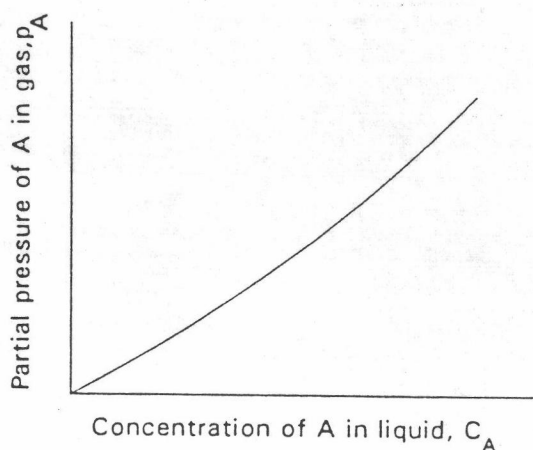




2.1 ทฤษฎีพื้นฐานการถ่ายเทมวลออกซิเจน

2.1.1 สมดุลย์ระหว่างสถานะ (Phase Equilibrium)

การถ่ายเทมวลโดยการแพร่หรือการพาเป็นกลไกซึ่งขึ้นอยู่กับผลต่างของความเข้มข้นภายในสถานะการถ่ายเทระหว่างสถานะก็เช่นเดียวกัน เกิดขึ้นเพราะมีผลต่างของความเข้มข้นเฉลี่ยในแต่ละสถานะหรือระบบไม่ได้อยู่ที่สมดุลย์ ถ้าระบบประกอบด้วย สถานะก๊าซคือ ออกซิเจน และสถานะของเหลวคือน้ำ ที่สมดุลย์อัตราที่โมเลกุลของออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ อัตราที่ออกซิเจนกลับเข้าสู่สถานะก๊าซที่สมดุลย์ความเข้มข้นของออกซิเจนในทั้งสองสถานะจะมีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวกับความดันย่อยของก๊าซ สามารถแสดงในรูปของเส้นโค้งสมดุลย์ (equilibrium curve) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสถานะของเหลว (C_A) กับความดันย่อยของตัวถูกละลายในสถานะก๊าซ (P_A)



รูปที่ 2.1 เส้นโค้งสมดุลย์แสดงความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสถานะก๊าซและสถานะของเหลวที่อุณหภูมิคงที่

ความเข้มข้นที่สมดุลย์ของสองสถานะในกรณีของเหลวและก๊าซเป็นแบบอุดมคติ (Ideal) สามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้เช่น

Raoult's law ได้ให้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อย (Partial Pressure) กับสัดส่วนโมลของตัวถูกละลายในสถานะของเหลว (mole fraction) และความดันไอของของเหลว (liquid vapour pressure)

$$P_A = x_A P'_A \dots\dots\dots(2.1)$$

โดยที่

$$P_A = \text{ความดันย่อยของก๊าซ}$$

$$x_A = \text{สัดส่วนโมลของตัวถูกละลายในสถานะของเหลว}$$

$$P'_A = \text{ความดันไอของของเหลว}$$

Daton's law พิจารณาถึงอากาศที่มีก๊าซหลายๆ ชนิดผสมกันอยู่ จากกฎของดาลตันได้ให้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความดันย่อยของก๊าซในอากาศ (Partial Pressure) กับสัดส่วนโมลของก๊าซในอากาศ (gas mole fraction in the mixing of gases at the equilibrium) และความดันรวม

$$P_A = y_A P \dots\dots\dots(2.2)$$

โดยที่

$$P_A = \text{ความดันย่อยของก๊าซ}$$

$$y_A = \text{สัดส่วนโมลของก๊าซในอากาศ}$$

$$P = \text{ความดันรวม}$$

Henry's law พิจารณาสมดุลระหว่างก๊าซชนิดหนึ่งกับของเหลวชนิดหนึ่ง จากกฎของเฮนรี่ได้ให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความดันย่อยของก๊าซในอากาศ (Partial Pressure) กับความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายลงในของเหลวในรูปของสัดส่วนโมล

$$P_A = H' x_A \dots\dots\dots(2.3)$$

โดยที่

$$P_A = \text{ความดันย่อยของก๊าซ}$$

H' = ค่าคงที่ของเฮนรี่

x_A = ค่าสัดส่วนโมลของตัวถูกละลายในสถานะของเหลว

ในสารละลายเจือจาง $x_A = c_A / (c_A + c_B) \simeq c_A / c_B$

c_A = โมลของตัวถูกละลาย

c_B = โมลของเหลว (mole of bulk liquid)

$P_A = H' c_A / c_B = H c_A$ เมื่อ $H = H' / c_B$

$P_A = H c_A \dots \dots \dots (2.4)$

จากสมการของเฮนรี่และดาลตันสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสมการทั้งสองได้ดังนี้

จาก $P_A = H c_A$ (Henry's law)

$P_A = y_A P$ (Dalton's law)

ดังนั้น $P_A = H c_A = y_A P$

$c_A = y_A P / H \dots \dots \dots (2.5)$

H = Henry's law constant เป็นค่าคงที่ของก๊าซชนิดหนึ่งที่ละลายในของเหลวที่อุณหภูมิหนึ่ง

y_A = สัดส่วนโมลของก๊าซในกาชผสม ซึ่งเป็นค่าคงที่

ดังนั้น c_A ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้ในของเหลว ณ จุดสมดุลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันของก๊าซที่อยู่ในระบบ

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของเฮนรีกับชนิดก๊าซที่ละลายน้ำ

Gas	Formula	Henry's Constant at 20°C (atm) ^b	Temperature Dependence	
			ΔH (kcal/kmole, $\times 10^{-3}$)	K
Oxygen	O ₂	4.3×10^4	1.45	7.11
Nitrogen	N ₂	8.6×10^4	1.12	6.85
Methane	CH ₄	3.8×10^4	1.54	7.22
Ozone	O ₃	5.0×10^3	2.52	8.05
Carbon dioxide	CO ₂	1.51×10^2	2.07	6.73
Hydrogen sulfide	H ₂ S	5.15×10^2	1.85	5.88
Chlorine	Cl ₂	5.85×10^2	1.74	5.75
Chlorine dioxide	ClO ₂	54	2.93	6.76
Sulfur dioxide	SO ₂	38	2.40	5.68
Ammonia	NH ₃	0.76	3.75	6.31

a Form Landolt-Boernstein (1976) and International Critical Tables.

b 1 atm = 101.3 kPa.

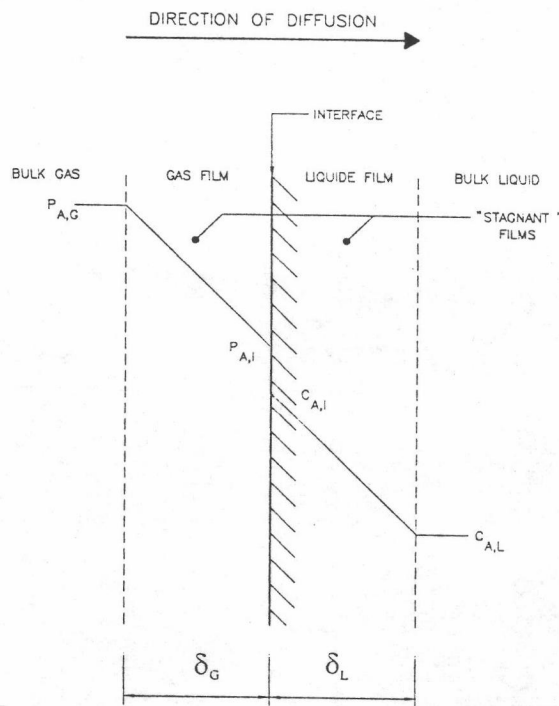
2.1.2 กลไกการถ่ายเทมวลออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสถานะของเหลว

2.1.2.1 ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-resistance theory)

ทฤษฎีสองความต้านทานเป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายกลไกการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะซึ่งในการถ่ายเทมวลจะประกอบด้วยสามขั้นตอน คือ

1. การถ่ายเทมวลจากภายในสถานะที่หนึ่งไปยังผิว ระหว่างสถานะ
2. การถ่ายเทข้ามผิวระหว่างสถานะ
3. การถ่ายเทไปยังภายในสถานะที่สอง

สมมติฐานของทฤษฎีสองความต้านทานคือ อัตราการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะจะถูกควบคุมโดยการแพร่ผ่านแต่ละสถานะและไม่มี ความต้านทานในการถ่ายเทมวลข้ามผิวระหว่างสถานะ



รูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายเทมวลจากสถานะก๊าซไปยังสถานะของเหลว

รูปที่ 2.2 แสดงสถานะการถ่ายเทขององค์ประกอบ A จากสถานะก๊าซไปยังสถานะของเหลวเนื่องจากมีผลต่างความเข้มข้น

โดยที่

$P_{A,G}, C_{A,L}$ = ความเข้มข้นรวมในสถานะก๊าซและของเหลว

$P_{A,i}, C_{A,i}$ = ความเข้มข้นที่ผิวระหว่างสถานะ

δ_G, δ_L = ความหนาของชั้นขอบเขตหรือความหนาของฟิล์ม

ความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลด้านสถานะก๊าซและสถานะของเหลวตามลำดับ

จากทฤษฎีสองความต้านทานที่กล่าวไว้ว่าไม่มีความต้านทานในการถ่ายเทมวลข้ามผิวระหว่างสถานะ แสดงว่า $P_{A,i}$, $c_{A,i}$ คือ ความเข้มข้นที่สมดุลย์ จากรูปที่ 2.2 เมื่อความสัมพันธ์ที่สมดุลย์เป็นไปตามกฎของเฮนรี่จะเห็นว่า $c_{A,L} < c_{A,i}$, $P_{A,i} < P_{A,G}$ เพราะเป็นการถ่ายเทมวลจากสถานะก๊าซไปยังสถานะของเหลว

จากขั้นตอนการถ่ายเทมวล ซึ่งเสนอโดยทฤษฎีสองความต้านทาน จะเห็นว่า ความต้านทานของการถ่ายเทมวลจะเท่ากับผลบวกของความต้านทานย่อยในแต่ละสถานะ ไม่คิดความต้านทานที่ผิวระหว่างสถานะ โดยสามารถแสดงค่าความต้านทานเหล่านี้ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass-transfer coefficients)

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของสารต่างๆในน้ำ

Constituent	Molecular Diffusion Coefficient (25°C) ($m^2/sec \times 10^9$)
Dissolved Gases	
O ₂	2.5
CO ₂	2.0
SO ₂	1.7
Cl ₂	1.4
NH ₃	2.0
Weak electrolytes	
Formic acid	1.4
Ethanol	1.3
Glucose	0.7
Lactose	0.5
urea	1.4
Humic acid molecule (5 mm. in diameter)	0.1
Strong electrolytes (at infinite dilution)	
NaCl	0.8
Kcl	1.0
CaCl ₂	1.33
MgCl ₂	1.25
NaHCO ₃	1.63
Na ₂ SO ₄	1.2

เทมวไลต์ ดั้งนี้

จากกฎของฟิค (Fick's law) สามารถเขียนสมการแสดงการถ่าย

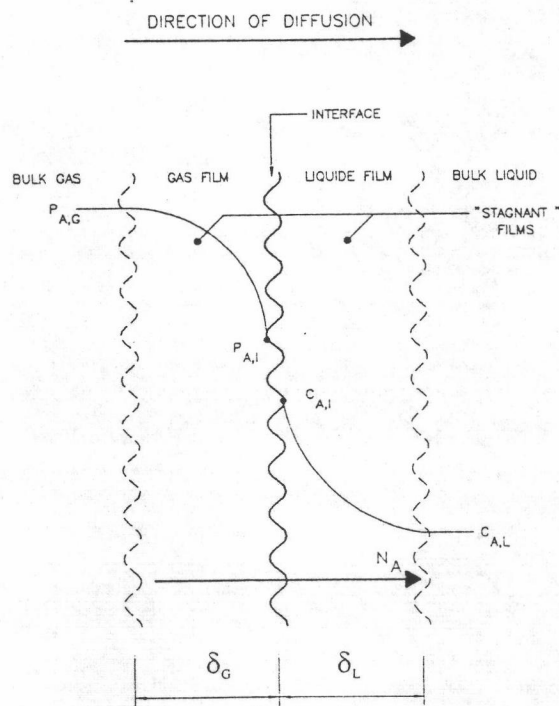
$$N_A = \frac{D \Delta c}{\Delta x} \dots \dots \dots (2.6)$$

โดยที่

- N_A = ปริมาณฟลักซ์ที่ถ่ายเท
- D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
- Δx = ความหนาของฟิล์ม
- Δc = ความแตกต่างของความเข้มข้น

2.1.2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (Individual mass-transfer

coefficients)



รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายเทมวลผ่านฟิล์มของก๊าซและของเหลว

จากรูปที่ 2.3 การถ่ายเทมวลระหว่างสถานะในทิศทาง Z ที่สภาวะคงตัวสามารถเขียนสมการของฟลักซ์สำหรับแต่ละด้านของผิวระหว่างสถานะ ดังนี้

$$N_{A,Z} = k_G (P_{A,G} - P_{A,i}) \dots \dots \dots (2.7)$$

$$N_{A,Z} = k_L (c_{A,i} - c_{A,L}) \dots \dots \dots (2.8)$$

โดยที่

$$k_G = \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในฟิล์มของก๊าซ}$$

(จำนวนโมลที่ถ่ายเท/(เวลา) (พ.ท.ผิวสัมผัส)(ความดัน))

$$k_L = \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในฟิล์มของเหลว}$$

(จำนวนโมลที่ถ่ายเท/(เวลา)(พ.ท.ผิวสัมผัส)(ความเข้มข้น))

$$P_{A,G} - P_{A,i} = \text{แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวล จากภายในสถานะก๊าซมายังผิว}$$

ระหว่างสถานะ

$$c_{A,i} - c_{A,L} = \text{แรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทจากผิวระหว่างสถานะมา}$$

ภายในสถานะของเหลว เมื่อเป็นการถ่ายเทมวลจากสถานะ

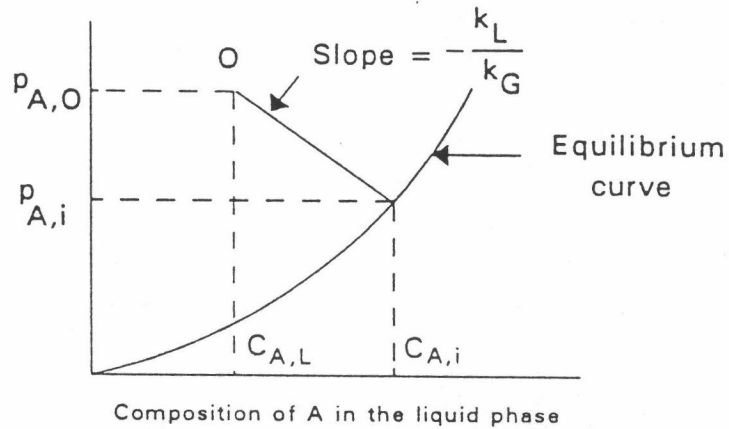
ก๊าซไปยังของเหลว

ที่สถานะคงตัวฟลักซ์ในแต่ละสถานะย่อมเท่ากัน ดังนั้น จากสมการ
(2.7) และ (2.8)

$$N_{A,Z} = k_G (P_{A,G} - P_{A,i}) = -k_L (c_{A,L} - c_{A,i})$$

$$-(k_L/k_G) = (P_{A,G} - P_{A,i}) / (c_{A,L} - c_{A,i})$$

ความสำคัญของอัตราส่วน k_G/k_L แสดงในรูปที่ 2.4 จุด 0 แสดงความเข้มข้นภายในทั้งสองสถานะ ที่จุดหรือระนาบหนึ่งในระบบ ถ้าลากเส้นตรงซึ่งมีความลาดชัน $-k_L/k_G$ มาสัมผัสเส้นโค้งสมดุลย์ จุดสัมผัส $P_{A,i}$, $c_{A,i}$ คือความเข้มข้นที่ผิวระหว่างสถานะหรือเป็นความเข้มข้นที่สมดุลย์นั่นเอง



รูปที่ 2.4 การหาค่าความเข้มข้นที่ผิวระหว่างเฟส

อาจเรียก k_G , k_L ว่าเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย หรือ สัมประสิทธิ์ฟิล์มเพราะเป็นค่าที่ระบุเฉพาะสถานะในสถานะหนึ่ง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย อาจมีสัญลักษณ์ และหน่วยต่างๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนสถานะ และชนิดของระบบการถ่ายเทมวล

2.1.2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (Overall mass-transfer coefficients)

การคำนวณฟลักซ์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อยตามสมการ (2.7) และ (2.8) จำเป็นต้องทราบค่าความเข้มข้นที่สมดุลย์ (ผิวหน้าสถานะ) $P_{A,i}$, $c_{A,i}$ ซึ่งไม่สามารถวัดได้ง่ายนัก วิธีการที่ง่ายกว่า คือ การใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (overall mass-transfer coefficient) และแรงขับเคลื่อนที่คำนวณจากความเข้มข้นรวมในทั้งสองสถานะ ($P_{A,G}$, $c_{A,L}$) และเขียนสมการของฟลักซ์ดังต่อไปนี้

$$N_A = K_G (P_{A,G} - P_A^*) \dots \dots \dots (2.9)$$

$$N_A = K_L (c_A^* - c_{A,L}) \dots \dots \dots (2.10)$$

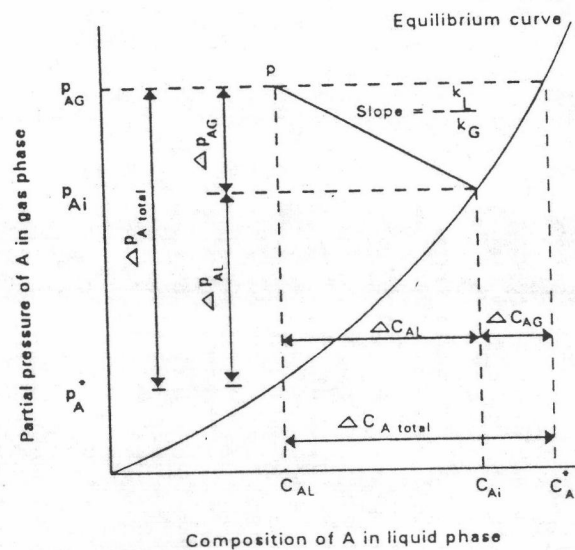
โดยที่

P_A^* = ความดันย่อยของ A ที่อยู่ในสมดุลกับความเข้มข้นรวมในสถานะของเหลว

C_A^* = ความเข้มข้นของ A ที่อยู่ในสมดุลกับ $P_{A,G}$

K_G = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม คำนวณจากแรงขับเคลื่อนซึ่งเป็นผลต่างของความดันย่อยมีหน่วยเป็นจำนวนโมลที่ถ่ายเท/(เวลา (พ.ท.ผิวสัมผัส) (ความเข้มข้น P_A)

K_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม คำนวณจากแรงขับเคลื่อน ซึ่งเป็นผลต่างของความเข้มข้นที่สถานะของของเหลว มีหน่วยเป็นจำนวนโมลที่ถ่ายเท/(เวลา)(พ.ท.ผิวสัมผัส)(ความเข้มข้นที่ C_A)



รูปที่ 2.5 แสดงค่าแรงขับเคลื่อนที่เกี่ยวข้อง เมื่อมีการถ่ายเทมวลจากสถานะก๊าซไปยังสถานะของเหลว

จากรูปที่ 2.5 แรงขับเคลื่อนรวมในแต่ละสถานะเป็นผลบวกของแรงขับเคลื่อนย่อยตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\Delta P_{A,TOTAL} &= \Delta P_{A,G} + \Delta P_{A,L} = (P_{A,G} - P_{A,i}) + (P_{A,i} - P_A^*) \\ \Delta c_{A,TOTAL} &= \Delta c_{A,G} + \Delta c_{A,L} = (c_A^* - c_{A,i}) + (c_{A,i} - c_{A,L})\end{aligned}$$

ความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจึงสามารถหาอัตราส่วนความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลได้จากแรงขับเคลื่อนดังนี้

$$\text{ความต้านทานในสถานะก๊าซ/ความต้านทานรวมสองสถานะ} = \Delta P_{A,G} / \Delta P_{A,TOTAL} = (1/k_G) / (1/K_G)$$

$$\text{ความต้านทานในสถานะของเหลว/ความต้านทานรวมสองสถานะ} = \Delta c_{A,L} / \Delta c_{A,TOTAL} = (1/k_L) / (1/K_L)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อยสามารถหาได้เมื่อทราบความสัมพันธ์ที่สมดุลย์

จากกฎของเฮนรี

$$P_A = Hc_A$$

สมการที่ (2.4) คือ สภาวะที่สารละลายเจือจาง โดย H คือ ค่าคงที่ของเฮนรี นอกจากนี้ รูปที่ 2.5 ยังแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นในทั้งสองสถานะที่มีความสัมพันธ์กันตามสมดุลย์คือ

$$P_{A,G} = Hc_A^*$$

$$P_A^* = Hc_{A,L}$$

$$P_{A,i} = Hc_{A,i}$$

จากสมการ (2.9)

$$1/K_G = (P_{A,G} - P_A^*)/N_{A,Z} = (P_{A,G} - P_{A,i})/N_{A,Z} + (P_{A,i} - P_A^*)/N_{A,Z}$$

$$1/K_G = (P_{A,G} - P_{A,i})/N_{A,Z} + H(c_{A,i} - c_{A,L})/N_{A,Z} \dots \dots \dots (2.13)$$

แทนค่าสมการ (2.7) , (2.8) ในสมการ (2.13) จะได้

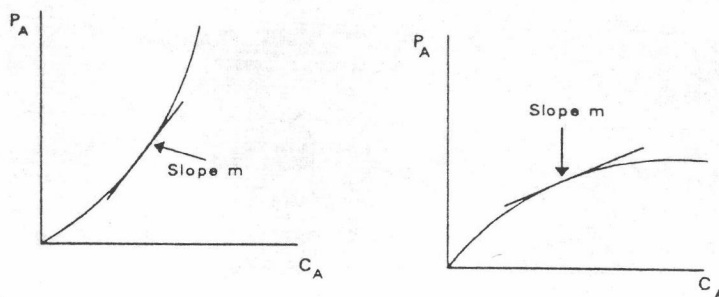
$$1/K_G = 1/k_G + H/k_L \dots \dots \dots (2.14)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้ความสัมพันธ์ของ K_L ว่า

$$1/K_L = (c_A^* - c_{A,L})/N_{A,Z} = (P_{A,G} - P_{A,i})/N_{A,Z} + (c_{A,i} - c_{A,L})/HN_{A,Z}$$

$$1/K_L = 1/k_L + 1/Hk_G$$

สมการ (2.14) และ (2.15) แสดงค่าความต้านทานรวม ทางด้านสถานะก๊าซ ($1/K_G$) และสถานะของเหลว ($1/K_L$) ในรูปของความต้านทานในแต่ละสถานะ ทำให้สามารถเปรียบเทียบความต้านทานในแต่ละสถานะได้



รูปที่ 2.6. แสดงค่าความชัน (H) ของเส้นโค้งสมดุลย์

ในระบบซึ่งก๊าซละลายน้ำได้ดี เช่น แอมโมเนียกับน้ำ ค่า H ของแอมโมเนียซึ่งละลายน้ำได้ดีนั้นมีค่าน้อย หรือเส้นโค้งสมดุลย์มีลักษณะค่อนข้างแบนราบ (ดูรูปที่ 2.6) จากสมการ (2.14) แสดงว่า ความต้านทานในสถานะของเหลวมีน้อยมาก หรือความต้านทานส่วนใหญ่อยู่ในสถานะก๊าซนั่นเอง เรียกว่าเป็นระบบที่ถูกควบคุมด้วยสถานะก๊าซ (gas phase controlled)

ในทางตรงกันข้ามถ้าก๊าซละลายน้ำได้น้อยมาก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนในน้ำ ค่า H จะมีค่ามาก หรือเส้นโค้งสมดุลย์มีความชันสูงจากสมการ (2.15) จะเห็นว่าความต้านทานในสถานะก๊าซจะมีค่าน้อยมาก ค่า K_L จะมีค่าประมาณ K_L เรียกว่าระบบถูกควบคุมด้วยสถานะของเหลว (Liquid phase controlled) ค่า k_G, k_L ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบซึ่งถ่ายเทและลักษณะการไหล ในการนำไปใช้งานเราสามารถทราบได้ว่าความต้านทานในสถานะไหนเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวล จึงต้องหาค่าความต้านทานของสถานะนั้น และพยายามลดค่าความต้านทานหรือเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสถานะนั้น ๆ

จากสมการ (2.10)

$$N_A = K_L(c_A^* - c_{A,L})$$

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทมวล และฟลักซ์มี

ดังนี้

$$aN_A = dc_A / dt \dots \dots \dots (2.16)$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ (2.16) ใหม่ได้ดังนี้

$$dc_A / dt = K_L a (c_A^* - c_A) \dots \dots \dots (2.17)$$

โดยที่

- a = พื้นที่จำเพาะต่อหน่วยปริมาตร
- c_A^* = ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ณ จุดสมดุลย์
- c_A = ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ณ เวลาใดๆ

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

Eckenfelder and Ford (1968) กล่าวว่าปัจจัยหลายอย่างมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (K_L) และ $K_L a$ แต่ที่สำคัญก็คือ อุณหภูมิและสารที่มีผลต่อแรงตึงผิวของของเหลว โดยที่ผลของอุณหภูมิสามารถแสดงสัมพันธ์ได้ดังสมการ

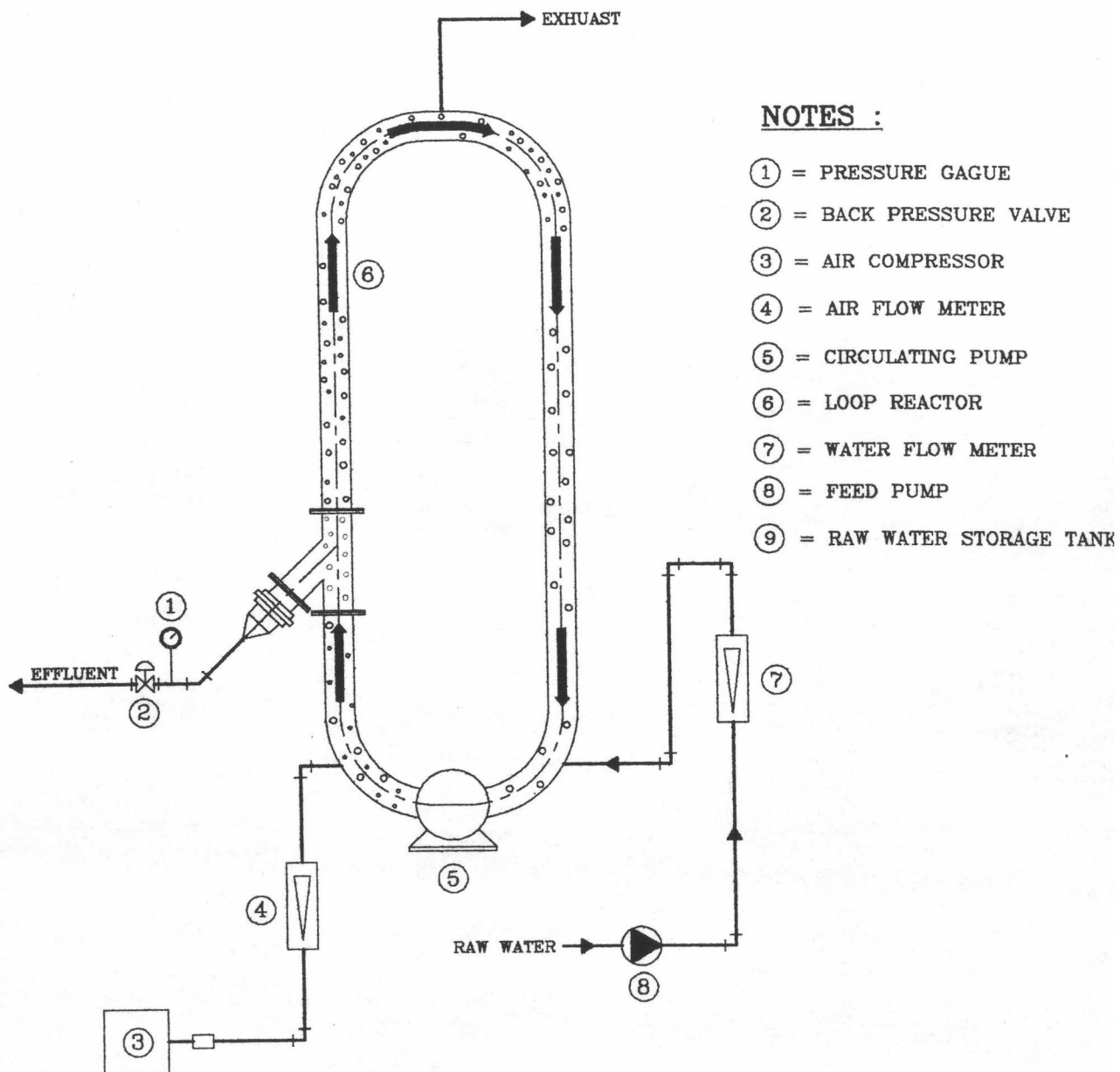
$$K_T = K_{20^\circ\text{C}} \times \theta^{(T-20)}$$

อุณหภูมิมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (K_L) , θ มีค่าอยู่ระหว่าง 1.016 ถึง 1.037 จากการศึกษาของ Eckenfelder and Brankart (1960) พบว่า θ มีค่าเท่ากับ 1.028 สำหรับการเติมออกซิเจนโดยการเป่าอากาศ แต่สำหรับค่า $K_L a$ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดและความเร็วของฟองก๊าซ ซึ่งมีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (A/V) ค่า θ ที่ใช้ในการปรับค่าของ $K_L a$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 1.024

2.2 ถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน

2.2.1 หลักการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน

ถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนประยุกต์มาจากถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนที่ใช้เมมเบรนเป็นตัวกั้นฟองอากาศ (Membrane Gas/Liquid Contractor) โดยการประยุกต์จะตัดส่วนที่เป็นเมมเบรนออก เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดเนื่องจากเมมเบรนอุดตันเมื่อนำไปใช้งาน สำหรับส่วนประกอบของถังปฏิกรณ์ก็จะประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนที่ไหลวนเป็นทอกลมจำนวนสองท่อปลายบนและล่างเชื่อมเข้าด้วยกัน และที่ด้านล่างจะมีเครื่องสูบน้ำหมุนเวียน เพื่อใช้ในการหมุนเวียนของเหลวในถังปฏิกรณ์ โดยที่ของเหลวและก๊าซจะเข้าทางด้านดูดของเครื่องสูบน้ำ จุดที่ของเหลวออกจากถังปฏิกรณ์จะอยู่ทางด้านส่งของเครื่องสูบน้ำมีลักษณะงอทำมุมกับทิศทางการไหล เพื่อป้องกันฟองก๊าซในถังปฏิกรณ์หลุดออกไปพร้อมของเหลว ถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนประกอบด้วยส่วนประกอบ ดังรูปที่ 2.7



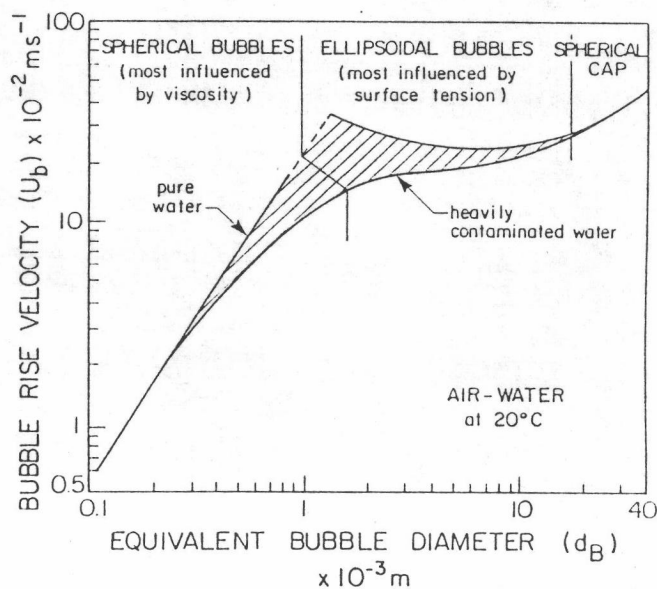
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน

2.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของถังปฏิกรณ์

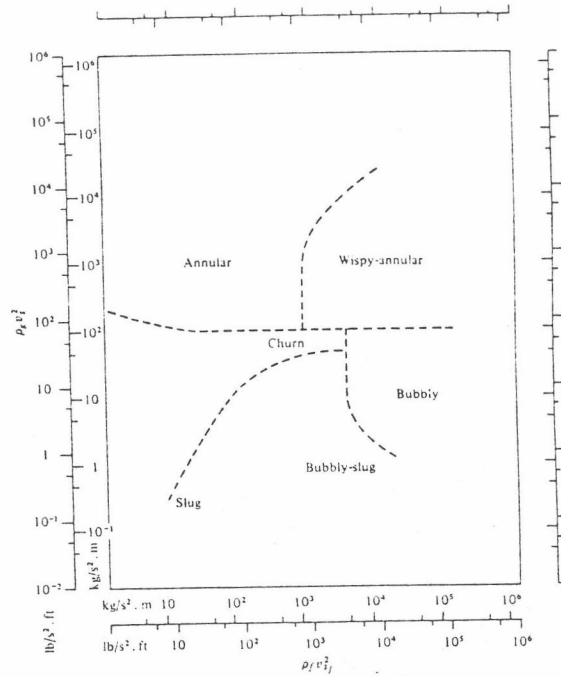
ตัวแปรที่ใช้ควบคุมการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน (Bernard และคณะ, 1986) ได้แก่

2.2.2.1 ความเร็วของการหมุนเวียนของเหลวในถังปฏิกรณ์ (Liquid Circulation Velocity, V_L)

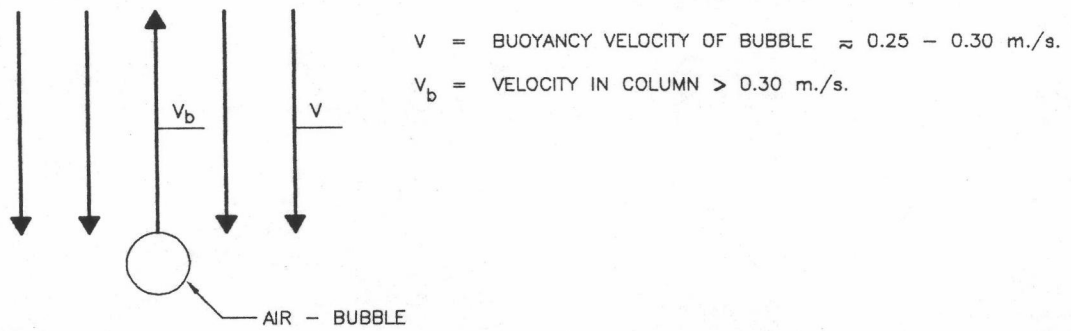
ความเร็วของการหมุนเวียนของเหลวในถังปฏิกรณ์ จะเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ ความเร็วของการลอยตัวอย่างอิสระของฟองก๊าซประมาณ 0.25-0.30 เมตรต่อวินาที ในถังปฏิกรณ์จะต้องควบคุมความเร็วของของเหลวและฟองก๊าซให้มากกว่าความเร็วของการลอยตัวอย่างอิสระในที่นี้คือ การใช้เครื่องสูบน้ำภายในวงจรสูบน้ำ โดยให้ความเร็ว ซึ่งได้จากค่าอัตราการไหลของน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดของวงจรมากกว่าความเร็วของการลอยตัวอย่างอิสระของฟองก๊าซ ฟองก๊าซบางส่วนจะถูกควบคุมให้หมุนเวียนอยู่ในวงจรถ้าทำให้ก๊าซในฟองละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการละลายก๊าซของถังปฏิกรณ์แบบนี้มีค่าสูง



รูปที่ 2.8 แสดงขนาดฟองก๊าซ และความเร็วในการลอยตัวของฟองก๊าซ



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการไหลของผสมของสองสถานะ (Azbel, 1981)



รูปที่ 2.10 แสดงความเร็วในวงจรถับความเร็วในการลอยตัวของฟองก๊าซ

2.2.2.2 ความดันภายในถังปฏิกรณ์

ความดันภายในถังปฏิกรณ์เป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะทำให้ก๊าซสามารถละลายน้ำได้เร็วขึ้น จากกฎของเฮนรี่ (Henry's law) และกฎของดาลตัน (Dalton's law)

- 1) กฎของเฮนรี่ (Henry's law)

$$P_A = Hc_A$$

- 2) กฎของดาลตัน (Dalton's law)

$$P_A = y_A P$$

โดยที่

P = ความดันรวมของระบบ

P_A = ความดันย่อยของก๊าซ

y_A = สัดส่วนโมลของก๊าซในอากาศ

c_A = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลว ณ จุดสมดุลย์

H = ค่าคงที่ของเฮนรี่

3) สมการความสัมพันธ์ระหว่างกฎของเฮนรี่และกฎของดอลตัน

$$c_A = y_A P / H$$

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ (%) ในอากาศ

องค์ประกอบ	ร้อยละ	ส่วนในล้านส่วน
ไนโตรเจน	78.09	780,900
ออกซิเจน	20.94	209,400
อาร์กอน	.93	9,300
คาร์บอนไดออกไซด์	.0318	318
นีออน	00.18	18
ฮีเลียม	.00052	5.2
คริปทอน	.0001	1
ซีนอน	.000008	0.08
ไนตรัสออกไซด์	.000025	.025
ไฮโดรเจน	.00005	0.5
มีเทน	.00015	1.5
ไนโตรเจนไดออกไซด์	.0000001	0.001
โอโซน	.000002	0.02
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	.00000002	0.0002
คาร์บอนมอนอกไซด์	.00001	0.1
แอมโมเนีย	.000001	0.01

หมายเหตุ อัตราส่วนของก๊าซในตาราง อาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพการณ์ และเวลา ค่าที่แสดงเป็นเพียงค่าแสดงให้เห็นถึงระดับของส่วนประกอบ

จากสมการการถ่ายเทมวลของก๊าซระหว่างสถานะ อัตราเร็วของการละลายของก๊าซสามารถแสดงได้ด้วยสมการ (2.17)

$$dc/dt = K_L a (c_A^* - c_A)$$

ถ้าให้ค่า $K_L a$ เป็นค่าคงที่ของถังปฏิกรณ์จะสามารถสรุปได้ว่า อัตราเร็วของการละลายของก๊าซแปรผันตามแรงขับเคลื่อนคือค่าความแตกต่าง ($c_A^* - c_A$)

ดังนั้นถ้าต้องการให้อัตราเร็วของการละลายของก๊าซในของเหลวเพิ่มขึ้น จะต้องเพิ่มค่าความแตกต่างของ ($c_A^* - c_A$) นั่นคือ การลด c_A หรือเพิ่ม c_A^* จากความสัมพันธ์ของกฎของเฮนรีกับกฎของดาลตัน การเพิ่มค่า c_A สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าความดันรวมนั่นเอง

2.2.2.3 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ของเหลวอยู่ในถังปฏิกรณ์

ในถังปฏิกรณ์ถ้ากำหนดความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการให้ละลายในของเหลวให้มีค่าคงที่ ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำผ่านถังปฏิกรณ์จะมีค่าคงที่ด้วย

ปริมาตรของถังปฏิกรณ์มีค่าคงที่ ดังนั้นเวลาที่ของเหลวอยู่ในวงจรของถังปฏิกรณ์จึงสามารถแสดงด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$t_r = V/Q \dots \dots \dots (2.18)$$

โดยที่

t_r = เวลาที่กักเก็บ (Residence time)

V = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume of reactor)

Q = อัตราการสูบน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ (Liquid flow rate)

ถ้า $t_d =$ เวลาในการละลายของก๊าซ (Dissolution time)
 $t_d \leq t_r$

ถ้าเวลาในการละลายของก๊าซมากกว่าเวลาที่ช่องไหลอยู่ในวงจร ($t_d > t_r$) จะเกิดการสะสมของก๊าซในถังปฏิกรณ์

2.3 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

วิทย์, 2516 ศึกษาความเป็นไปได้ในการทำความสะอาดน้ำโสโครกด้วยวิธีเติมออกซิเจนลงในน้ำอาศัยหลักการทางชลศาสตร์ โดยทำให้เกิดจุดภายในเส้นท่อที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ โดยใช้ท่อเวนจูรี ทำให้อากาศเข้าไปผสมกับน้ำโดยอาศัยเพียงเครื่องสูบน้ำ จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก แต่มีความสะดวกในการบำรุงรักษาและการใช้งาน

Kubota, H. et al., 2521 ศึกษาถึงปัญหาในการทำงานของ Deep Shaft Aerator และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับตัวแปรต่างๆ ในการทำงาน เช่น ความเร็วก๊าซ ความเร็วของเหลวในถังปฏิกรณ์ สัดส่วนของว่างในของเหลว และสมการการถ่ายเทมวลออกซิเจนผ่านผิวสัมผัส

Takamasu et al., 2524 ทำการวิเคราะห์การเติมอากาศโดยใช้ถังเติมอากาศรูปตัวยู (U-tube) ในแง่ของการถ่ายเทมวลออกซิเจน และได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ระยะต่างๆ ตามความลึกของถังเติมอากาศ

Speece et at., 2526 ศึกษาการเติมอากาศในถังเติมอากาศรูปตัวยู (U-Tube) เพื่อหาสภาพที่เหมาะสมในการออกแบบและทำงานโดยสร้างแบบจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ จากแบบจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์พบว่าความลึกของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมประมาณ 30 ม. ในทางปฏิบัติความลึกที่เกินกว่า 30 ม. จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมากขึ้น

Siegel, H.S. and Merchuk J.C., 2530 ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้จุลชีพที่ต้องการให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุด โดยการศึกษาที่ผ่านมาได้กล่าวถึงถึงปฏิกรณ์แบบลมยก (Airlift Reactor) จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลออกซิเจนสูง และการหมุนเวียนของเหลวในถังปฏิกรณ์เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของเหลวที่มีสองสถานะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการไหลวนขึ้น และได้ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของถังปฏิกรณ์ เช่น ส่วนหัวของถังปฏิกรณ์ที่เกิดการแยกอากาศออกจากน้ำ จากการศึกษาพบว่า มีความสำคัญต่อการทำงานของถังปฏิกรณ์ และการถ่ายเทมวลในถังปฏิกรณ์

M. Roustan and J.P. Duguet, 2533 ศึกษาประสิทธิภาพการละลายระหว่างสถานะก๊าซและของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบวนเวียน โดยใช้เมมเบรนเป็นตัวกั้นฟองอากาศในถังปฏิกรณ์พบว่า ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะและของเหลวมีค่าสูงประมาณร้อยละ 90

Popel H.J. and Woner. M, 2534 ได้ศึกษาและเสนอวิธีการวัดอัตราการถ่ายเทออกซิเจน โดยการวัดขนาดและการกระจายของฟองก๊าซแทนวิธีการใช้สารเคมีลดค่าออกซิเจนละลายน้ำและเติมอากาศลงไปใหม่ ผลที่ได้ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าอยู่ในช่วง 13 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับวิธีที่ใช้การลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและเติมอากาศกลับไปใหม่ ค่าที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น เมื่อฟองก๊าซมีขนาดเล็กกว่า 3 มม.

ทรงสร, 2535 ได้นำเอาถังปฏิกรณ์แบบวนเวียนมาใช้ในการกำจัดเหล็กที่อยู่ในรูปของเหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริก จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดเหล็กเฟอร์รัสได้ในช่วงร้อยละ 60 ถึงร้อยละ 90

G.A. Holder and J.M Leow, 2537 ศึกษาถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพของเวเนจอร์ในการเติมก๊าซออกซิเจน เพื่อใช้ในการควบคุมการเกิดกลิ่น เนื่องจากซิลโฟต์ในรางระบายน้ำเสียแบบเปิด จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลออกซิเจนจะมีค่าสูงก็ต่อเมื่อ ขนาดของเวเนจอร์มีขนาดเล็ก ซึ่งจะมีผลให้มีพลังงานในการผสมที่เพียงพอและมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูง แต่จะมีปัญหาเกี่ยวกับการอุดตันของท่อ