



บทที่ 2

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ (local mass transfer coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ทั้งในวัฏภาคแก๊ส และวัฏภาคของเหลว สามารถหาได้โดยการทดลอง หรือจากสูตรโดยประสบการณ์ของนักวิจัยหลายท่าน สูตรหรือสมการที่สร้างขึ้นจะมีหลายสมการ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาวะของการทดลองที่ต่าง ๆ กัน การเลือกใช้สมการควรใช้สมการที่มีภาวะการทดลองที่ใกล้เคียงกับภาวะของจริง สมการเหล่านี้มักจะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มไร้มิติที่มียกกำลังต่าง ๆ กัน

สมการตัวอย่างที่ยกมาแสดงในที่นี้สร้างขึ้นโดยนายอนดา (Onda) (11) และเพื่อนร่วมงาน โดยอาศัยข้อมูลของการถ่ายเทมวลในหลายๆ ระบบมารวบรวมสร้างสมการขึ้น ดังนี้

สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ในวัฏภาคของเหลว :

สมการ (2.1.1) : $k_L (\rho_L / \mu_L g)^{1/3} = 0.0051 (G_L / a \mu_L)^{2/3} (\mu_L / \rho_L D_A)^{-1/2} (a_v D_p)^{0.4}$

สมการ (2.1.2) : $a/a_v = 1 - \exp[-1.45 (\sigma_e / \sigma)^{0.75} (G_L / a_v \mu_L)^{0.1} (G_L^2 a_v / \rho_L^2 g)^{-0.05} (G_L^2 / \rho_L \sigma a_v)^{0.2}]$

สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ในวัฏภาคแก๊ส :

$$k_a RT/a_v D_v = C (G_v/a_v \mu_v)^{0.7} (\mu_v/\rho_v D_v)^{1/3} (a_v D_p)^{-2.0} \dots\dots\dots (2.1.3)$$

โดยที่

- a_v = พื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นแพคกิง (Packing Material) ต่อปริมาตรของแพคกิง (เมตร²/เมตร³)
- a = พื้นที่ผิวที่เปียกของเหลวของแพคกิงต่อปริมาตรของเขต (เมตร²/เมตร³)
- C = ตัวคงที่ที่ไม่มีหน่วย
= 5.23 สำหรับแพคกิงขนาดใหญ่กว่า 0.0127 เมตร (1/2 นิ้ว)
= 2.0 สำหรับแพคกิงขนาดเล็กกว่า 0.0127 เมตร (1/2 นิ้ว)
- D_A = สัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสาร A ในวัฏภาคของเหลว (เมตร²/วินาที)
- D_v = สัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสาร A ในวัฏภาคแก๊ส (เมตร²/วินาที)
- D_p = ขนาดเชิงตัวเลขของแพคกิง (Nominal Packing Size) (เมตร)
- G_L = อัตราไหลของของเหลวต่อพื้นที่หน้าตัดของหอ (กิโลกรัม/วินาที-เมตร²)
- G_v = อัตราไหลของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัดของหอ (กิโลกรัม/วินาที-เมตร²)
- μ_L = ความหนืดของของเหลว (นิวตัน-วินาที/เมตร²)
- μ_v = ความหนืดของแก๊ส (นิวตัน-วินาที/เมตร²)
- ρ_L = ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัม/เมตร³)
- ρ_v = ความหนาแน่นของแก๊ส (กิโลกรัม/เมตร³)
- σ = ความตึงผิวของของเหลว (นิวตัน/เมตร)
- σ_c = ความตึงผิววิกฤต (นิวตัน/เมตร) ค่าตัวเลขในตารางที่ 2.1.1

