



## วารสารปริทัศน์

## 2.1 กลไกการดูดซึม (Mechanism of absorption) - The Two-Film Theory (1)

แนวคิดที่มีประโยชน์มากที่สุดสำหรับกระบวนการการดูดซึมคือ Two-Film Theory อันเนื่องมาจาก Whitman ตามทฤษฎีนี้สารจะถูกถ่ายเทใน main body ของวัสดุโดยกระแสการพา (convection current) โดยไม่พิจารณาถึงความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ยกเว้นในบริเวณที่ใกล้กับผิวสัมผัส (interface) ระหว่างวัสดุกับแต่ละด้านของผิวสัมผัสได้รับการสมมุติว่าไม่มีกระแสการพาและมีฟิล์มบาง (thin film) ของของไหลเกิดขึ้นตลอดที่ซึ่งการถ่ายเทนั้นได้รับเพียงอิทธิพลจากการแพร่แบบโมเลกุล (molecular diffusion) เท่านั้น ฟิล์มนี้หนากว่า laminar sub-layer เล็กน้อย เพราะว่าให้ความต้านทานเท่ากับความต้านทานของ boundary layer ทั้งหมด ตามกฎของ Fick นั้นอัตราการถ่ายเทโดยการแพร่เป็นสัดส่วนกับผลต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) และพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีการแพร่เกิดขึ้นทิศทางการถ่ายเทของสารผ่านผิวสัมผัสไม่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้น แต่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ทางสมดุล (equilibrium relationship) ปัจจัยการควบคุม (controlling factor) จะเป็นอัตราการแพร่ผ่านฟิล์มทั้งสองซึ่งพิจารณาว่ามีความต้านทานทั้งหมดอยู่ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบผ่านวัสดุของก๊าซและของเหลว แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 โดย  $p_g$  คือความดันย่อยในวัสดุของก๊าซ,  $p_1$  คือความดันย่อยที่ผิวสัมผัส,  $C_L$  คือความเข้มข้นในวัสดุของของเหลว และ  $C_1$  คือความเข้มข้นที่ผิวสัมผัส

ดังนั้นตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมา ความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสจะอยู่ในสมดุล และความต้านทานต่อการถ่ายเทจะมีศูนย์กลางในฟิล์มบางของแต่ละด้าน

## 2.2 การแพร่ผ่านฟิล์มก๊าซ (Diffusion through a stagnant gas film) (2)

กระบวนการดูดซึมทางกายภาพ อาจพิจารณาเป็นการแพร่ของก๊าซที่ละลายได้ A ไปในของเหลวโมเลกุล A จะแพร่ผ่านฟิล์มก๊าซ (stagnant gas film) ถ้าพิจารณาว่าการดูดซึมของก๊าซประกอบด้วยองค์ประกอบที่ละลายได้ A และองค์ประกอบที่ไม่ละลาย B



อัตราการแพร่ของ A ไปยังผิวสัมผัส

$$N_A = - D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N_A$  คือ อัตราการแพร่, โมล/หนึ่งหน่วยเวลา-หนึ่งหน่วยพื้นที่

$C_A$  คือ ความเข้มข้น, โมล/หนึ่งหน่วยปริมาตร

$D_{AB}$  คือ vapor phase diffusivity

และ  $z$  คือ ระยะในทิศทางของการแพร่

สำหรับ ก๊าซอุดมคติ (ideal gas) ความหนาแน่นเชิงโมลาร์ (molar density),  $C_T$  ไม่ขึ้น  
อยู่กับองค์ประกอบ

$$C_A + C_B = C_T = \frac{P_i}{RT}$$

อัตราการดูดซึมทางกายภาพของ A

$$N_A = \text{flow by diffusion} + \text{bulk flow}$$

$$= - D_{AB} \frac{dC_A}{dz} + N x_A$$

$$= - D_{AB} \frac{dC_A}{dz} + (N_A + N_B) x_A \quad (2.2)$$

$$= - D_{AB} \frac{dC_A}{dz} + (N_A + N_B) \frac{C_A}{C_T}$$

เมื่อ  $N = N_A + N_B$  และ  $x_A = C_A/C_T$

ที่สภาวะคงตัว (steady state) จะมีการแพร่ในทิศทาง  $z$  เท่านั้น  $N_A$  และ  $N_B$  จะคงที่ อินทิเกรตสมการ (2.2) ตลอดความหนาของฟิล์ม,  $z_G$  และแทนความเข้มข้นแต่ละด้านของฟิล์มด้วย suffix 1 และ 2

$$\int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{-dC_A}{N_A C_T - C_A (N_A + N_B)} = \frac{1}{C_T D_{AB}} \int_{z_1}^{z_2} dz$$

กำหนดให้  $z_2 - z_1 = z_G$  จะได้ว่า

$$\frac{1}{N_A + N_B} \ln \left[ \frac{N_A C_T - C_{A2} (N_A + N_B)}{N_A C_T - C_{A1} (N_A + N_B)} \right] = \frac{z_G}{C_T D_{AB}}$$

หรือ  $N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB} C_T}{z_G} \ln \left[ \frac{N_A / (N_A + N_B) - C_{A2} / C_T}{N_A / (N_A + N_B) - C_{A1} / C_T} \right]$  (2.2)

จากกฎของก๊าซอุดมคติ (ideal-gas law)

$$\frac{C_A}{C_T} = \frac{p_A}{p} \quad \text{และ} \quad C_T = p/RT$$

ดังนั้น สมการ (2.2) จะเขียนได้เป็น

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB} P}{R T z_G} \ln \left[ \frac{[N_A / (N_A + N_B)] P - p_{A2}}{[N_A / (N_A + N_B)] P - p_{A1}} \right]$$
 (2.3)

เนื่องจาก อัตราการแพร่ของ B,  $N_B = 0$

$$\frac{N_A}{N_A + N_B} = 1$$

และสมการ (2.3) จะเขียนได้เป็น

$$N_A = \frac{D_{AB} P}{R T z_G} \ln \left[ \frac{P - p_{A2}}{P - p_{A1}} \right]$$

เนื่องจาก  $P - p_{A2} = p_{B2}$ ,  $P - p_{A1} = p_{B1}$ ,  $p_{B2} - p_{B1} = p_{A1} - p_{A2}$



$$\text{ดังนั้น } N_A = \frac{D_{AB} P}{R T z_G} \frac{p_{A1} - p_{A2}}{p_{B2} p_{B1}} \ln \left[ \frac{p_{B2}}{p_{B1}} \right]$$

$$\text{ถ้าให้ } \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln (p_{B2}/p_{B1})} = p_{Bm}$$

$$\text{จะได้ว่า } N_A = \frac{D_{AB} P}{R T z_G p_{Bm}} (p_{A1} - p_{A2})$$

นั่นคือ อัตราการดูดซึมของ A ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$N_A' = k_G [p_{A1} - p_{A2}] \quad (2.4)$$

$$\text{เมื่อ } k_G = \frac{D_{AB} P}{R T z_G p_{Bm}}$$

ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ ไม่ทราบค่าความหนาของฟิล์ม จึงนิยมใช้สมการ (2.4) โดย  $k_G$  คือ gas film transfer coefficient สำหรับการดูดซึม

### 2.3 อัตราการดูดซึม (Rate of Absorption based on Two Film Theory) (1)

ในกระบวนการสภาวะคงตัว (steady state process) ของการดูดซึมทางกายภาพ อัตราการถ่ายเทมวลสารผ่านฟิล์มของก๊าซจะเหมือนกับอัตราการถ่ายเทมวลสารผ่านฟิล์มของของเหลว สามารถเขียนสมการทั่วไปสำหรับการถ่ายเทมวลสารได้ดังนี้

$$\text{เมื่อ } N_A' = k_G (p_G - p_1) = k_L (C_1 - C_L) \quad (2.5)$$

$p_G$  คือ ความดันย่อยในก๊าซ

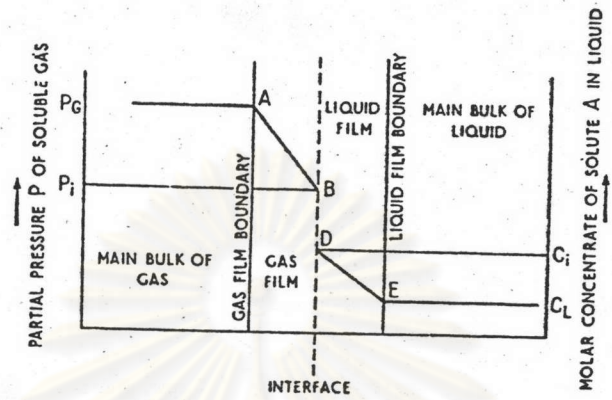
$C_L$  คือ ความเข้มข้นในของเหลว

$p_1$  และ  $C_1$  คือ ความดันย่อย และความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสซึ่งถูกสมมติว่าอยู่ในสภาวะสมดุล

