

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แอลกอฮอล์

โดยทั่วไปแอลกอฮอล์ที่ใช้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.1.1 เมทิลแอลกอฮอล์หรือเมธานอล (methyl alcohol or methanol) เป็นแอลกอฮอล์ที่ได้จากก๊าซธรรมชาติและการสังเคราะห์ทางเคมี มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{CH}_3\text{OH}$  ไม่สามารถจะนำมาบริโภคได้ เมธานอลมีการกัดกร่อนและระเหยง่ายกว่าเอทานอลและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์มากกว่าเอทานอล

2.1.2 เอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอล (ethanol alcohol or ethanol) เป็นแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่งที่เป็นสารอินทรีย์สามารถรับประทานได้ เกิดจากการหมักพืชหรือสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนแป้งจากพืชให้เป็นน้ำตาลแล้วเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ เอทานอลที่พบกันทั่วไปได้แก่ สุรา ไวน์ เบียร์ สาเก เป็นต้น เอทานอลมีสัญลักษณ์ทางเคมีเป็น  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  มีคุณสมบัติเป็นของเหลวไม่มีสี และจุดไฟติด โดยทั่วไปเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

- มีเนื้อแอลกอฮอล์ไม่น้อยกว่า 99.38 % โดยทั่วไปมีน้ำเจือปนไม่เกิน 0.5%
- เป็นสารละลายที่ไม่มีสี ระเหยง่าย
- จุดเดือด 78.3 องศาเซลเซียส
- จุดเยือกแข็ง - 117.3 องศาเซลเซียส
- ความถ่วงจำเพาะ 0.786 ที่ 16 องศาเซลเซียส
- ให้ค่าความร้อน (Calorific value) 12,800 Btu/lbm
- สามารถละลายในน้ำ และสารอินทรีย์อื่นๆ ได้ดี

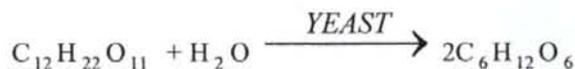
### 2.2 การผลิตเอทิลแอลกอฮอล์

การผลิตเอทิลแอลกอฮอล์ในชั้นอุตสาหกรรมนั้น ทำได้ 2 วิธีคือ

1. การสังเคราะห์ (synthesis) โดยที่ใช้เอทิลีน (ethylene) เป็นวัตถุดิบ โดยใช้ในกระบวนการ hydrolysis คือ นำเอทิลีนมาทำปฏิกิริยากับน้ำโดยใช้กรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) หรือ กรดฟอสเฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำให้ได้เอทิลแอลกอฮอล์แล้วนำมาทำให้บริสุทธิ์

2. การหมัก (fermentation) เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด และเป็นวิธีที่ใช้ในประเทศไทยในปัจจุบัน วัตถุดิบที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ กากน้ำตาล (molasses) ประเภท blackstrap ซึ่งเป็นผลพลอยที่ได้จากการผลิต

น้ำตาล กากน้ำตาลประเภทนี้มีน้ำตาลประมาณ 55% โดยน้ำหนักซึ่งจำนวน 35% - 40% เป็นน้ำตาลซูโครส (sucrose) และอีก 15% - 20% เป็นพวกน้ำตาลกลูโคส และ ฟรุคโตส (glucose and fructose) นอกจาก กากน้ำตาลแล้วยังมีวัตถุดิบอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเอทิลแอลกอฮอล์ได้เช่น ผลผลิตทางการผลิตที่มี น้ำตาล และแป้งได้แก่ ผลไม้ต่างๆ ข้าวเหนียว ข้าวโพด มันสำปะหลัง ฯลฯ และนำทิ้งจากการผลิตเชื้อ กระจายที่ใช้ขบวนการซัลไฟต์ (waste sulfite liquors) ขบวนการผลิตเอธานอลด้วยการหมัก ซึ่งมีหลักการ ดังต่อไปนี้คือ กากน้ำตาลจะถูกนำมาผสมน้ำเพื่อลดความเข้มข้นของน้ำตาลให้เหลือประมาณ 10% - 15% เดิม กกรดกำมะถันเพื่อลดค่า pH จากเดิมประมาณ 5.3 ให้เหลือระหว่าง 4 - 5 เดิมแอมโมเนียซัลเฟตลงไปเพื่อ เป็นอาหารเสริมให้แก่ยีสต์ (yeast) นำสารละลายกากน้ำตาลที่ได้มาหมักในถังหมัก (fermentor) ที่ปิดฝามิดชิด เดิมเชื้อยีสต์ที่เตรียมไว้ ลงในถังหมักประมาณ 2% ของปริมาณสารละลายกากน้ำตาล กวนในถังหมัก ตลอดเวลา แล้วยีสต์จะปล่อยน้ำย่อย (enzymes) ออกมาทำปฏิกิริยากับน้ำตาล กลายเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ ใน สภาวะที่ไร้อากาศดังสมการ



ในปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์นั้น จะเกิดความร้อนขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องระบายความ ร้อนออก โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในประเทศจะใช้วิธีการสูบน้ำเย็นขึ้นไปให้น้ำเย็นไหลขโอบรอบถัง เพื่อความคุมอุณหภูมิรอบถังหมักให้อยู่ในช่วงระหว่าง 30 - 37 องศาเซลเซียส ซึ่งในการหมักจำเป็นต้องกวน น้ำในถังตลอดเวลา เพื่อให้ปฏิกิริยาชีวเคมีในถังมีการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ ให้เกิดได้ดี ยิ่งขึ้น ช่วงหลังจากระยะเวลา 48 - 60 ชั่วโมง สารละลายในถังหมักที่เรียกว่า "น้ำสำ" มีเอทิลแอลกอฮอล์ ประมาณ 7% - 10%

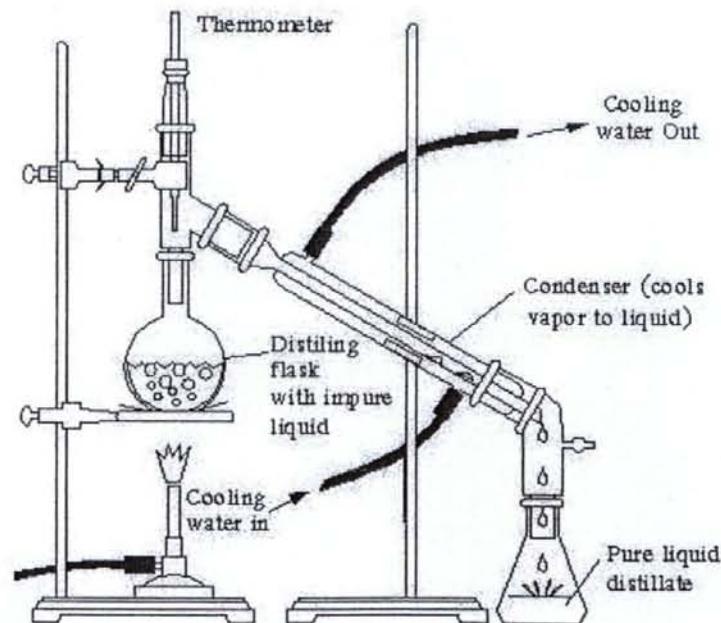
### 2.3 การกลั่นแอลกอฮอล์

การกลั่น จัดว่าเป็นวิธีที่สำคัญที่สุดวิธีหนึ่งสำหรับการทำของเหลวให้บริสุทธิ์ ไขแยกของ เหลวหรือ ของแข็งกับของเหลวที่ผสมกันเป็นสารละลายเนื้อเดียวออกจากกัน โดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือด การ กลั่นเป็นกระบวนการที่ทำให้ของเหลวได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วทำให้ควบแน่นกลับมาเป็นของเหลว อีก ในขณะที่กลั่นของผสม ของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำจะกลายเป็นไอแยกออกมาก่อน ของเหลวที่มีจุดเดือด สูงขึ้นจะแยกออกมาภายหลัง การกลั่นมีหลายประเภท เช่น

- 2.3.1 การกลั่นแบบธรรมดา
- 2.3.2 การกลั่นลำดับส่วน
- 2.3.3 การกลั่นด้วยไอน้ำ
- 2.3.4 การกลั่นแบบพิเศษ