ข้อสังเกต ของสมการ (2.1.1), (2.1.2) และ (2.1.3) คือ

- 1) สมการเหล่านี้ใช้ได้ในการณีของการถ่ายเทมวลที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในชั้นของเหลวด้านทาน
- 2) สมการนี้สร้างขึ้นโดยอาศัยผลการทดลองที่อาศัยของเหลวที่เป็นน้ำ และของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์โดยที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ ($G_L/a\mu_L$) สำหรับน้ำอยู่ระหว่าง 0-40 และของสารอินทรีย์อยู่ระหว่าง 1-40 และแพคกิงมีหลายรูปแบบคือเป็นวงแหวนแรชชิก (Raschig Ring) ขนาดตั้งแต่ 0.0064-0.0508 เมตร (0.25 ถึง 2 นิ้ว) แบร์ซาดเดิลส์ (Berl Saddle) ขนาด 0.0127-0.0381 เมตร (0.5 ถึง 1.5 นิ้ว)

วงแหวนพอล (Pall Ring) ขนาด 0.0254 เมตร (1 นิ้ว) ลูกกลม
ขนาด 0.012 และ 0.0254 เมตร (0.5 นิ้ว และ 1 นิ้ว) และ
รูปแท่ง (Rod) ขนาด 0.0127 และ 0.0254 เมตร (0.5 นิ้ว และ
1 นิ้ว)

ตารางที่ 2.1.1 ค่าความตึงผิววิกฤตของวัสดุต่างๆที่ใช้ทำแฉก

วัสดุ	σ_c (10^3 นิวตัน/เมตร)
คาร์บอน	56
เซรามิก	61
แก้ว	73
พาราฟิน	20
โพลีเอซิลีน	33
โพลีไวนิลคลอไรด์	40
เหล็ก	75

2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่เมื่อมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในชั้น ของเหลวด้านทาน

การถ่ายเทมวลที่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจะทำให้อัตราการ
ถ่ายเทมวลสูงขึ้น การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกจากกระแสแก๊ส
โดยใช้สารละลาย โมโนเอทานอลามีน เป็นระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นใน
ระหว่างการถ่ายเทมวล แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะซึมผ่านจากแก๊สเข้าไปในสาร
ละลายแล้วจะทำปฏิกิริยากับ เอ็มอีเอ ที่อยู่ในสารละลายซึ่งจะทำให้ความเข้มข้น
ของ CO_2 ที่ละลายในสารละลายลดลง ยังผลให้แรงขับหรือผลต่างของความ
เข้มข้นของแก๊ส CO_2 ในแก๊ส และสารละลายต่างกันมาก ทำให้ค่าอัตราการ
ถ่ายเทมวลสูงขึ้น

อิทธิพลของปฏิกิริยาเคมีต่ออัตราการดูดซึมแก๊ส สามารถถูกแทนด้วย
เทอมของเอนฮานซ์เมนต์แฟคเตอร์ (Enhancement Factor), E

$$E = \left[\frac{N_{A,L}}{N^{\circ}_{A,L}} \right] \begin{matrix} C^{\circ}_{A,b} = C_{A,b} \\ C^{\circ}_{A,i} = C_{A,i} \end{matrix} \quad (2.2.1)$$

โดยที่ $N_{A,L}$ = ฟลักซ์ของการดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาเคมี
(Chemical Absorption Flux)

$N^{\circ}_{A,L}$ = ฟลักซ์ของการดูดซึมทางกายภาพ
(Physical Absorption Flux)

ตัว L ที่ห้อยท้าย หมายถึง โมลาร์ฟลักซ์ ในวัฏภาคของเหลว

$$\text{หรือ } E = \frac{k_L}{k^{\circ}_L} \quad (2.2.2)$$

โดยที่ k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล เมื่อมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นใน
ระหว่างการดูดซึม

k°_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเมื่อมีเฉพาะการดูดซึมทาง
กายภาพ

รูปแบบของสมการ N_A และ E จะเปลี่ยนไปตามชนิดของปฏิกิริยา
ซึ่งจะพิจารณาเป็นกรณีๆ ไป

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First Order Reaction) สำหรับปฏิกิริยาผันกลับไม่
ได้ (Irreversible) และเกิดอย่างรวดเร็ว แฮตตา (Hatta) (12) ได้ใช้
แบบจำลองแบบฟิล์ม (Film Model) ได้คำตอบสำหรับ $\sqrt{M} \gg 3$

$$N_A = \sqrt{D_A k_1} C_{A,i} \quad (2.2.3)$$

เมื่อ k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$M = \frac{D_A k_1}{(k^{\circ}_L)^2}, \quad \text{ไม่มีหน่วย} \quad (2.2.4)$$

