บทที่ 3
หฤษฎีการออกแบบเครื่องย่อยแร่

จุดมุ่งหมายที่จะต้องคำนึงถึงในปฏิกริยาทางเคมีที่จะนำมาใช้งานในทางอุตสาหกรรม ได้แก่

3.1 การเลือกแบบของเครื่องปฏิกรณ์ทางเคมีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงาน

3.2 การหาขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ทางเคมีและเครื่องกวนสาร

3.3 การเลือกใช้วัสดุ

เพื่อที่จะเป็นไปตามจุดมุ่งหมายดังกล่าว จะต้องเรียนรู้ถึง

1. อัตราการเกิดปฏิกริยาทางเคมี
2. ผลของปฏิกริยาที่ได้ผลมากที่สุด
3. ธรรมชาติทางกายภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นกับปฏิกริยา
4. สิ่งเกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการทางเคมี

3.1 การเลือกแบบของเครื่องปฏิกรณ์ทางเคมีที่เหมาะสมและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ทางเคมี

การเลือกและออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ทางเคมีในทางอุตสาหกรรมสำหรับงานใดงานหนึ่งนั้น จะขึ้นอยู่กับกลไกของการเกิดปฏิกริยา แต่กลไกของการเกิดปฏิกริยานั้นยังไม่มีวิธีการทดสอบที่แน่นอน ดังนั้นวิธีการ Trial-and-error จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนั้นองค์ประกอบที่สำคัญอีกอันหนึ่งคือ การศึกษาผลทางด้านเทอร์มอดายนามิกส์ของกระบวนการทั้งหมด

3.1.1 แบบของเครื่องปฏิกรณ์ทางเคมี โดยทั่ว ๆ ไป เครื่องปฏิกรณ์ทางเคมี แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ แบ่งตามลักษณะของการทำงาน และแบ่งตามลักษณะของการออกแบบ

ก. ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามลักษณะการทำงานนั้นโดย

หลักการแล้วมักจะใช้กับปฏิกริยาที่เป็นแบบ Homogeneous ซึ่งแบ่งชนิดได้เป็น เครื่องปฏิกรณ์เฉพาะหน่วย, เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

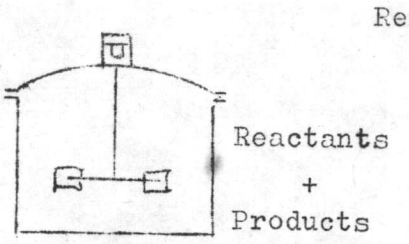
1. เครื่องปฏิกรณ์เฉพาะหน่วย เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จะใส่สารที่ทำปฏิกริยาทั้งหมดลงไปตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งขณะที่ทำปฏิกริยาจะไม่มีสารตัวหนึ่งตัวใดเข้าหรือออกจากเครื่องปฏิกรณ์เลย ดังนั้นลักษณะทั่ว ๆ ไปจะเป็นถัง จะมีเครื่องกวนสารอยู่ด้วยหรือไม่ก็ได้ มักจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้กับผลผลิตขนาดเล็ก

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง สารที่ต้องการทำปฏิกริยาจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ในระหว่างการทำงาน และในเวลาเดียวกันผลผลิตที่ได้จากการทำปฏิกริยาจะถูกถ่ายออกมา เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ลักษณะทั่ว ๆ ไปอาจจะเป็นถัง, เป็นท่อตั้งหรือนอนก็ได้ ส่วนใหญ่จะใช้ในโรงงานขนาดใหญ่ เพื่อลดราคาค่าผลิตและสะดวกต่อการควบคุมคุณภาพของผลผลิต