### 2.3.1 การกลั่นแบบธรรมดา (Simple distillation)

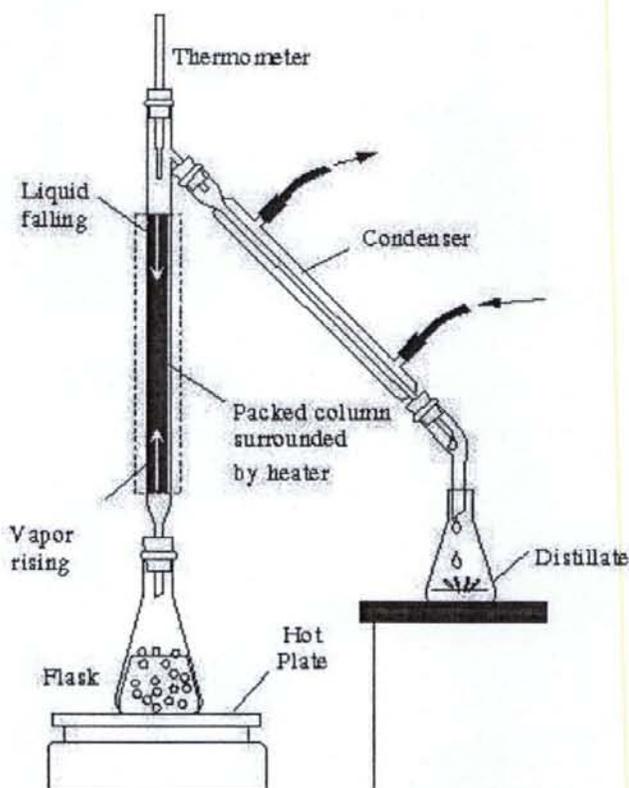
การกลั่นแบบธรรมดา เหมาะสำหรับการแยกสารละลายที่ตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยยาก และตัวถูกละลายมีจุดเดือดสูงกว่าตัวทำละลายมาก เช่น น้ำเชื่อม น้ำเกลือ นอกจากนั้นยังใช้แยกของเหลว 2 ชนิด ที่มีจุดเดือดต่างกันมาก ๆ เช่น ต่างกันมากกว่า 80 องศาเซลเซียส ออกจากกันได้ ในขณะที่กลั่นตัวทำละลายจะแยกออกมา ตัวถูกละลายจะยังคงอยู่ในขวดกลั่น ทำให้ตัวทำละลายที่บริสุทธิ์แยกออกจากสารละลายตัวอย่าง เช่น การกลั่นน้ำเกลือ ซึ่งประกอบด้วย น้ำ (จุดเดือด 100 องศาเซลเซียส) และเกลือโซเดียมคลอไรด์ (จุดเดือด 1,413 องศาเซลเซียส) เมื่อสารละลายได้รับความร้อนจะมีแต่ น้ำ เท่านั้นที่กลายเป็นไอออกมา เมื่อไอน้ำผ่านเข้าไปในเครื่องควบแน่นซึ่งมีน้ำเย็นไหลเวียนตลอดเวลา ไอน้ำจะควบแน่นได้ของเหลว คือ น้ำที่บริสุทธิ์ออกมา ในขณะที่เกลือยังคงอยู่ในสารละลายในขวดกลั่น ถ้ายังคงกลั่นต่อไปจนแห้งจะเหลือแต่เกลืออยู่ในขวดกลั่น จึงทำให้สามารถแยกน้ำกับเกลือออกจากกันได้



รูปที่ 2.1 การกลั่นแบบธรรมดา

### 2.3.2 การกลั่นลำดับส่วน (Fractional distillation)

การกลั่นลำดับส่วนเหมาะสำหรับกลั่นแยกของเหลวที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน การจำแนก  
ระหว่างการกลั่นแบบธรรมดา กับการกลั่นลำดับส่วน ด้วยความใกล้เคียงหรือแตกของจุดเดือด หรือแยก  
สารละลายที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยง่ายทั้งคู่ ซึ่งถ้ากลั่นแบบธรรมดา เพียงครั้งเดียว  
จะได้สารที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น การกลั่นน้ำผสมเอทานอล ต้องกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จึงจะได้เอทานอลที่มีความ  
บริสุทธิ์เพิ่มขึ้นทุกครั้ง แต่ในทางปฏิบัติแทนที่จะนำของเหลวไปกลั่นซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งจะทำให้  
สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและใช้เวลานาน จึงได้นำไปกลั่นในคอลัมน์ลำดับส่วนหรือในหอกลั่น ซึ่งทำหน้าที่  
เหมือนกับเป็นการกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง การกลั่นในหอกลั่นนี้เรียกว่า การกลั่นลำดับส่วน เช่น การกลั่น  
น้ำมันดิบหรือน้ำมันปิโตรเลียม



รูปที่ 2.2 การกลั่นแบบลำดับส่วน

ข้อสังเกต : 1. เมื่อสารระเหยออกมาแล้วเราก็จะมีตัวควบแน่นหรือ Condenser ทำหน้าที่ให้สารนั้น  
ควบแน่นกลับเป็นของเหลวอีกครั้ง ซึ่งจะใช้น้ำเย็นหล่อ โดยน้ำจะเข้าทางด้านล่างและไหลออกทางด้านบน  
ดังรูป เพราะถ้าให้น้ำเข้าข้างบน น้ำก็จะไหลออกหมด โดยยังไม่ทันทำให้สารควบแน่นได้เลย

2. ถ้าเราไม่มีเครื่องมือในการลำดับส่วนแต่ต้องการแยกสารที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน เราสามารถทำได้โดยใช้การกลั่นธรรมดาหลายๆครั้งแทน

3. การกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบจะต่างจากการกลั่นลำดับส่วนธรรมดา คือ กลั่นลำดับส่วนธรรมดา สารจะออกมาทีละชนิดโดยสารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะออกมาก่อน แต่การกลั่นน้ำมันดิบ สารทุกชนิดจะควบแน่นออกมาพร้อมกันแต่อยู่คนละชั้นของหอกกลั่น โดยชั้นบนจุดเดือดจะต่ำ ชั้นล่างจุดเดือดจะสูง ดังรูป



รูปที่ 2.3 ลำดับการกลั่น

4. การกลั่นลำดับส่วนบางครั้งไม่ได้แยกสารให้บริสุทธิ์ แต่แยกสารที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกันไว้ด้วยกันเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบ

5. การเลือกวิธีกลั่นว่าจะกลั่นธรรมดาหรือกลั่นลำดับส่วนปกติจะดูที่จุดเดือดเป็นหลัก ดังนั้นเราจึงประยุกต์ใช้ได้โดย ให้เราคิดว่าถ้าเรานำของเหลวนั้นไปเผาแล้วมีสารเหลืออยู่ให้ใช้วิธีกลั่นแบบธรรมดา เพราะของแข็งกับของเหลวอมมีจุดเดือดต่างกันมาก แต่ถ้าคิดว่าเผาแล้วไม่เหลือสารโดยอยู่เลยระเหยไปหมดก็ให้ใช้การกลั่นลำดับส่วนแทน

### 2.3.3 การสกัดโดยการกลั่นด้วยไอน้ำ (Steam distillation)

การกลั่นด้วยไอน้ำเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งของการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำละลาย ละลายสารและพาสารที่ต้องการออกจากของผสมได้ ส่วนใหญ่การกลั่นด้วยไอน้ำมักจะใช้สกัดสารอินทรีย์ออกจากส่วนต่าง ๆ ของพืชที่อยู่ตามธรรมชาติ เช่น การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากตะไคร้ ใบมะกรูด เป็นต้น หลักการที่สำคัญ การสกัดโดยการกลั่นด้วยไอน้ำอาศัยหลักการที่ว่า "สารที่ต้องการสกัดจะต้องระเหยได้ง่าย สามารถให้ไอน้ำพาออกมาจากของผสมได้ และสารที่สกัดได้จะต้องไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำหรือไม่ละลายน้ำนั่นเอง (ถ้าของเหลวที่กลั่นได้ละลายน้ำ หรือรวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำจะต้องนำไปกลั่นแยกอีกครั้งหนึ่ง) หลังจากสกัดด้วยไอน้ำแยกออกมาจากของผสมแล้ว ของเหลวจะแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นหนึ่งเป็นน้ำ อีกชั้นหนึ่งเป็นสารที่ต้องการ ซึ่งสามารถใช้กรวยแยก แยกออกจากกัน

### 2.3.4 การกลั่นแบบพิเศษ

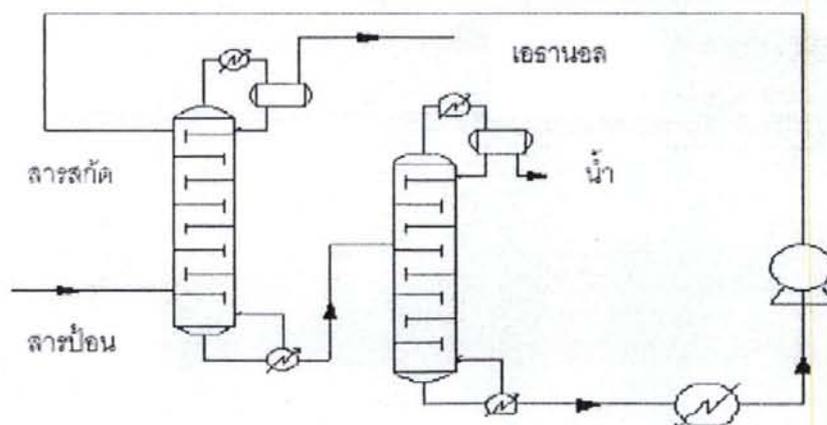
#### 2.3.4.1 การดูดซับน้ำจากสารละลายเอธานอลด้วยสารดูดความชื้น (liquid phase absorption)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ของแข็งที่เป็นผงละเอียดเป็นตัวดูดความชื้น และมีโครงสร้างผิวที่ดูดซับน้ำได้ดีกว่าเอธานอล ในอดีตนิยมใช้ปูนขาว (lime stone) เป็นตัวดูดความชื้น ในระยะต่อมาก็มีการพัฒนาใช้สารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะใช้สารดูดความชื้นชนิดไหน ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันกันว่าวิธีนี้ที่สิ้นเปลืองสารดูดความชื้น(ในกรณีที่ใช้แล้วทิ้ง) และสิ้นเปลืองพลังงานในงานการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (สารที่ดูดน้ำได้ดี ก็ย่อมยากที่จะแยกน้ำออกจากสารที่ดูดความชื้น ไปแล้วนั้น เพื่อให้นำสารกลับมาใช้ใหม่ได้)

#### 2.3.4.2 การกลั่นแบบ azeotropic (Azeotropic Distillation)

การกลั่นแบบ azeotropic (Azeotropic Distillation) เป็นวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมมานานแล้วแต่ยังเป็นที่ยอมรับกันอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศบราซิลซึ่งจัดได้ว่ามีการใช้เชื้อเพลิงเอธานอลอย่างแพร่หลาย ก็ยังใช้การกลั่นแบบนี้ในสัดส่วนที่เกินกว่า 80% โดยการกลั่นในลักษณะนี้ยังแยกการกลั่นออกเป็น 2 วิธีย่อย ๆ ได้ดังนี้

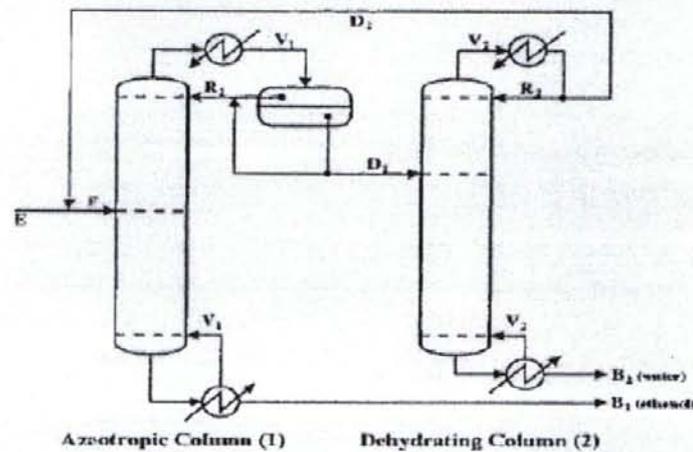
**2.3.4.2.1 Homogeneous Azeotropic Distillation** เป็นวิธีการกลั่นโดยการเติมสารสกัด (entrainer) ในสถานะของเหลวผสมกับสารละลายเอธานอลเดิม (เอธานอลก่อนการกลั่น) แล้วได้ของเหลวสถานะเดียว(single liquid phase) สำหรับวิธีนี้ยังแบ่งย่อยออกได้อีก แต่จะไม่ขอลงมาถึงทุกวิธี วิธีที่ยอมรับกันคือ การกลั่นสกัด (Extractive Distillation) สารสกัดที่เติมเข้าไปจะเป็นสารที่มีจุดเดือดสูงละลายได้ทั้งน้ำและเอธานอลและไม่เกิด Azeotrop กับทั้งน้ำและเอธานอล สารสกัดที่เติมเข้ามาจะทำให้ความสามารถในการกลายเป็นไอสัมพัทธ์ (relative volatility) เพิ่มขึ้นโดยจากการกลั่นจะได้เอธานอลบริสุทธิ์จากทางด้านบนหอกลั่น และสารละลายน้ำและสารสกัดจากทางด้านล่างหอกลั่น ซึ่งจะถูกนำไปกลั่นแยกสารสกัดออกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2.4 หอกลั่นแบบ Homogeneous Azeotropic Distillation (Dirk Muller et. al, 1998)

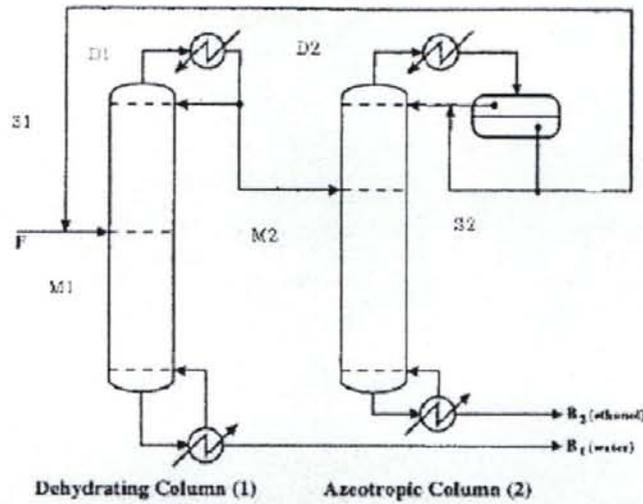
### 2.3.4.2.2 Heterogeneous Azeotropic Distillation แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

**แบบที่ 1** direct sequences เป็นการกลั่นโดยใช้หอกลั่น 2 หอ โดยที่หอแรกเป็นการกลั่นแบบอะซีโอโทรป ที่เป็นการเติมสารสกัดเข้าไปพร้อมกับสารป้อนแล้วเกิดของเหลว 2 สถานะ (รวมทั้งหมดเป็น 3 สถานะ คือ ไอ 1 สถานะ และของเหลว 2 สถานะ ) การกลั่นโดยวิธีนี้จะได้เอธานอลบริสุทธิ์ออกที่ด้านล่างของหอกลั่น และ น้ำและสารสกัด (azeotropic composition) จะออกจากทางด้านบนหอกลั่น เข้าเครื่องควบแน่น แล้วได้ของเหลวออกมา 2 สถานะที่หอแบ่งชั้น เป็นน้ำ 1 สถานะ กับสารละลายซึ่งมีสารสกัดปนอยู่มากอีก 1 สถานะ ซึ่งทั้งสองสถานะนี้จะแยกชั้นกัน แล้วเข้าสู่หอแยกสารสกัดออกจากน้ำ เพื่อนำสารสกัดมาใช้อีกครั้ง โดยที่นำมาป้อนพร้อมกับสารป้อนตั้งต้นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.5 Heterogeneous Azeotropic Distillation -direct sequences (Esbjerg et al,1998 )

**แบบที่ 2** indirect sequences เป็นการกลั่นโดยใช้หอกลั่น 2 หอ โดยที่หอแรกจะเป็นหอแยกน้ำโดยมีการเติมสารสกัดเข้าไปด้วย จะได้น้ำออกที่ด้านล่างของหอกลั่นหอที่ 1 และสารผสมระหว่างเอธานอลกับสารสกัดจะออกที่ด้านบนแล้วจะเข้าสู่หอที่ 2 เป็นการกลั่นแบบอะซีโอโทรป จะได้เอธานอลบริสุทธิ์ออกที่ด้านล่างของหอกลั่นที่ 2 น้ำและสารสกัด (azeotropic composition) จะออกจากทางด้านบนหอกลั่น เข้าเครื่องควบแน่น แล้วได้ของเหลวออกมา 2 สถานะที่หอแบ่งชั้น เป็นน้ำ 1 สถานะ กับสารละลายซึ่งมีสารสกัดปนอยู่มากอีก 1 สถานะ ซึ่งทั้งสองสถานะนี้จะแยกชั้นกัน แล้วเข้าสู่หอแยกสารสกัดออกจากน้ำ เพื่อนำสารสกัดมาใช้อีกครั้ง โดยที่นำมาป้อนพร้อมกับสารป้อนตั้งต้นดังรูปที่ 2.3

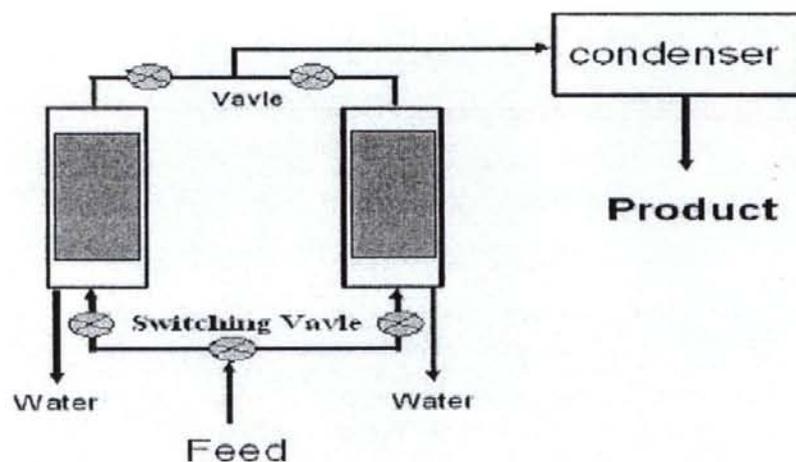


รูปที่ 2.6 Heterogeneous Azeotropic Distillation -indirect sequences (Esbjerg et al, 1998)

### 2.3.4.3 การดูดซับน้ำจากสารละลายเอทานอลในสถานะไอ โดยใช้หอดูดซับแบบสลับความดัน

#### (Pressure Swing Absorption)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ค่อนข้างใหม่ จะใช้หอดูดซับ 2 หอทำงานสลับกัน ในหอกลั่นแรกไอของเอทานอลความบริสุทธิ์ 95% (หรือน้อยกว่า) สามารถผ่านเข้ามาในหอดูดซับที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง (สูงกว่าจุดควบแน่น) ไอน้ำจะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับที่เป็นของแข็งมีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก โดยน้ำจะไปเกาะบนผิวตัวดูดซับนั้น สารดูดซับที่นิยมกันในปัจจุบันคือ Zeolite ส่วนไอของเอทานอลก็จะผ่านเลยออกจากหอดูดซับและถูกควบแน่นกลั่นตัวเป็นของเหลวไปเป็นผลิตภัณฑ์เอทานอลบริสุทธิ์ สำหรับหอที่ดูดซับน้ำจนอิ่มตัวแล้วก็จะถูกนำไปลดความดันเพื่อให้ น้ำที่ดูดซับบนผิวของตัวดูดซับระเหยกลายเป็นไอออกไป แล้วหอดูดซับที่ระเหยน้ำออกไปแล้วก็จะนำกลับมาใช้สลับกัน ไปเป็นวัฏจักร



รูปที่ 2.7 การดูดซับน้ำจากสารละลายเอทานอลในสถานะไอ โดยใช้หอดูดซับแบบสลับความดัน

#### 2.3.4.4 กระบวนการเพอแวกพอเรชัน (Pervaporation process)

เป็นกระบวนการเยื่อแผ่น (Membrane process) แบบหนึ่ง ใช้ในการแยกของเหลวผสมเหมาะสมสำหรับของเหลวผสมที่แยกได้ยากโดยวิธีการแยกแบบธรรมดา เช่น ของผสมอะซีโอโทรป (azeotropic mixture) ได้แก่ สารละลายเอทานอล-น้ำ หรือของผสมที่แต่ละองค์ประกอบมีจุดเดือดใกล้เคียงกัน การแยกผสมโดยกระบวนการเพอแวกพอเรชันสามารถทำได้ 3 ทางคือ

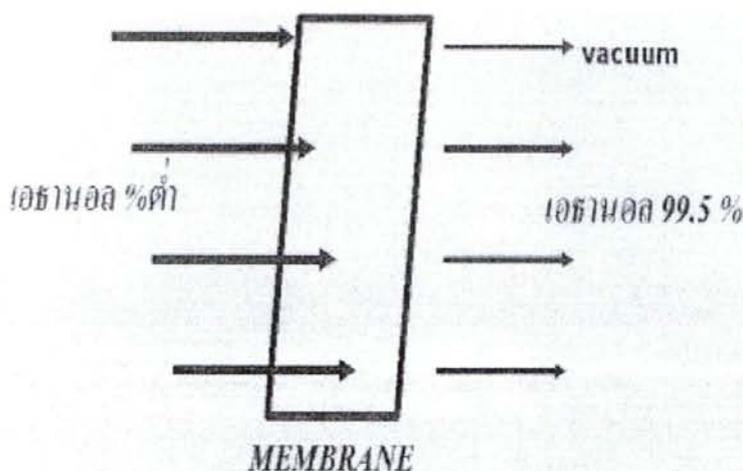
- 1) การแยกน้ำออกจากของผสมสารอินทรีย์-น้ำ
- 2) การแยกสารอินทรีย์ออกจากของผสมสารอินทรีย์-น้ำ
- 3) การแยกของผสมสารอินทรีย์

ปัจจุบันกระบวนการเพอแวกพอเรชันที่มีการประยุกต์ใช้งานแล้วในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การใช้เยื่อน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95% เพื่อผลิตเอทานอล(99.5%) แทนการกลั่นแบบอะซีโอโทรป ซึ่งมีข้อดีคือประหยัดพลังงานและไม่ต้องใช้สารเคมี แต่อย่างไรก็ตาม การนำกระบวนการเพอแวกพอเรชันไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังมีจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเยื่อแผ่นแบบอื่นๆ เช่น ออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) และไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) ในขณะที่กระบวนการเยื่อแผ่นแบบอื่นได้รับการพัฒนาจนถึงขั้นที่น่าพอใจ กล่าวคือ มีเยื่อแผ่นทางการค้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาถูกลง รวมทั้งมีเยื่อแผ่นหลากหลายชนิดที่สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารละลายที่ต้องการแยกได้ กระบวนการเพอแวกพอเรชันเป็นกระบวนการที่มีการพัฒนาช้า และยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาเยื่อแผ่นให้มีทั้งค่าฟลักซ์และค่าการแยกสูงอีก เพื่อให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากสารละลายที่ใช้แยกโดยกระบวนการเพอแวกพอเรชัน โดยมากจะมีขนาดโมเลกุลเล็ก จึงต้องใช้เป็นเยื่อแผ่นแบบแน่น (dense membrane) ทำให้ฟลักซ์มีค่าต่ำ การพยายามปรับสภาพเยื่อแผ่นด้วยวิธีการต่างๆ มักทำให้ค่าการแยกของเยื่อแผ่นลดลง การผลิตเยื่อแผ่นที่มีทั้งค่าฟลักซ์และค่าการแยกสูงจึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก เนื่องจากกลไกการแยกสารของเยื่อแผ่นและการถ่ายมวลของสารผ่านเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอแวกพอเรชัน ค่อนข้างมีความซับซ้อน เยื่อแผ่นที่เพอแวกพอเรชันใช้อยู่ในเชิงการค้ามีจำกัด ได้แก่ เยื่อแผ่นเชิงประกอบโพลีไวนิลแอลกอฮอล์บนแผ่นรองรับโพลีเอทิลีนไครลิลที่ผลิตโดย GFT(Gesellschaft for Trenntechnik,Homburg/Saar, F.R.G.) งานวิจัยส่วนใหญ่เน้นการพัฒนาเยื่อแผ่นที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับสารละลายต่างๆ ซึ่งแนวทางในการพัฒนาเยื่อแผ่นเพอแวกพอเรชันอาจทำได้หลายวิธี ได้แก่

- 1) การใช้โพลีเมอร์ชนิดใหม่
- 2) เนื่องจากโพลีเมอร์เพียงตัวเดียวมักจะไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับสารที่ต้องการแยก ได้ จึงมีการพัฒนาโพลีเมอร์ใหม่จากโพลีเมอร์ 2 ตัวหรือมากกว่าโดยเทคนิคโคโพลีเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) และ blending
- 3) การปรับสภาพของเยื่อแผ่นด้วยวิธีการทางเคมีหรือทางกายภาพ เช่น crosslinking เป็นต้น

#### 4) การเปลี่ยน morphology ของเยื่อแผ่น

เพื่อพัฒนาเยื่อแผ่นเพอแวปพอเรชันที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับการแยกน้ำจากสารละลายเอทานอล โดยจะผลิตเยื่อแผ่นจากโพลีเมอร์ผสมไคโตซาน (chitosan,CS) กับโพลีเมอร์อื่นที่มีศักยภาพ เช่น ไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส (hydroxyethylcellulose, HEC) และไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลส (hydroxypropylcellulose, HPC) โดยจะปรับสภาพเยื่อแผ่นโดยการเชื่อมขวาง (crosslinking) ด้วยสารเคมีที่เหมาะสม เช่น ฟอรัลดีไฮด์ (formaldehyde), กลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) และยูเรีย-ฟอรัลดีไฮด์ (urea-formaldehyde) นอกจากนี้จะศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเชื่อมขวาง ก็คือการเติม crosslinking agent ในสารละลายโพลีเมอร์ก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นเปรียบเทียบกับการแช่เยื่อแผ่นในสารละลาย crosslinking agent โดยมีเป้าหมายที่จะพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม



รูปที่ 2.8 กระบวนการเพอแวปพอเรชัน (Pervaporation process)

เป็นกระบวนการที่ใช้แยกน้ำออกจากเอทานอล โดยการป้อนของเหลวผสม (ถูกทำให้ร้อน) ให้ผ่านเยื่อ โดยมีระบบสุญญากาศ (vacuum) ช่วยในการทำให้ของเหลวกลายเป็นไอง่ายขึ้นแล้วจะทำให้เอทานอลลอดผ่านเยื่อได้แต่น้ำจะไม่สามารถผ่านเยื่อ

#### 2.4 หอกกลั่น (Distillation of columns)

หอกกลั่นมีมากมายหลายชนิด การออกแบบหอกกลั่นนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของการแยกของผสม และการออก และการออกแบบหอกกลั่นในแต่ละชนิดจะมีความซับซ้อนต่างกัน

