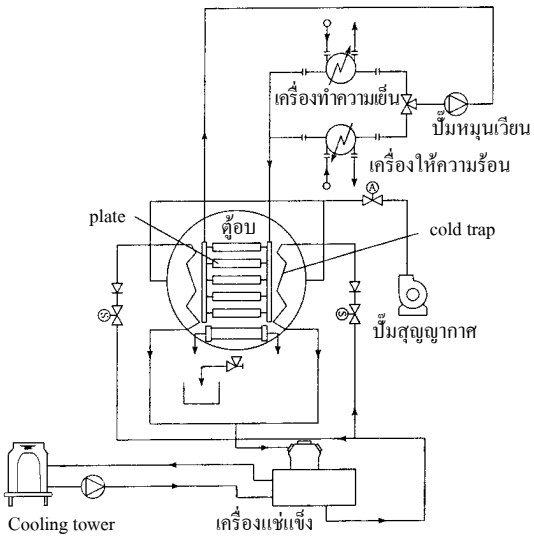
batch และใช้การอบบนถาด ส่วนในอุตสาหกรรมอาหาร ในแง่ของความคุ้มทุนจะต้องผลิตเป็นจำนวนมาก ส่วนมากจึงใช้เครื่องอบต่อเนื่องแบบลำเลียงด้วยสายพาน (รูปที่ 4.44)



รูปที่ 4.44 เครื่องอบ vacuum dryer แบบต่อเนื่อง

(2.4) เครื่องอบ Freeze dryer

เมื่อนำวัตถุดิบที่มีน้ำอยู่ไปแช่แข็งที่อุณหภูมิประมาณ –30°C จนน้ำในวัตถุดิบแข็งตัวเป็นน้ำแข็ง แล้วนำไปวางไว้ในสุญญากาศอ่อนๆ แล้วให้ความร้อนเพียงเล็กน้อย ผลึกน้ำแข็งในวัตถุดิบนั้นจะระเหิดกลายเป็นไอในระยะเวลาอันสั้น เครื่องอบที่ใช้ปรากฏการณ์ระเหิดโดยไม่ผ่านสถานะของเหลวนี้ เรียกว่า เครื่องอบ vacuum freeze dryer (รูป 4.45) โดยจะทำงานในสภาพที่วัตถุดิบแช่แข็งอยู่ ดังนั้น จึงใช้กับการอบวัตถุดิบที่เสี่ยมสภาพได้ง่ายต่อความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งได้นำมาใช้กันมากในการอบเวชภัณฑ์ จุลินทรีย์ อาหารที่มีสรรพคุณเฉพาะทางซึ่งไม่ต้องการให้เปลี่ยนสภาพด้วยความร้อน รวมทั้งการอบอาหารที่เน้นเรื่องกลิ่นหอม เช่น กาแฟสำเร็จรูป หรือการอบอาหารที่มีของแข็งรวมอยู่ด้วย เช่น แกงสำเร็จรูป เป็นต้น



รูปที่ 4.45 เครื่องอบ vacuum freeze dryer

(3) วิธีให้ความร้อนอื่นๆ

(3.1) เครื่องอบอินฟราเรด เครื่องอบไมโครเวฟ

การแผ่รังสีอินฟราเรด และแผ่รังสีไมโครเวฟเป็นการปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีอินฟราเรดจะใช้ช่วงความยาวคลื่น 0.76-1000 μm ส่วนไมโครเวฟมีความยาวคลื่น 1-1000 mm (โดยทั่วไปเราจะแสดงความถี่ด้วยความยาวคลื่น ซึ่งเทียบเท่ากับความถี่ 300 MHz-300 GHz) ทั้งนี้ เนื่องจากความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันถึงแสนเท่า กลไกการกำเนิดความร้อน และอุปกรณ์ต่างๆ จึงมีความแตกต่างกันอย่างมาก

ในการแผ่รังสี Near infrared ซึ่งใช้หลอดไฟอินฟราเรด รังสีจะทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบได้น้อยมาก ตั้งแต่อดีตที่ผ่านมาจึงใช้ในการอบน้ำยาเคลือบ หมึกพิมพ์ หรือกาว

