

## บทที่ 2

## ทฤษฎีและผลงานวิจัยในอดีต



## 2.1 การกระจายของฟองก๊าซในถังกวน

## 2.1.1 การเกิดฟอง

ในการศึกษากระจายของก๊าซในของเหลว ก๊าซเข้าสู่ถังกวนทางท่อนำก๊าซโดยผ่านออกทางหัวกระจายซึ่งอยู่ใต้ใบพัดกวน การหมุนของใบพัดกวนจะช่วยเพิ่มแรงเฉือน (shear force) และทำให้ของเหลวในถังกวนเกิดความปั่นป่วน (turbulence) ก๊าซที่ออกมาจากหัวกระจายจะถูกตีแตกเป็นฟองเล็ก ๆ กระจายไปรอบ ๆ ใบพัดกวน ฟองก๊าซเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นบางส่วนอาจเกิดการรวมตัวกัน เป็นฟองใหญ่ได้ในบริเวณผนังของถังกวน อย่างไรก็ตามในที่สุดขนาดของฟองโดยประมาณจะมีขนาดใกล้เคียงกันตลอดภายในถังกวน (1)

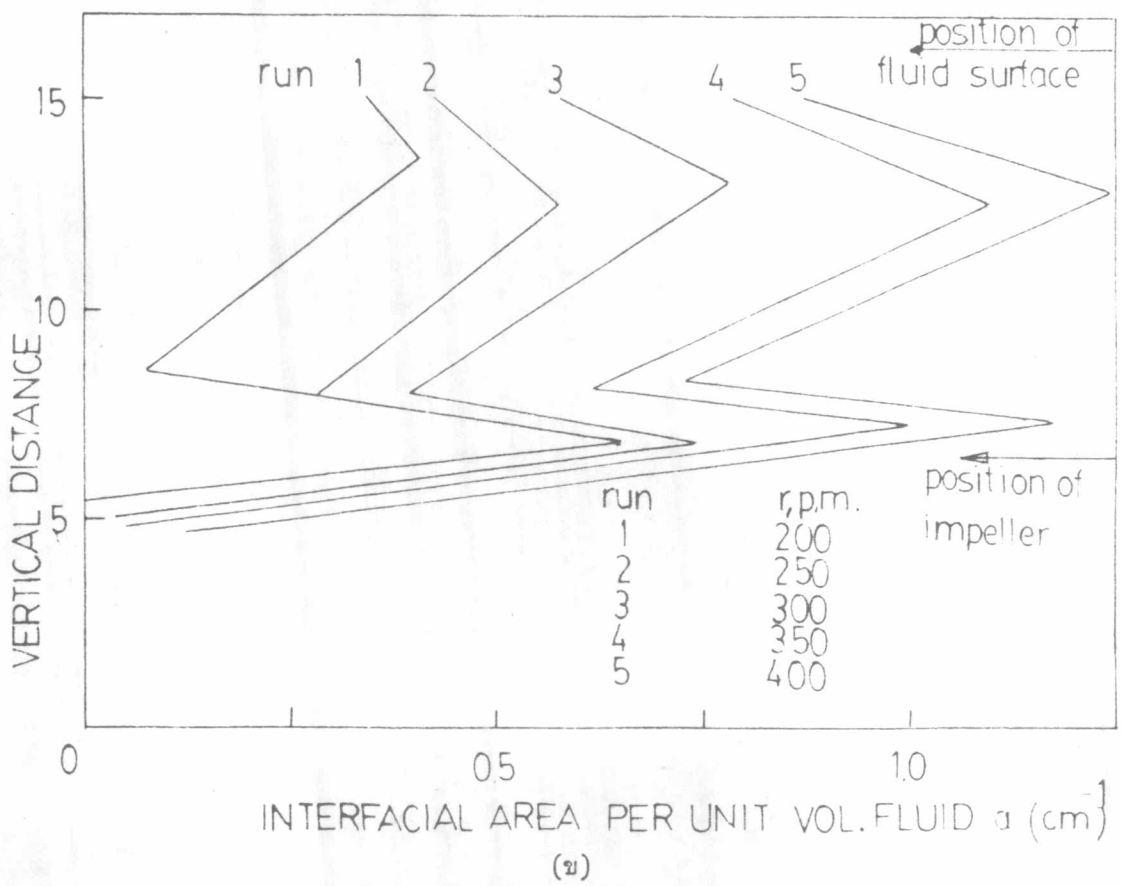
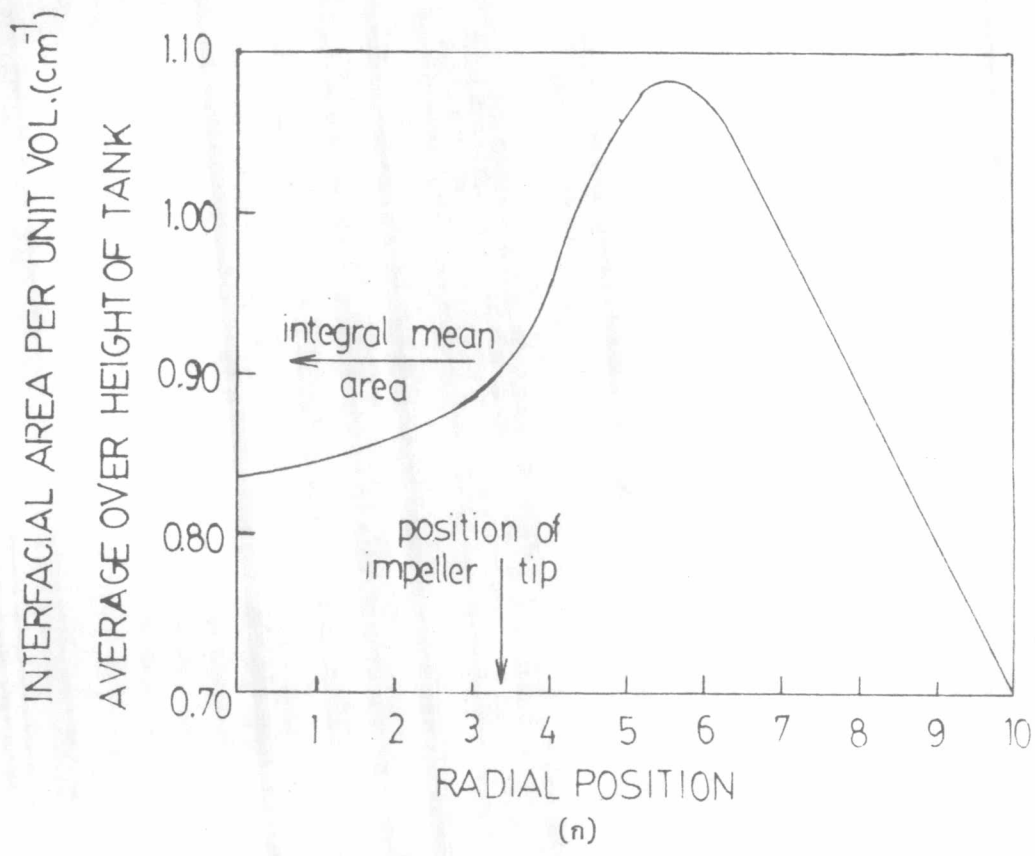
ความหนาแน่นของฟองก๊าซในถังกวนจะไม่เท่ากันตลอด จากการศึกษาของ Calderbank (2), Lee และ Merick (3) เกี่ยวกับพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว พบว่ามีความแตกต่างตามความลึกของของเหลวในถังกวน และที่อัตราการหมุนของใบพัดกวนสูงขึ้นจะเห็นความแตกต่างนี้เด่นชัด รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มีพื้นที่สัมผัสสูงในแนวความสูงของถังกวนคือบริเวณใกล้ ๆ กับใบพัดกวนและบริเวณที่อยู่ใกล้กับผิวหน้าของของเหลว สำหรับในแนวรัศมีบริเวณด้านหลังของปลายใบพัดกวนจะมีพื้นที่สัมผัสสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ในถังกวน เนื่องจากพื้นที่สัมผัสจะขึ้นกับความหนาแน่นของฟองก๊าซ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าบริเวณเหล่านี้จะมีความหนาแน่นของฟองก๊าซสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ด้วย

## 2.1.2 กลไกการกระจายของฟองก๊าซในของเหลว

Calderbank (4) ได้เสนอทฤษฎีของการกระจายระหว่างกันของของไหล 2 ชนิดซึ่งไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันโดยเสนอว่าแรงที่มีผลต่อการกระจายจะประกอบด้วย

1. แรงตึงผิว (Surface tension) เป็นแรงที่กระทำที่ผิวฟองหรือหยดของของเหลวเพื่อรักษาสภาพความเป็นทรงกลม (sphericity) ของฟองหรือหยดไว้

$$\text{แรงตึงผิวต่อหน่วยพื้นที่} = \frac{\sigma}{D} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายของพื้นที่ผิวสัมผัสตามแนวรัศมี (ก) และแนวตั้ง (ข) ภายในถังกวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 นิ้ว

2. แรงพลศาสตร์ของไหล (Fluid-dynamic) เป็นแรงเนื่องจากผลของความโน้มถ่วง (gravity), การไหลของของเหลว, แรงเฉื่อย (inertia force) และอาจรวมถึงแรงความหนืด (viscous force) ด้วย แรงทั้งหมดนี้จะกระทำต่อฟองในลักษณะของแรงพลศาสตร์เค้นเฉือน (Dynamic shear stress)

$$\text{แรงพลศาสตร์เค้นเฉือน} = \tau \quad (2.2)$$

3. แรงเนื่องจากความหนืดภายในเฟสกระจาย (Dispersed phase) เป็นแรงที่เกิดขึ้นภายในฟองหรือหยดของเหลว เนื่องจากการไหลวน (Circulation) ภายในฟองหรือหยด ซึ่งเป็นผลให้เกิดแรงเค้นหนืด (viscous stress) สำหรับฟองก๊าซแรงนี้จะมีค่าน้อยมาก

$$\text{แรงเค้นหนืดในเฟสกระจาย} \propto \frac{\mu_d}{D} \sqrt{\tau/\rho_d} \quad (2.3)$$

การกระจายของฟองก๊าซในของเหลวเกิดขึ้นได้เมื่อแรงเค้นเฉือนสามารถเอาชนะแรงตึงผิวโดยทั่วไปแรงทั้ง 3 ดังกล่าวสามารถเขียนอยู่ในรูปเลขไร้มิติ (dimensionless number) ได้ดังนี้

$$\text{Bubble Weber number, } N_{We,b} = \frac{\tau D}{\sigma} \quad (2.4)$$

$$\text{Bubble Reynold number, } N_{Re,b} = \frac{D}{\mu_d} (\tau \rho_d)^{1/2} \quad (2.5)$$

$$\text{Viscosity group, } N_{Vi,b} = \frac{\sqrt{N_{We}}}{N_{Re}} = \mu_d / (\rho_d \sigma D)^{1/2} \quad (2.6)$$

Calderbank (4) ได้เสนอว่า การแตกฟองจะเกิดขึ้นได้เมื่อค่า Weber number มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต (Critical Weber number,  $(N_{We})_{crit}$ )

ในการหาขนาดของฟองในการกระจายจะต้องทราบค่าแรงเค้นเฉือนด้วย จากการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับความปั่นป่วนของของไหลรอบ ๆ ฟอง เพื่อหาค่าแรงเค้นเฉือนที่กระทำต่อฟองนั้น

Calderbank (4) ได้แสดงค่าแรงเค้นเฉือนเนื่องจากความปั่นป่วนไว้ดังนี้

$$\tau = C_1 \rho_c (PD/V\rho_c)^{2/3} \quad (2.7)$$

ถ้าให้ค่า Bubble Weber number ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องมือในการกระจาย มีค่าคงที่ขนาดของฟองที่ใหญ่ที่สุดที่เกิดขึ้นจะเขียนได้ในรูปความสัมพันธ์กับค่าแรงตึงผิว, ความหนาแน่น

ของของเหลว และกำลังงานที่ใช้ในการกระจายได้ดังนี้

$$D = C_2 \left[ \frac{\sigma^{0.6}}{\rho_c^{0.2} (P/V)^{0.4}} \right] \quad (2.8)$$

สำหรับในถังกวน สมการ (2.8) จะเขียนในรูปเลขไรต์หน่วยได้ดังนี้

$$\frac{D}{L} \propto (N_{We,I})^{-3/5} N_P^{-2/5} \left(\frac{L}{V}\right)^{3-2/5} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $N_{We,I}$  เป็นค่า Weber number ของใบพัดกวน ,  $\frac{N^2 L^3 \rho}{\sigma}$

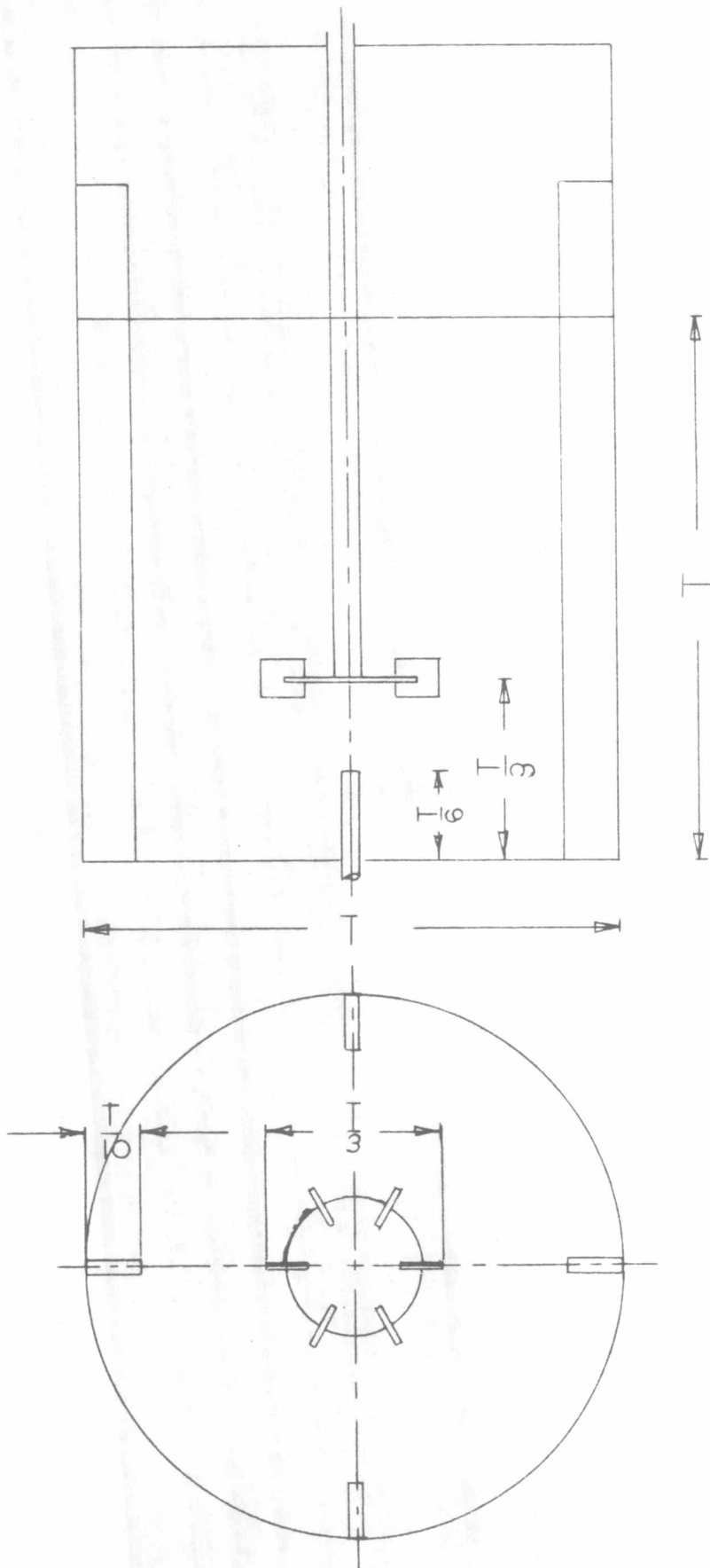
$N_P$  เป็นค่า Power number,  $\frac{P}{N^3 L^5 \rho_c}$

## 2.2 การใช้ถังกวน เป็น เครื่องมือในการดูดซึมก๊าซ (gas absorption)

### 2.2.1 ลักษณะของถังกวน (Geometry of an agitated tank)

ลักษณะรูปทรงของใบพัดกวนและถังกวนซึ่งใช้เป็นเครื่องมือในการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวจะมีผลต่อการกระจายของก๊าซในของเหลว ในการออกแบบจะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบที่สำคัญต่าง ๆ เช่น ในเรื่องการดูดซึม (absorption) เป็นการดูดซึมที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีด้วยหรือไม่ นอกจากนี้ยังขึ้นกับการจัดเครื่องมือ และสภาวะการทำงาน (operating condition) Calderbank (4) ได้เสนอรูปแบบของถังกวนมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาการกระจายของก๊าซในของเหลว ดังรูปที่ 2.2 โดยที่ลักษณะของถังกวนจะประกอบด้วยแผ่นกั้น (baffle) 4 แผ่น และหัวกระจายก๊าซ (gas nozzle) 1 หัว ชนิดของหัวกระจายที่ใช้จะขึ้นกับขนาดของถังกวน ในถังกวนขนาดเล็กมักใช้หัวกระจายแบบท่อเปิด (open pipe) แต่ในถังกวนขนาดใหญ่หัวกระจายที่ใช้มักเป็นแบบวงแหวน (ring sparger) ซึ่งมีรูหลายรู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนไม่ควรใหญ่เกินกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดกวน (5) สำหรับหัวกระจายแบบท่อเปิด ขนาดของท่อไม่ควรมีผลต่อขนาดของฟองมากนัก (6) แต่จะมีผลเมื่อความเร็วของใบพัดกวนต่ำ ๆ (7)

