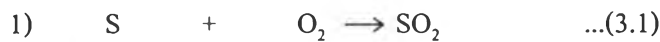


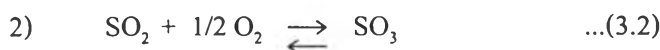
### บทที่ 3 ปฏิกิริยาและเครื่องปฏิกรณ์

#### 3.1 กระบวนการผลิตกรดกำมะถัน

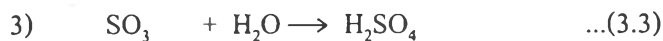
ในกระบวนการผลิตกรดกำมะถัน ประกอบไปด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนหลัก คือ



เป็นการเผาไหม้ของกำมะถันกับออกซิเจนได้เป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนใหญ่ได้มาจาก 2 แหล่งด้วยกัน คือ วิธีเผากำมะถันบริสุทธิ์กับอากาศโดยตรง และวิธีนำก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากการถลุงโลหะที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ



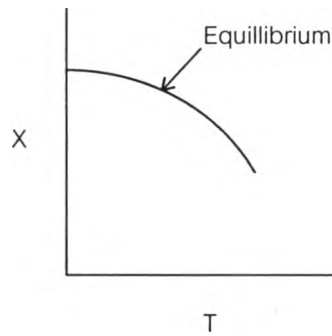
เป็นการเปลี่ยนซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{V}_2\text{O}_5$  ซึ่งจะดำเนินไปภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบด โดยจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในงานวิจัยนี้ต่อไป



เป็นการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ด้วยน้ำที่เป็นส่วนประกอบของกรดกำมะถัน เข้มข้น 98.5 % ซึ่งจะเกิดจากการผ่านก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ให้ไหลสวนทางกับกรดกำมะถันในหอดูดซับ (Absorption Tower)

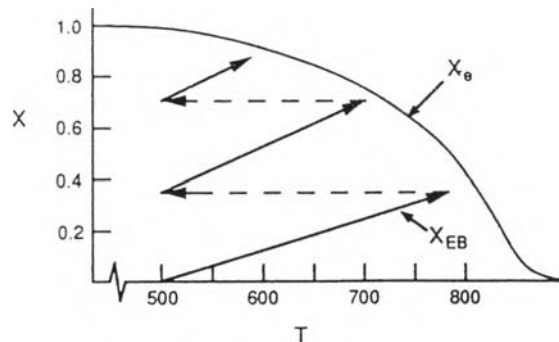
#### 3.2 ลักษณะเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเดชันของ $\text{SO}_2$

ปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{SO}_2$  กับ  $\text{O}_2$  เป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ (reversible exothermic reaction) โดยอาศัยตัวเร่ง ปฏิกิริยา  $\text{V}_2\text{O}_5$  ลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยานี้คือ เป็นปฏิกิริยาที่สามารถดำเนินไปจนกระทั่งมีค่าการเปลี่ยน (conversion) สูงสุดที่จุดสมดุลของปฏิกิริยา (equilibrium) เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยา ( $K_{\text{equilibrium}}$ ) จะลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสูงสุด (equilibrium conversion) ลดลงด้วย ดังแสดงตามรูป 3-1



รูปที่ 3-1 การเปลี่ยนแปลงของการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นที่จุดสมดุล (equilibrium conversion)  $X$  เทียบกับอุณหภูมิ  $T$

เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปได้มากที่สุด จึงต้องออกแบบให้จุดสิ้นสุดของปฏิกิริยา อยู่ที่อุณหภูมิต่ำพอที่ได้ค่าการเปลี่ยน (conversion) ตามที่ต้องการ แต่อุณหภูมิต้องสูงพอที่ทำให้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วพอที่จะทำงานในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ คือ แบ่งการทำปฏิกิริยา ออกเป็นชั้น ในระหว่างชั้น จะถ่ายเทความร้อนออก และในชั้นตอนสุดท้ายจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยา จะต้องทำให้อุณหภูมิมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ วิธีการดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แสดงการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนออก ระหว่างชั้นของปฏิกิริยา

ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์ (converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการเกิดปฏิกิริยาถูกออกแบบเป็นหอทรงกระบอกสูงภายนอกหุ้มฉนวน ภายในแบ่งเป็นชั้น ในแต่ละชั้นบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา ( $V_2O_5$ ) ในลักษณะเป็น packed bed ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ในแต่ละชั้นของเครื่อง