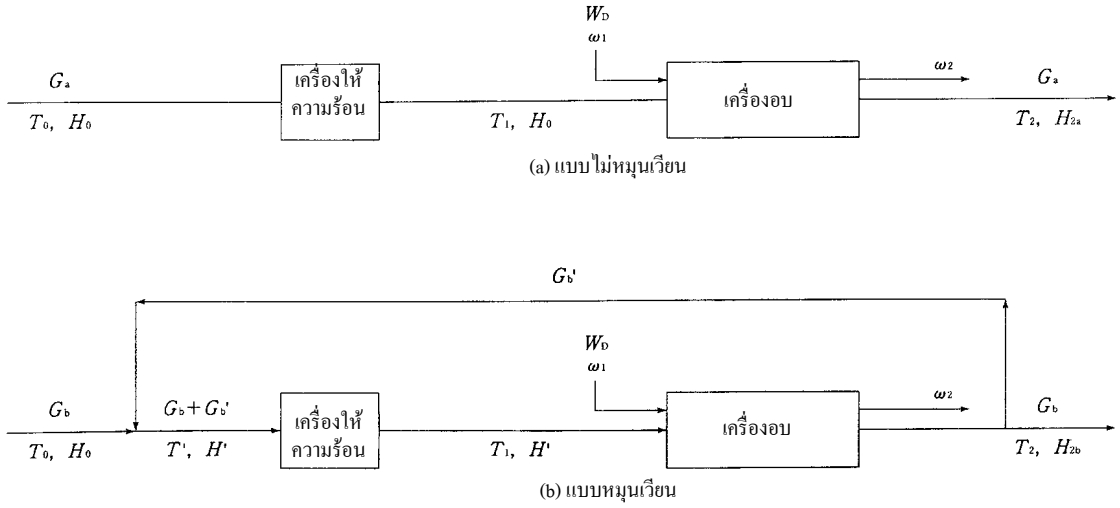
รังสี Far infrared หรือคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัตถุได้มาก หากใช้ในการอบช่วงอัตราเร็วลดลงจะมีประสิทธิผลสูง และสามารถป้องกันการให้ความร้อนมากเกินไปในช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลงได้ จึงใช้ในการอบเวชภัณฑ์และอาหารต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน มีการอบอาหารด้วย far infrared กันมาก

การป้อนความร้อนแฝงในการระเหยที่ต้องใช้ในการอบในรูปพลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดจะทำให้ต้นทุนสูง ดังนั้น จึงมักใช้ร่วมกับการอบด้วยลมร้อนหรืออบด้วยการนำความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในช่วงระเหยน้ำจากผิวหน้าซึ่งวัตถุดิบยังมีอัตราความชื้นสูงอยู่จะใช้วิธีอบด้วยลมร้อน เมื่ออัตราความชื้นลดต่ำลง และพื้นผิวระเหยเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบแล้ว จึงนำการอบด้วยการแผ่รังสีเหล่านี้มาใช้ร่วมด้วย จะทำให้ภายในวัตถุดิบมีอัตราความชื้นสม่ำเสมอ และเพิ่มอัตราเร็วในการอบให้สูงขึ้น

4.7.6 สมดุลความร้อนของเครื่องอบกับประสิทธิภาพความร้อน

4.7.6.1 วิธีรับความร้อนด้วยลมร้อน

ต่อไปนี้จะใช้เครื่องอบด้วยลมร้อนแบบมีการเปลี่ยนแปลงความดัน (Diabatic) ดังรูป 4.46 (a) โดยจะคำนวณสมดุลความร้อนระหว่างวัตถุดิบกับลมร้อน ในการอบนั้นความชื้นจะดูดความร้อนแฝงเพื่อระเหยเป็นไอ จึงต้องคำนึงถึงสมดุลของความชื้นด้วย



รูปที่ 4.46 การอบด้วยลมร้อน 2 วิธี

ถ้าให้ปริมาณลมร้อนที่เป่าเข้าไปในเครื่องอบเท่ากับ G_a [kg-อากาศแห้ง/s] ให้ความชื้นของลมร้อนเท่ากับ H_0 ให้ความชื้นของอากาศชื้นที่ระบายออกเท่ากับ H_{2a} แล้ว ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัตถุดิบ W_D ($\omega_1 - \omega_2$)

$$G_a(H_{2a} - H_0) = W_D(\omega_1 - \omega_2) \tag{4.43}$$

ในที่นี้ สัญลักษณ์ W_D แทนความเร็วในการป้อนวัตถุดิบโดยไม่คิดน้ำหนักความชื้น [kg/s] สัญลักษณ์ ω_1, ω_2 แทนความชื้นในวัตถุดิบที่คิดแบบ dry basis ก่อนและหลังการอบวัตถุดิบ