D_A = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร A

เอนฮานซ์เมนต์แฟคเตอร์จะเป็น

$$E = \frac{\sqrt{D_A k_L}}{k_L} = \sqrt{M} \quad (2.2.5)$$

สำหรับแบบจำลองของ ฮิกบิ (Higbie) และ แดงค์เวอร์ท (Danckwerts) ก็จะได้ดังสมการ (2.2.3) และ (2.2.5) เช่นกัน แม้ว่าคำตอบที่แน่นอน (Exact Solutions) จะแตกต่างกันเล็กน้อย (13)

ปฏิกิริยาเป็นแบบเกิดขึ้นทันทีทันใด และผันกลับไม่ได้ (Instantaneous Irreversible Reaction)



หนึ่งโมลของสาร A ที่ซึมเข้ามาในชั้นของเหลว จะทำปฏิกิริยาทันทีกับ z โมลของสาร B ที่อยู่ในชั้นของเหลว และได้ผลิตภัณฑ์ P จำนวน y โมล จากแบบจำลองแบบฟิล์ม โดยนาย แอดตา ได้

$$N_A = \left(1 + \frac{D_B C_{Bb}}{zD_A C_{A1}}\right) k_L C_{A1} \quad (2.2.7)$$

$$= E_1 k_L C_{A1} \quad (2.2.8)$$

$$\text{โดย } E_1 = 1 + \frac{C_{Bb}}{zC_{A1}} \cdot \frac{D_B}{D_A} \quad (2.2.9)$$

C_{Bb} = ความเข้มข้นในเนื้อของเหลวของสาร B (เอ็มอีเอ)

D_B = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร B

E_1 = เอนฮานซ์เมนต์แฟคเตอร์สำหรับกรณีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทันทีทันใด แดงค์เวอร์ท (14), (15) ได้เสนอสมการที่สอดคล้องกับแบบจำลองของ ฮิกบิ และ แดงค์เวอร์ท

$$E_1 = \sqrt{\frac{D_A}{D_B}} + \frac{C_{Bb}}{zC_{A1}} \sqrt{\frac{D_B}{D_A}} \quad (2.2.10)$$

ข้อสังเกต ถ้า $D_A = D_B$ สมการ (2.2.10) จะเหมือนกับสมการ (2.2.9) ไบรอัน (Brian) และคณะ (17) ได้เสนอ

$$E_1 = 1 + \frac{C_{Bb}}{zC_{A1}} \sqrt{\frac{D_B}{D_A}} \quad (2.2.11)$$

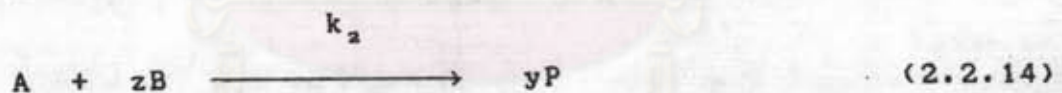
ฮิกิตะ (Hikita) และคณะ (34) ได้อธิบายสมการ E_1 สำหรับกรณีปฏิกิริยาเกิดขึ้นทันทีที่กั้นโดแบบผันกลับได้และมีค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant) ใหญ่มากๆ ปฏิกิริยามีรูปแบบดังนี้



$$\text{ได้ } E_1 = 1 + \sqrt{\frac{D_B}{D_A}} \left[\frac{C_{Bb}}{2C_{A1}} \right] \frac{1}{1 + \sqrt{C_{Ab}/C_{A1}}} \quad (2.2.13)$$

C_{Ab} = ความเข้มข้นในเนื้อของเหลวของสาร A (คาร์บอนไดออกไซด์)

ปฏิกิริยาอันดับสอง (Second Order Reaction) สำหรับการดูดซึมแก๊ส
แบบมีปฏิกิริยาอันดับสอง และผันกลับไม่ได้



คำตอบในเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) สำหรับแบบจำลองแบบฟิล์มยังไม่มีใครหาคำตอบได้ แต่นาย แวน เครวีเลน (Van Krevelen) และ ฮอฟทิสเซอร์ (Hofstizer) (16) ได้คำนวณหาคำตอบโดยประมาณของสองสมการนี้ สำหรับกรณีที่ $C_{Ab} = 0$ และเขาได้แสดงคำตอบเหล่านี้ออกมาในรูปของสมการที่มีความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 10\%$ ดังนี้

$$E = \frac{\sqrt{M \left[\frac{E_1 - E}{E_1 - 1} \right]}}{\tan h \sqrt{M \left[\frac{E_1 - 1}{E_1 - 1} \right]}} \quad (2.2.15)$$

$$\text{โดยที่ } M = \frac{D_A k_2 C_{BB}}{(k_L^0)^2} \quad (2.2.16)$$

$$E_1 = 1 + C_{BB} D_B / z C_{A1} D_A \quad (2.2.17)$$

ไบรอัน และคณะ (17) หาคำตอบจากทฤษฎีการทะลุผ่าน (Penetration Theory) สำหรับการดูดซึมแก๊สโดยมีปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับไม่ได้คำตอบที่ได้ถูกแทนด้วยสมการ

$$E = \frac{\sqrt{M \left[\frac{E_1 - E}{E_1 - 1} \right]}}{\tan h \sqrt{M \left[\frac{E_1 - E}{E_1 - 1} \right]}} \quad (2.2.18)$$

$$\text{โดยที่ } M = \frac{D_A k_2 C_{BB}}{(k_L^0)^2} \quad (2.2.19)$$

$$\text{และ } E_1 = 1 + \frac{C_{BB}}{z C_{A1}} \sqrt{\frac{D_B}{D_A}} \quad (2.2.20)$$

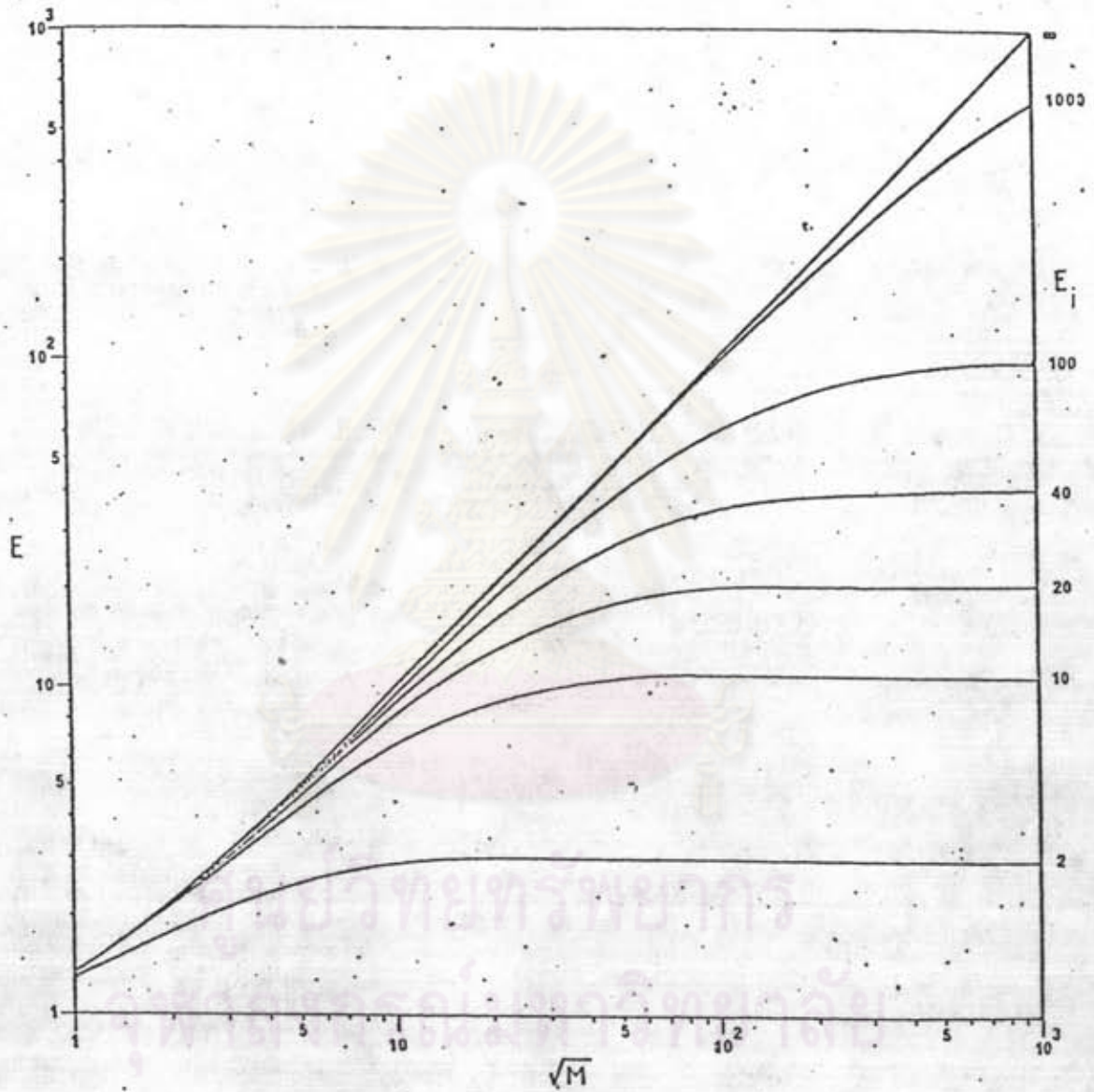
รูปที่ 2.2.1 แสดงตัวอย่างของค่า E เป็นฟังก์ชันของ \sqrt{M} ที่ค่าต่าง ๆ ของ (E_1) โดยคำนวณมาจากสมการที่ (2.2.18)