ปฏิกรณ์ แล้วถูกนำไปถ่ายเทความร้อนออกที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ก่อนนำกลับเข้าทำปฏิกิริยา ในขั้นต่อไป เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้สูงสุด

### 3.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบด(packbed reactor)

#### 3.3.1 ลักษณะทั่วไป

เครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบดเป็นเครื่องปฏิกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมเคมี โดยสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มักจะถูกอยู่ในสภาวะก๊าซ ซึ่งจะต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะของแข็ง จึงออกแบบเครื่องปฏิกรณ์โดยบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดไว้ภายใน และให้สารตั้งต้นที่อยู่ในสภาวะก๊าซไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านั้น แล้วเกิดปฏิกิริยาได้เป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จะมีลักษณะแตกต่างกันไปบ้างตามลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยานั้น จะแสดงตัวอย่างของเครื่องปฏิกรณ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-1 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบด

Classification	Use	Typical Application
Single adiabatic bed	Moderately exothermic or endothermic non-equilibrium limited	Mild hydrogenation
Radial flow	Where low $\Delta P$ is essential and useful where change in mole is large	Styrene from ethylbenzene
Adiabatic beds in series with intermediate cooling or heating	High conversion, equilibrium limited reactions	-SO <sub>2</sub> oxidation -Catalytic reforming -Ammonia synthesis -Hydrocracking
Multitubular nonadiabatic	Highly endothermic or exothermic reaction requiring close temperature control to ensure high selectivity	-Many hydrogenations -Ethylene oxidation to ethylene oxide, formaldehyde by methanol oxidation, phthalic anhydride production

ตารางที่ 3-1 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบด(ต่อ)

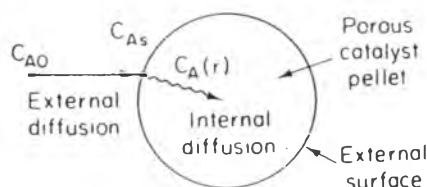
Classification	Use	Typical Application
Direct-fired nonadiabatic	Highly endothermic, high temperature reactions	Steam reforming

### 3.3.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบ Heterogenous

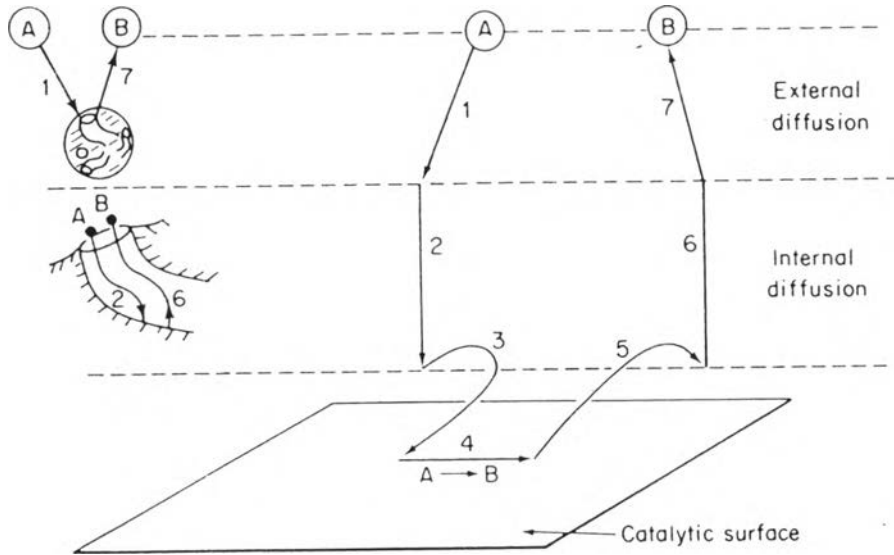
อัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบ Heterogenous ก่อนข้างจะซับซ้อน เนื่องด้วยปฏิกิริยาเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงยังขึ้นอยู่กับอัตราการเข้าถึงผิวตัวเร่งปฏิกิริยาของสารตั้งต้นด้วย และสามารถที่จะอธิบายขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