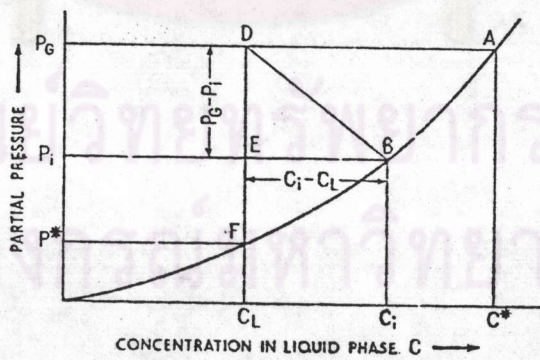
$$\text{เพราะฉะนั้น } \frac{k_G}{k_L} = \frac{C_1 - C_L}{p_G - p_1} \quad (2.6)$$

สภาวะเหล่านี้อาจแสดงได้ในเชิงเรขาคณิตดังรูปที่ 2.2 เมื่อ A.B.F. คือ เส้นโค้งสมดุล (equilibrium curve) จุด D( $C_L, p_G$ ) แทนสภาวะในของเหลว และก๊าซ





รูปที่ 2.1 โปรไฟล์ความเข้มข้นสำหรับองค์ประกอบ A ที่ถูกดูดซึม (1)



รูปที่ 2.2 driving force ในวัฏภาคของก๊าซและวัฏภาคของของเหลว (1)

$p_G$  คือ ความดันย่อยของ A ใน main bulk ของกระแสก๊าซ (gas stream),

และ

$C_L$  คือ ความเข้มข้นโดยเฉลี่ยของ A ใน main bulk ของของเหลว

จุด A ( $C^*, p_G$ ) แทนความเข้มข้น  $C^*$  ในของเหลวซึ่งอยู่ในสมดุลกับ  $p_G$  ในก๊าซ

จุด B ( $C_1, p_1$ ) แทนความเข้มข้น  $C_1$  ในของเหลวซึ่งอยู่ในสมดุลกับ  $p_1$  ในก๊าซ

ซึ่งเป็นสภาวะที่ผิวสัมผัส

จุด F ( $C_L, p^*$ ) แทนความดันย่อย  $p^*$  ในวัฏภาคของก๊าซซึ่งอยู่ในสมดุลกับ  $C_L$  ใน

ของเหลว

ดังนั้น driving force ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทในวัฏภาคของก๊าซ

$$(p_G - p_1) = DE$$

และ driving force ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทในวัฏภาคของของเหลว

$$(C_1 - C_L) = BE$$

และความเข้มข้นที่ผิวสัมผัส (จุด B) หาได้โดยการลากเส้นที่มีความชัน  $-k_L/k_G$  จาก D ไปตัดกับเส้นโค้งสมดุลที่จุด B

การหาค่า  $k_L$  และ  $k_G$  ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทในฟิล์มของของเหลวและฟิล์มของก๊าซตามลำดับโดยตรงนั้น ต้องทำการทดลองหาความเข้มข้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถหาได้ในกรณีพิเศษเท่านั้น พบว่าค่าที่พิจารณานั้นเป็นค่าสัมประสิทธิ์รวม คือ  $K_G$  และ  $K_L$  ดังสมการ

$$N_A' = K_G (p_G - p^*) = K_L (C^* - C_L) \quad (2.7)$$

โดย  $K_G$  และ  $K_L$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทรวมในวัฏภาคของก๊าซและวัฏภาคของของเหลวตามลำดับ (overall gas-phase transfer coefficient and overall liquid-phase transfer coefficient)



## 2.4 เครื่องมือในการดูดซึมก๊าซ

เครื่องมือที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซจะถูกออกแบบเพื่อทำให้การสัมผัสกันระหว่างวัฏภาคทั้งสองเกิดขึ้นมากที่สุด Welty (3) ได้แบ่งตามลักษณะเครื่องมือและวิธีการดำเนินการทดลองเป็น 4 แบบ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ดังนี้

### 2.4.1 Spray tower

### 2.4.2 Bubble tower

### 2.4.3 Bubble-plate and sieve-plate towers

### 2.4.2 Packed tower

#### 2.4.1 Spray tower

ประกอบด้วยหอทดลองซึ่งวัฏภาคของก๊าซไหลผ่านและของเหลวถูกป้อนเข้าไปภายในโดยหัวพ่นกระจาย (spray nozzle) รูปที่ 2.3 (a) แสดงทิศทางการไหลของวัฏภาคในหอทดลอง หัวพ่นกระจายถูกออกแบบให้แบ่งย่อยของเหลวออกเป็นหยดเล็ก ๆ จำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคในการถ่ายเทมวลสาร spray tower ใช้สำหรับการถ่ายเทมวลสารของก๊าซที่ละลายได้ดีมากซึ่งมี gas-phase resistance ความคุมอัตราการถ่ายเทมวลสาร

#### 2.4.2 Bubble tower

มีหลักการตรงกันข้ามกับ spray tower โดยก๊าซถูกกระจายเข้าไปในวัฏภาคของของเหลวในรูปของฟองละเอียด ฟองก๊าซขนาดเล็กจะให้นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมาก การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นทั้งในระหว่างการเกิดฟองและในขณะที่ฟองลอยสูงขึ้นผ่านของเหลว bubble tower ใช้สำหรับที่ซึ่งสภาพของของเหลวควบคุมอัตราการถ่ายเทมวลสาร

#### 2.4.3 Bubble-plate and sieve-plate towers

มักใช้ในทางอุตสาหกรรม เป็นการรวมของกลไกการถ่ายเทที่สังเกตได้ใน spray tower และ bubble tower การถ่ายเทมวลสารระหว่างวัฏภาคเกิดขึ้นในระหว่างการเกิดฟองและในขณะที่ฟองลอยสูงขึ้นผ่านของเหลว



#### 2.4.4 Packed tower

ใช้สำหรับการสัมผัสแบบสวนทางกันอย่างต่อเนื่องของวัฏภาคที่ไม่ผสมกัน เป็นหอทดลองในแนวตั้งซึ่งบรรจุด้วยวัสดุบรรจุ ของเหลวจะไหลลงมาผ่านผิววัสดุบรรจุเป็นฟิล์มบาง ส่วนก๊าซมีกลไกลชั้นสวนทางกับของเหลวทั้งสองวัฏภาคอยู่ในสภาพปั่นป่วน ดังนั้นอาจใช้สำหรับระบบก๊าซ-ของเหลวซึ่งมี gas-phase resistance หรือ liquid-phase resistance ความคมหรือที่ซึ่งความต้านทานทั้งสองวัฏภาคมีความสำคัญ

#### 2.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer coefficient) (4)

การถ่ายเทมวลสารระหว่างก๊าซและของเหลวมีกลไกเกิดขึ้น 3 ขั้นตอนด้วยกัน ขั้นตอนที่หนึ่ง โมเลกุลของก๊าซภายในช่องเดินทางไปยังพื้นที่ผิวของช่อง ขั้นตอนที่สอง โมเลกุลของก๊าซละลายผ่านผิวระหว่างก๊าซและของเหลว ขั้นตอนที่สาม โมเลกุลเดินทางจากผิวสัมผัสไปอยู่ที่ท่ามกลางของเหลว ที่ผิวสัมผัสอัตราการดูดซึมถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ในแต่ละด้านของผิวสัมผัส และความเข้มข้นที่บริเวณนี้จะอยู่ในสมดุลในเวลารวดเร็ว

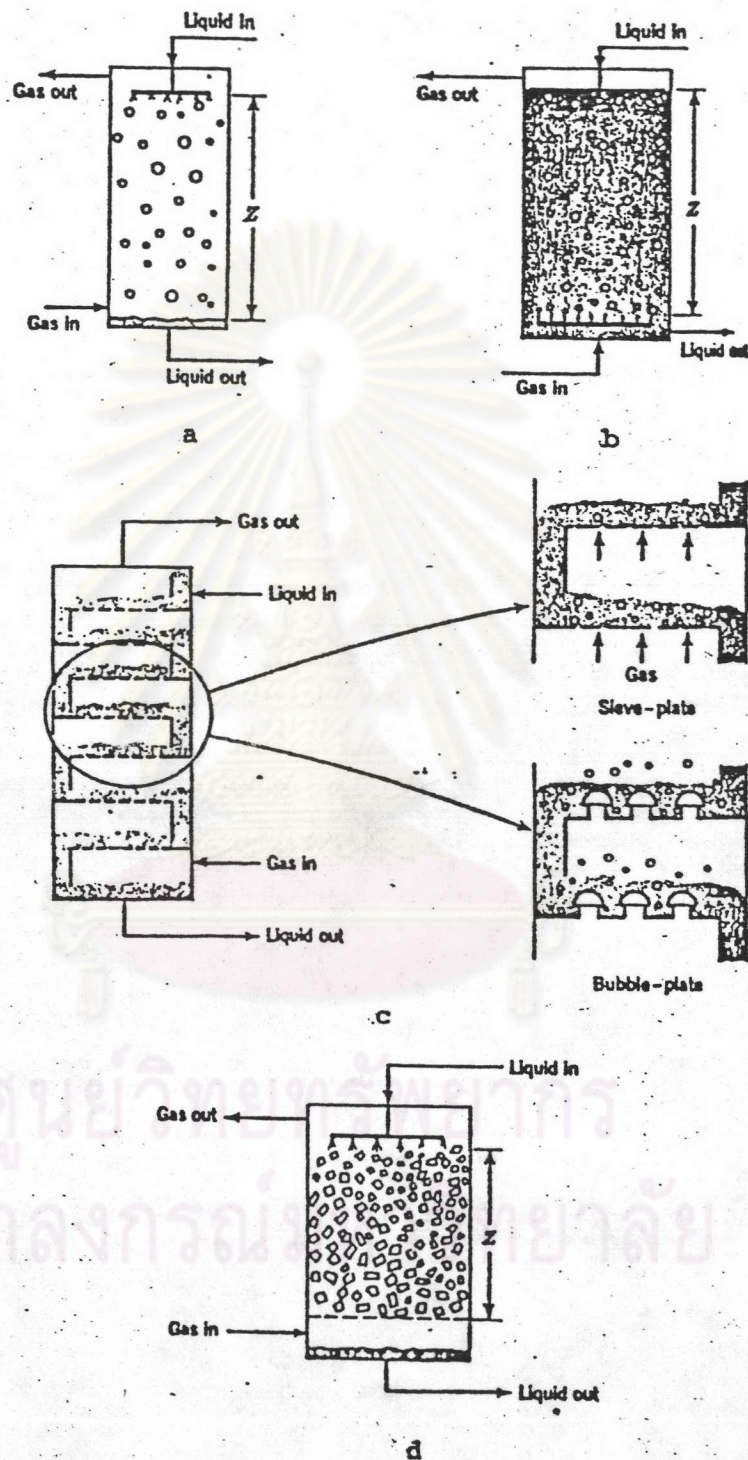
โดยทั่วไปการหาค่าความดันย่อยและความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสนั้นเป็นไปได้ ดังนั้นเป็นการสะดวกที่จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (overall mass transfer coefficient) ซึ่งมีพื้นฐานจาก overall driving force ระหว่าง  $p_A$  และ  $C_A$  อาจกำหนดสัมประสิทธิ์รวมจากพื้นฐานของวัฏภาคของก๊าซ  $K_G$  , หรือวัฏภาคของของเหลว,  $K_L$  โดยสมการ

$$K_G = \frac{N_A'}{p_A - p^*} \quad (2.8)$$

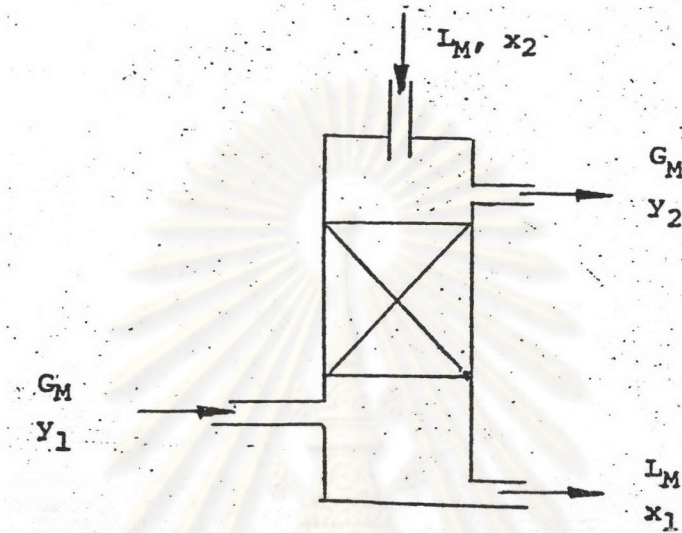
$$K_L = \frac{N_A'}{C^* - C_A} \quad (2.9)$$

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการดูดซึมในหอทดลอง โดยทั่วไปจะรายงานเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ควบคุมด้วย gas film (gas film mass transfer coefficient) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ควบคุมด้วย liquid film (liquid film mass transfer coefficient) หรือ H.T.U. (height of transfer unit) ความเข้มข้น





รูปที่ 2.3 หอดูดซึมก๊าซ (a) Spray tower (b) Bubble tower  
(c) Plate tower (d) Packed tower (3)



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการไหลสำหรับการดูดซึมแบบสวนทางกัน  
ใน packed tower (3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ของตัวถูกละลายในวัฏภาคของก๊าซ จะแสดงในรูปความดันย่อยหรือสัดส่วนโมล (mole fraction) แผนภาพการไหลสำหรับการดูดซึมแบบสวนทางกัน (counter-current absorption) ใน packed tower แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 อาจคำนวณปริมาณที่ถูกดูดซึมจากแต่ละองค์ประกอบของก๊าซหรือของเหลวที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ผ่านหอทดลอง ดังนั้นสมการสมดุลมวลสาร (materials balance) สำหรับกระบวนการคือ

$$G_M (y_1 - y_2) = L_M (x_1 - x_2) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $G_M$  และ  $L_M$  คือ อัตราการไหลเชิงโมลาร์ของก๊าซและของเหลว (Molar flow rates of inert gas and solute-free liquor, กรัมโมล/วินาที ชม.<sup>2</sup>),  $y$  และ  $x$  คือ สัดส่วนโมลของตัวถูกละลาย และ subscripts 1 และ 2 หมายถึงส่วนล่างสุดและส่วนบนสุดของคอลัมน์ตามลำดับในหน่วยของความดันย่อยและความเข้มข้นสมการ (2.10) จะเป็น

$$\frac{G_M (p_1 - p_2)}{P} = \frac{L_M (C_1 - C_2)}{\rho_M} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\rho_M$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กรัมโมล/ชม.<sup>3</sup>) อัตราการดูดซึมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของการบรรจุในส่วนใด ๆ ของหอทดลองเท่ากับผลคูณของ overall gas phase transfer coefficient,  $K_G$  และความแตกต่างระหว่างความดันย่อยของก๊าซที่ถูกละลายที่จุดนั้น,  $p$  กับความดันย่อยที่อยู่ในสมดุลกับของเหลว,  $p^*$  จากสมการ (2.8)

$$\begin{aligned} N_A' &= K_G (p - p^*) \\ &= K_G P (y - y^*) \end{aligned} \quad (2.12)$$