2.4.1 หอกกลั่นแบบ Batch การกลั่นแบบ Batch นี้จะป้อนสารเข้าไปครั้งเดียวและให้ความร้อนเพื่อทำการกลั่น

2.4.2 หอกกลั่นแบบต่อเนื่อง (Continuous Columns) ในทางตรงกันข้าม หอกกลั่นแบบนี้จะป้อนสารเข้าอย่างต่อเนื่องและจะไม่มีปัญหาการค้างถ้าไม่มีปัญหาเกิดขึ้น การกลั่นแบบนี้เหมาะสำหรับสารที่มี

อัตราการผลิตสูง และสารที่มี 2 องค์ประกอบ ชนิดของหอกลับแบบต่อเนื่อง (Continuous Columns) แบ่งได้ดังนี้

แบ่งตามชนิดของสารป้อน

- binary column สารป้อนที่ใช้จะมี 2 องค์ประกอบเท่านั้น
- multi-component column สารป้อนที่ใช้จะมีมากกว่า 2 องค์ประกอบ

แบ่งตามจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ได้

- multi-product column จะได้ผลิตภัณฑ์มากกว่า 2 ชนิด

แบ่งตามการใช้สารช่วยแยก

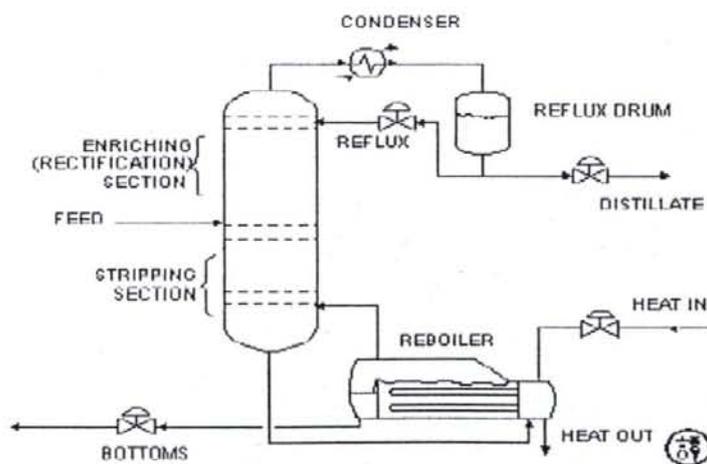
- extractive distillation สารป้อนจะป้อนทางด้านล่างของหอกลับ
- azeotropic distillation สารป้อนจะป้อนทางด้านบนของหอกลับ

แบ่งตามชนิดของคอลัมน์

- tray column
- packed column

หอกลับจะมีหลายส่วนประกอบที่สำคัญ ดังรูปที่ 2.9 แต่ละส่วนจะทำงานแตกต่างกัน เช่น ให้ความร้อน ความดันไอให้เป็นของเหลว เป็นต้น ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญ ประกอบด้วย

- reboiler ใช้สำหรับต้มกลั่นเพื่อทำให้สารผสมกลายเป็นไอ
- condenser ใช้สำหรับควบแน่นไอให้กลายเป็นของเหลว
- reflux drum นำของเหลวที่ควบแน่นจาก condenser กลับสู่หอกลับ
- column internals มีส่วนช่วยในการแยกสารผสมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น



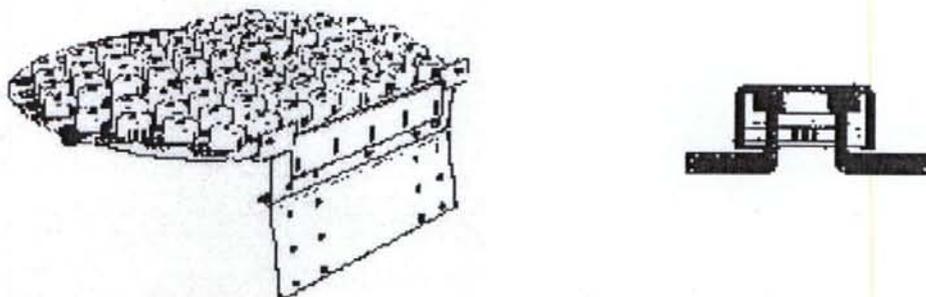
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบที่สำคัญของหอกลับ

กระบวนการกลั่นเริ่มจากของเหลวที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการกลั่นซึ่งเราจะทราบความเข้มข้นของสารที่ป้อนและส่วนใหญ่ขึ้นในการป้อนสารนั้นจะอยู่ประมาณกึ่งกลางของหอกลั่น เมื่อทำการกลั่นสารที่ระเหยง่ายจะระเหยขึ้นไปทางด้านบนของหอกลั่น ดังนั้นจะได้เปอร์เซ็นต์ของสารที่ระเหยง่ายจะมีมากที่ด้านบนของหอกลั่นส่วนของเหลวที่ยังไม่ระเหยจะไหลลงสู่ด้านล่างของหอกลั่นเพื่อทำการกลั่นซ้ำอีกครั้ง

## 2.5 ทฤษฎีการออกแบบหอกลั่น

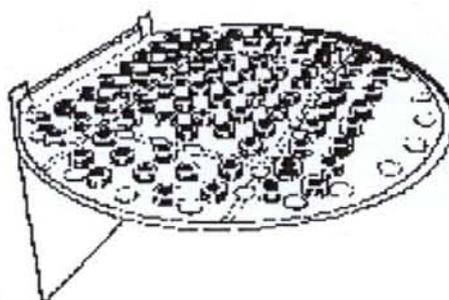
### 3.5.1 Column Internal

2.5.1.1 ถาดแบบ bubble cap ถาดแบบ bubble cap บนถาดจะมีรูซึ่งมีปล่องเชื่อมติดอยู่เพื่อให้ไอไหลผ่านขึ้นและเหนือปล่องจะมี cap ซึ่งเป็นถ้วยคว่ำติดตั้งอยู่ cap จะประกอบด้วยช่องหรือรูเพื่อให้ไอไหลผ่านไปสัมผัสกับก๊าซได้ ถาดแบบ bubble cap มีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 2.10 ถาดแบบ bubble cap (M.T. Tham, 1997-2003)

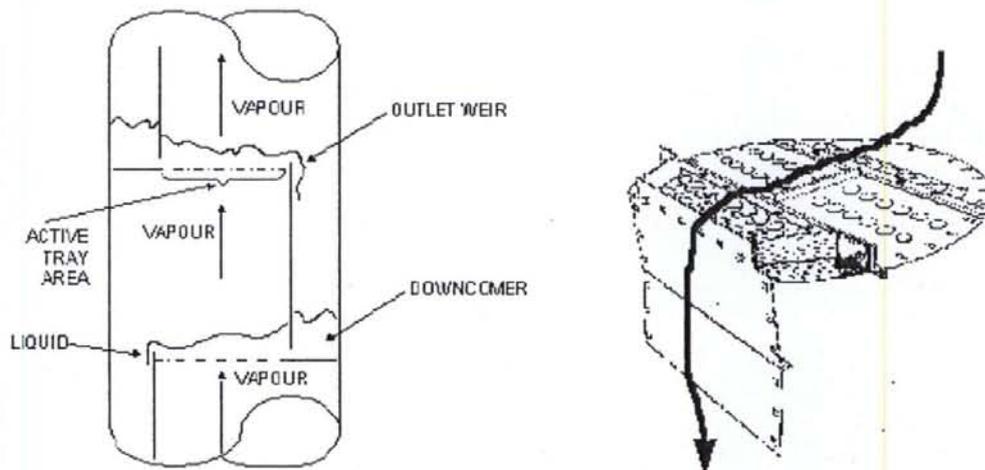
2.5.1.2 ถาดแบบ valve ถาดแบบ valve นี้อาจจัดเป็นแบบที่อยู่ระหว่างถาดแบบ bubble cap และ perforated ลักษณะของถาดเป็น cap ที่สามารถยกตัวได้ซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายออริฟิสที่ปรับขนาดได้เมื่ออัตราการไหลของไอเปลี่ยนไป วาล์วทำด้วยแผ่น โลหะกลมมีขนาดตั้งแต่ 33 มม. วาล์วจะมีขาหลายขาซึ่งขาจะจำกัดการเคลื่อนไหวในแนวตั้ง และวาล์วบางแบบจะมีระบบป้องกันการไหลของของเหลวลงสู่ด้านล่าง ในขณะที่อัตราการไหลของไอไม่เพียงพอที่จะยกวาล์ว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 2.11 ถาดแบบ valve (M.T. Tham, 1997-2003)