1. สารตั้งต้นจากกระแสของไหล (bulk fluid) แพร่ผ่านฟิล์มชั้นนอกของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาจนถึงผิวชั้นนอกของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา
2. สารตั้งต้นจากผิวชั้นนอกของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา แพร่ผ่านรูพรุนของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา เข้าถึงผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อยู่ภายในเม็ด
3. สารตั้งต้นถูกดูดซับกับผิวของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา
4. สารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น
5. ผลิตภัณฑ์คายออกจากผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
6. ผลิตภัณฑ์แพร่ผ่านรูพรุน มายังผิวชั้นนอกตัวเร่งปฏิกิริยา
7. ผลิตภัณฑ์แพร่ผ่านฟิล์มชั้นนอกตัวเร่งปฏิกิริยาออกสู่กระแสของไหล (bulk fluid)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม จึงเท่ากับขั้นตอนที่ช้าที่สุดในขั้นตอน 1-7 นี้ ซึ่งถ้าหากอัตราการแพร่ (ขั้นตอน 1, 2, 6 และ 7) ช้ากว่า ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา (ขั้นตอน 3, 4 และ 5) ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมจึงเท่ากับ อัตราการแพร่ และถ้าหากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุด เมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่นๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมจะเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



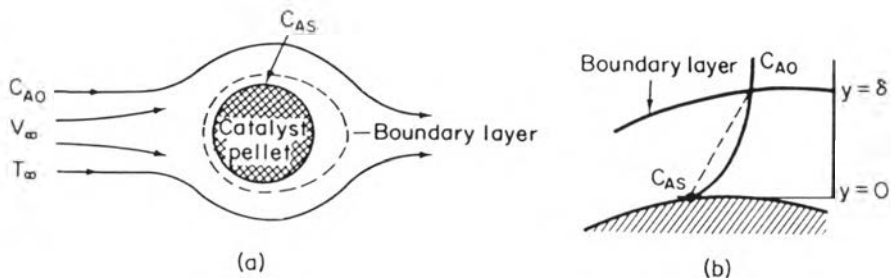
รูปที่ 3-3 แสดงขั้นตอนการแพร่ของสารตั้งต้น จากกระแสการไหล เข้าสู่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3-4 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบ Heterogenous

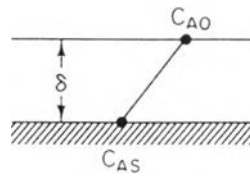
### 3.2.3 การแพร่ผ่านฟิล์มชั้นนอกตัวเร่งปฏิกิริยา

การไหลของกระแสก๊าซของสารตั้งต้น ผ่านเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ ครอบคลุมรอบผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นชั้นต้านทานการแพร่ของสารตั้งต้น และการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้ ความเข้มข้นและ อุณหภูมิ ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างจากในกระแส จะมากหรือน้อยขึ้นกับความหนาและค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลสารและพลังงานของชั้นฟิล์ม



รูปที่ 3-5 แสดงให้เห็นชั้นฟิล์มที่อยู่รอบตัวเร่งปฏิกิริยา

a. การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อนของชั้นฟิล์ม  
พิจารณาเฉพาะเมื่อดัชนีการถ่ายเทมวลสารที่มีชั้นฟิล์มหนา  $\delta$  ถัดจากผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และสามารถพิจารณาอนุโลมให้เป็นพิกัดฉาก โดย พิจารณาว่าผลเนื่องจากความโค้งของผิวน้อยมาก เนื่องจาก  $\delta$  หนาน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3-6 แสดง concentration profile บนชั้นฟิล์ม

สามารถแสดงสมการอธิบายอัตราการถ่ายเทมวลสารข้ามชั้นฟิล์มได้ดังสมการ

$$W = k_c (C_{a_0} - C_{a_s}) \quad \dots(3.4)$$

และสมการอธิบายการถ่ายเทพลังงานข้ามชั้นฟิล์ม ดังสมการ

$$Q = h (T_o - T_s) \quad \dots(3.5)$$

การศึกษาปัญหาการเกิดปฏิกิริยาแบบ Heterogenous ที่มีขั้นตอนการถ่ายเทมวลสารหรือการถ่ายเทพลังงานความร้อน เป็นขั้นตอน Rate limiting คือ การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร และ การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทพลังงานความร้อน ตามลำดับ ซึ่งทั้งนี้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว ได้มีการกล่าวถึง ในงานวิจัยอื่นๆ เช่น

สำหรับรูปทรงของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ง่ายที่สุดคือ ทรงกลม อาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group) ดังเช่น การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทพลังงาน จะใช้ตัวแปรไร้มิติ(Fogler 1992) ดังนี้

$$\text{Nusselt number , } Nu = \frac{hd_p}{k_f} \quad \dots(3.6)$$

$$\text{Reynolds number, Re} = \frac{U\rho d_p}{\mu} \quad \dots(3.7)$$

$$\text{Prandtl number, Pr} = \frac{\mu C_p}{k_t} = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\rho C_p}{k_t} \right) = \frac{\nu}{\alpha_t} \quad \dots(3.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่จะใช้หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทพลังงานความร้อน(h) สำหรับ รูปทรงกลม

$$\text{Nu} = 2 + 0.6\text{Re}^{1/2}\text{Pr}^{1/3} \quad \dots(3.9)$$

สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ก็จะมีลักษณะการหาไว้เช่นเดียวกัน โดยจะมีตัวแปรไร้มิติ คือ

$$\text{Sherwood number, Sh} = \frac{k_c d_p}{D_{AB}} \quad \dots(3.10)$$

$$\text{Schmidt number, Sc} = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad \dots(3.11)$$

$$\text{Reynold number, Re} = \frac{U\rho d_p}{\mu} \quad \dots(3.12)$$

โดยเพิ่มตัวแปร  $D_{AB}$  (mass diffusivity) ส่วนตัวแปรอื่นใช้ชนิดเดียวกับสมการการถ่ายเทพลังงาน ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่นำไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร( $k_c$ )คือ

$$\text{Sh} = 2 + 0.6\text{Re}^{1/2}\text{Sc}^{1/3} \quad \dots(3.13)$$

b. การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทพลังงานความร้อน สำหรับกรณี การไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบด

การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทพลังงาน ระหว่างผิวตัวเร่งปฏิกิริยากับในกระแสก๊าซในเครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบด (packed bed reactor) จะอาศัยความสัมพันธ์ของ Colburn j-factor กับ Reynolds Number (Yashida et al., 1962)

$$j_H = St Pr^{2/3} = \left( \frac{h_h}{C_b U c_{p,g}} \right) \left( \frac{v}{\alpha_l} \right)^{2/3} \quad \dots(3.14)$$

$$j_{m,l} = St_{m,l} Sc^{2/3} = \left( \frac{h_{m,l}}{U} \right) \left( \frac{v}{D_{l,aif}} \right)^{2/3} \quad \dots(3.15)$$

โดยความสัมพันธ์ของ j-factor กับ Reynolds Number คือ

$$J_H = j_m = 0.84 Re^{-0.51} : Re < 50 \quad \dots(3.16)$$

$$J_H = j_m = 0.57 Re^{-0.41} : Re \geq 50 \quad \dots(3.17)$$

โดย

$$Re = \frac{W}{a \psi \mu_{film}} \quad \dots(3.18)$$

### 3.2.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาในเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าปฏิกิริยาที่อาศัยตัวเร่งปฏิกิริยานั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนเช่นนี้ สารตั้งต้นความเข้มข้น  $C$  ที่ผิวชั้นนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องแพร่ผ่านรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปยังผิวด้านในเพื่อเกิดปฏิกิริยาที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ในระหว่างการแพร่ผ่านรูพรุน สารตั้งต้นจึงทำปฏิกิริยากับผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ระหว่างรูพรุนที่แพร่ผ่านไปด้วย จึงจะทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นแตกต่างกันออกไปที่จะเข้าถึงผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ณ จุดต่างๆ ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา ในแต่ละจุดบนพื้นผิวไม่เท่ากันด้วย

ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยา จึงอาศัยแนวทางในการนิยามตัวแปรใหม่ คือ Effectiveness factor ( $\eta$ )

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสภาวะอุณหภูมิและความเข้มข้นที่เข้าถึงพื้นผิวนั้นๆ}}{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยใช้สภาวะที่ผิวชั้นนอกตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้น}} \\ &= \frac{R^*}{R_s} \quad \dots(3.19) \end{aligned}$$



จากตัวแปรนี้จะสามารถคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นเพียงแค่ถ้าทราบภาวะที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและค่า  $\eta$  เท่านั้น

การหาค่า Effectiveness factor ( $\eta$ )

ก่อนอื่นต้องแนะนำตัวแปรเพื่อช่วยในการหาค่า  $\eta$  เพิ่มขึ้นอีก คือ

a. Effectiveness Diffusivity ( $D_e$ )

$D_e$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ Diffusivity (Knudsen) ที่สามารถแพร่ผ่านรูพรุนภายในเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา โดยคำนวณจาก

$$D_e = \frac{D_A \epsilon_p \sigma}{t} \quad \dots(3.20)$$

$D_A$  : Diffusivity in bulk ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )

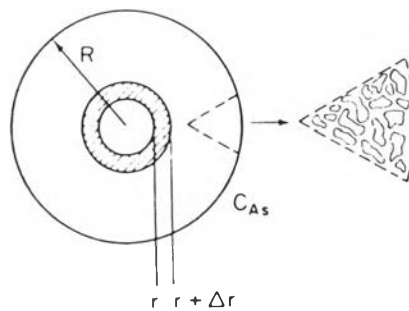
$\epsilon_p$  : void fraction (dimensionless)

$\sigma$  : constriction factor (Variation of cross-sectional area of pore) (dimensionless)

$t$  : tortuosity (dimensionless)

b. Thiele Modulus

พิจารณาเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3-7 แสดง shell balance บนตัวเร่งปฏิกิริยา

สามารถเขียนสมการสมดุล โมล โดยใช้ต้นแบบเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่  $n$  ได้

คือ

$$\frac{d^2 C_A}{dr^2} + \frac{2}{r} \left( \frac{dC_A}{dr} \right) - \frac{k_n A_i C_A^n}{D_e} = 0 \quad \dots(3.21)$$

โดยที่เงื่อนไขขอบเขต(Boundary Condition) คือ

$$C_A = \text{finite} \quad \text{at } r = 0$$

$$C_A = C_{A0} \quad \text{at } r = R$$

เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป จึงทำการพัฒนาสมการต่อมา เพื่อให้อยู่ในสภาพไร้มิติ(dimensionless equation) ทำให้ได้ตัวแปรไร้มิติที่สำคัญในการศึกษาปฏิกิริยาเครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบด คือ ค่าโมดูลัสของธิล(Thiele Modulus)

โดยให้  $\varphi = C_A / C_{AS}$

$$\lambda = r/R$$

จะได้สมการ (3.21) ในรูปไร้มิติเป็น

$$\frac{d^2 \varphi}{d\lambda^2} + \frac{2}{\lambda} \left( \frac{d\varphi}{d\lambda} \right) - \frac{k_n R^2 S_a \rho_p C_{AS}^{n-1}}{D_e} \varphi^n = 0 \quad \dots(3.22)$$

$$\frac{d^2 \varphi}{d\lambda^2} + \frac{2}{\lambda} \left( \frac{d\varphi}{d\lambda} \right) - \phi_n^2 \varphi^n = 0 \quad \dots(3.23)$$

จะได้ตัวแปรไร้มิติตัวสำคัญ คือ

$$\phi_n^2 = \frac{k_n C_{AS}^{n-1} \rho_p S_a R^2}{D_e} = \frac{k_n C_{AS}^n \rho_p S_a R}{D_e [(C_{AS} - 0) / R]} = \frac{\text{“อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ผิว”}}{\text{“อัตราการแพร่”}} \quad \dots(3.24)$$

ความหมายของ Thiele Modulus ( $\phi_n$ ) คือ ถ้า  $\phi_n$  มีค่าสูงมาก หมายถึง อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมถูกจำกัดด้วยการแพร่(diffusion) และถ้า  $\phi_n$  มีค่าต่ำมาก หมายถึง อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมถูกจำกัดด้วย อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ผิว

ตัวอย่างการคำนวณค่า  $\eta$  (Fogler 1992)

โดยจะเริ่มต้นสาริตจากรูปทรงของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาที่คุ้นเคยก่อนคือทรงกลม(sphere)และอัตราการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่ 1

ปฏิกิริยาที่คำนวณจากพื้นที่ผิวทั้งหมด โดยใช้สภาวะที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้น( $R_s$ )

$$\begin{aligned}
 R_s &= (\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อพื้นที่})(\text{พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา}) \\
 &= (\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อพื้นที่})(\text{พื้นที่ผิว/น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา})(\text{น้ำหนักรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา}) \\
 &= (-r'_{AS})(S_a) (4/3\pi R^3 \rho_p) \quad \dots(3.25)
 \end{aligned}$$

$-r'_{AS}$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อพื้นที่ผิว ณ สภาวะบนผิวชั้นนอกตัวเร่งปฏิกิริยา  
(mol/g.sec)

$S_a$  = พื้นที่ผิวน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา(m<sup>2</sup>/g)

$\rho_p$  = ความหนาแน่นตัวเร่งปฏิกิริยา(g/cm<sup>3</sup>)