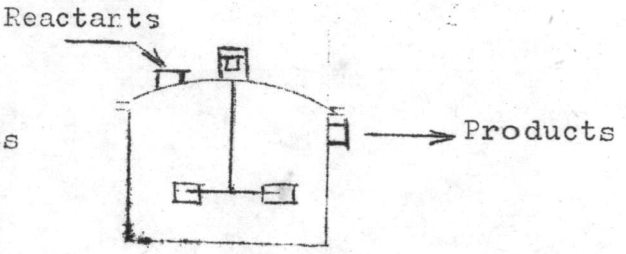
3. เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง แบบนี้จะใช้เมื่อเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองแบบดังกล่าวมาแล้วไม่เหมาะสมต่อการทำงาน เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีลักษณะเป็นถังคล้ายแบบเฉพาะหน่วย โดยต้องการให้ผลผลิตยังคงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ขณะที่ยังมีการป้อนสารที่ทำปฏิกริยาลงในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ตลอดเวลา

ข. ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามลักษณะการออกแบบ

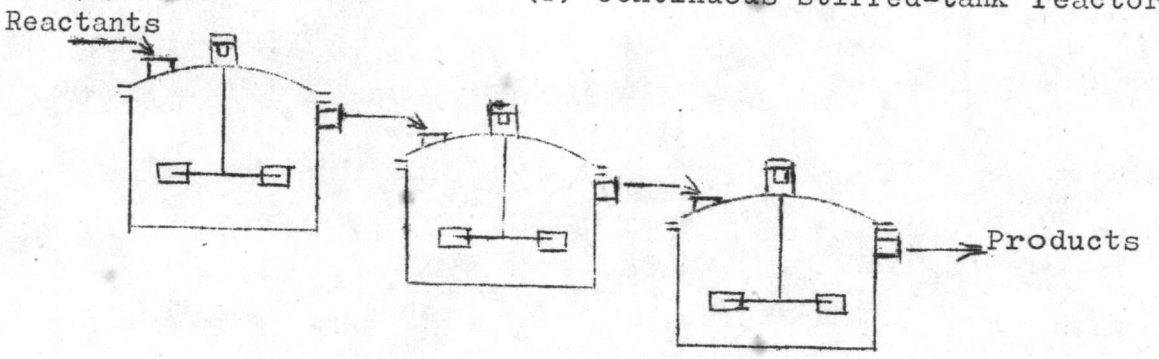
1. เครื่องปฏิกรณ์แบบถัง (Tank Reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี โดยส่วนใหญ่แล้วจะติดเครื่องกวนสารอยู่ด้วยเพื่อทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้เป็นได้ทั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบเฉพาะหน่วย ตามรูป 3-1 ก. หรือ เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องเป็นถังที่มีเครื่องกวนสาร ตามรูป 3-1 ข. สำหรับกระบวนการที่ต่อเนื่องสามารถนำเอาเครื่องปฏิกรณ์หลาย ๆ ตัวมาต่ออนุกรมกันได้ตามรูป 3-1 ค. หรืออาจจะสร้างโดยใช้ภาชนะเพียงอันเดียวแต่แบ่งช่องการทำงานในภาชนะเป็นช่อง ๆ โดยแต่ละช่องเทียบได้กับเครื่องปฏิกรณ์เฉพาะหน่วย 1 ตัว ตามรูป 3-1 ง. และรูป 3-1 จ.