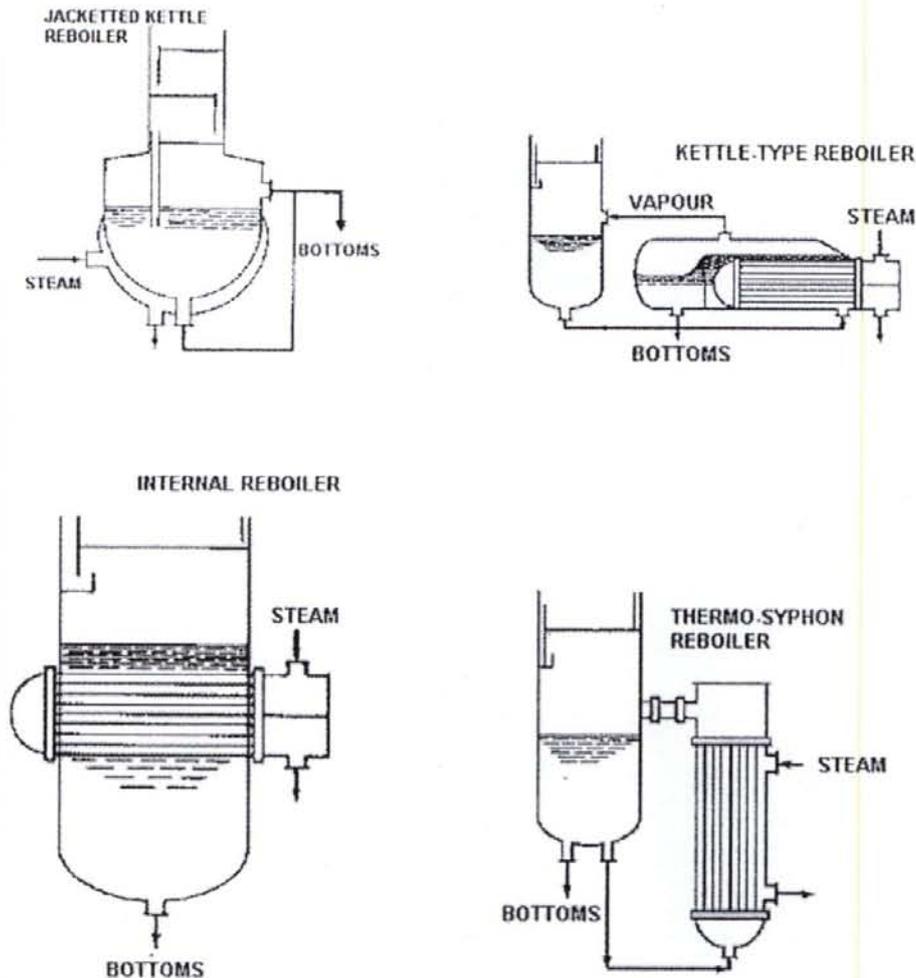
**2.5.1.3 ถาดแบบ perforate** ถาดแบบ perforate ถูกสร้างมาในลักษณะเดียวกับถาดแบบ bubble cap เว้นแต่ว่าบริเวณซึ่งเคยเป็น cap จะถูกแทนที่ด้วยแผ่นโลหะเจาะเป็นรูกลมเล็ก ไอจะไหลผ่านรูและกระจายผ่านของเหลวซึ่งไหลผ่านถาด ถาดแบบนี้สามารถทำงานได้ที่วิสัยสามารถสูงกว่าถาดแบบ bubble cap เมื่อประสิทธิภาพเท่ากัน แต่มีข้อนำวิดคือถ้าอัตราการไหลของไอมีค่ามากกว่าค่าที่ออกแบบไว้จะทำให้ของเหลวสามารถไหลผ่านรูลงไปยังถาดด้านล่างได้

**2.5.2 การไหลของ ไอและของเหลวในหอกถาด (Liquid and Vapour Flows in a Tray Column)**  
ไอกับของเหลวจะไหลสวนทางกัน โดยที่ไอจะไหลขึ้นด้านบนของหอกถาด โดยผ่านทางด้านรูที่เจาะไว้ เช่น ผ่านทางรู cap เป็นต้น ส่วนของเหลวจะไหลลงสู่ด้านล่างของหอกถาด โดยผ่านทางรูที่เรียกว่า downcomer ของเหลวจะถูกกักไว้โดยทำนบ (weir) ปกติทำนบจะมีระดับต่ำกว่าช่องภายในของ cap ป้องกันการไหลลงในรู cap แทนที่จะไหลลง downcomer เพราะถ้าของเหลวไหลลงรู cap จะทำให้ไอไม่สามารถไหลผ่านขึ้นมาได้ การไหลของไอและของเหลวจะเป็นไปตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 2.12 การไหลของไอและของเหลว (M.T. Tham, 1997-2003)

**2.5.3 Column Reboiler** Reboiler จะทำหน้าที่ในการต้มสารให้กลายเป็นไอ ซึ่งส่วนใหญ่ reboiler จะเป็นแบบ shell and tube heat exchanger เนื่องจากเครื่องทำความร้อนแบบนี้จะทำให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสกับสารผสมได้มากทำให้ของเหลวกลายเป็นไอดีมากขึ้น



รูปที่ 2.13 Reboiler ( M.T. Tham,1997-2003)

## 2.6 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

เมื่อใดก็ตามที่จุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็จะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ พลังงานที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่าความร้อน ถึงแม้ว่าวิชาเทอร์โมไดนามิกส์จะเป็นวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทของพลังงานก็ตามแต่ก็เป็นการศึกษาเฉพาะในกรณีที่ระบบความร้อนนั้นอยู่ในสภาวะที่สมดุลแล้วเท่านั้น ดังนั้นกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์จึงใช้ได้เพียงทำนายจำนวนพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบความร้อนที่อยู่ในสภาวะสมดุลจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถที่จะบอกให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเพียงไร

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่คั้นนั้นจะต้องทราบถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบต่าง ๆ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน (Conduction)

2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน (Convection)
3. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี หรือการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

ในการออกแบบระบบความร้อนและการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะต้องเข้าใจกลไกของการถ่ายเทความร้อนแต่ละแบบ และต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนแบบนั้น ๆ สำหรับในบทนี้จะพิจารณาถึงกฎเกณฑ์สำคัญๆ สูตรในการหาปริมาณความร้อน คือ

$$Q = mC_p \Delta T \quad \text{J} \quad (2.1)$$

### 2.6.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางที่บดบังแสงเมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในก้อนวัตถุนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำซึ่ง  $q$  จะเป็นสัดส่วนกับ  $\frac{dT}{dx}$  ซึ่งเป็นค่าความลาดชันของอุณหภูมิตุณกับพื้นที่  $A$  ที่ความร้อนไหลผ่าน จะเขียนเป็นสมการได้

$$q \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$q$  แทน อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน

$A$  แทน พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน

$T$  แทน อุณหภูมิ

$x$  แทน ระยะการเคลื่อนที่ของความร้อน

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity),  $k$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

จากสมการนี้มีชื่อเรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เห็นเครื่องหมายลบอยู่ด้านขวามือของสมการเป็นผลเนื่องมาจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนต้องไหลจากจุดที่อุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำนั้น มีเครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้เพราะ

อุณหภูมิจะลดน้อยลงเมื่อระยะทาง  $x$  เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกเมื่อไหลไปในทางทิศทางที่เป็นบวกแล้วก็จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ทางด้านขวาของสมการ

ให้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านผนังราบเมื่อผิวมีอุณหภูมิต่างกัน และมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวเนื่องจากผิวทั้งสองมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีความร้อนไหลจากผิวที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผิวที่มีอุณหภูมิต่ำ และถ้าหากการนำความร้อน  $K$  ของผนังมีค่าคงที่แล้วเมื่อแทนค่า  $k$  นี้ลงไปในสมการแล้วทำการอินทิเกรต ก็จะได้อัตราการนำความร้อนเป็น

$$q = -\frac{kA}{L}(T_2 - T_1) = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2) \quad (2.4)$$

เมื่อ

$q$  แทน อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนัง, W

$K$  แทน ค่าการนำความร้อนของผนัง, W/m.k

$A$  แทน พื้นที่ของผนังที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน,  $m^2$

$L$  แทน ความหนาของผนัง, m

$T_1$  แทน อุณหภูมิผิวทางด้านซ้าย (ที่  $x = 0$ ), K

$T_2$  แทน อุณหภูมิผิวทางด้านขวา (ที่  $x = L$ ), K

## 2.6.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อน

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันก็就会有การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อน กระบวนการพาความร้อนดังกล่าวนี้เป็นปรากฏการณ์พื้น ๆ แต่กลไกของการถ่ายเทความร้อนนั้นซับซ้อนมาก ในช่วงแรกนี้จะไม่กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ แต่จะเสนอกลไกและสมการหลัก ๆ ที่สามารถใช้คำนวณหาอัตราการพาความร้อนจากส่วนย่อย ๆ ของระบบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบที่ใช้ให้ความร้อน และใช้ระบายความร้อน การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อนนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection)

2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวของการพาความร้อนแบบอิสระนั้นเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในก้อนของไหลเนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างของการพาความร้อนแบบอิสระนี้ได้แก่การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านที่เกิดขึ้นในวันที่ไม่มีลมพัด การพาความร้อนภายในภาควัสดุที่มีขดลวดให้ความร้อนหรือการถ่ายเทความร้อนจากผิวของตัวเก็บความร้อนที่ได้มาจากดวงอาทิตย์ในช่วงที่ไม่มีลมพัด

การพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของเหลวเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วคงที่สูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากความแตกต่างของอุณหภูมิมีขนาดเท่า ๆ กันแล้วการพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่าแต่ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบไหนก็ตามต่างก็มีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งมีรูปสมการเป็น

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (2.5)$$

เมื่อ

$\bar{h}_c$  แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (Average convective heat transfer coefficient) ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ หรือหนึ่งหน่วยของการนำจากการพาความร้อน,  $W/m^2 \cdot K$

$A$  แทน พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสของไหล,  $m^2$

$T_s$  แทน อุณหภูมิของผิววัตถุ,  $K$

$T_{f,\infty}$  แทน อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมาก ๆ,  $K$

ค่า  $\bar{h}_c$  นี้หาได้โดยวิธีวิเคราะห์และโดยวิธีทดลอง หน่วยของ  $\bar{h}_c$  ในระบบเอสไอนั้นเป็น  $W/m^2 \cdot K$

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากกฎของฟูเรียร์ใช้กับระบบแกนของวัตถุรูปทรงกระบอกกลมได้ คือ

$$q = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$L$  แทน ความยาวของวัตถุรูปทรงกระบอก,  $m$

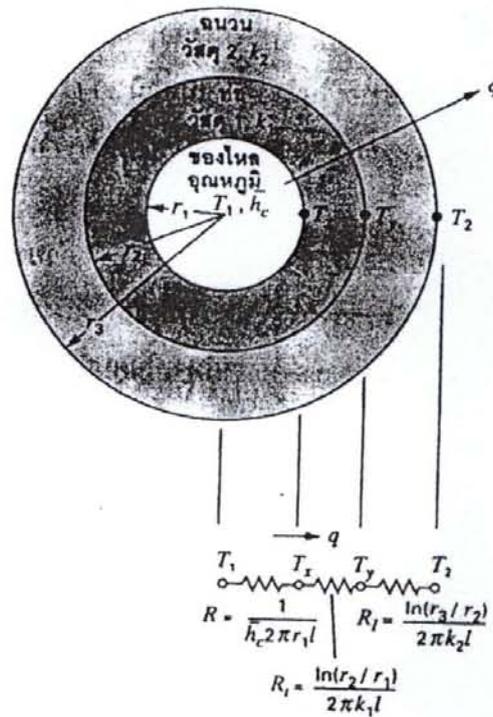
เมื่อแทนค่าการกระจายอุณหภูมิ  $\frac{dT}{dr}$  ที่ได้จากการดิฟเฟอเรนเชียล จะได้อัตราการไหลของความร้อนเป็น

$$q = \frac{T_i - T_o}{\ln(r_o / r_i) / 2\pi l} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$T_i$  แทน อุณหภูมิภายในท่อ,  $K$

$T_o$  แทน อุณหภูมิภายนอกท่อ,  $K$



รูปที่ 2.4 วงจรความร้อนที่ต่อความต้านทานแบบอนุกรม

อัตราการถ่ายเทความร้อนของปัญหาดังกล่าวจะมีค่าตามสมการ

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi r_1 h_c l} + \ln \frac{r_3 - r_2}{2\pi k_1 l} + \ln \frac{r_4 - r_3}{2\pi k_2 l}} \quad (2.8)$$

## 2.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่าง ๆ ในด้านทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง วิศวกรควรมีความรู้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการพาความร้อน การส่งผ่านของความร้อนและความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล

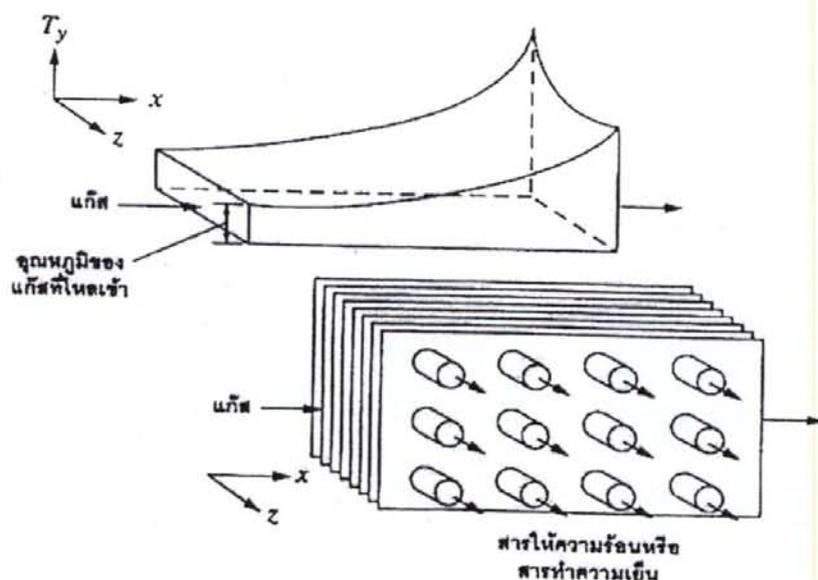
ในปัจจุบัน กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนได้แพร่หลายไปในประเทศต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว และเพื่อให้การใช้พลังงานความร้อนเป็นไปอย่างถูกหลักการกระบวนการเหล่านี้มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสถานะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือ

ก๊าซในทำนองเดียวกันอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หมุนเวียนเอาความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่

3.1 หน้าที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกต้อง หลัการ และมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีใช้และวิธีเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างแน่นแฟ้นกับหลักเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์อย่างมากด้วยการเลือกเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน จะทำอย่างระมัดระวังมากเงื่อนไขที่สำคัญอันหนึ่งสำหรับการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งรวมถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือความมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงและราคาถูก

3.2 ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่ว ๆ ไป ได้แก่ ชนิดแผ่นเพลทเรียบ (flat-plate) ชนิดเปลือกท่อ (shell-and-tube) และชนิดการไหลตัดกัน (cross-flow type) ซึ่งการแลกเปลี่ยนแบบท่อคู่ นั้น เป็นแบบที่ง่ายที่สุด สำหรับเปลือก-ท่อ ถ้าการไหลของของไหลทั้งสอง ไหลในทิศทางเดียวกันที่ได้แสดงไว้ถือว่าเป็นการไหลแบบขนานกัน และถ้าการไหล มีทิศทางตรงกันข้าม ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการไหลแบบสวนทางกัน

ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีทิศทางของของไหลตัดกัน ที่มุมทางด้านขวาไปยังทางด้านอื่น ถ้าของไหลสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระในระหว่างที่ไหลผ่านเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อน ลักษณะของของไหลนี้เรียกว่า เป็นการไหลผสมกัน (Mixed) อุณหภูมิที่แพร่กระจายนี้ เกิดขึ้นตามระยะทางที่เบี่ยงเบนไป เพราะว่าของไหลที่ไหลนี้ จะอยู่ในทิศทางที่สัมผัสกันและมีค่าอุณหภูมิแตกต่างกัน จากประสบการณ์ทางการไหลของของไหล ก็คือ ระยะทางเดียวกันเมื่อนับจากจุดที่ของไหลไหลเข้า (inlet)



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกันที่นิยมใช้กันแพร่หลาย

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ของไหลจะถ่ายเทความร้อนให้แก่กัน ดังนั้น ถ้าของไหลไม่มีการเปลี่ยนสภาวะ (คือ เปลี่ยนจากไอเป็นของเหลวหรือของเหลวเป็นไอ) อุณหภูมิของของไหลทั้งสองนั้นก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ขณะที่ของไหลไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมีความสำคัญมากในการคำนวณเกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน

#### 4. การคำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อน

วัตถุประสงค์อันดับแรกในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ เพื่อหาขนาดพื้นที่ผิวที่จำเป็นที่ต้องการเพื่อการถ่ายเทความร้อน ที่อุณหภูมิ และอัตราการไหลของของไหลที่กำหนดให้ วิธีการนี้ จะสามารถกระทำได้โดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม  $U$  ความสัมพันธ์พื้นฐานจะแสดงให้ด้วยสมการการถ่ายเทความร้อนคือ

$$q = UA\Delta T_m \quad (2.9)$$

เมื่อ

$\Delta T_m$  แทน ค่าอุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $U$ ) การถ่ายเทความร้อนทั้งในกรณีของผนังราบและผนังรูปทรงกระบอก สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความต้านทานที่ผิวของผนัง ในที่นี้จึงจะกล่าวเฉพาะผนังรูปทรงกระบอก

สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทรงกระบอกชั้นเดียว ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งขึ้นกับพื้นที่ภายในท่อ จะเขียนได้จากสมการดังนี้คือ

$$\text{ผนังราบ} \quad U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.10)$$