$R$  = รัศมีของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา(cm)

ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง( $R'$ ) สามารถหาได้จาก อัตราการแพร่ผ่านพื้นที่ผิวชั้นนอกเข้าสู่ภายใน

$$\begin{aligned}
 (R') &= (\text{พื้นที่ผิวทรงกลม})(\text{อัตราการแพร่ต่อพื้นที่}) \\
 &= (4\pi R)(D_c C_{AS} \frac{d\phi}{d\lambda} \Big|_{\lambda=1}) \quad \dots(3.26)
 \end{aligned}$$

จาก Thiele Modulus ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่ 1 คือ

$$\phi_1 = R \sqrt{\frac{k_1 \rho_p S_a}{D_c}} \quad \dots(3.27)$$

แทนลงในสมการไร้มิติได้  $\frac{d\phi}{d\lambda} \Big|_{\lambda=1} = (\phi_1 \coth \phi_1 - 1)$

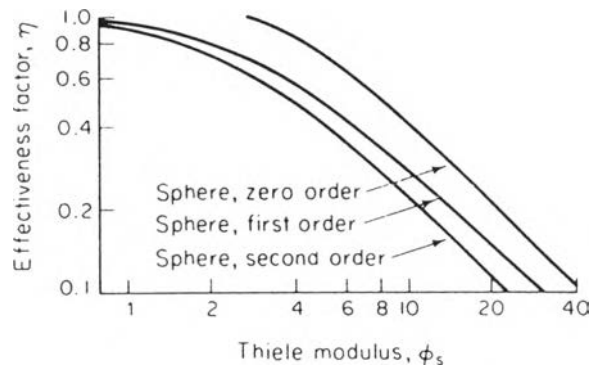
เพราะฉะนั้นอัตราการแพร่ =  $4\pi R D_c C_{AS} (\phi_1 \coth \phi_1 - 1)$

ต่อมาคำนวณหาค่า  $\eta$  โดยแทนค่าตามสมการ(3.19)

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\text{ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสภาวะอุณหภูมิและความเข้มข้นที่เข้าถึงพื้นผิวนั้นๆ}}{\text{ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยใช้สภาวะที่ผิวชั้นนอกตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้น}} \\
 &= \frac{3 (\phi_1 \coth \phi_1 - 1)}{\phi_1^2} \quad \dots(3.28)
 \end{aligned}$$

ค่า  $\eta$  ที่ได้สาธิตดังที่ข้างบนเป็นค่าเฉพาะในกรณีที่เกิดตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นรูปทรงกลม(sphere) กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่ 1 เท่านั้น

ในกรณีรูปทรงอื่นๆหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างไปนั้น ได้มีผู้ศึกษาและสรุปข้อมูลบางส่วน ดังแสดงในรูป 3-8

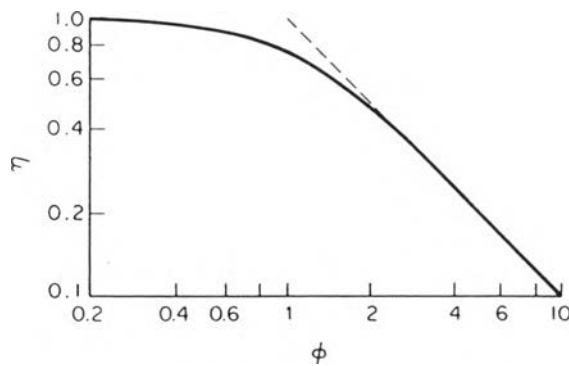


$$\text{Zero order } \phi_{s0} = R \sqrt{k_0 S_0 \rho_p / D_e C_{A0}}$$

$$\text{First order } \phi_{s1} = R \sqrt{k_1 S_0 \rho_p / D_e}$$

$$\text{Second order } \phi_{s2} = R \sqrt{k_2 S_0 \rho_p C_{A0} / D_e}$$

(a)



$$\text{Sphere } \phi = (R/3) \sqrt{k_1 S_0 \rho_p / D_e}$$

$$\text{Cylinder } \phi = (R/2) \sqrt{k_1 S_0 \rho_p / D_e}$$

$$\text{Slab } \phi = L \sqrt{k_1 S_0 \rho_p / D_e}$$

(b)

รูปที่ 3-8 แสดงค่า  $\eta$  ของรูปทรงต่างๆ และสำหรับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอื่นๆ