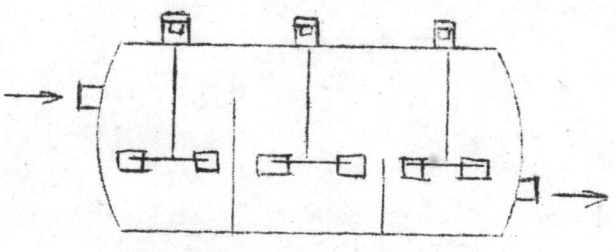
(ก) Batch reactor



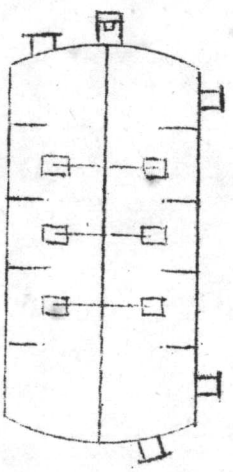
(ข) Continuous stirred-tank reactor



(ค) Continuous stirred-tank reactor battery



(ง) Continuous staged reactor horizontal type

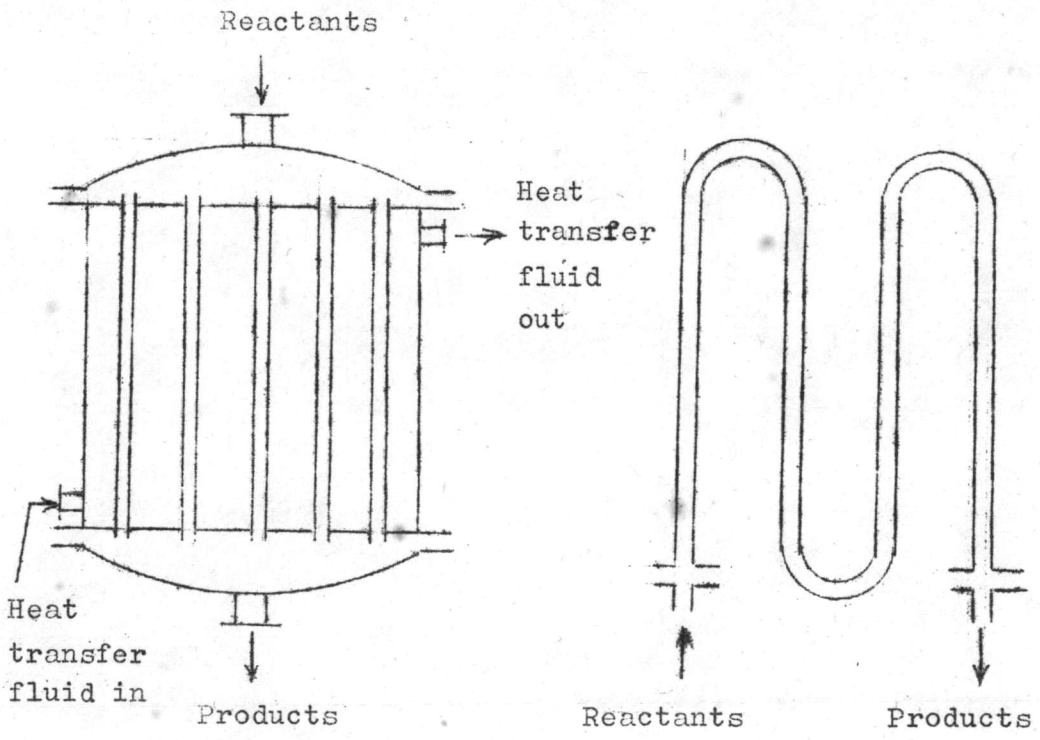


(จ) Continuous staged reactor vertical type

รูปที่3-1 เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบถังพร้อมด้วยเครื่องกวนสาร (Stirred-tank reactor)

2. เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบท่อ (Tubular Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้อาจจะสร้างเป็นท่อเดียวยาวต่อเนื่อง ตามรูป 3-2 ข. หรือเป็นท่อหลาย ๆ ท่อต่อขนานกัน ตามรูป 3-2 ก. โดยที่สารที่ทำปฏิกริยาทั้งหมดเข้าทางปลายท่อด้านหนึ่งส่วนผลผลิตจะออกทางปลายท่ออีกด้านหนึ่ง โดยมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของสารที่ทำปฏิกริยาในท่อดังกล่าว สำหรับความร้อนที่จะให้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้อาจจะออกแบบเป็น jacket หุ้มท่อหรืออาจจะเป็นแบบ Shell-and-Tube ตามรูป 3-2 ก. ก็ได้ ส่วนภายในท่ออาจจะบรรจุเม็ดสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกริยาในกรณีที่ต้องมีสารตัวเร่งปฏิกริยาในปฏิกริยาเคมีนั้น ๆ เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบท่อ เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการให้ผลผลิตกลับไปปะปนกับสารที่ทำปฏิกริยาอีก เช่น กระบวนการเปลี่ยนอากาศให้เป็นไนตรัสออกไซด์ หรือ การทำให้ไนตรัสออกไซด์เป็นไนตริก-ออกไซด์ เป็นต้น



รูปที่ 3-2 เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบท่อ (Tubular reactors)

3. เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบหอคอย (Tower Reactor) รูปลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบนี้ โครงสร้างจะเป็นทรงกระบอกตั้งโดยอัตราส่วนของความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางจะแตกต่างกันมากภายในเครื่องปฏิกรณ์อาจจะว่างเปล่าหรือมีเหล็กกั้นบรรจุสารลงไปก็ได้เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้เหมาะสำหรับปฏิกริยาที่เป็นแบบ Heterogeneous

4. เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-Bed Reactor) แบบนี้มีรูปร่างทรงกระบอกตั้งภายในบรรจุด้วยของแข็งที่มีเม็ดละเอียดซึ่งอาจจะเป็นสารตัวเร่งปฏิกริยาทางเคมีหรือสารที่ทำปฏิกริยา จากนั้นสารที่เป็นตัวทำปฏิกริยาที่เป็นของเหลวจะถูกป้อนเข้าทางส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยอัตราที่ของแข็งลอยอยู่ในของเหลวโดยไม่ถูกพาออกไปนอกเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จึงเหมาะสำหรับปฏิกริยาระหว่างสารที่เป็นของแข็งและของเหลว เช่น ปฏิกริยาการเปลี่ยนจากยูเรเนียมออกไซด์ ไปเป็นยูเรเนียมฟลูโอไรด์

5. เครื่องปฏิกรณ์แบบสเลอรี่-เฟส (Slurry-phase Reactor) ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้เป็นแบบท่อตั้งภายในประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกริยาซึ่งมีลักษณะเป็นผง แช่อยู่ในของเหลวที่เป็นตัวทำปฏิกริยา แล้วป้อนสารที่เป็นตัวทำปฏิกริยาอีกตัวหนึ่งที่เป็นก๊าซเข้าไปเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ควรมีการควบคุมอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มักจะใช้กับงานที่มีความร้อนสูง เช่น Hydro-cracking of residual fuel oils.

006349

3.1.2 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี เงื่อนไขที่ต้องการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีประกอบด้วย

ก. แบบอย่างของการเกิดปฏิกริยาว่าเป็นแบบง่าย ๆ หรือเป็นแบบที่ซับซ้อน

ข. มีสารตัวเร่งปฏิกริยาในปฏิกริยานั้น ๆ หรือไม่

ก. Phases ที่มีในปฏิกริยามีกี่ phases

ง. วิธีการควบคุมอุณหภูมิและความดันของการเกิดปฏิกริยา

1182033 46

จ. ปริมาณของผลผลิต

ฉ. ข้อมูลพื้นฐานอื่น ๆ ได้แก่

1. อัตราการเกิดปฏิกริยาและการแปรค่าของ Parameter ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น

2. คุณสมบัติของการส่งถ่ายความร้อนและมวลของสาร

3. คุณสมบัติทางกายภาพของสารทั้งหมดที่ทำปฏิกริยา

เมื่อได้ศึกษาเงื่อนไขต่าง ๆ แล้ว ข้อมูลที่ได้จะเป็นสิ่งชี้นำในการเลือกแบบและขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เคมี

3.2 การหาขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เคมีและเครื่องกวนสาร

3.2.1 การหาขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เคมี

Parameter ที่ใช้ในการวัดหาความจุของเครื่องปฏิกรณ์เคมีได้แก่ Residence time หรือ Space time โดยที่ Mean residence time คือระยะเวลาเฉลี่ยที่มีการเกิดปฏิกริยาของสารที่ทำปฏิกริยากันในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$\bar{\theta} = - \int_{N_{A_o}}^{N_{A_f}} \frac{dN_A}{V\,(-r_A)} \qquad (3\text{-}1)$$