เนื่องจากท่อทำจากโลหะที่มีผนังบางมาก และมีค่าการนำความร้อนสูงมากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเขียนได้ดังนี้คือ

$$U = \left[ \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

ในกรณีที่ฝั่งภายนอกของท่อติดครีป สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จะหาได้โดยสมการที่เขียนได้ดังนี้คือ

$$U = \left[ \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o \left\{ \left( \frac{A_o}{A_i} \right) + \eta_f \left( \frac{A_f}{A_i} \right) \right\}} \right]^{-1} \quad (2.12)$$

เมื่อ

- $U$  แทน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม,  $W/m^2.K$   
 $h_i$  แทน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเอธานอล,  $W/m^2.K$   
 $h_o$  แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำ,  $W/m^2.K$   
 $k$  แทน สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อทองแดง,  $W/m.K$   
 $A_i$  แทน พื้นที่ผิภายในต่อหน่วยความยาวของท่อ,  $m^2$   
 $A_o$  แทน พื้นที่ผิภายนอกต่อหน่วยความยาวของท่อ,  $m^2$   
 $A_f$  แทน พื้นที่ผิวของครีบอกต่อหน่วยความยาวของท่อ,  $m^2$   
 $\eta_f$  แทน ประสิทธิภาพของครีบ

เมื่อตัวห้อย  $i$  และ  $o$  แสดงถึงผิวภายในและภายนอกของผนังตามลำดับ สิ่งที่สำคัญคือ พื้นที่ในการพาความร้อนไม่เหมือนกับของไหล ทั้งที่เป็นกรณีของผนังทรงกระบอกจะนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่ผิวต้องมีความเหมาะสม

## 2.8 เครื่องควบแน่นหรือคอนเดนเซอร์ (Condenser)

เป็นอุปกรณ์เครื่องทำความเย็นชนิดหนึ่งประกอบด้วยท่อทองแดง ขดขนาไปมาและมีแผ่นโลหะบาง ๆ อาจเป็นเหล็กหรืออลูมิเนียมพาดทับเชื่อมติดไว้กับท่อทองแดง เรียกว่าครีบ (Fin) หน้าที่ของเครื่องควบแน่นคือรับเอาสารตัวกลางที่เป็นแก๊สที่มีแรงดันสูงและร้อนเข้ามาในเครื่องควบแน่น และจะระบายความร้อนโดยถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นออกไป สารทำความเย็นที่เป็นแก๊สนี้ เมื่อถูกดึงหรือระบายออกไป (อาจจะเป่าลมเป่า, น้ำผ่าน หรืออาศัยธรรมชาติก็ตาม) สารทำความเย็นที่เป็นแก๊สจะกลายเป็นของเหลวทันที ดังนั้นเครื่องควบแน่นจึงมีหน้าที่ระบายความร้อนหรือถ่ายเทความร้อนออกจากสารทำความเย็นที่เป็นแก๊สและทำให้แก๊สเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว

เครื่องควบแน่นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

1. ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air cooled condenser)
2. ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water cooled condenser)
3. ชนิดที่ระบายความร้อนด้วยน้ำและอากาศ (Evaporative condenser)

ชนิดหรือขนาดของเครื่องควบแน่นขึ้นอยู่กับหลักทางเศรษฐกิจเป็นสำคัญ การตกลงใจสร้างเครื่องควบแน่นจะต้องคำนึงถึง ราคาค่าไฟ, ค่าน้ำ ค่าวัสดุที่ใช้ทำเครื่องควบแน่นและอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ขนาดของเครื่องควบแน่นที่จะต้องเลือกใช้ให้พอดีขึ้นอยู่กับ

- 1) ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของผิวโลหะที่ใช้ทำเครื่องควบแน่น
- 2) ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น
- 3) ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของตัวกลางที่จะใช้ระบายความร้อน (คือน้ำและอากาศ)
- 4) อุณหภูมิของสารทำความเย็นและของตัวกลางที่จะใช้ระบายความร้อน
- 5) คุณสมบัติของสารทำความเย็น

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่นจะมีความสามารถมากน้อยขึ้นอยู่กับ

- วัสดุที่ใช้สร้างเครื่องควบแน่น
- จำนวนพื้นที่ผิวที่ถ่ายเทความร้อนเป็นตารางฟุต
- กำลังลึงของลมที่จะผ่าน

## 2.9 วัสดุที่ใช้ทำหอกลั่นเอธานอล

เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กกล้าผสมที่ไม่เกิดสนิมในสภาพปกติ ที่มีความต้านทานความกัดกร่อนสูงมาก เนื่องจากธาตุโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณค่อนข้างสูง และปริมาณคาร์บอนค่อนข้างต่ำ โครเมียมตั้งแต่ 11% ขึ้นไป จะสามารถรวมตัวกับออกซิเจนในบรรยากาศได้ดีมาก และสร้างโครเมียมออกไซด์มีลักษณะเป็นฟิล์มบางหุ้มผิวเหล็กแข็งแรงมาก แม้จะถูกขัดถูออกไปก็สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้อีกในเวลาอันรวดเร็ว เป็นการป้องกันออกซิเจนในบรรยากาศที่จะรวมตัวกับผิวเหล็กอันเป็นสาเหตุของการเกิดเหล็กออกไซด์หรือสนิมได้อย่างสมบูรณ์มากซึ่งชื่อเรียกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม

การจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก กลุ่มมาร์เทนซิติก และกลุ่มออสเทนนิติก ซึ่งลักษณะรายละเอียดสรุปได้ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (ferrite stainless steels) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิห้องที่มีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักไม่มีนิกเกิลมีคาร์บอนอยู่ในเกณฑ์ต่ำโดยทั่วไปจะอ่อนและเหนียวขึ้นรูปง่าย ไม่สามารถชุบแข็งโดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระทำได้ แต่การเปลี่ยนแปลงรูปทางกลจะทำให้แข็งขึ้นได้เนื่องจากเกิดการชุบแข็ง ด้านการกัดกร่อนได้ดี ความแข็ง และความแข็งแรงต่ำ เชื่อมประกอบยาก

2. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (martensitic stainless steels) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซต์ที่อุณหภูมิห้อง มีธาตุโครเมียมเป็นหลักโดยตรง และไม่มีนิกเกิล (ยกเว้น 414 และ 413 มีได้เล็กน้อย ประมาณ 1.8%) มีคาร์บอนสูงมากกว่าเฟอร์ริติกและออสเทนนิติก สามารถเพิ่มความแข็งได้โดยการชุบแข็ง (อบเป็นออสเทนไนท์แล้วจุ่มชุบลงในน้ำ)

3. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค (austenitic stainless steels) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากมีธาตุ निकเกิดเป็นธาตุผสมพิเศษเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชนิด นิกเกิลทำให้ออสเทนไนท์ขยาย และมีเสถียรภาพมากขึ้น คุณสมบัติโดยทั่วไปจะสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีที่สุด ไม่มีสารแม่เหล็กหรือแม่เหล็กไม่ดูด สามารถเชื่อมได้ง่ายที่สุด เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคมีข้อเสียคือ การเกิดคาร์ไบด์ตกตะกอนตามขอบเกรนแต่ก็มีวิธีที่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ แนวทางแก้ปัญหาและป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตกตะกอนตามขอบเกรนเนื่องจากการอบชุบ และการเชื่อมพอสรุปได้ดังนี้

- 3.1 เติมธาตุที่รวมตัวกับคาร์บอนซึ่งไวกว่าโครเมียม เช่น Ti, Cb, Nb เป็นต้น
- 3.2 ลดคาร์บอนให้ต่ำลง เช่น 304L และ 316L จะมีคาร์บอนไม่เกิน 0.03%
- 3.3 หลังจากการเชื่อมควรรีบนำเอาไปอบที่ประมาณ 1,050 องศาเซลเซียสแล้วชุบน้ำทันที

ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค

AISI Type	ส่วนผสมทางเคมีคิดเป็นเปอร์เซ็นต์(Wt %)					ชนิดของการใช้งาน
	Cr	C	Mo	Al	Other (Max)	
301	17	7	0.15			เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงสูงที่ใช้สำหรับประยุกต์ใช้ในการทำโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงเพิ่มและมีการหลอมได้ดี ใช้สร้างอุปกรณ์การบิน อุปกรณ์เกี่ยวกับฮาร์ดแวร์
302	18	9	0.15			ตามวัตถุประสงค์เป็นเสตนเลสออสเทนนิคที่ใช้ทำเครื่องมือตกแต่งอุปกรณ์เกี่ยวกับอาหาร อุปกรณ์เกี่ยวกับการบิน เสาอากาศ สปริง ผลิตภัณฑ์อาหาร โครงสร้างภายนอก อุปกรณ์โรงกลั่นน้ำมัน
304L	19	10	0.03			เป็นการปรับปรุงมาจากชนิด 304 ให้มีคาร์บอนต่ำเป็นพิเศษ ป้องกันการตกตะกอนของคาร์บอนและใช้ทำถังเก็บของสะสมเชื้อเพลิง

ที่มา: ไทย-โกเบเว ลิ่ง จำกัด