ความสูงของของเหลวในถังกวน ควรจะเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวนจึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมดีที่สุด (1) อย่างไรก็ตามความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่านี้น้อยก็ไม่มีผล



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของถังกวนและใบพัดกวน

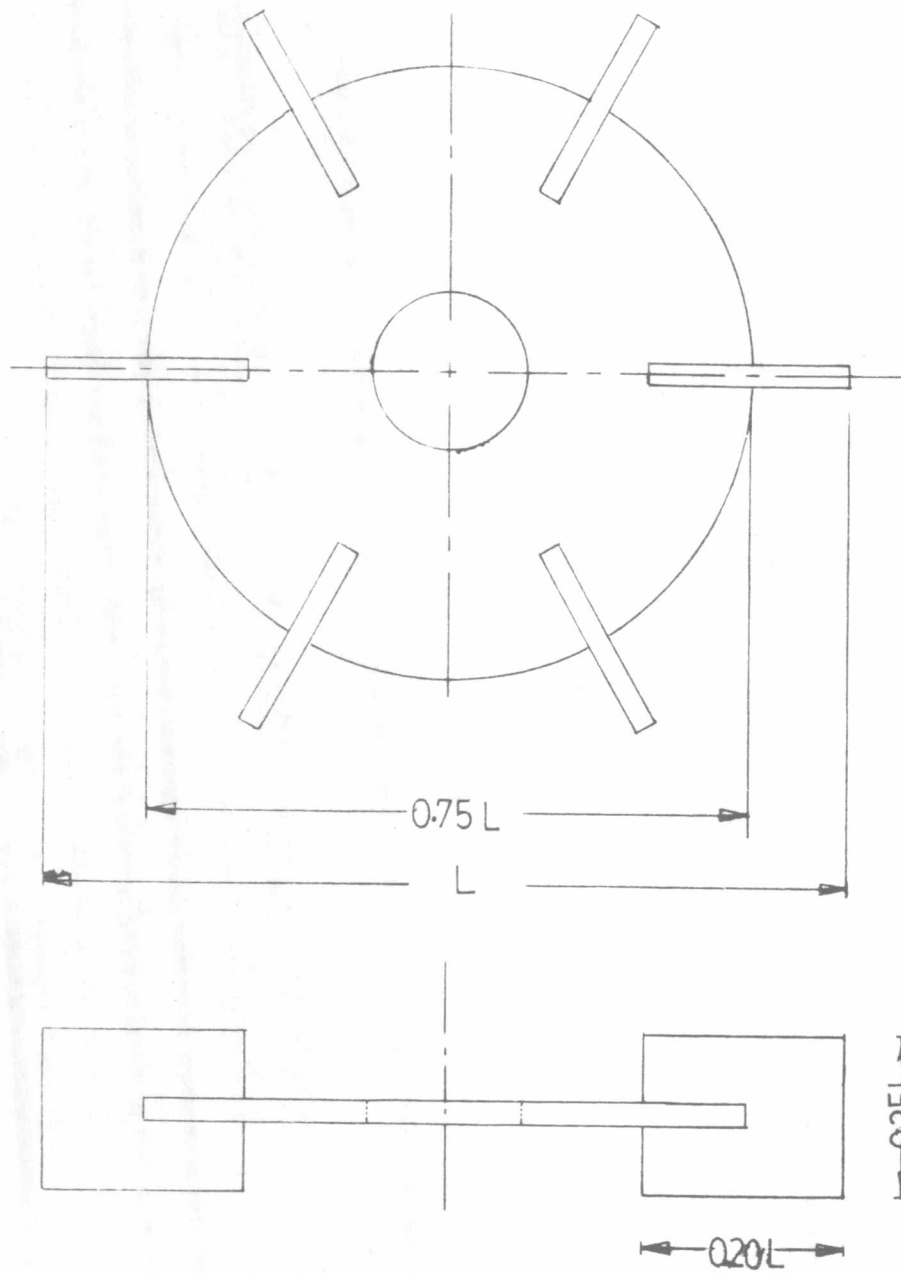
มากนัก แต่ไม่ควรเกิน 2 เท่าของ เส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน เพราะจะทำให้เกิดการรวมตัวของ ฟองบริเวณส่วนบนของถังกวน ซึ่งจะ เป็นผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสลดลง และประสิทธิภาพของการดูดซับก็จะ ลดลงด้วย

จากการทดลองของ Yoshida et al (8) เกี่ยวกับชนิดของใบพัดกวน พบว่าที่อัตราการ ไหลของก๊าซ และกำลังงาน (power) ที่ใช้ค่าหนึ่ง ๆ ชนิดของใบพัดกวนจะไม่ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัส เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามชนิดและโครงสร้างของใบพัดกวนจะมีความสัมพันธ์กับกำลังที่ใช้ในการกวน จากการทดลองของ Westerterp (1) พบว่าใบพัดกวนแบบกังหัน 6 ใบพัด (6-blade turbine) ดังรูปที่ 2.3 เป็นแบบที่เหมาะสมในการศึกษาการกระจายของก๊าซในของเหลว และจากการศึกษาของ Sharma et al (9) โดยทดลองใช้ใบพัดกวนแบบกังหันชนิดต่าง ๆ ในการศึกษาอัตราการถ่ายเทมวลสารพบว่าใบพัดกวนแบบกังหัน ใบพัดตรง 6 ใบพัด (6-straight-blade dish turbine) ให้ผล ดีที่สุด

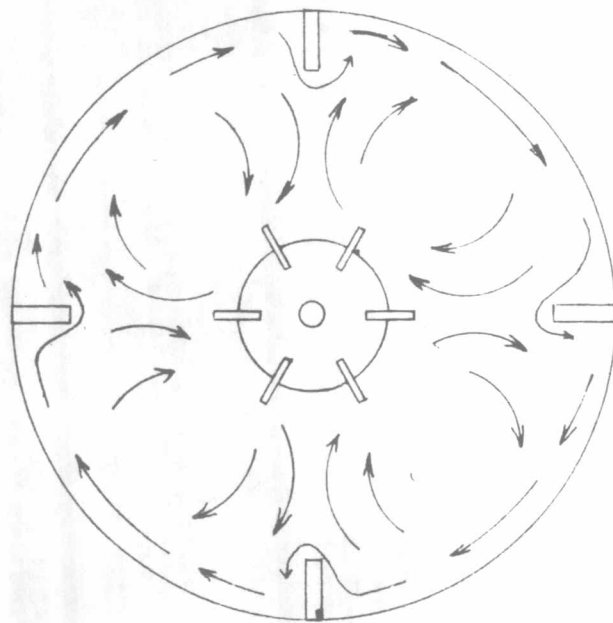
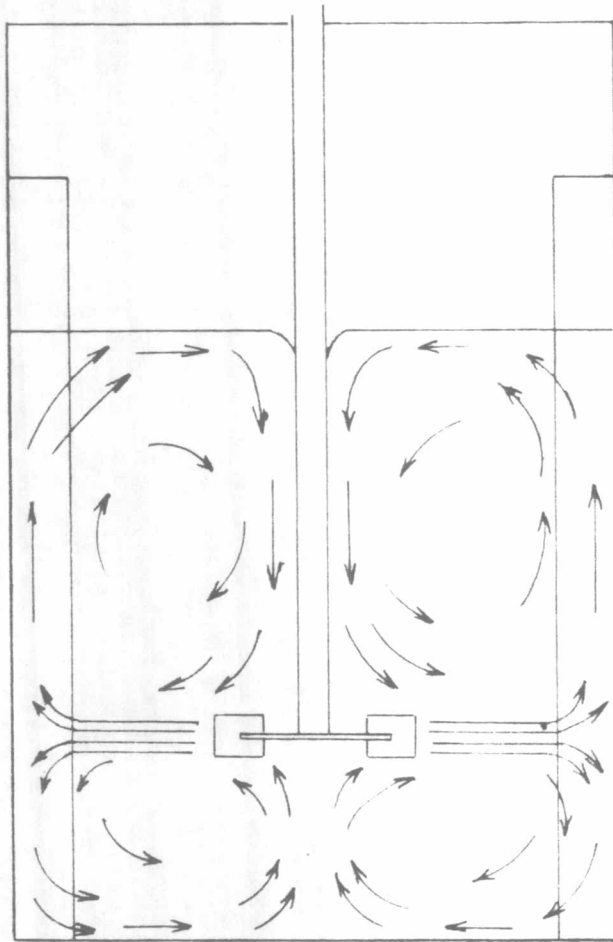
แม้ว่าขนาดและตำแหน่งของใบพัดกวนซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของถังกวน จะมีผลต่อประสิทธิภาพ ในการกวน แต่ผลงานด้านนี้ยังมีน้อยไม่เพียงพอที่จะสรุปผลได้ อย่างไรก็ตามในการศึกษาการกระจาย ของก๊าซในของเหลวสำหรับถังกวนมาตรฐาน (10) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกวนจะเป็น  $1/3$  เท่าของ เส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน และตำแหน่งของใบพัดกวนจะอยู่สูงจากก้นถึง  $1/3$  เท่าของความ สูงของของเหลวในถังกวน สำหรับรูปแบบการไหลของของเหลวในถังกวนมาตรฐานมีแบบการไหลดัง แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

#### 2.2.2 กำลังที่ใช้ในการกวน

ค่ากำลังที่ใช้ในการกวนจะมีความสำคัญต่อการศึกษการกระจาย เพราะใช้ เป็นบรรทัดฐาน ในการขยายขนาดถังกวน และยังมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer Coefficient) อีกด้วย ในระบบสถานะเดียว (One-phase system) Ruston, Costich และ Everett (10) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Power number,  $P/(\rho_L N^3 L^3)$  กับ Reynold number,  $\frac{NL^2 \rho_L}{\mu}$  ดังรูปที่ 2.5 พบว่า Power number จะขึ้นกับค่า Reynold number จนถึง 10000 หลังจากนั้นค่า Power number จะมีค่าคงที่

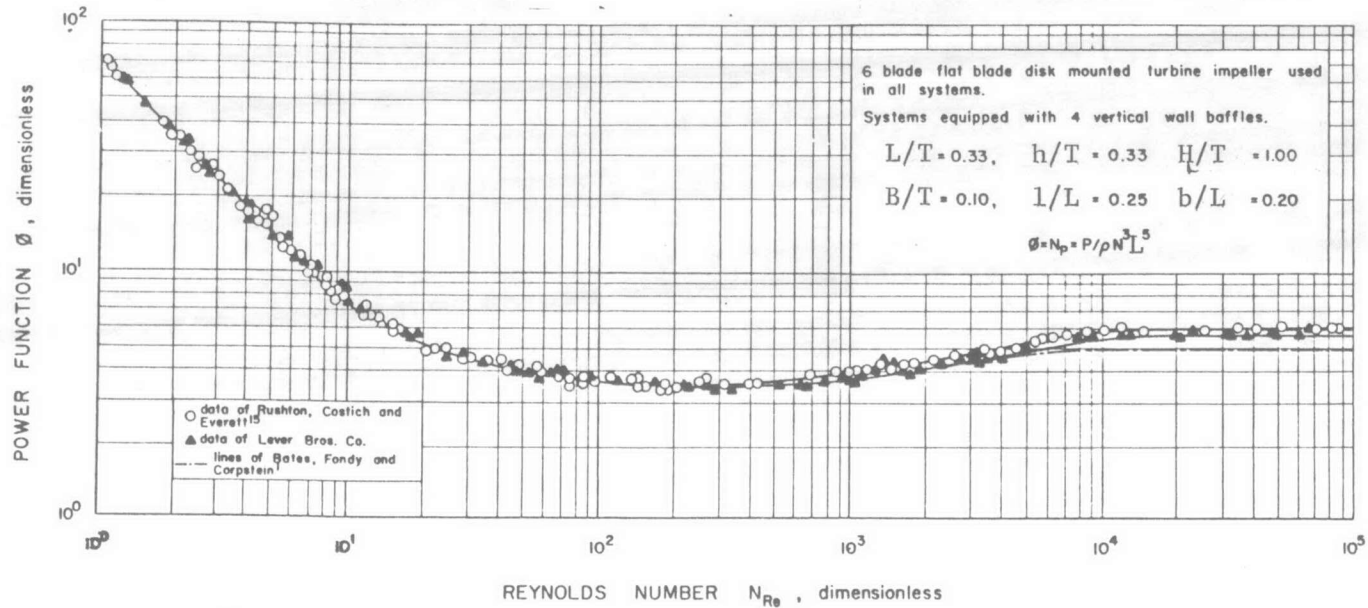


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะใบพัดคววนชนิด 6-Flat blade turbine



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการไหลของของเหลวในถังกวน





รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power number และ Reynold number สำหรับถังกวนมาตรฐาน

สำหรับในการกวนที่มีก๊าซเข้าสู่ถังกวน Calderbank (2) ได้ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Power ratio,  $P/P_0$  กับค่า Aeration number,  $Q/NL^3$  ในของเหลวบริสุทธิ์ พบว่าได้กราฟเส้นตรง 2 ส่วน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$\text{ที่ } \frac{Q}{NL^3} < \sim 0.03, \quad \frac{P}{P_0} = 1 - 12.6 \frac{Q}{NL^3} \quad (2.10)$$

$$\text{และ } \frac{Q}{NL^3} > \sim 0.03, \quad \frac{P}{P_0} = 0.62 - 1.85 \frac{Q}{NL^3} \quad (2.11)$$



จากผลงานของ Calderbank ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้เอทานอล (Ethanol) ในการแปรค่าแรงดึงผิวในช่วง 73.5 ถึง 21.7 ไดน์ต่อเซนติเมตร พบว่าแรงดึงผิว ไม่ค่อยจะมีผลต่อการลดลงของกำลังที่ใช้ในการกวนมากนัก

นอกจาก สมการของ Calderbank แล้ว Lvong และ Volesky (11) ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ของ power ratio,  $P/P_0$  กับค่าของกลุ่มเลขไร้น้อย 2 กลุ่มคือ Aeration number,  $Q/NL^3$  และ Weber number ของใบพัดกวน  $\frac{N^2 L^3 \rho_L}{\sigma}$  สำหรับของไหล

นิวโตเนียน ดังนี้

$$P/P_0 = 0.497 \left( \frac{Q}{NL^3} \right)^{-0.38} \left( \frac{N^2 L^3 \rho_L}{\sigma} \right)^{-0.18} \quad (2.12)$$

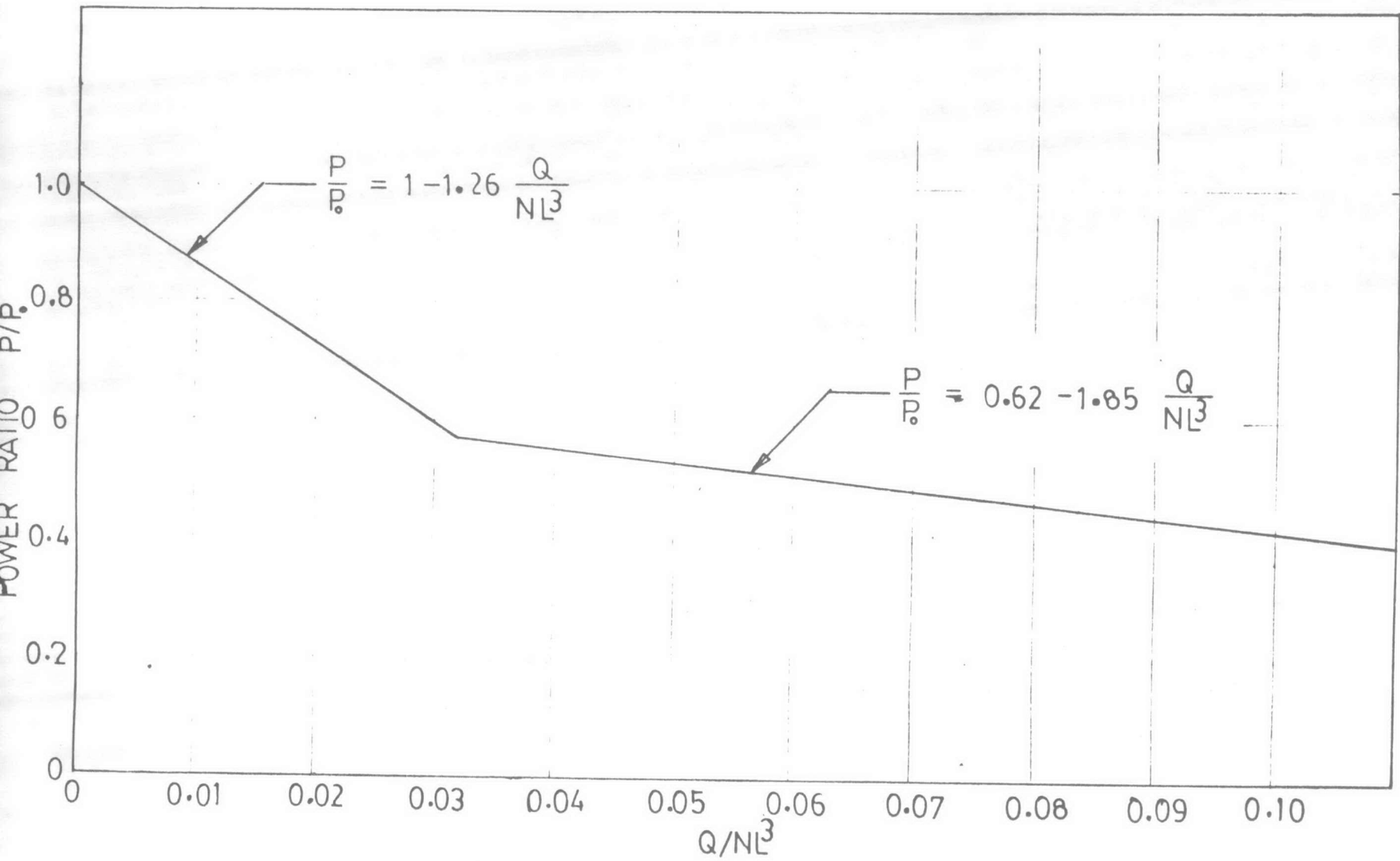
โดยมีค่า Coefficient of determination = 0.985

และ  $\sigma$  แปรค่าอยู่ในช่วง 55-72 ไดน์ต่อเซนติเมตรโดยใช้เอทานอลในการแปรค่า

### 2.2.3 ความเร็วของใบพัดกวน

Westerterp et al (1) ได้เสนอว่าความเร็วของใบพัดกวนจะต้องมีค่ามากกว่าค่าความเร็วต่ำสุด,  $N_0$  การกวนในถังกวนจึงจะเกิดขึ้นอย่างทั่วถึง ทำให้การกระจายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ค่าความเร็วต่ำสุดสามารถแสดงได้ในรูปสมการดังนี้

$$\left( \frac{N_0 L}{\sigma g / \rho_L} \right)^{0.25} = A + B \frac{T}{L} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power ratio และ Aeration number

A และ B เป็นค่าคงที่ไม่มีหน่วยโดยขึ้นกับชนิดของไบพัตควอน สำหรับไบพัตควอนแบบกึ่งตัน 6 ไบ ค่าคงที่มีค่า 1.22 และ 1.25 ตามลำดับ

#### 2.2.4 ขนาดของฟอง และสัดส่วนก๊าซค้าง (fractional gas hold up)

โดยทั่วไปขนาดของฟองก๊าซในการกระจายของก๊าซในของเหลว สามารถหาได้จากสมการที่ 28 แต่ในทางปฏิบัติ ฟองที่กระจายออกไปอาจเกิดการรวมตัวกันได้เมื่อเข้ามาใกล้กัน และจากหลักฐาน จากการทดลอง (2) พบว่าค่า Critical Weber number จะขึ้นกับอัตราส่วนความหนืดด้วย ดังนั้นเพื่อให้สมการดังกล่าวถูกต้องยิ่งขึ้น จึงมีการปรับปรุงโดยมีเทอมสัดส่วนก๊าซค้างและอัตราส่วนความหนืดรวมอยู่ด้วย ซึ่ง Calderbank (2) ได้สรุปสมการเกี่ยวกับขนาดของฟองและสัดส่วนก๊าซค้างไว้ดังนี้

สำหรับการกระจายของฟองก๊าซในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

$$D_{S.M} = 2.25 \left[ \frac{\sigma^{0.6}}{(P/V)^{0.4} \rho_c^{0.2}} \right] H^{0.4} \left( \frac{\mu_d}{\mu_c} \right)^{0.25} \quad (2.14)$$

และในสารละลายอัลกอฮอล์

$$D_P = 1.90 \left[ \frac{\sigma^{0.6}}{(P/V)^{0.4} \rho_c^{0.2}} \right] H^{0.65} \left( \frac{\mu_d}{\mu_c} \right)^{0.25} \quad (2.15)$$

สำหรับสัดส่วนก๊าซค้าง เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$H = \left( \frac{V_S H}{V_t} \right)^{0.5} + 0.0216 \left[ \frac{(P/V)^{0.4} \rho_c^{0.2}}{\sigma^{0.6}} \right] \left( \frac{V_S}{V_t} \right)^{0.5} \quad (2.16)$$

นอกจากค่าสัดส่วนก๊าซค้างที่แสดงโดย Calderbank. Dickey ( 12 ) ได้แสดงค่าสัดส่วนก๊าซค้างในรูปสมการดังนี้

เมื่อ  $\frac{P}{\rho V}$  มีค่าต่ำ ๆ

$$H = 1.4 \left( \frac{P}{\rho V} \right) \left( \frac{L}{T} \right)^{1.5} \quad (2.17)$$

007524

เมื่อ  $\frac{P}{PV}$  มีค่าสูง ๆ

$$H = 1.8 \left(\frac{P}{PV}\right)^{0.14} V_S^{0.75} \quad (2.18)$$

สำหรับ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองก๊าซเฉลี่ย Lee และ Meyrick (3) ได้สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ไว้ดังนี้

$$D_{S.M} = 4.25 \left[ \frac{\sigma^{0.6}}{(P/V)^{0.4} \rho_c^{0.2}} \right] H^{0.5} \quad (2.19)$$

สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในช่วงสัดส่วนก๊าซค้ำระหว่าง 0-0.1 พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองก๊าซจะขึ้นกับกลุ่มของ  $\left[ \frac{\sigma^{0.6}}{(P/V)^{0.4} \rho_c^{0.2}} \right]$  เท่านั้นโดยไม่มีเทอมสัดส่วนก๊าซค้ำอยู่ด้วย

#### 2.2.5 พื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial area)

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการทดลองเกี่ยวกับพื้นที่สัมผัสของการกระจายของก๊าซในของเหลวอย่างมากโดยพยายามพัฒนาเทคนิคในการวัดพื้นที่ผิวสัมผัส และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัส เช่น กำลังงานที่ใช้ในการกวน, คุณสมบัติของก๊าซและของเหลว และสภาวะที่ทำการทดลอง แล้วสร้างความสัมพันธ์ขึ้นในรูปสมการ Calderbank (2) ได้เสนอสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area) กับตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$\text{สำหรับ } N_{Re} \left[ \frac{NL}{V_S} \right]^{0.3} < 20,000, \quad a_0 = 144 \left[ \frac{(P/V)^{0.4} \rho_c^{0.2}}{\sigma^{0.6}} \right] \left( \frac{V_S}{V_t} \right)^{0.5} \quad (2.20)$$

$$\text{และ } N_{Re} \left[ \frac{NL}{V_S} \right]^{0.3} > 20,000, \quad \log \frac{2.3 a}{a_0} = 195 \cdot 10^{-5} N_{Re} \left[ \frac{NL}{V_S} \right]^{0.3} \quad (2.21)$$

สมการของ Calderbank ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเนื่องจากใช้วิธีในการวัดพื้นที่ผิวสัมผัสแบบ Light transmission technique ซึ่งในปัจจุบันยอมรับว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุด แต่เนื่องจาก Calderbank ได้ทำการทดลองในสภาวะที่อัตราการผลิตของก๊าซต่ำ ๆ ต่อมา Potter et al (13) จึงได้เสนอสมการซึ่งปรับปรุงจากสมการของ Calderbank เพื่อให้ใช้ได้ในช่วงอัตราไหลของก๊าซที่สูงขึ้น โดยคูณ Correction factor,  $\frac{Et}{P}$  เข้ากับสมการเดิม จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$a_o = 144 \left[ \frac{(P/V)^{0.4} \mu^{0.2}}{\sigma^{0.6}} \right] \left[ \frac{V_s}{V_t} \right]^{0.5} \left( \frac{E_t}{P} \right) \quad (2.22)$$

ในกรณีที่ทำการศึกษาทดลองในสภาวะความดันบรรยากาศสูงกว่าปกติ จะมีข้อผิดพลาดเกี่ยวกับความหนาแน่นของก๊าซที่เข้าถึงกวน สมการ 2.21 จึงแก้ไขใหม่เป็นดังนี้

$$a_o = 144 \left[ \frac{P/V^{0.4} \mu^{0.2}}{\sigma^{0.6}} \right] \left[ \frac{V_s}{V_t} \right]^{0.5} \left( \frac{E_t}{P} \right) \left[ \frac{\rho}{\rho_a} \right]^{0.16} \quad (2.23)$$

สมการนี้เมื่อตรวจสอบจากข้อมูล 90 การทดลองพบว่ามีความเบี่ยงเบนเฉลี่ยร้อยละ 8

### 2.3 การถ่ายเทมวลในถังกวน

#### 2.3.1 การถ่ายเทมวลในเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase)

โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล จะขึ้นกับการไหลและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล ซึ่งสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$\frac{K_L D}{D_L} \propto \left[ \frac{D V \rho_L}{\mu} \right]^{n_1} \left[ \frac{\mu}{\rho_L D_L} \right]^{n_2}$$

$$(N_{Sh}) \propto (N_{Re})^{n_1} (N_{Sc})^{n_2}$$

สำหรับฟองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมากกว่า 2.5 มม. สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลได้ดังนี้

$$K_L N_{Sc}^{1/2} = 0.42 \left[ \frac{\Delta \rho \mu g}{\rho_L^2} \right]^{1/3} \quad (2.24)$$

และสำหรับฟองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยน้อยกว่า 2.5 มม.

$$K_L N_{Sc}^{2/3} = 0.31 \left[ \frac{\Delta \rho \mu g}{\rho_L^2} \right]^{1/3} \quad (2.25)$$

#### 2.3.2 การถ่ายเทมวลในเฟสกระจาย (Dispersed phase)

Calderbank(4)ได้ทำการพิสูจน์สมการเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสกระจาย

โดยกำหนดให้เฟสกระจายเป็นรูปทรงกลม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย Sauter พบว่า

สำหรับกรณีเมื่อเวลาในการสัมผัสมีค่ามาก

$$K_g = \frac{2}{3} \frac{\pi^2 Dg}{D} + \frac{D \ln 6}{6t \pi^2} \quad (2.26)$$

ในทางปฏิบัติ เทอมที่ 2 จะไม่มีความสำคัญ ดังนั้น

$$K_g \approx \frac{2}{3} \frac{\pi^2 Dg}{D} \quad (2.27)$$

และสำหรับกรณีที่เวลาในการสัมผัสมีค่าน้อย

$$K_g = 2 \sqrt{Dg/\pi t} \quad (2.28)$$

สำหรับฟองก๊าซค่าความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลจะมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความต้านทานการถ่ายเทมวลในของเหลว

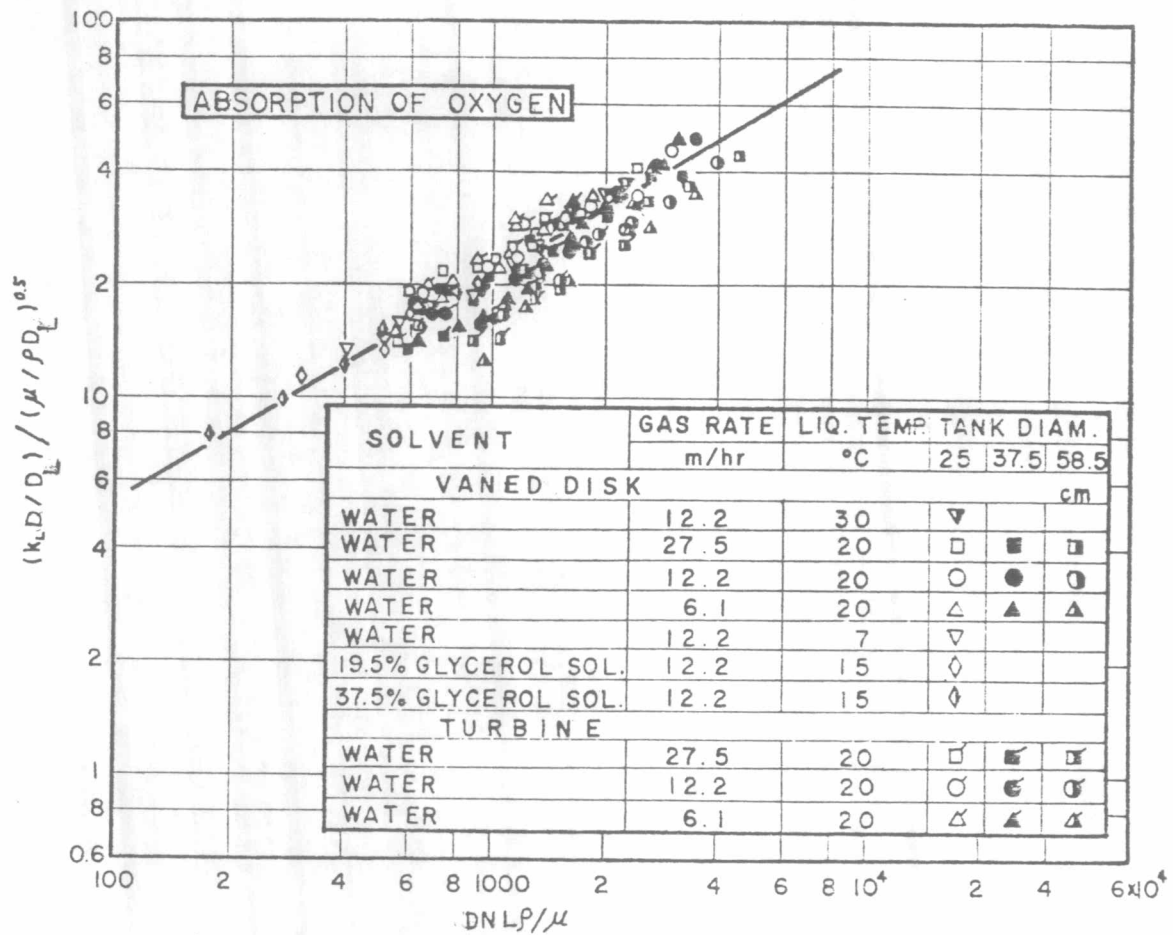
สำหรับการถ่ายเทมวลออกซิเจนในน้ำ Yoshida et al (8) ได้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในถังกวน 3 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 , 37.5 และ 58.5 เซนติเมตร ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_{Sh}$  กับ  $N_{Re}$ ,  $N_{Sc}$  ดังรูปที่ 2.7 และแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบการดังนี้

$$K_L D/D_L = 0.33 (DNL\rho/\mu)^{0.6} (\mu/\rho D_L)^{0.5} \quad (2.29)$$

นอกจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซึ่งเป็นตัวที่บอกถึงความสามารถในการถ่ายเทมวลแล้ว ในทางปฏิบัติ เนื่องจากมีความยุ่งยากในการหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัส จึงมักรายงานผลการถ่ายเทมวลในลักษณะสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตร Riet (7) ได้สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของ  $K_L A$  และ  $\frac{P}{V}$ ,  $V_S$  ไว้ดังนี้

$$K_L A = 2.60 \times 10^{-2} \left(\frac{P}{V}\right)^{0.4} V_S^{0.5} \quad (2.30)$$

$P/V$  ใช้ได้ในช่วง 500-10000 วัตต์/เมตร<sup>3</sup> และ  $V_S$   $0.5 \times 10^{-2}$  -  $4.0 \times 10^{-2}$  เมตร/วินาที



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $D N L \rho / \mu$  และ  $(k_L D / D_L) / (\mu / \rho D_L)^{0.5}$

## 2.4 สารชอบผิว และผลของสารชอบผิวต่อการถ่ายเทมวล

### 2.4.1 ลักษณะของสารชอบผิว (14)

สารละลายโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ตามความสามารถในการดูดซับ (adsorb)

ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและอากาศได้ 2 พวกคือ

1. สารชอบผิว (surface active substances)
2. สารไม่ชอบผิว (surface inactive substances)

สารชอบผิวเป็นสารที่ชอบสะสมอยู่ที่ผิวสัมผัส สารชอบผิวจะต้องมีแรงดึงผิวน้อยกว่าตัวทำละลาย (solvent) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารชอบผิว และโมเลกุลของตัวทำละลายจะน้อยกว่าแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายด้วยกัน ดังนั้นโมเลกุลของสารชอบผิวจะถูกผลักให้ไปอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัส และเนื่องจากการสะสมของโมเลกุลสารชอบผิวที่ผิวสัมผัสซึ่งแรงกระทำระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อยจึงทำให้แรงดึงผิวลดลง

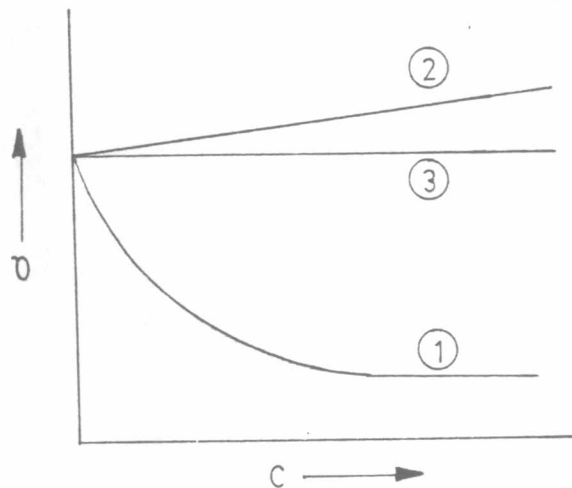
โมเลกุลของสารชอบผิวจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ชอบรวมอยู่กับน้ำ (hydrophillic



group) หรือสามารถถูกล้อมรอบได้ด้วยโมเลกุลของน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) ซึ่งเป็นส่วนของไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากมีความสามารถละลายต่ำจึงถูกผลักให้อยู่ห่างจากโมเลกุลของน้ำ

สารไม่ชอบผิว สารเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะหนีจากผิวของเหลวเข้าสู่ของเหลว เนื่องจากสารพวกนี้มีความสามารถในการละลายสูง แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารพวกนี้กับตัวทำละลายจะมากกว่าแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายด้วยกัน สารพวกนี้ได้แก่สารอินทรีย์ที่นำไฟฟ้าได้ทั้งหมด, กรด, ด่าง และ เกลือ โมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวเป็นไอออนได้ดีในน้ำ

สารทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดึงผิวที่บริเวณผิวสัมผัสซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิวและความเข้มข้นของสารละลายชนิดต่าง ๆ

กราฟเส้นที่ 1 เป็นเส้น Isotherm ของสารชอบผิว ในช่วงแรกแรงดึงผิวจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในระยะเริ่มต้น ( $C = 0$ ) พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและอากาศยังไม่มีสารชอบผิวอยู่ ต่อมาเมื่อมีสารชอบผิว ( $C > 0$ ) ในช่วงที่ความเข้มข้นไม่มากนัก สารชอบผิวเกือบทั้งหมดจะไปอยู่ที่ผิวสัมผัสทำให้แรงดึงผิวลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อมีสารชอบผิวมากขึ้น ๆ แรงดึงผิวก็จะลดลง ๆ จนเกิดเป็นชั้นของโมเลกุลของสารชอบผิว (monomolecular layer) ปกคลุมผิวสัมผัสทั้งหมด หลังจากนี้การดูดซับโมเลกุลของสารชอบผิวไปที่บริเวณผิวสัมผัสจะไม่มีผลต่อการลดลงของแรงดึงผิว

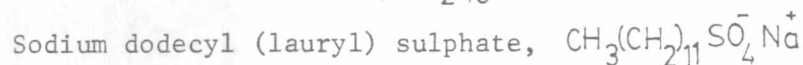
กราฟเส้นที่ 2 เป็นเส้น Isotherm ของสารไม่ชอบผิว เนื่องจากโมเลกุลของสารเหล่านี้มีความสามารถในการละลายสูง จึงชอบอยู่ในของเหลวมากกว่าที่ผิวสัมผัส และทำให้ในบริเวณผิวสัมผัสมีสารเหล่านี้อยู่น้อย แรงดึงผิวจึงสูงขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้น สารพวกนี้ในบริเวณผิวสัมผัสก็จะเพิ่มขึ้น จึงทำให้แรงดึงผิวเพิ่มขึ้น

กราฟเส้นที่ 3 เป็นเส้น Isotherm ของสารซึ่งไม่มีผลต่อแรงดึงผิว

#### 2.4.2 ชนิดของสารชอบผิว (15)

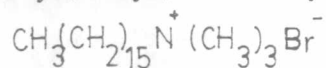
ชนิดของสารชอบผิวสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

##### 1. สารชอบผิวชนิด แอนไอออนิก (Anionic Surfactant) เช่น



##### 2. สารชอบผิวชนิด แคทไอออนิก (Cationic Surfactant) เช่น

Hexadecyl(cetyl) trimethylaminonium bromide,



##### 3. สารชอบผิวชนิด นอนไอออนิก (Nonionic Surfactant) เช่น

Polyoxyethylene P-tertoctylphynyl ether,

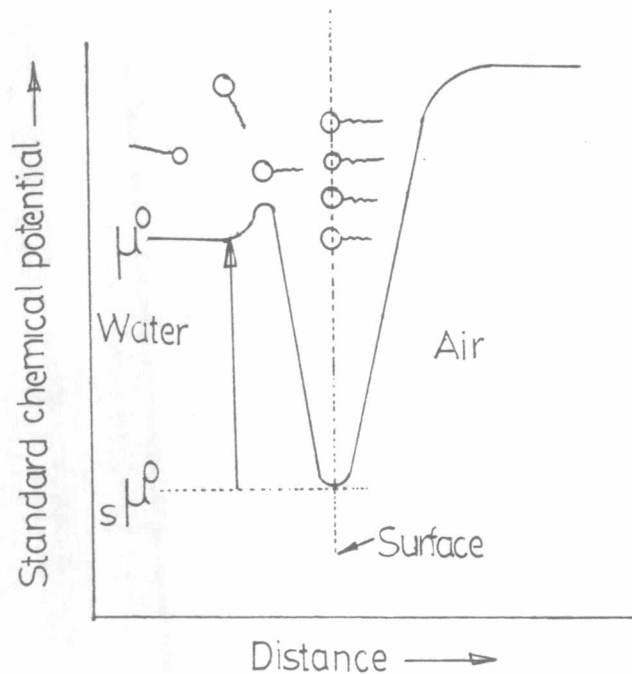


นอกจากนี้ยังมีสารชอบผิวพวก แอมโฟไลติก (Ampholytic) ซึ่งเป็นได้ทั้ง แอนไอออนิก แคทไอออนิก หรือนอนไอออนิก ขึ้นอยู่กับความเป็นกรดต่างของสารละลาย และสารชอบผิวที่เกิดในธรรมชาติ เช่น lecitin เป็นต้น

#### 2.4.3 การเกิดขึ้นโมเลกุล (Monolayer) ของสารชอบผิว (16)

เมื่อนำสารชอบผิวละลายในตัวทำละลายจะพบว่าโมเลกุลของสารชอบผิวจะถูกผลักดันให้มาอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสมากกว่าบริเวณอื่น จากปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ในลักษณะของ

ศักยภาพทางเคมี (Chemical potential) ของตัวทำละลาย ดังนี้



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง standard chemical potential และระยะทาง

จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าศักยภาพทางเคมีของโมเลกุลของ propanol จะมีค่าต่ำสุดเมื่ออยู่ที่ผิวสัมผัส ดังนั้นโมเลกุลส่วนใหญ่จะถูกผลักดันให้อยู่ที่บริเวณผิวสัมผัส การถ่ายเทโมเลกุลจากชั้นในสารละลาย (bulk solution) ไปสู่ที่ผิวสัมผัสจะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะ Osmotic pressure พลังงานส่วนนี้จะได้จากผลต่างของศักยภาพทางเคมีของตัวทำละลายระหว่างชั้นในสารละลายและชั้นผิวสัมผัส การถ่ายเทโมเลกุลของตัวทำละลายไปที่ผิวสัมผัสจะสิ้นสุดลงเมื่อค่าศักยภาพทางเคมีในชั้นผิวสัมผัสและในชั้นสารละลายมีค่าเท่ากัน

โมเลกุลของสารชอบผิวซึ่งอยู่ในบริเวณผิวสัมผัสจะมีผลทำให้แรงดึงผิวลดลง และยิ่งมีมากขึ้นก็จะทำให้แรงดึงผิวลดลงมากขึ้น ในการอธิบายถึงการดูดซับโมเลกุลของสารชอบผิวไปที่ผิวสัมผัส Gibb ได้แสดงในรูปสมการดังนี้

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \frac{d\sigma}{dc} \quad (2.31)$$

ค่า  $\Gamma$  จะแทนปริมาณการดูดซับ , R คือค่าคงที่ของก๊าซ และ T เป็นอุณหภูมิ

จากสมการของ Gibb ถ้าแรงดึงผิวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น ก็จะทำให้ค่าปริมาณการดูดซับ เป็นลบซึ่งหมายความว่าตัวทำละลายจะอยู่ในสารละลายมากกว่าในบริเวณผิวสัมผัสในทางกลับกัน ถ้าแรงดึงผิวลดลง เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นก็จะทำให้ค่าปริมาณการดูดซับ เป็นบวกซึ่งหมายความว่าตัวทำละลายจะอยู่ในบริเวณผิวสัมผัสมากกว่าในสารละลาย