ต่อไปจะมาพิจารณาสมดุลความร้อน โดยปริมาณความร้อน q [W] ที่ถูกใช้ไปในเครื่องอบ จะเท่ากับผลบวกระหว่างปริมาณความร้อน q_E ที่ต้องใช้ในการระเหยความชื้น กับความร้อนสัมผัส q_H ที่ให้แก่วัตถุดิบเพื่อให้มีอัตราความชื้นตามที่ต้องการ และความร้อนสูญเสีย q_L ดังนั้น ถ้าให้ความร้อนจำเพาะ (humid heat) ของลมร้อนเท่ากับ c_H แล้ว จะทำดุลความร้อนในเครื่องอบ ได้ดังนี้

$$q = q_E + q_H + q_L = G_a(h_1 - h_2) \cong G_a c_H (T_1 - T_2) \tag{4.44}$$

ส่วนปริมาณความร้อน q_T [W] ที่ได้รับจากเครื่องให้ความร้อนจะเท่ากับสมการข้างล่าง

$$q_T = G_a(h_1 - h_0) \cong G_a c_H (T_1 - T_0) \tag{4.45}$$

ประสิทธิภาพความร้อน η ของเครื่องอบจะเท่ากับผลบวกระหว่างปริมาณความร้อน q_E ที่ต้องใช้ในการระเหยความชื้นกับความร้อนสัมผัส q_H ที่ให้แก่วัตถุดิบเพื่อให้มีอัตราความชื้นตามที่ต้องการ หารด้วยปริมาณความร้อน q_T ที่ต้องใช้ในการอบ

$$\eta = \frac{q_E + q_H}{q_T} \tag{4.46}$$

เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีความร้อนสูญเสีย q_L จากสมการ (4.44) และ (4.45) จะได้ว่า

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \tag{4.47}$$

ตัวอย่างของเครื่องอบแบบนี้ได้แก่ drying tumbler, flash dryer, spray dryer ฯลฯ ซึ่งสามารถใช้ลมร้อนอุณหภูมิสูงได้

โดยทั่วไป ในเครื่องอบแบบอุโมงค์และแบบสายพานลำเลียง ซึ่งใช้ลมร้อนมีอุณหภูมิต่ำแต่มีปริมาณมาก จึงมักจะนำไอร้อนชื้นที่ระบายออกส่วนหนึ่งมาผสมกับอากาศภายนอกเพื่อนำความร้อนกลับมาใช้และเพิ่มประสิทธิภาพความร้อน ด้วยวิธีการหมุนเวียนเช่นนี้ จากสมดุลในทำนองเดียวกับสมการ (4.44) และ (4.45) จะได้ว่า

$$q = (G_b + G'_b) c_H (T_1 - T_2) \tag{4.48}$$

$$q_T = (G_b + G'_b) c_H (T_1 - T') \tag{4.49}$$

ดังนั้น ในกรณีที่ไม่มีความร้อนสูญเสีย ประสิทธิภาพความร้อนจะเท่ากับสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T'} \tag{4.50}$$

เมื่อเปรียบเทียบเครื่องอบแบบหมุนเวียนลมร้อนกับแบบไม่หมุนเวียนโดยให้อุณหภูมิและปริมาณของลมร้อนที่เข้าออกเครื่องอบมีค่าเท่ากันแล้ว จากสมดุลที่จุดผสม หาก $T_2 > T_0$ แล้ว จะพบว่า $T' > T_0$ ดังนั้นเครื่องอบแบบหมุนเวียนจึงมีประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่า อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถกล่าวได้เสมอไปว่า

เครื่องอบแบบหมุนเวียนจะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่า เนื่องจากความชื้นระหว่างการอบในเครื่องอบแบบหมุนเวียนจะมีค่าสูงกว่าอากาศภายนอก ดังนั้น หากเพิ่มสัดส่วนของไอร้อนที่นำไปผสมกับอากาศภายนอกแล้ว ความชื้นจะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราเร็วในการอบมีค่าต่ำลงและต้นทุนเครื่องจักรจะสูงขึ้น ดังนั้น จึงต้องหาค่าสัดส่วนที่จะนำไปหมุนเวียนที่เหมาะสมที่สุดโดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายรวม

4.7.6.2 วิธีรับความร้อนด้วยการนำความร้อน

วิธีรับความร้อนด้วยการนำความร้อน โดยทั่วไปจะถ่ายเทความร้อนทางอ้อมจากแหล่งความร้อนผ่านผนังโลหะให้แก่วัตถุดิบที่จะอบ จะใช้ลมร้อนเพื่อการลำเลียงไอระเหยที่เกิดขึ้นเท่านั้น จึงมีความร้อนสูญเสียน้อย และมีประสิทธิภาพความร้อนสูง วิธีรับความร้อนด้วยลมร้อนจะมีประสิทธิภาพความร้อน 30-60% แต่วิธีรับความร้อนด้วยการนำความร้อนจะมีประสิทธิภาพความร้อนสูงถึง 70-90% และยิ่งวัตถุดิบมีอัตราความชื้นสูงเท่าใด ประสิทธิภาพความร้อนจะสูงขึ้นเท่านั้น

4.7.7 การคำนวณขนาดของเครื่องอบโดยเบื้องต้น

เมื่อหาค่าปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการอบได้แล้วยิ่งเครื่องอบมีปริมาตรเล็กเท่าใด ก็แสดงว่าสมรรถนะในการอบยิ่งสูงเท่านั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเครื่องอบที่มีปริมาตรเท่ากัน เครื่องอบที่อบวัตถุดิบแห้งเร็วกว่าจะมีสมรรถนะสูงกว่า

ในเครื่องอบที่รับความร้อนด้วยลมร้อน ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท q [W] จะเท่ากับ

เดินเครื่องแบบ Batch $q = \alpha a V (T - T_m)_{lm}$ (4.51)

เดินเครื่องต่อเนื่อง $q = \alpha a V (T_k - T_m)_{lm}$ (4.52)

ส่วนเครื่องอบแบบรับความร้อนด้วยการนำความร้อนทั้งแบบ Batch และต่อเนื่อง

$$q = UA (T_k - T_m)_{lm} \quad (4.53)$$

โดยสัญลักษณ์ V แทนปริมาตรของเครื่องอบ [m^3] สัญลักษณ์ T แทนอุณหภูมิของลมร้อน [K] สัญลักษณ์ T_m แทนอุณหภูมิของวัตถุดิบ [K] สัญลักษณ์ $(T - T_m)_{lm}$ แทนค่าเฉลี่ยล็อกการิทึมของผลต่างอุณหภูมิระหว่างลมร้อนกับวัตถุดิบที่ทางเข้า และทางออกเครื่องอบ สัญลักษณ์ αa แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตร [W/(m^3·K)] สัญลักษณ์ U แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [W/(m^2-พื้นที่ให้ความร้อนที่สัมผัสกับวัตถุดิบ·K)] สัญลักษณ์ A แทนพื้นที่ให้ความร้อนที่สัมผัสกับวัตถุดิบ [m^2] สัญลักษณ์ T_k แทนอุณหภูมิของแหล่งความร้อน [K]

การลดค่า V หรือ A ที่จำเป็นในการให้ความร้อนที่กำหนดทำได้ดังต่อไปนี้

(1) เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตร αa [W/(m^3·K)]

(2) เพิ่มผลต่างอุณหภูมิระหว่างลมร้อนกับวัตถุดิบหรือระหว่างแหล่งให้ความร้อนกับวัตถุดิบ โดยคำนึงถึงอุณหภูมิที่วัตถุดิบรับได้ด้วย

(3) สำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง ทำการกวนหรือเป่าให้ฟุ้งกระจายในลมร้อนให้ดีขึ้น เป็นต้น

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตร αa จะขึ้นอยู่อย่างมากกับวิธีการสัมผัสระหว่างวัตถุดิบกับลมร้อนและกับประเภทของเครื่องอบ ตัวอย่างเช่น กรณีของตู้อบแบบถาด ที่เป็นชนิดให้อากาศไหลทางเดียวกับวัตถุดิบ จะมีค่า 200-350 W/(m^3·K) แต่ตู้อบแบบสายพานลำเลียงที่มีอากาศร้อนพัดตั้งฉากกับการไหลของวัตถุดิบจะมีค่าสูงกว่า คือประมาณ 800-2300 W/(m^3·K)