โดย $\bar{\theta}$ = Mean residence time

N_{A_f}, N_{A_o} = โมลของสารที่ทำปฏิกริยา A ที่ออกและเข้าเครื่องปฏิกรณ์เคมี

V = ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เคมี

$-r_A$ = อัตราการสูญหายไปของสารที่ทำปฏิกริยา A เป็นโมลต่อหน่วยเวลา

สมการนี้ได้มาจากการทำ Material balance ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีซึ่งจะเขียนอยู่ในรูป Fraction ของ A ได้เป็น

$$\bar{\theta} = N_{A_O} \int_{0}^{x_{A_f}} \frac{dx_A}{V(-r_A)} \qquad (3\text{-}2)$$

x_A = Fraction ของ A

โดยทั่วไปแล้ว สมการ 3-1 และ 3-2 มักจะกำหนด v เป็นปริมาตรของส่วนผสมของสารที่ทำปฏิกริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงขณะที่เกิดปฏิกริยา สำหรับในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเฉพาะหน่วยนั้น $\bar{\theta}$ อาจจะเป็นเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแปรรูปของสารที่ทำปฏิกริยาในขนาดหนึ่ง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเฉพาะหน่วย

สำหรับ Space time กำหนดได้เป็นเวลาที่ใช้ในการทำงานในเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่รู้ปริมาตรของสารที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 1 ครั้ง ในเงื่อนไขที่กำหนดส่วนกลับของ Space time ได้แก่ Space velocity ซึ่งเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$\theta = \frac{V}{F/\rho} = \frac{V}{F_{A_O}/C_{A_O}} = \frac{V}{v_O} = \frac{1}{S} \qquad (3\text{-}3)$$

โดย F และ F_{A_O} = อัตราการไหล, โมลต่อหน่วยเวลา ของสารที่เข้าทำปฏิกริยาทั้งหมดและของสารตัวทำปฏิกริยา A ตามลำดับ

ρ = ความหนาแน่น, โมลต่อหน่วยปริมาตรของสารที่เข้าทำปฏิกริยาทั้งหมด

C_{A_O} = ความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกริยา

v_O = อัตราการไหลโดยปริมาตรของสารที่เข้าทำปฏิกริยา

Θ = Space time

S = Space velocity

จะเห็นได้ว่า Mean residence time และ Space time จะต่างกันตรงความหนาแน่นของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์เคมี โดย Mean residence time จะใช้ในกรณีที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์เฉพาะหน่วย ส่วน Space time ใช้สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง

ในกรณีที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเฉพาะหน่วยซึ่งมีปริมาตรคงที่ สมการที่ใช้คำนวนในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี จะเป็น

$$\dot{\Theta} = C_{A_O} \int \frac{dx_A}{-r_A} \qquad (3\text{-}4)$$

นอกจากสมการดังกล่าวมาแล้ว ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมียังต้องคำนึงถึงสมการ Material และ Energy balance โดยสมการ Material balance จะแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารต่าง ๆ ในรูปของอัตราการเกิดปฏิกริยาจำเพาะ, อัตราการไหลของสารที่เข้าทำปฏิกริยาและปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เคมี โดยคำนวนในรูปของส่วนผสมของสารที่เข้าทำปฏิกริยาส่วนสมการ Energy balance จะบ่งบอกถึงอัตราความร้อนที่ใช้

สมการเคมีทั่ว ๆ ไปเขียนได้เป็น

$$A + B \rightleftharpoons E$$

$$B + E \rightleftharpoons S$$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีเฉพาะหน่วย สมการ Material balance เขียนได้เป็น

$$\frac{dN_E}{d\Theta} = (r_1 - r_2)V \qquad (3\text{-}5)$$

$$\frac{dN_S}{d\Theta} = r_2 V \qquad (3\text{-}6)$$

$$N_A = C_{A_O} V - N_E - N_S \qquad (3\text{-}7)$$

$$N_B = C_{B_O} V - N_E - 2N_S \qquad (3\text{-}8)$$

สมการ Energy balance เขียนได้เป็น

$$\frac{dQ}{d\theta} = UA_w(T_w - T) - (r_1\Delta H_1 - r_2\Delta H_2)V \qquad (3\text{-}9)$$

A_w = พื้นที่ในการส่งถ่ายความร้อน, ft^2

C_{A_O}, C_{B_O} = ความเข้มข้นของสารทำปฏิกริยา A และ B, $moles/ft^3$

r = อัตราการเกิดปฏิกริยา, $moles/sec.ft^3$

N_i = จำนวนโมลของสาร i

V = ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เคมี, ft^3

T = อุณหภูมิในขณะทำปฏิกริยา, ^oF

T_w = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ให้ต่อเครื่องปฏิกรณ์เคมีขณะทำปฏิกริยา, ^oF

U = สัมประสิทธิ์ของการส่งถ่ายความร้อนทั้งหมด, $BTU/sec.ft^2.{}^oF/ft.$

$\Delta H_1, \Delta H_2$ = ความร้อนของการเกิดปฏิกริยาสำหรับปฏิกริยาที่ 1 และปฏิกริยาที่ 2 ตามลำดับ BTU/mole

θ = เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกริยา, sec.

Q = ปริมาณความร้อนที่ใช้, BTU

ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีนั้นต้องคำนึงถึงความร้อนที่จะให้แก่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อนำความร้อนนั้นเป็นตัวเร่งการทำปฏิกริยาระหว่างสารต่าง ๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วความร้อนที่ให้จากภายนอกเครื่องปฏิกรณ์และผ่านเข้า

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

สู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยวิธีการนำความร้อน

ความสัมพันธ์พื้นฐานของการส่งถ่ายความร้อนโดยการนำความร้อนเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลผ่านความร้อนไปตามพื้นผิวที่มีความร้อนเท่ากันตลอดกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามพื้นผิวนั้น ๆ หลักการนี้จะเป็นไปตามกฎของ Fourier เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\frac{dq}{dA} = -k\frac{\partial T}{\partial n} \qquad (3\text{-}10)$$

โดย A = พื้นที่ของผิวที่มีความร้อนเท่ากันตลอด

n = ระยะทางที่ความร้อนจะส่งถ่ายไป

q = อัตราการไหลผ่านของความร้อนไปในระยะทางนั้น ๆ

T = อุณหภูมิ

k = ค่าคงตัว

จากสมการ 3-10 จะพบว่าอุณหภูมิจะแปรค่าไปตามระยะทางและเวลาโดยเครื่องหมายลบทางด้านขวาของสมการเป็นผลมาจากการไหลผ่านของความร้อนจากที่ร้อนสู่ที่ที่เย็นกว่า และพื้นที่ A นั้นจะต้องเป็นพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ส่วน n คือระยะทางที่วัดตั้งฉากกับพื้นที่ A

และเมื่อถึง Steady state อุณหภูมิจะเป็นฟังก์ชั่นของระยะทางเท่านั้นและอัตราการไหลของความร้อนแต่ละจุดคงที่สมการ 3-10 จะเขียนได้เป็น

$$\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dn} \qquad (3\text{-}11)$$

โดยที่ค่าคงตัว k เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของสารเรียกว่าค่าการนำความร้อนมีหน่วยเป็น $BTU/ft.hr.^{\circ}F$, q วัดเป็น $BTU/hr.$ และ $\frac{dT}{dn}$ เป็น $^{\circ}F/ft.$

ถ้ากำหนดให้ x เป็นระยะทางแทน n แล้ว สมการ 3-11 จะเขียนได้เป็น

$$\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dx} \qquad (3\text{-}12)$$

หรือ $$dT = -\frac{q}{kA}dx$$

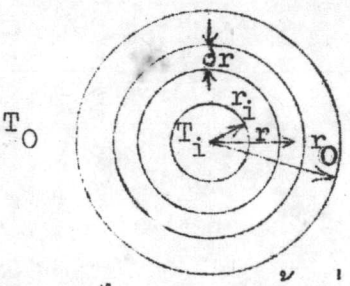
ในกรณีที่การไหลของความร้อนผ่านแผ่นโลหะ สมการ 3-12 เมื่อถูก Integrate เทียบระหว่างตัวแปร T กับ x แล้วจะเป็น

$$\frac{q}{A} = k\frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} = k\frac{\Delta T}{B} \qquad (3\text{-}13)$$

โดย $x_2 - x_1 =$ B เป็นความหนาแน่นของแผ่นโลหะ

$T_1 - T_2 = \Delta T$ เป็นอุณหภูมิที่ลดไปเมื่อผ่านแผ่นโลหะ

สำหรับในกรณีที่การส่งถ่ายความร้อนผ่านรูปทรงกระบอก



รูปที่3-3 การไหลของความร้อนผ่านรูปทรงกระบอก

จากภาพตัดขวางของรูปทรงกระบอกข้างบน กำหนดได้เป็น

r_i = รัศมีภายในของรูปทรงกระบอก

r_o = รัศมีขอบนอกของรูปทรงกระบอก

L = ความยาวของรูปทรงกระบอก

T_o = อุณหภูมิที่ผิวนอกของรูปทรงกระบอก

T_i = อุณหภูมิที่ผิวในของรูปทรงกระบอก

ถ้าเป็นรูปทรงกระบอกที่บาง สมการ 3-11 จะเขียนได้เป็น

$$q = -k \frac{dT}{dr} 2\pi rL \qquad (3\text{-}14)$$

ซึ่งพื้นที่ที่ความร้อนจะผ่านไปคิดเป็น $2\pi rL$ และ dn เป็น dr ในกรณีที่เป็นรูปทรงกระบอกหนา สมการ 3-14 จะเป็น

$$\int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi Lk}{q} \int_{T_o}^{T_i} dT$$

$$\ln r_o - \ln r_i = \frac{2\pi Lk}{q} (T_i - T_o)$$

$$q = \frac{k2\pi L (T_i - T_o)}{\ln (r_o/r_i)} \qquad (3\text{-}15)$$

เพื่อให้ได้รูปสมการที่ง่าย เขียนสมการได้เป็น

$$q = \frac{k\bar{A}_L (T_i - T_o)}{r_o - r_i} \qquad (3\text{-}16)$$

โดย $$\bar{A}_L = \frac{2\pi L (r_o - r_i)}{\ln (r_o/r_i)} \qquad (3\text{-}17)$$

และ $\bar{A}_L$ เป็นพื้นที่ของรูปทรงกระบอกยาว L และรัศมี $\bar{r}_L$ ดังนั้น

$$\bar{r}_L = \frac{r_o - r_i}{\ln (r_o/r_i)} \qquad (3\text{-}18)$$

$$= \frac{r_o - r_i}{2.303 \log (r_o/r_i)}$$

r_L เรียกว่า Logarithmic mean radius

3.2.2 เครื่องกวนสาร ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมีสิ่งที่สำคัญอีกอันหนึ่งได้แก่การกวนสาร ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสารไปในทางใดทางหนึ่ง ซึ่งโดยปกติแล้วจะทำให้เคลื่อนไหวในลักษณะวนในภาชนะซึ่งอาจจะเป็นถังของของเหลวผสมหรือในเครื่องปฏิกรณ์เคมี ประโยชน์ของเครื่องกวนสารแบ่งได้เป็น

ก. เพื่อให้ของแข็งขนาดเล็ก ๆ ลอยตัวในของเหลวได้ดีขึ้น

ข. ทำให้การผสมระหว่างของเหลวและของเหลวดีขึ้น

ค. ทำให้การผ่านก๊าซลงในของเหลวเกิดฟองที่มีขนาดเล็ก

ง. ทำให้การพาความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนสู่ของเหลวเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและรวดเร็ว

สำหรับในเครื่องย่อยแร่เครื่องกวนสารจะทำให้การพาความร้อนในของเหลวเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและจะทำให้ปฏิกริยาของตัวทำปฏิกริยาเป็นไปอย่างสมบูรณ์ขึ้น ซึ่งขนาดของกำลังที่จะให้แก่เครื่องกวนสารนั้นจะต้องคำนึงถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของถังที่ใช้, ความยาว และเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด, ระยะตำแหน่งของใบพัดจากส่วนล่างสุดของถัง, ความฉีกของของเหลวและขนาดของ baffle baffle จะเป็นตัวทำให้เกิดการเคลื่อนไหวทางแนวตั้งด้วยนอกเหนือไปจากการเคลื่อนไหวตามแนวนอนอันเกิดจากใบพัด สำหรับสมการการคำนวนกำลังของเครื่องกวนสารที่จะทำให้การเคลื่อนไหวของของเหลวเป็นแบบ Turbulent แล้วเขียนได้เป็น [8]

$$P = \frac{K_T n^3 D_a^5 \rho}{g_c} \qquad (3\text{-}19)$$

K_T เป็นค่าคงที่สำหรับใบพัดของเครื่องกวนสารและถังต่าง ๆ

n เป็นอัตราการหมุนของใบพัด

D_a เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด

ρ เป็นความหนาแน่นของของเหลว

g_c เป็นแรงศูนย์ถ่วงจำเพาะ

สำหรับในกรณีที่ต้องการให้มีการแขวนลอยตัวของของแข็งขนาดเล็ก ๆ ในของเหลวจะต้องคำนึงถึงการนอนก้นของของแข็งเล็ก ๆ เหล่านั้น, ความสูงของของแข็งเล็ก ๆ ที่จะถูกยกขึ้นไปซึ่งสมการการคำนวนกำลังที่จะหมุนเครื่องกวนเขียนได้เป็น [8]

$$\frac{Pg_c}{g\rho_m V_m u_t} = (1-\epsilon_m)^{2/3}\left(\frac{D_t}{D_a}\right)^{1/2} e^{4.35\beta} \quad (3\text{-}20)$$

โดย $$\beta = \frac{Z_S - E}{D_t} - 0.1 \quad (3\text{-}21)$$

ρ_m, V_m เป็นความหนาแน่นและปริมาตรของของแข็งรวมกับของเหลวตามลำดับ

ϵ_m เป็น Volume fraction ของของเหลวที่มีของแข็งเล็ก ๆ ลอยตัวอยู่

D_t เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง

D_a เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด

Z_S เป็นความสูงของของแข็งเล็ก ๆ ที่จะลอยตัวขึ้นไป

E เป็นระยะที่ตำแหน่งของใบพัดห่างจากส่วนล่างของถัง

g_c, g เป็นแรงศูนย์ถ่วงจำเพาะ

u_t เป็นความเร็วในการนอนก้นของของแข็งเล็ก ๆ ซึ่งเป็นไปตาม Stokes' Law เขียนสมการได้เป็น

$$u_t = \frac{a_e D_P^2 (\rho_P - \rho)}{18 \mu} \qquad (3\text{-}22)$$

a_e = g ในกรณีที่ตกด้วยแรงถ่วงศูนย์

D_P เป็นขนาดของของแข็งเล็ก ๆ ซึ่งกำหนดให้เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมของของแข็งเล็ก ๆ นั้น

ρ_P เป็นความหนาแน่นของของแข็งเล็ก ๆ

ρ เป็นความหนาแน่นของของเหลว

μ เป็นความหนืดของของเหลว

3.3 การเลือกใช้วัสดุ การที่จะเลือกใช้วัสดุในการสร้างประกอบเครื่องนั้นจะต้องคำนึงถึงและเข้าใจกระบวนการและหลักการทำงาน เพื่อจะได้นำวัสดุชนิดต่าง ๆ มาทดสอบคุณสมบัติความทนทานและการถูกกัดกร่อนของสารเคมี

สำหรับการวางแผนเลือกใช้วัสดุอาจจะพิจารณาการเลือกใช้จากประสบการณ์, จากข้อมูลตามวารสารต่าง ๆ หรือตามโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ตลอดจนพิจารณาถึงความยากง่ายในการจัดหาวัสดุ และความปลอดภัยทางกายภาพอื่น ๆ เมื่อได้วัสดุที่เหมาะสมจากการเลือกแล้ว จะต้องมีการศึกษาถึงอิทธิพลอื่น ๆ ที่จะมีต่อวัสดุนั้น เช่น อิทธิพลของอากาศ, สิ่งเจือปนที่มีอยู่, อิทธิพลของความร้อน และโครงสร้างของเครื่องที่จะใช้วัสดุนั้นประกอบขึ้นมาเป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น ราคาของวัสดุ, ราคาของผลผลิตที่จะได้, อายุการใช้งานของวัสดุนั้น ๆ อีกด้วย