#### 2.4.4 ลักษณะโครงสร้างของชั้นโมเลกุลสารชอบผิว (14)

ดังได้กล่าวแล้วว่าโมเลกุลของสารชอบผิวจะถูกไล่ให้ไปอยู่ในบริเวณผิวสัมผัสและเกิดเป็นชั้นของโมเลกุลปกคลุมพื้นที่ผิวสัมผัส การปกคลุมนี้แบ่งได้ตามลักษณะการรวมกลุ่มของโมเลกุลได้ 2 แบบคือ แบบ gaseous surface film และ Condensed film

Gaseous surface film การเกิดขึ้นในลักษณะนี้เนื่องจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อย โมเลกุลจะมีแนวโน้มที่จะกระจายไปบนผิวน้ำและอยู่ห่างกัน โมเลกุลของสารชอบผิวด้านที่มีขั้วจะจมอยู่ในน้ำ ขณะที่ส่วนหางซึ่งประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนแผ่ราบไปบนผิวน้ำเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำและส่วนหางของโมเลกุลสารชอบผิวมีค่ามากกว่าส่วนหางของโมเลกุลสารชอบผิวด้านกัน ดังรูปที่ 2.9 (ก) สารที่จะทำให้เกิดการจับตัวของโมเลกุลในลักษณะนี้ได้แก่ สารชอบผิวอินทรีย์ ที่มีส่วนหางไม่สั้นหรือยาวเกินไป เช่น กรดไขมัน (fatty acid) ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนไม่น้อยกว่า 12 อะตอมและไม่มากกว่า 20-22 อะตอม

Condensed film การเกิดขึ้นโมเลกุลในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อแรงกระทำกันของส่วนหางของโมเลกุลสารชอบผิวมีค่ามากจึงทำให้โมเลกุลจะจับตัวเป็นกลุ่มโดยมีส่วนหางขนานกัน และตั้งฉากกับผิวสัมผัส ดังรูปที่ 2.10 (ข) โมเลกุลของสารชอบผิวที่จะเกิดได้ในลักษณะนี้ จะต้องมีส่วนหางยาวจึงจะทำให้แรงกระทำระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้นซึ่งได้แก่โมเลกุลของสารชอบผิวที่ส่วนหางมีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 20-24 อะตอม

 (ก) Gaseous surface film.

 (ข) Condensed film.

รูปที่ 2.10 แสดงการจัดโมเลกุลของสารขอมผิวที่ผิวสัมผัส (ก) gaseous surface film

(ข) Condensed film

#### 2.4.5 คุณสมบัติของชั้นโมเลกุลสารขอมผิว (16)

โมเลกุลของสารขอมผิวที่ปกคลุมผิวสัมผัสจะเกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และการจัดตัวของโมเลกุล ในการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของชั้นโมเลกุลสารขอมผิวที่เปลี่ยนไปจะช่วยให้เข้าใจสภาพการเกิดขึ้นดังกล่าว คุณสมบัติของชั้นโมเลกุลที่เปลี่ยนไปเนื่องจากสารขอมผิว ได้แก่ ความดันผิว (surface pressure) และความหนืดผิว (surface viscosity)

ความดันผิว ( $\Delta\sigma$ ) คือค่าแรงตึงผิวที่ลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นโมเลกุลสารขอมผิว ซึ่งเขียนได้ในรูปสมการดังนี้

$$\Delta\sigma = \sigma_0 \quad (2.32)$$

การเปลี่ยนแปลงความดันผิวเกิดขึ้น เนื่องจากความต้องการพื้นที่ในการแผ่กระจายมากขึ้น

ความหนืดผิว คือความหนืดของผิวสัมผัสที่เปลี่ยนไปเนื่องจากชั้นโมเลกุลของสารขอมผิว ชั้นโมเลกุลที่มีคุณสมบัติทางกายภาพต่างกันจะทำให้มีค่าความหนืดผิวต่างกัน ความหนืดผิวจะมีความสัมพันธ์กับความหนืดในสารละลาย ดังสมการ

$$\mu = \frac{\mu_0}{S} \quad (2.33)$$

#### 2.4.6 การถ่ายเทมวลผ่านชั้นโมเลกุลสารชอบผิว

จากการศึกษาผลงานการทดลอง เท่าที่ผ่านมาถึงผลของสารชอบผิวที่มีต่ออัตราการถ่ายเทมวลจากก๊าซเข้าสู่ของเหลว ไม่ว่าจะ เป็นระบบที่ไม่มีกระแสไหล (non-flow system) หรือในระบบที่มีกระแสไหล (flow system) พบว่าสารชอบผิวซึ่งอยู่ที่ผิวสัมผัสจะทำให้เกิดความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น แต่ทฤษฎีในการอธิบายผลของสารชอบผิวต่ออัตราการถ่ายเทมวลยังไม่ได้รับการพิสูจน์ในทางปฏิบัติ เนื่องจากการหาค่า parameter บางตัวยังไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ เช่น surface diffusivity ของสารชอบผิว อย่างไรก็ตามแนวคิดในการอธิบายถึงการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลหรือความต้านทานการถ่ายเทมวลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารชอบผิว อาจพอสรุปได้ว่าเป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ

1. Hydrodynamic effect สารชอบผิวซึ่งอยู่ในบริเวณผิวสัมผัสจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทาง Hydrodynamic ในบริเวณผิวสัมผัสซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทมวลลดลง

Raymond (17) ได้ทำการทดลองวัดค่า drag coefficient ของฟองก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.28-0.44 เซนติเมตร กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล โดยศึกษาในฟองเดี่ยว (single bubble) ได้สังเกตเห็นว่าการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะแปรผันโดยตรงกับค่า drag coefficient ซึ่งแสดงว่าการลดลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะต้องสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทาง Hydrodynamic บริเวณผิวสัมผัส และจากการทดลองของ Hammerton และ Garner (18) พบว่าการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลเนื่องจากสารชอบผิวจะเพิ่มความแข็ง (rigidity) ให้แก่ผิวสัมผัส และลดการเคลื่อนที่ เนื่องจากการพา (surface convection motion) ในบริเวณผิวสัมผัส ทำให้การไหลวนภายในฟองก๊าซลดลงด้วย จากการทดลองของ Lee et al (19) ซึ่งได้ทำการทดลองโดยศึกษาถึงผลของ Hydrodynamic ที่ถูกรบกวนโดยสารชอบผิว พบว่า การลดลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะสัมพันธ์กับขนาดของ eddies ที่เพิ่มขึ้น และความเร็วของ eddies ที่ลดลง นอกจากผลการทดลองดังกล่าวนี้ การทดลองอื่น ๆ ก็สรุปผลในลักษณะที่คล้ายกัน (20, 21)

2. Barrier effect สารชอบผิวที่บริเวณผิวสัมผัสจะทำหน้าที่ปิดกั้นการถ่ายเทมวลได้โดยตรง เป็นผลให้การถ่ายเทมวลลดลง Goodridge et al (20) ได้อธิบายถึงการดูดซึมของ

โมเลกุลก๊าซผ่านชั้นสารขอบผิวไว้ว่า โมเลกุลที่จะซึมผ่านชั้นโมเลกุลของสารขอบผิวได้นั้นจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะ Potential energy barrier ซึ่งโดยปกติมีค่ามากกว่าในกรณีผิวสัมผัสที่ไม่มีสารขอบผิว นอกจากนี้ยังขึ้นกับโอกาสในการชนของโมเลกุลก๊าซกับผนังกันของชั้นสารขอบผิวตรงจุดที่จะไม่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับ หมายความว่าชั้นโมเลกุลสารขอบผิวจะทำหน้าที่คล้ายตะแกรงที่จะยอมปล่อยให้โมเลกุลบางโมเลกุลที่เข้ามาชนผ่านไปได้ บางโมเลกุลไม่อาจผ่านไปได้อันนี้ขึ้นอยู่กับ potential energy barrier ตรงจุดที่โมเลกุลก๊าซวิ่งเข้าชน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการปิดกั้นของโมเลกุลสารขอบผิวจะมีผลทำให้การซึมผ่านเป็นไปได้ยากขึ้น ซึ่งจะมีผลอีกประการหนึ่งที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลลดลงกว่ากรณีเมื่อไม่มีสารขอบผิวอยู่ที่ผิวสัมผัส.