4.7.8 มาตรการอนุรักษ์พลังงาน

การอบเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ความร้อนในปริมาณค่อนข้างมาก มาตรการอนุรักษ์พลังงานของเครื่องอบจึงมีความสำคัญมาก ความร้อนสูญเสียที่สำคัญในเครื่องอบมีดังต่อไปนี้

(1) ความร้อนที่ออกไปกับอากาศที่ออกจากตู้อบ

(2) ความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีจากเครื่องอบ

(3) ความร้อนสูญเสียจากการรั่วของอากาศร้อนจากช่องว่างต่างๆ ของเครื่องอบ

ดังนั้น จึงต้องตรวจสอบการใช้ความร้อนของเครื่องอบและประเภทของการสูญเสียความร้อนให้ชัดเจนแล้วดำเนินมาตรการลดการสูญเสียความร้อนด้วยการหุ้มฉนวน หรือนำไอร้อนความดันต่ำกลับมาใช้ประโยชน์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีการข้างต้นก็ยังมีขีดจำกัด โดยพื้นฐานแล้ววิธีนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ควรจะมีการพิจารณาเชิงโครงสร้างตั้งแต่ในขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้

(1) ในกรณีที่มีกระบวนการรีดน้ำก่อนนำไปอบ ควรจะรีดน้ำด้วยวิธีเชิงกลให้มีอัตราความชื้นต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ การรีดน้ำเชิงกลนี้เช่น การหมุนเหวี่ยงวัตถุดิบ(Centrifugation) การกรอง การรีดน้ำด้วยวิธีเชิงกลแม้ว่าจะมีต้นทุนเครื่องจักรสูง แต่ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องจะต่ำกว่าการอบมาก

(2) ในช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ วัตถุดิบจะมีอุณหภูมิต่ำตลอดเวลา และการถ่ายเทความร้อนจึงมีประสิทธิผลดี ดังนั้น จึงควรกวนหรือเป่าวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผงให้ฟุ้งกระจายไปในลมร้อน เพื่อลดอัตราความชื้นวิกฤตให้มีค่าต่ำลง

(3) พยายามเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรหรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าสูงสุดเท่าที่จะทำได้ เมื่อทำเช่นนั้นแล้วตัวกลางให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิที่ทางออกต่ำลง ทำให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงขึ้น

(4) ในเครื่องอบแบบใช้ลมร้อน ควรนำไอร้อนที่ปล่อยออกจากตู้อบส่วนหนึ่งมาหมุนเวียนเท่าที่ปริมาตรของเครื่องอบจะยอมให้ทำได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนให้สูงขึ้น

4.7.9 สัญลักษณ์

A พื้นที่ผิวในการอบแห้ง

c_H ความร้อนจำเพาะของลมร้อน, humid heat

G อัตราการไหลของอากาศแห้ง

h ความชื้นของอากาศ

k_H สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

q อัตราการถ่ายเทความร้อนในการอบแห้ง

R_A อัตราการอบแห้งจำเพาะ

T อุณหภูมิสัมบูรณ์

U สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

W มวลของวัตถุดิบแห้ง

α_a สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตร

η ประสิทธิภาพความร้อน

θ เวลา

λ ความร้อนแฝงของการระเหย

ω ความชื้นในวัตถุดิบ

ω_d ความชื้นในวัตถุดิบคิดบนพื้นฐานของน้ำหนักแห้ง

ω_w ความชื้นในวัตถุดิบคิดบนพื้นฐานของน้ำหนักเปียก

สรุป

ในบทนี้ได้แนะนำถึงหอกลั่นและอุปกรณ์ประกอบ เช่น เครื่องควบแน่น และหม้อต้มซ้ำ และเครื่องอบแห้ง เมื่ออ่านบทนี้จบ ผู้อ่านควรจะรู้จักเทอมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกลั่น เช่น สมดุลของเหลว-ไอ, ความสามารถในการระเหยสัมพัทธ์ (Relative volatility), Reflux ratio เป็นต้น โดยเนื้อหาในบทนี้จะสามารถสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

- ระบบการกลั่น และหลักการของการกลั่น จะอาศัยความสามารถในการระเหยเป็นไอของสาร 2 ชนิด ที่ต่างกัน ของของผสมแต่ละชนิด เมื่อให้ความร้อนแก่ของเหลวผสม สารที่มีจุดเดือดต่ำระเหยง่าย ก็จะกลายเป็นไอขึ้นไป ในสัดส่วนที่มากกว่าสารอีกตัว เมื่อนำไอนี้มาควบแน่น ก็จะได้ของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในสัดส่วนที่ มากกว่า หรือเรียกได้ว่าบริสุทธิ์กว่าของเหลวผสมเริ่มต้น
- การกลั่นลำดับส่วนจะช่วยให้ของเหลวที่กลั่นได้มีความบริสุทธิ์มากกว่าเดิมเพราะอาจถือได้ว่าเป็นการนำของเหลวที่กลั่นแล้วมากลั่นซ้ำอีกหลายๆ ครั้งที่อุณหภูมิต่างๆ กันไป
- การกลั่นมีได้หลายระบบนอกเหนือจากการกลั่นแบบปกติ หรือการกลั่นลำดับส่วน เช่น การกลั่นโดยเติม สารบริสุทธิ์อีกตัวผสมลงไปเพื่อเปลี่ยนค่าความสามารถในการระเหยสัมพัทธ์ (relative volatility), การ กลั่นสาร azeotrope, การกลั่นที่มีปฏิกิริยาร่วม เป็นต้น ซึ่งการเลือกใช้การกลั่นแต่ละระบบก็จะเหมาะกับ คู่สารผสมที่ต่างกัน ออกไป
- การอนุรักษ์พลังงานของหอกลั่นจะทำได้หลายทาง เช่น การปรับ reflux ratio, การนำเอาความร้อน ที่ได้ จากการควบแน่นผลิตภัณฑ์มาอุ่นสารในสายป้อน หรือการใช้ muti-effect เป็นต้น
- นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้ความร้อนในการระเหย เพื่อทำให้สารเริ่มต้นเข้มข้นขึ้น โดยใช้เครื่องระเหย โดยความร้อนที่ให้ในการระเหยต้องเอาชนะความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ของ ตัวทำละลายนั้นได้ (ส่วนมากจะเป็นน้ำ)
- การทำดุลสารเคมี และดุลความร้อนในหม้อระเหย จะต้องเข้าใจหลักการของการระเหย และต้องคำนึง ถึงปริมาณ และอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ถังระเหยการทำดุลความร้อนนี้ ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ4.3.3
- เครื่องระเหยมีได้หลายชนิด ตั้งแต่ หม้อระเหยแบบมาตรฐาน, หม้อระเหยแบบ basket, หม้อระเหย แบบฟิล์ม เป็นต้น การเลือกใช้เครื่องระเหยนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลวที่ต้องการระเหยความหนืดของของเหลว และการให้ความร้อน ส่วนอุปกรณ์ประกอบเครื่องระเหยอัน ได้แก่ เครื่องระบายอากาศ - ลดความดัน และเครื่องควบแน่น มีไว้เพื่อช่วยให้การใช้เครื่องระเหยเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงานที่ต้องใช้
- วิธีการปรับเปลี่ยนลำดับของสายป้อนเข้าสู่หม้อระเหย และการควบคุมหน้าสัมผัส ถ่ายเทความร้อน จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้เร็วขึ้น และมากขึ้น ซึ่งความเข้าใจในเรื่องนี้ จะนำ ไปสู่แผนการใช้พลังงาน ได้อย่างคุ้มค่า

ส่วนในหัวข้อการอบแห้งนั้นจะกล่าวถึง อัตราเร็วในการอบ และเส้นกราฟแสดงสมบัติการอบและกลไกการอบที่สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะที่มีลักษณะแตกต่างกันคือ (I) ช่วงอุ่นวัตถุดิบ (II) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ (III) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง

- อุปกรณ์อบแห้งมีหลายประเภท การเลือกใช้เครื่องอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุที่ต้องการอบแห้งนั้น
- อัตราเร็วของการอบจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ปริมาณน้ำในวัตถุดิบ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุดิบกับลมร้อน อุณหภูมิและความชื้นของลมร้อน รวมทั้งความหนาของชั้นวัตถุดิบด้วย

- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเครื่องอบแห้ง จะเกิดได้จากการนำความร้อนเป็นหลัก แต่ก็มีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนร่วมด้วยก็ได้
- การอนุรักษ์พลังงานในการอบ อาจทำด้วยการรีดน้ำออกให้มากที่สุดก่อนเข้าตู้อบ การใช้ลมร้อนขาออกบางส่วนมาผสมกับอากาศร้อนขาเข้า และให้มีการกวนหรือการผสมให้วัตถุดิบได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