พื้นที่ของการบรรจุในส่วนเล็ก ๆ ของหอทดลองของหนึ่งหน่วยภาคตัดขวาง และความสูง  $dH$  คือ  $s.dH$  และอัตราการดูดซึมในส่วนนี้ถูกกำหนดโดยสมการ



$$\begin{aligned}
 N_A' \, sdH \, A &= K_G \, A \, P(y - y^*) \, sdH \\
 &= G_M \, dy \\
 &= L_M \, dx \qquad \text{_____ (2.13)}
 \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned}
 N_A' \, AdH &= K_G \, A \, (p - p^*) \, dH \\
 &= \frac{G_M \, dp}{P} \\
 &= \frac{L_M \, dc}{\rho_M} \qquad \text{_____ (2.14)}
 \end{aligned}$$

เพื่อที่จะอินทิเกรตสมการเหล่านี้ตลอดความสูงของหอทดลอง จำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง driving force ( $y - y^*$ ) หรือ ( $p - p^*$ ) และองค์ประกอบของก๊าซหรือของเหลว ในหลายกรณีที่เกี่ยวข้องกับสารละลายเจือจางปัญหานี้อาจทำให้ง่ายขึ้นโดยการสมมติว่าสภาพละลายได้ (solubility) เป็นไปตามกฎของ Henry และแทนด้วยสมการ

$$y^* = mx \qquad \text{_____ (2.15)}$$

$$p^* = Xc \qquad \text{_____ (2.16)}$$

จากสมมติฐานที่ทำให้ง่ายขึ้นนี้ สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า mean driving force สำหรับหอทดลองเท่ากับ logarithmic mean ของความแตกต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อยที่ส่วนบนสุด และส่วนล่างสุดซึ่งอาจคำนวณได้จากสภาวะสุดท้าย สมการสมดุลมวลสารและสภาพละลายได้ เพื่อพิสูจน์ทฤษฎีบทนี้ สิ่งแรกจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของของเหลวและก๊าซ และ driving force ที่ทุก ๆ จุดในหอทดลอง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทั้งสอง  $x$  และ  $y$  ที่ระดับใด ๆ หาได้โดยการประยุกต์สมการสมดุลมวลสารกับภาคตัดของหอทดลองที่ต่ำกว่าระดับนั้น



จากสมการ (2.10)

$$y_1 - y = \frac{L_M}{G_M} (x_1 - x)$$

จากสมการ (2.15)

$$y_1^* - y = m(x_1 - x)$$

และกำหนด driving force

$$\begin{aligned} \Delta y &= y - y^* \\ &= y_1 - y_1^* + \left[ m - \frac{L_M}{G_M} \right] (x_1 - x) \end{aligned}$$

โดยการหาอนุพันธ์ของสมการเหล่านี้ จะได้ว่า

$$d \Delta y = \left[ \frac{L_M}{G_M} - m \right] dx$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } dy &= \frac{L_M}{G_M} dx \\ &= \frac{(L_M/G_M)}{(L_M/G_M) - m} d \Delta y \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการ (2.10) และ (2.15)

$$\begin{aligned} \frac{(L_M/G_M)}{(L_M/G_M) - m} &= \frac{(y_1 - y_2)/(x_1 - x_2)}{[(y_1 - y_2)/(x_1 - x_2)] - [(y_1^* - y_2^*)/(x_1 - x_2)]} \\ &= \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_1 - \Delta y_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \Delta y_1 &= y_1 - y_1^* \\ \Delta y_2 &= y_2 - y_2^* \end{aligned}$$

นั่นคือ

$$dy = \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_1 - \Delta y_2} d\Delta y$$

จากสมการ (2.13)

$$\begin{aligned} \frac{K_G A P dH}{G_M} &= \frac{dy}{\Delta y} \\ &= \left[ \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_1 - \Delta y_2} \right] \left[ \frac{d\Delta y}{\Delta y} \right] \end{aligned}$$

อินทิเกรตระหว่างองค์ประกอบปลายสุด

$$\begin{aligned} \frac{K_G A P H}{G_M} &= \int_{y_2}^{y_1} \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_1 - \Delta y_2} \frac{d\Delta y}{\Delta y} \\ &= \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_{1n}} \end{aligned} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\Delta y_{1n}$  คือ logarithmic mean ของ  $\Delta y_1$  และ  $\Delta y_2$ 

$$\Delta y_{1n} = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{\ln(\Delta y_1 / \Delta y_2)} \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.17)

$$K_G A = \frac{G_M (y_1 - y_2)}{HP \Delta y_{1n}} \quad (2.19)$$



หรือ 
$$K_G A = \frac{N_{CO_2}}{H_T S P \Delta y_{1n}} \quad (2.20)$$

สำหรับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

### 2.5.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเท (Factors influencing the Transfer Coefficient) (1)

ผลกระทบโดยทั่วไปของสภาพละลายได้ของก๊าซที่มีต่อรูปร่างของเส้นโค้งสมดุล และผลกระทบของผลลัพท์ที่ได้ต่อสัมประสิทธิ์ของฟิล์มและสัมประสิทธิ์รวม อาจพิจารณาได้ดังนี้

#### 1. ก๊าซที่ละลายได้ดี (very soluble gas)

เส้นโค้งสมดุลจะใกล้กับแกนความเข้มข้น (C-axis) และจุด E (รูปที่ 2.2) เข้าใกล้กับจุด F มาก ค่า driving force ตลอดฟิล์มของก๊าซ (DE) จะเท่ากับ overall driving force (DF) โดยประมาณ ดังนั้น  $k_G$  จะเท่ากับ  $K_G$  โดยประมาณ

#### 2. ก๊าซที่ละลายได้น้อยมาก (almost insoluble gas)

เส้นโค้งสมดุลจะเพิ่มขึ้นอย่างชันมาก จนกระทั่ง driving force ( $C_1 - C_L$ ) (EB) ในฟิล์มของของเหลว เท่ากับ overall driving force ( $C^* - C_L$ ) (AD) ในกรณีนี้  $k_L$  จะเท่ากับ  $K_L$  โดยประมาณ

#### 3. ก๊าซที่ละลายได้ปานกลาง (moderately soluble gas)

ในที่นี้ทั้งสองฟิล์มจะให้ความต้านทานที่มากพอสมควร และจุด B ที่ผิวสัมผัสจะเป็นจุดที่ลากเส้นที่มีความชัน  $-k_L/k_G = -(p_G - p_1)/(C_1 - C_L)$  ผ่านจุด D ในงานทดลองส่วนใหญ่ๆ ไม่สามารถหาค่าความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสโดยตรงได้ ดังนั้นจึงหาได้แต่เพียงค่าสัมประสิทธิ์รวมเท่านั้น

### 2.5.2 กลุ่มไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสาร (Dimensionless groups concerning mass transfer) (5)

ในการศึกษาผลกระทบของ pulsation ที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราของกระบวนการการดูดซึม จำเป็นต้องทราบลักษณะการไหลของทั้งสองวัฏภาค และอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างวัฏภาคทั้งสอง pulsating flow คือ การไหลที่ถูกทำให้เกิดมีความเร่งและความหน่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะมีการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้นในช่วงของการเร่งหรือ

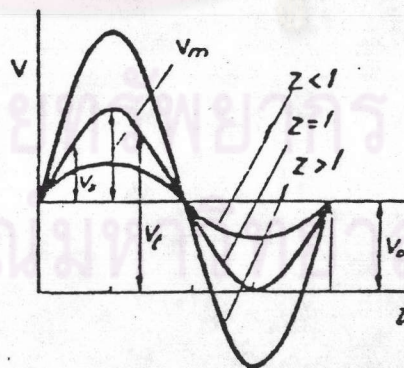


ช่วงของการหน่วง ช่วงเวลาเหล่านี้พิจารณาว่าเป็นกระบวนการเริ่มแรกซึ่งผิวสัมผัสยังไม่ได้รับการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ ภายใต้สภาวะการไหลเช่นนี้ชั้นของผิวสัมผัสจะบางมาก ความต้านทานต่อกระบวนการถ่ายเทมวลสารจึงลดลง และอัตราของกระบวนการจะเพิ่มขึ้นในกระบวนการดูดซึม pulsation ทำให้เกิดความปั่นป่วนในก๊าซหรือผ่านวัฏภาคของก๊าซ ซึ่งอาจกระทำต่อวัฏภาคของเหลว การแปรผันของความเร็วในการไหลของก๊าซในระหว่างการแกว่งกวัด (osillation) 1 ครั้ง เป็นสิ่งที่น่าสนใจมากถ้าให้ความเร็วคงตัว (steady-state velocity) ของก๊าซที่ไหลผ่านท่อ เป็น  $V_0$ , แอมพลิจูดของ pulsation,  $a$  และความถี่,  $f$  ดังนั้นกระแสความเร็ว (current velocity),  $V_x$  ที่เกิดจาก pulsation (รูปที่ 2.5)

$$V_x = V_m \sin \omega t \quad \text{_____ (2.21)}$$

หรือความเร็วรวม (total velocity) :

$$V_t = V_0 \pm V_x = V_0 \pm V_m \sin \omega t \quad \text{_____ (2.22)}$$



รูปที่ 2.5 แสดงการแปรผันของความเร็วใน pulsating flow



W. Linke (6) ได้ให้คำจำกัดความของ  $V_m/V_o$  คือ The Degree of undulation of the pulsation,  $Z$  นั่นคือ

$$V_t = V_o(1+Z \sin \omega t) \quad \text{และ} \quad Z = \frac{af}{V_o} \quad (2.23)$$

ค่าของ  $Z$  จะบอกถึงทิศทางการของความถี่รวมในท่อ สำหรับ  $Z < 1$  จะได้ sinusoidal pulsating flow ที่มีความเร็วเป็นบวก และสำหรับ  $Z > 1$  ในระหว่างช่วงของการท่วงจะมีค่าความเร็วเป็นลบ

นอกจากนี้จะต้องพิจารณาถึงลักษณะของวิถีภาคของของเหลว พิล์มของของเหลวที่ไหลผ่านผิวในแนวตั้งและมีค่า Reynolds number,  $Re > 16$  จะก่อตัวเป็นคลื่นบนผิวของรั้น ความหนาของฟิล์มและความเร็วของการไหลจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลวและอัตราในการกระจาย (spray rate) ที่  $Re = 16$  จะเป็น laminar flow ที่  $Re > 16$  การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent) พลังงานที่จำเป็นสำหรับการเกิดคลื่นและการผสมได้จากพลังงานศักย์ของของเหลว ซึ่งบางส่วนได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ บางส่วนถูกกระจัดกระจาย ที่เหลือจะใช้สำหรับการผสม

การแพร่ใน pulsating fluid สำหรับระบบเชิงเรขาคณิตที่คล้ายคลึงกัน แสดงได้ด้วยฟังก์ชันของรูปแบบต่อไปนี้

$$f(d, U_G, U_L, \rho_L, D_L, k, f, a) = 0 \quad (2.24)$$

วิเคราะห์ด้วยวิธี dimensional analysis จะได้ฟังก์ชันในรูปที่ประกอบด้วยกลุ่มไม่มีหน่วย 5 เทอม ตาม  $\Pi$  - Theory ดังนี้

$$f \left[ \left( \frac{dU_L \rho_L}{\mu_L} \right)^x \left( \frac{D_L}{dU_L} \right)^y \left( \frac{k}{U_L} \right)^z \left( \frac{df}{U_G} \right)^d \left( \frac{a}{d} \right)^e \right] = 0 \quad (2.25)$$



$$\text{โดย } \frac{1}{\frac{dU_L}{\mu_L} \rho_L \cdot \frac{D_L}{dU_L}} = \frac{\mu_L}{D_L \rho_L} = Sc \quad (2.26)$$

$$\frac{k/U_L}{D_L/dU_L} = \frac{kd}{D_L} = Sh \quad (2.27)$$

$$\text{และ } (df/U_G)(a/d) = fa/U_G \quad (2.28)$$

คุณสมบัติสมการ (2.28) ด้วย  $\parallel$  จะได้

$$\parallel \frac{fa}{U_G} = Z \quad , \text{ Degree of undulation of the pulsation } \quad (2.29)$$

ดังนั้นเขียนได้เป็น

$$Sh = C Re^m Sc^n Z^p (a/d)^r$$

พิจารณา  $Z$  ร่วมกับ  $a/d$  จะได้ว่า

$$Sh = C Re^m Sc^n Z^p \quad (2.30)$$

สมการ (2.41) แสดงถึงพฤติกรรมของกระบวนการแพร่ใน pulsating fluid ซึ่งแตกต่างจากสมการที่รู้จักกันดีสำหรับ steady-state flow โดยประกอบด้วยปัจจัย  $Z$  ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมสำหรับกระบวนการ pulsation

## 2.6 การดูดซึมที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี (Absorption associated with chemical reaction) (1)

ในกรณีเท่าที่พิจารณานั้น กระบวนการดูดซึมก๊าซในของเหลวจะเป็นไปในทางกายภาพเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามมีหลายกรณีในการดูดซึมที่ก๊าซทำปฏิกิริยาทางเคมีกับองค์ประกอบ

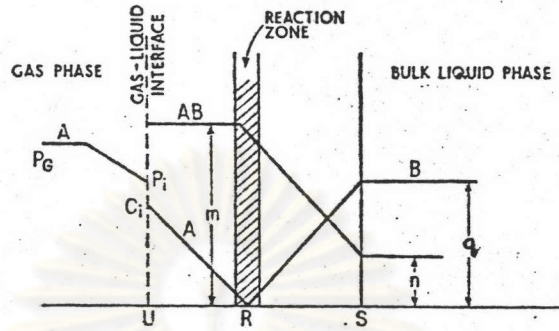


ของวิภาคของของเหลว เช่น ในการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์โดยสารละลายต่างนั้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารละลายต่าง ดังนั้นกระบวนการถ่ายเทมวลสารจะซับซ้อนยิ่งขึ้น ในกระบวนการเช่นนี้ สภาวะในวิภาคของก๊าซจะคล้ายคลึงกับที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ในวิภาคของของเหลวมีฟิล์มของของเหลว และ ขอบเขตของปฏิกิริยา (reaction zone) ปรากฏอยู่ โดยยังคงแทนกระบวนการแพร่ และปฏิกิริยาเคมีได้ด้วยการประยุกต์ใช้ Film theory เช่นเดียวกับวิธีของ Hatta (8) ในกรณีที่พิจารณาเห็น ปฏิกิริยาเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ และเป็นแบบที่ก๊าซตัวถูกละลาย A ถูกดูดซึมจากก๊าซผสมโดยสาร B ในวิภาคของของเหลว ซึ่งรวมกับ A ดังสมการ  $A + B \longrightarrow AB$  ในขณะที่ก๊าซเข้าใกล้ผิวสัมผัสของของเหลว ก๊าซจะละลายและเข้าทำปฏิกิริยากับ B โดยทันที ดังนั้นเกิดเป็นผลปฏิกิริยาใหม่ขึ้น AB ซึ่งแพร่ผ่านไปยังส่วนของสารละลายของของเหลว (main body of liquid) ความเข้มข้นของ B ที่ผิวสัมผัสจะลดลง อันเป็นผลให้เกิดการแพร่ของ B จากสารละลายของของเหลวไปยังผิวสัมผัสเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็ว ทำให้ B ถูกดึงไปอย่างรวดเร็วมาก จึงจำเป็นที่ก๊าซ A จะแพร่ผ่านส่วนของฟิล์มของของเหลวก่อนที่จะพบกับ B ดังนั้นจะมีขอบเขตของปฏิกิริยาระหว่าง A และ B ที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ห่างออกไปจากผิวสัมผัสระหว่างก๊าซ และของเหลวไปทางส่วนของสารละลายของของเหลว จนกระทั่งอัตราการแพร่ของ A จากผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว เท่ากับอัตราการแพร่ของ B จากส่วนของสารละลายของของเหลวก็จะเป็นตำแหน่งสุดท้ายของแถบของปฏิกิริยา เมื่อถึงสภาวะนี้ความเข้มข้นของ A, B และ AB แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยแกนตั้งเป็นความเข้มข้น และแกนนอนเป็นตำแหน่งของระนาบที่สัมพันธ์กับผิวสัมผัส โดย U คือ ระนาบของผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว R คือ แถบของปฏิกิริยา และ S คือ ขอบเขตภายนอกของฟิล์มของของเหลว (outer boundary of liquid film)

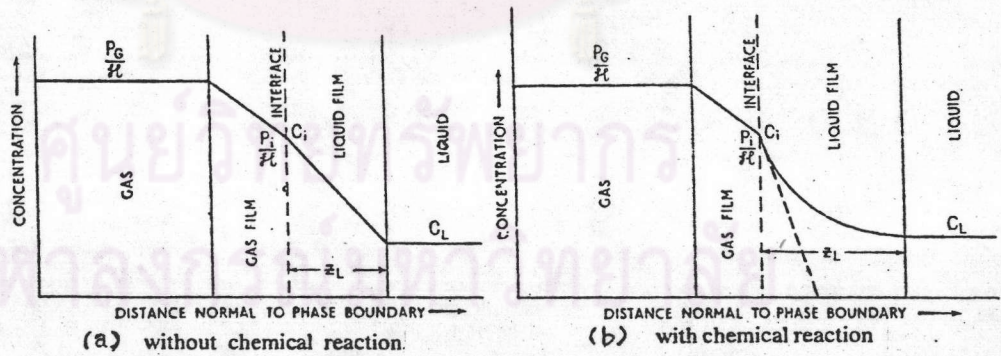
ดังนั้น A แพร่ผ่านฟิล์มของก๊าซด้วย driving force,  $p_g - p_1$  และแพร่ไปยังขอบเขตของปฏิกิริยาด้วย driving force,  $q$  และผลปฏิกิริยาที่ไม่ระเหย (non-volatile product) AB จะแพร่กลับไปยังส่วนของสารละลายของของเหลวภายใต้ driving force,  $m - n$

ความแตกต่างระหว่างการดูดซึมทางกายภาพและการดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 (a) และ 2.7 (b) จากเอกสารของ Van Kreyelen และ Hoftijzer (1:474) โดย 2.7(a) แสดง concentration profile สำหรับการดูดซึม





รูปที่ 2.6 โปรไฟล์ความเข้มข้นของการดูดซึมที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี (1)



รูปที่ 2.7 โปรไฟล์ความเข้มข้นสำหรับการดูดซึม (1)

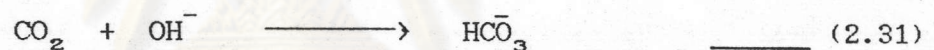


ทางกายภาพและ 2.7 (b) แสดง concentration profile สำหรับการดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีด้วย

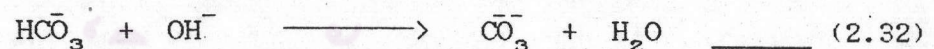
อิทธิพลของปฏิกิริยาเคมี คือ จะไปเร่งการดึง A จากผิวสัมผัส จากรูป 2.7 (a) concentration profile ผ่านฟิล์มของของเหลวที่มีความหนา  $z_L$  เป็นเส้นตรง ส่วนในรูป 2.7 (b) องค์ประกอบ A ถูกนำไปใช้โดยปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น concentration profile เป็นเส้นโค้ง โดยเส้นประเป็น concentration profile เมื่อ A ถูกนำไปใช้โดยการแพร่เท่านั้น สำหรับอัตราการดูดซึมเดียวกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ ศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบพัลส์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นการดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการดูดซึม (7) แสดงได้ดังนี้

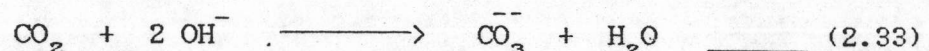
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่ค่อยละลายน้ำ แต่เมื่อละลายแล้วพบกับไอออนของไฮดรอกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างรวดเร็ว ดังสมการ



ในสารละลายมีปริมาณไอออนของไฮดรอกไซด์อยู่เป็นจำนวนมาก หลังจากปฏิกิริยานี้แล้ว จะมีปฏิกิริยาต่อเนื่องตามมา คือ



โดยปฏิกิริยาไอออนนิค (2.32) จะเกิดขึ้นเร็วกว่า (2.31) ดังนั้น (2.31) เป็น rate-determining step ปฏิกิริยารวม คือ





## 2.7 ผลงานวิจัยในอดีต

นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาปัญหาของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายต่างและสร้างสหสัมพันธ์ (correlation) โดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในก๊าซ (overall agas transfer coefficient) และรวมเทอมต่างๆ คือ อิทธิพลของการแพร่ในก๊าซ, อิทธิพลของการแพร่ในของเหลว และอิทธิพลของปฏิกิริยาเคมี Hatta (8) พบว่า  $K_G$  ไม่ขึ้นอยู่กับนอร์แมลิตี หรือสภาวะอื่นในของเหลว และสรุปว่า controlling resistance อยู่ในฟิล์มของก๊าซ Jenny (9:216) พบว่าในฟิล์มของของเหลวมีความสำคัญ ซึ่งไม่สอดคล้องกับ Hatta เนื่องจาก  $K_G$  ที่ได้ต่ำกว่า  $K_G$  สำหรับแอมโมเนียในเครื่องมือเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่า นอร์แมลิตีระหว่าง 1.0 และ 2.0 N ไม่มีผลกระทบต่อ  $K_G$

Tepe และ Dodge (10) ซึ่งใช้ระบบการไหลแบบสวนทางกันใน packed column ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 นิ้ว และบรรจุด้วย 1/2 in. C Raschig rings พบว่า  $K_G A$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่ 2 N จากนั้นลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น และ  $K_G A$  ลดลงอย่างเป็นเส้นตรงกับนอร์แมลิตีของโซเดียมคาร์บอเนต และ เพิ่มขึ้นเป็นกำลัง 0.28 กับอัตราการไหลของของเหลว เพิ่มขึ้นเป็นกำลัง 6 กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของของเหลว โดยไม่พิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของก๊าซได้ซึ่งสอดคล้องกับ Jenny ไม่พิจารณาถึง gas film resistance โดยความต้านทานในการถ่ายเทส่วนใหญ่จะอยู่ในวัฏภาคของของเหลว

Spector และ Dodge (11) ซึ่งใช้ระบบเดียวกันใน packed column พบว่า  $K_G A$  แปรผันตามกำลัง 0.5 ของความดันสัมบูรณ์ของหอตลอดง เพิ่มขึ้นเป็นกำลัง 0.35 กับอัตราการไหลของก๊าซที่ต่ำกว่า 500 ปอนด์ต่อชั่วโมงต่อตารางฟุต และเพิ่มขึ้นเป็นกำลัง 0.15 กับอัตราการไหลของก๊าซที่ใกล้เคียงกับ 100 ปอนด์ต่อชั่วโมงต่อตารางฟุต และสรุปว่า ความต้านทานในฟิล์มของก๊าซมีนัยสำคัญแต่ไม่ใช่ลักษณะเด่น ข้อมูลที่ได้แทนด้วยสมการที่อยู่ในรูป

$$\log K_G A = 0.20 \log L - K \quad (2.34)$$

เมื่อ L คือ อัตราการไหลของของเหลว และ K คือ ค่าคงที่ในสมการของ Spector และ

Dodge



นอกจากนี้ Hatta (12) ยังพบว่า เมื่อใช้ก๊าซผสมของอากาศ-คาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายต่างนั้น gas resistance มีความสำคัญน้อย เมื่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 38 และ liquid resistance จะควบคุมอัตราการถ่ายเท ในนิสัย (range) นี้ อัตราการดูดซึมเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลายต่าง

Blum, Stutzman และ Dodge (13) ทำการทดลองโดยใช้ระบบการไหลแบบ ส่วนทางกันใน packed column ที่มีขนาดของสิ่งบรรจุต่างๆ กัน ความสูงของการบรรจุ เท่ากับ 2.87-4.33 ฟุต ความเข้มข้นของเบสเท่ากับ 0.07-3.90 N สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ ในก๊าซเท่ากับ 0.03-0.28 อัตราการไหลของก๊าซและของเหลวเท่ากับ 2.9-18 และ 13-185 ปอนด์/(ชั่วโมง)(ตารางฟุต) ตามลำดับ พบว่า  $K_G A$  ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของก๊าซ แต่ เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของเหลว ซึ่งอิทธิพลนี้จะน้อยลง เมื่ออัตราการไหลของของเหลว เพิ่มขึ้น  $K_G A$  เพิ่มขึ้นตามนอร์แมลลิตี้ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนถึง 1.51 N จากนั้นนอร์แมลลิตี้ ที่เพิ่มขึ้นจะ ไม่มีอิทธิพลต่อ  $K_G A$  นอกจากนี้ยังสร้างสมการซึ่งใช้แทนกระบวนการดูดซึมก๊าซที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมทางกายภาพและปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

$$Na = \frac{K' h (OH^-)(CO_3^{2-})}{(\mu')^m} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $K' = 0.0176 L^{0.84}$  และ  $m = 1.09$

โดย  $K'$  ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของก๊าซและขนาดของสิ่งบรรจุ และเพิ่มขึ้นตามนอร์แมลลิตี้จนถึง 1.5 N

จากผลการทดลองของ Pozin, Kopylev และ Tarat (14) เกี่ยวกับการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์ (ความดันย่อยประมาณ 0.15 บรรยากาศ) ในสารละลายต่างใน sieve-plate column ขนาดเล็ก พบว่า สภาวะที่คล้อยตามการดูดซึมจะควบคุมโดยปฏิกิริยา fast pseudo-first order ด้วยเช่นเดียวกับ Harris และ Roper (15) ที่ทำการทดลองการดูดซึมของ lean carbon dioxide (ความดันย่อยน้อยกว่า 0.02 บรรยากาศ) ในสารละลายต่างใน sieve-plate column ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ฟุต พบว่าสภาวะการทดลอง คล้อยตามการดูดซึมที่ควบคุมโดยปฏิกิริยา pseudo-first order ด้วยเช่นกัน



Wozniak และ Ostergaard (16) ทำการทดลองการถ่ายเทมวลใน countercurrent three-phase fluidized bed ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.1 เมตร ความสูงของเบดเท่ากับ 1 เมตร เม็ดของแข็งกลวงมีรูปทรงกลมทำด้วยโพลิโพรพิลีน (polypropylene) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $(9.7 \pm 0.2) 10^{-3}$  เมตร มีความหนาแน่นเท่ากับ 388 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซผสมที่ใช้ประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 4.5 และอากาศในบรรยากาศร้อยละ 95.5 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.15-1.5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ความเร็วไหลผ่านของก๊าซคงที่ที่ 0.7 เมตรต่อวินาที และความเร็วไหลผ่านของของเหลว 0.02-0.07 เมตรต่อวินาที พบว่า  $K_G A$  เพิ่มขึ้นตามค่าเฉลี่ยของโมแลลิตีของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งอิทธิพลนี้จะน้อยลงเมื่อโมแลลิตีเพิ่มขึ้น

Ziolkowski และ Filip (17) ศึกษาอิทธิพลของ pulsed vapor flow ที่มีต่อการถ่ายเทมวลใน packed column ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ความสูงของการบรรจุเท่ากับ 500 มิลลิเมตร บรรจุด้วย  $7 \times 7 \times 1.5$  มิลลิเมตร Raschig rings ก๊าซผสมที่ใช้ประกอบด้วย อากาศร้อยละ 90 โดยปริมาตร และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร พบว่าอิทธิพลของ pulsation มีน้อยมากในนิสัยของแอมพลิจูดของ pulsator (stroke length) น้อยกว่า 28 มิลลิเมตร แต่ที่แอมพลิจูดของ pulsator มากกว่า 28 มิลลิเมตร อิทธิพลของ pulsation มีมากอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 เส้นตรง 1, 2 และ 3 ทำที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 620 กิโลกรัม/(เมตร)<sup>2</sup> (ชั่วโมง) และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ในนิสัย 0.25-1 N เส้นตรง 4 ทำที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1285 กิโลกรัม/(เมตร)<sup>2</sup> (ชั่วโมง) และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2 N และสร้างสมการที่ใช้อธิบายผลการทดลองในนิสัยของแอมพลิจูดของ pulsator เท่ากับ 28-56 มิลลิเมตร ได้ดังนี้

$$K_G A = b a^c \quad \text{_____} \quad (2.36)$$

หรือ

$$\log K_G A = \log b + c \log a \quad \text{_____} \quad (2.37)$$



ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงโดย  $b$  คือ ฟังก์ชันของนอร์แมลิตีของสารละลาย และ  $c$  คือ ฟังก์ชันของความเร็วของก๊าซและของเหลวที่คิดเป็นมวล ค่าคงที่ของ  $b$  และ  $c$  แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

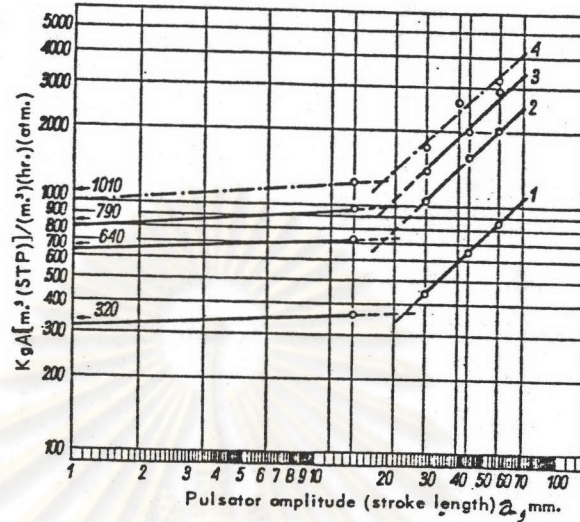
Tudose (5) ทำการทดลองในคอลัมน์การดูดซึม (absorption column) ที่ประกอบด้วยหลอดแก้วยาว 1.46 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 มิลลิเมตร ภายในหลอดแก้วมีแท่งแก้วซึ่งมีแกนร่วมกันยาว 990 มิลลิเมตร หนา 10.1 มิลลิเมตร โดยพื้นผิวภายนอกของแท่งแก้วจะเป็นพื้นผิวของการดูดซึมซึ่งฟิล์มของน้ำไหลผ่าน ศึกษาการดูดซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำพบว่า สัมประสิทธิ์รวมของการดูดซึม (total coefficient of absorption),  $K_p$  ในตอนแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความถี่ของ pulsation จนสูงสุดที่ 9.3 pulsation/sec จากนั้นจะลดลงจนถึงจุดต่ำสุดที่ 17 pulsation/sec จากนั้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นดังแสดงไว้ในรูป 2.9  $K_p$  เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแอมพลิจูดของ pulsation ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_p$  และ Degree of undulation,  $Z$  ซึ่งเป็น characteristic number สำหรับ pulsating flow

Harbaum และ Houghton (18) ทำการศึกษาอิทธิพลของ sonic vibration ความถี่ 20-2000 รอบต่อวินาที ที่มีต่ออัตราการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำใน countercurrent bubble-type absorber โดยทดลองวัดในเทอมของ  $K_L A$  พบว่า  $K_L A$  เป็นฟังก์ชันของความถี่และความสูงของเบต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.12

Kislov (19) ศึกษาความต้านทานของวิภูภาคของของเหลวภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงกับอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic) ของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องมือทางอุตสาหกรรม พบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 เมตรต่อวินาที อัตราการดูดซึมถูกจำกัดโดยความต้านทานของวิภูภาคของก๊าซและวิภูภาคของของเหลว สำหรับอัตราการไหลของก๊าซที่ต่ำกว่า ความต้านทานของวิภูภาคของก๊าซจะมากกว่าความต้านทานของวิภูภาคของของเหลว สำหรับอัตราการไหลของก๊าซที่มากกว่า 0.2 เมตรต่อวินาที การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะถูกจำกัดโดยความต้านทานของวิภูภาคของของเหลวเพียงอย่างเดียว

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ (20) ทำการทดลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายต่างในฟลูอิดซ์เบตสามสถานะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.8 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร พบว่า ที่ความสูงของเบตคงที่ เมื่อเพิ่มปริมาณการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้





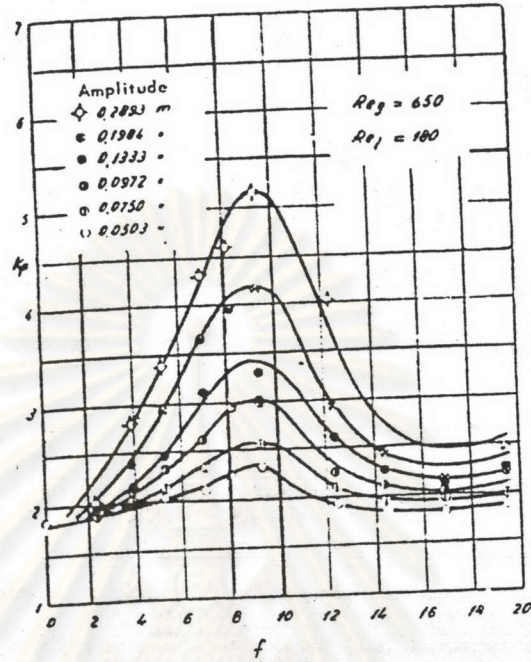
1-0.25 N solution; 2-0.5 N solution; 3-1.0 N solution; 4-2.0 N solution.

รูปที่ 2.8 กราฟแสดงฟังก์ชัน  $\log K_G A = f(\log a)$  ที่  $[NaOH]$  ต่างๆ (17)

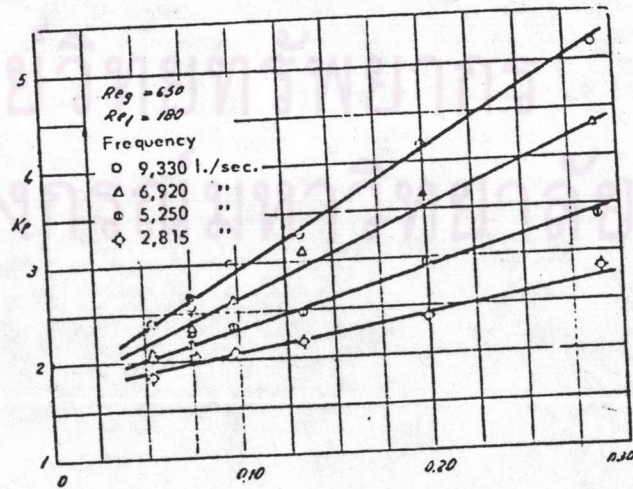
b	c	Range of application of constants b and c, a, mm.	Normality of NaOH in the absorbing solvent, N	Mass velocity of the gas G, kg./m²(hr.)
18.63	0.947	28 < a < 56	0,25	620
44.67	0.947	28 < a < 56	0,50	620
60.26	0.947	28 < a < 56	1,0	620
87.10	0.900	28 < a < 56	2,0	1285

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ b และ c (17)



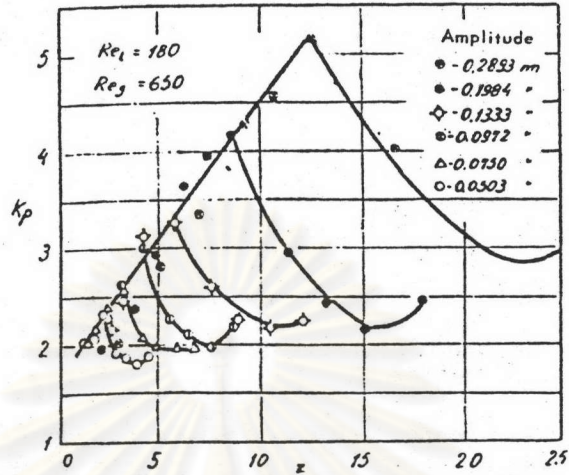


รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การดูดซึมรวม และ pulsation (5)

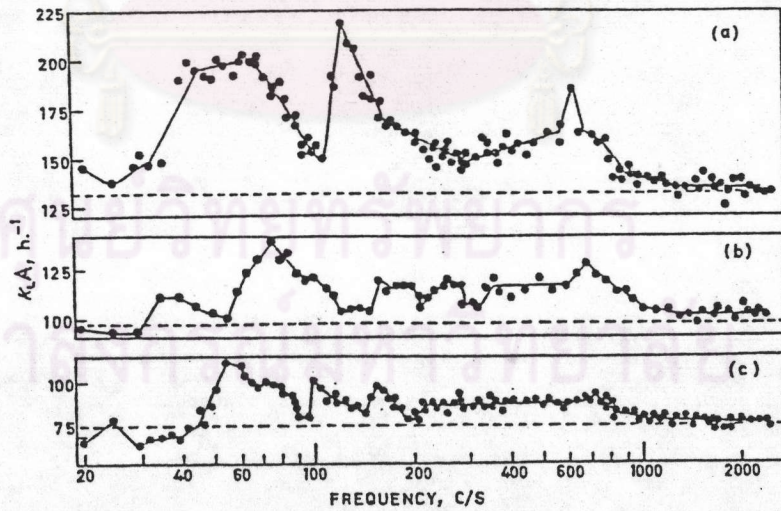


รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การดูดซึมรวม และ แอมพลิจูดของ pulsation (5)





รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การดูดซึมรวม และ Degree of undulation of the pulsation (5)



---- no vibration Bed height (a) 0.5 ft. (b) 1.0 ft. (c) 1.5 ft.

รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_L A$  กับ ความถี่ และ ความสูงของเบด ที่  $20^\circ\text{C}$  และ 0.93 บรรยากาศ  
 $U_L = 0.042$  ฟุต/วินาที       $U_G = 0.046$  ฟุต/วินาที (18)



มากขึ้น ผลปรากฏว่า ประสิทธิภาพการดูดซึมลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ที่ความสูงเบต 30 เซนติเมตร อัตราการไหลของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 52.8 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้น 0.14 โมลาร์ อากาศไหลด้วยอัตรา 25 กรัมโมลต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของ CO <sub>2</sub> (กรัม โมล/ชม.)	อัตราการดูดซึม CO <sub>2</sub> (กรัม โมล/ชม.)	ประสิทธิภาพ (%)
3.218	3.085	95.8
3.741	3.404	91.0
4.240	3.533	81.9
5.018	3.594	71.5
5.752	3.654	63.5

และเมื่อความสูงของเบตลดลง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซึมนั้นก็ลดลงด้วยเช่นกันดังแสดงไว้ใน ตาราง 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.3 ที่ความสูงเบต 20 เซนติเมตร อัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 90 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้น 0.09 โมลาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 6.6 กรัมโมลต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของอากาศ (กรัม โมล/ชม.)	ความเข้มข้น CO <sub>2</sub> (%)	อัตราการดูดซึม CO <sub>2</sub> (กรัม โมล/ชม.)	ประสิทธิภาพ (%)
81.3	7.5	8.8	82.1
114.1	5.5	8.6	79.9
117.3	5.3	8.5	79.2
125.0	5.0	7.8	73.0

และเมื่อทดลองเพิ่มปริมาณการไหลของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น พบว่ามีอัตราการเพิ่มน้อยมากและไม่แน่นอน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสูงเบต 55 เซนติเมตร อัตราการไหลของอากาศ 34.3 กรัมโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> 3.2 กรัม โมลต่อชั่วโมง หรือความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> เท่ากับ 8.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

อัตราการไหลของ NaOH (ลิตร/ชม.)	อัตราการดูดซึม CO <sub>2</sub> (กรัม โมล/ชม.)	ประสิทธิภาพ (%)
105.6	3.59	69.8
117.6	3.59	69.8
135.6	3.87	75.3