สมการ (2.2.18) สามารถทำให้ง่ายขึ้นโดยการกำหนดกรณีเฉพาะขึ้น (15) เช่น

$$\text{ถ้า } \sqrt{M} < (1/2) E_1 \quad (2.2.21)$$

$$\sqrt{M} > 3 \quad (2.2.22)$$

ทางเดินของค่า E จะอยู่ใกล้กับเส้นทแยงมุม ($E = \sqrt{M}$) ซึ่งเป็นเส้นที่แทนปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order) ดังนั้นสามารถใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (2.2.3-2.2.5) ในการหาอัตราการถ่ายเทมวล



รูปที่ 2.2.1 แสดงค่า E ของปฏิกิริยาอันดับสอง

014319

หรือการดูดซึมโดยแทนค่า $k_1 = k_2 C_{\text{B}}$ และ $C_{\text{A}} = 0$ ในกรณีเช่นนี้อาจจะอธิบายเป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้าพอ หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเมื่อไม่มีปฏิกิริยามีค่าสูงพอ เพื่อที่จะรักษาระดับความเข้มข้นของสาร B ในชั้นของเหลวด้านทานให้คงที่ และเท่ากับความเข้มข้นของของเหลวทั้งหมด C_{B}

ปี พ.ศ. 2517 ดีคัวร์เซย์ (DeCoursey) (9) ได้เสนอคำตอบโดยประมาณ สำหรับการดูดซึมแก๊สโดยมีปฏิกิริยาเคมี อันดับสองแบบผันกลับไม่ได้ ในวิภาคของเหลว โดยใช้แบบจำลองของ แดงค์เวอร์ท เนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้จะใช้คำตอบของ ดีคัวร์เซย์ ในการหาอัตราการถ่ายเทมวลและคำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดความสูงของหอดูดซึมแบบแพค สมการคำตอบที่ใช้คือ

$$E = -\frac{M}{2(E_1 - 1)} + \sqrt{\left[\frac{M^2}{4(E_1 - 1)^2} + \frac{E_1 M}{(E_1 - 1)} + 1 \right]} \quad (2.2.23)$$

โดย E_1 ได้จากสมการ (2.2.20) ของ ไบรอัน และคณะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย