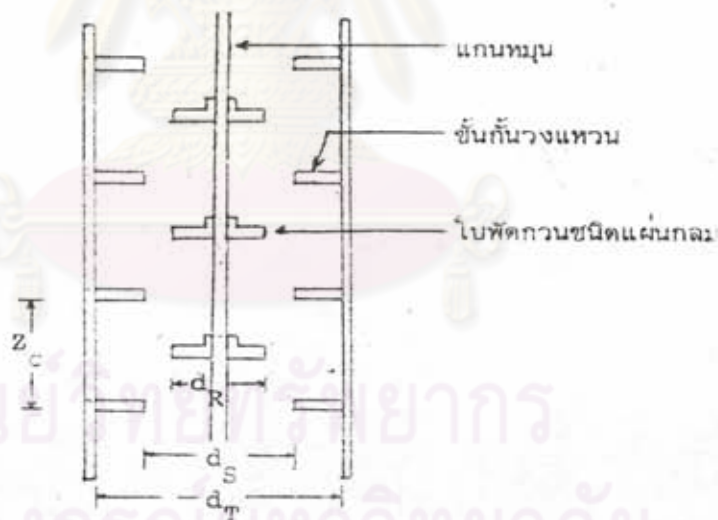


บทที่ 4

เครื่องสักรัดแบบคอลลัมน์ RDC

4.1 ลักษณะและการทำงานของคอลลัมน์ RDC

เครื่องสักรัดแบบคอลลัมน์ RDC มีลักษณะภายในคอลลัมน์ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นกันวงแหวน (Stator ring) เรียงเป็นระยะห่างที่เท่ากันตามความยาวของคอลลัมน์ซึ่งจะแบ่งคอลลัมน์ออกเป็นห้อง (compartment) ที่มีช่องเปิดถึงกันในแต่ละห้องจะมีใบพัดชนิดแผ่นกลม (rotor disc) ทำหน้าที่หมุนกววให้สารละลายสองเฟสที่ไหลสวนทางกันทำการสัมผัสกัน เนื่องจากแรงหมุนของใบพัด สารละลายเฟสกระจาย (dispersed phase) จะถูกแรงเหวี่ยงทำให้แตกตัวเป็นหยดเล็ก ๆ แทรกตัวไปในสารละลายเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) หลังจากนั้นก็จะลอยตัวไหลขึ้นไปในห้อง สักรัดชั้นถัดไป



รูปที่ 4.1 แลตงรายละเอียดภายในคอลลัมน์ RDC

4.2 ค่าความจุของคอลัมน์ RDC

ค่าความจุของคอลัมน์เป็นขีดจำกัดในการนำไปใช้งานเนื่องจากการไหลท่วมของสารละลายเฟสหนึ่ง เข้าไปในอีกเฟสหนึ่ง ซึ่งเกิดจากสารละลายเฟสต่อเนื่องไม่สามารถไหลผ่านคอลัมน์ไปได้เนื่องจากมีแรงต้านของการกวาดสารละลายด้วยใบพัด และแรงเสียดสีของสารละลายทั้งสองเฟสที่ไหลสวนทางกัน จึงมีผลทำให้สารละลายเฟสต่อเนื่องไหลปนออกไปกับสารละลายเฟสกระจาย

ค่าความจุของคอลัมน์แสดงในแบบผลรวมความเร็วของสารละลายเฟสกระจาย (U_d) กับความเร็วของสารละลายเฟสต่อเนื่อง (U_c) ที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์ได้มากที่สุด โดยไม่ทำให้เกิดการไหลท่วมในคอลัมน์

สำหรับองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อค่าความจุของคอลัมน์มี 4 ประการดังนี้

- 1) ขนาดและโครงสร้างของคอลัมน์
- 2) สมบัติทางกายภาพของสารละลายทั้งสองเฟส
- 3) อัตราส่วนของสารละลายเฟสกระจายต่อสารละลายเฟสต่อเนื่องที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์
- 4) ความเร็วรอบใบพัดกวาด

การใช้สมการเพื่อหาค่าความจุของคอลัมน์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปการหาค่าความเร็วของสารละลายเฟสกระจาย และความเร็วสารละลายเฟสต่อเนื่อง จากค่าอัตราส่วนของสารละลายเฟสกระจายในคอลัมน์ (x) และค่า Characteristic velocity (\bar{u}_0) ซึ่งเป็นค่าความเร็วสัมพันธ์ของหยดสารละลายเฟสกระจายที่ไหลผ่านคอลัมน์โดยสมมุติสภาพการไหลของสารละลายเฟสต่อเนื่องหยุดนิ่ง สมการของ Logsdail และคณะ (1957) แสดงได้ดังนี้

$$U_{df} = 2 \bar{u}_0 x_f^2 (1 - x_f) \quad (4.1)$$

$$U_{cf} = \bar{u}_0 (1 - x_f)^2 (1 - 2x_f) \quad (4.2)$$

และหาค่าอัตราส่วนของสารละลายเฟสกระจายในคอลัมน์ที่ภาวะการเกิดการ flooding (x_f) ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่กับอัตราส่วนการไหลเข้าสู่คอลัมน์ของสารละลายเฟสกระจายต่อสารละลายเฟสต่อเนื่อง (U_c/U_d) สมการแสดงได้ดังนี้

$$x_f = \frac{[1 + 8(U_c/U_d)]^{1/2} - 3}{4[(U_c/U_d) - 1]} \quad (4.3)$$

สำหรับค่า characteristic velocity สามารถหาได้จากสมการการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า characteristic velocity กับลักษณะโครงสร้างของคอลัมน์ สมบัติทางกายภาพของสารละลายทั้งสองเฟส และความเร็วรอบใบพัดกวน

Kung และ Beckman (1961) ศึกษาอิทธิพลความเร็วรอบใบพัดกวนที่มีผลต่อค่า characteristic velocity พบว่า ที่ความเร็วรอบใบพัดกวนช่วงแรก (Region I) ค่า characteristic velocity จะมีค่าคงที่ และเมื่อเพิ่มความเร็วใบพัดกวนไปจนถึงความเร็วหนึ่งซึ่งเรียกว่าความเร็วใบพัดกวนวิกฤต ค่า characteristic velocity จะเริ่มลดลงและถ้าเพิ่มความเร็วรอบใบพัดกวนในช่วงหลัง (region II) ให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นอีก ค่า characteristic velocity ก็ลดลงไปอีก (ดูรูปที่ 4.2)

การที่ค่า characteristic มีค่าคงที่ในช่วงแรกนั้นเนื่องจากการหมุนกวนสารละลายในคอลัมน์ไม่รุนแรงพอที่จะทำให้สารละลายเฟสกระจายแตกเป็นหยดเล็ก ๆ ดังนั้น สารละลายเฟสกระจายจะไหลผ่านคอลัมน์ในลักษณะเป็นสายเกลียวรอบแกนหมุน คือเมื่อการหมุนกวนสารละลายถึงความเร็วใบพัดกวนวิกฤต สารละลายเฟสกระจายจึงจะถูกทำให้แตกตัวเป็นหยดเล็ก ๆ มากมาย มีผลทำให้ลอยตัวผ่านสารละลายเฟสต่อเนื่องช้าลง ซึ่งทำให้ค่า characteristic velocity ลดลง

Kannapan (1973) ศึกษาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า characteristic velocity กับลักษณะโครงสร้างของคอลัมน์ สมบัติทางกายภาพของสารละลายทั้งสองเฟส และความเร็วรอบใบพัดกวน ดังนี้

- 1) กรณีไม่มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส

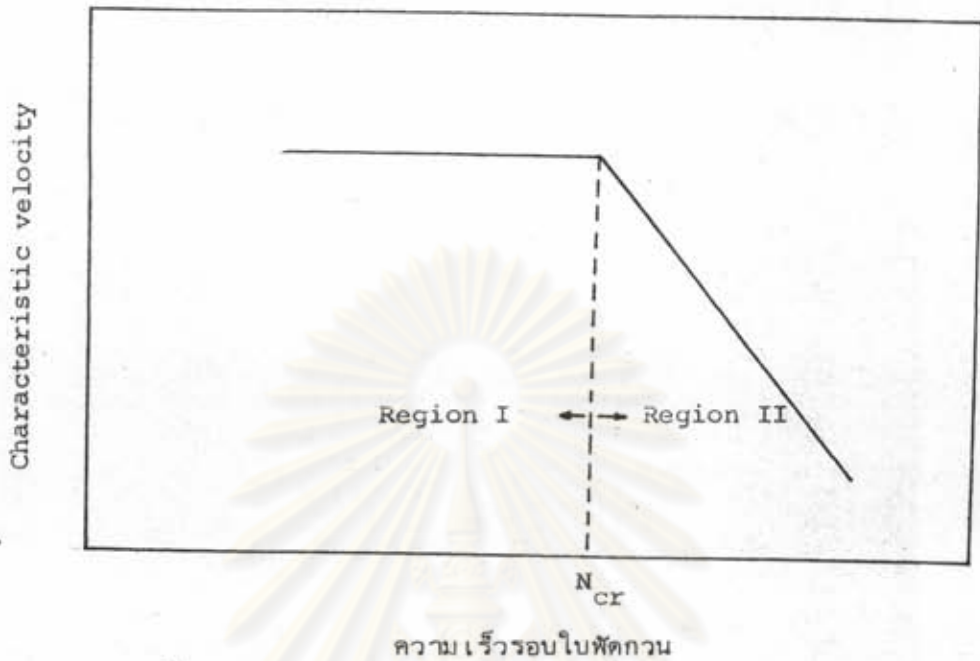
ความเร็วรอบใบพัดกวนวิกฤต (N_{cr}) หาได้จากสมการ ดังนี้

$$\left(\frac{g}{d_R N_{cr}}\right) \left(\frac{\gamma \rho_c}{\mu_c^4 g}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^{\frac{3}{5}} = 180 \quad (4.4)$$

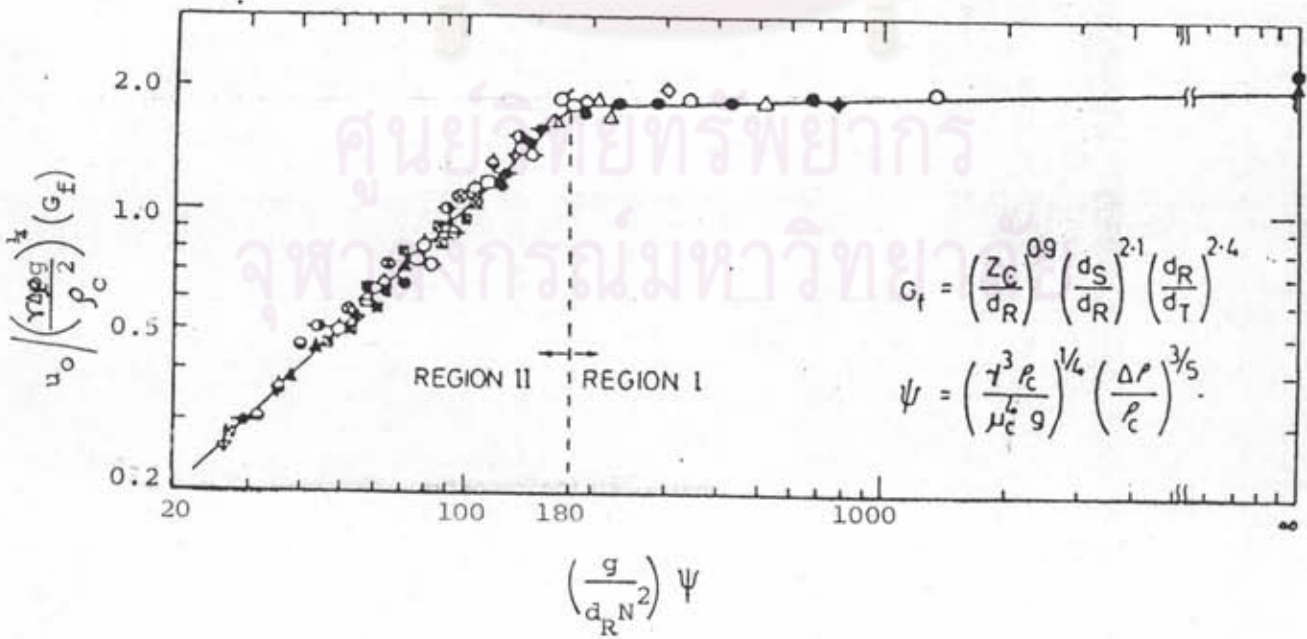
ค่า characteristic velocity (\bar{u}_o) หาได้จากสมการ ดังนี้

$$\bar{u}_o \left(\frac{\gamma \Delta \rho g}{\rho_c^2}\right)^{\frac{1}{4}} \left[\left(\frac{z_c}{d_R}\right)^{0.9} \left(\frac{d_S}{d_R}\right)^{2.1} \left(\frac{d_R}{d_T}\right)^{2.4}\right] = C \left[\left(\frac{g}{d_R N^2}\right) \left(\frac{\gamma \rho_c}{\mu_c^4 g}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c}\right)^{\frac{3}{5}}\right]^n \quad (4.5)$$

ซึ่งค่าคงที่ C และ n หาได้จากผลการทดลองของ Logsdail และคณะ (1957) Kung และ Beckman (1961) Olney (1964) และ Kannapan (1973) ซึ่งมีผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 อิทธิพลของความเร็วรอบใบพัดกวนที่มีผลต่อ Characteristic Velocity



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อหา characteristic velocity ในกรณีไม่มีการถ่ายเทมวลระหว่างเฟส (Kannapan, 1973)

สามารถหาค่าคงที่ได้ดังนี้

$C = 1.08$, $n = 0.08$ เมื่อความเร็วใบพัดกวนน้อยกว่าความเร็วใบพัดกวนวิกฤต
หรือความเร็วใบพัดกวนอยู่ใน Region I

$C = 0.01$, $n = 1.0$ เมื่อความเร็วใบพัดกวนมากกว่าความเร็วใบพัดกวนวิกฤต
หรือความเร็วใบพัดกวนอยู่ใน Region II

2) ในกรณีมีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส

กรณีที่มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสลักษณะโครงสร้างของคอกดรัมและคุณสมบัติ
ของสารละลายจะมีผลต่อค่า characteristic velocity ไม่เท่ากับการที่ไม่มีมีการถ่ายเทมวล
สารระหว่างเฟส

การหาค่าความเร็วรอบใบพัดกวนวิกฤต หาได้จากสมการดังนี้

สำหรับการถ่ายเทมวลสารจากเฟสกระจายไปยังเฟสต่อเนื่อง ($d \rightarrow c$)

$$\left(\frac{g}{d_R N_c^2} \right) \left[\left(\frac{\gamma^3 \rho_c}{\mu_c^4 g} \right)^{1/4} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{3/5} \right]^{1/2} = 16 \quad (4.6)$$

สำหรับการถ่ายเทมวลสารจากเฟสต่อเนื่องไปยังเฟสกระจาย ($c \rightarrow d$)

$$\left(\frac{g}{d_R N_{cr}^2} \right) \left[\left(\frac{\gamma^3 \rho_c}{\mu_c^4 g} \right)^{1/4} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{3/5} \right]^{1/2} = 25 \quad (4.7)$$

การหา characteristic velocity (\bar{u}_0) ซึ่งมีความเร็วรอบใบพัดกวนเร็วกว่า
ความเร็วรอบใบพัดวิกฤต สามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์เพื่อหา \bar{u}_0 ได้ดังนี้

$$\bar{u}_0 / \left(\frac{\gamma \Delta \rho g}{\rho_c^2} \right)^{1/4} (G_f) = \beta \left(\frac{g}{d_R N^2} \right) (\psi)^{1/2} \quad (4.8)$$

เมื่อกำหนดให้

$$G_f = \left(\frac{z_c}{d_R} \right)^{0.9} \left(\frac{d_s}{d_R} \right)^{2.1} \left(\frac{d_R}{d_T} \right)^{2.4}$$

$$\psi = \left(\frac{\gamma^3 \rho_c}{\mu_c^4 g} \right)^{1/4} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{3/5}$$

และค่าคงที่ β มีค่าดังนี้

4.4 $\beta = 0.110$ เมื่อมีการถ่ายเทมวลสารจาก $d \rightarrow c$ จากผลการทดลองในรูปที่

4.5 $\beta = 0.077$ เมื่อมีการถ่ายเทมวลสารจาก $c \rightarrow d$ จากผลการทดลองในรูปที่

ส่วนการหาค่า characteristic velocity (\bar{u}_0) ซึ่งความเร็วรอบใบพัดช้ากว่าความเร็วรอบใบพัดวิกฤต สามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์เพื่อหา \bar{u}_0 ได้ดังนี้

เมื่อมีการถ่ายเทมวลสารจาก $c \rightarrow d$ และ $d \rightarrow c$

$$\bar{u}_0 / \left(\frac{\Delta \rho g}{\rho_c} \right)^{1/2} (G_F) = 1.08 \left[\left(\frac{g}{d_R N^2} \right) (\psi)^{1/2} \right]^{0.08} \quad (4.9)$$

4.3 การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบ RDC

4.3.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของแต่ละเฟส

Olney (1964) , Strand และคณะ (1962) Oley (1964), Strand และคณะ (1962) Kagan และคณะ (1963) ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของแต่ละเฟส จากการทดลองปล่อยให้หยดสารละลายเฟสกระจายลอยผ่านสารละลายเฟสต่อเนื่องซึ่งไม่มีการไหล

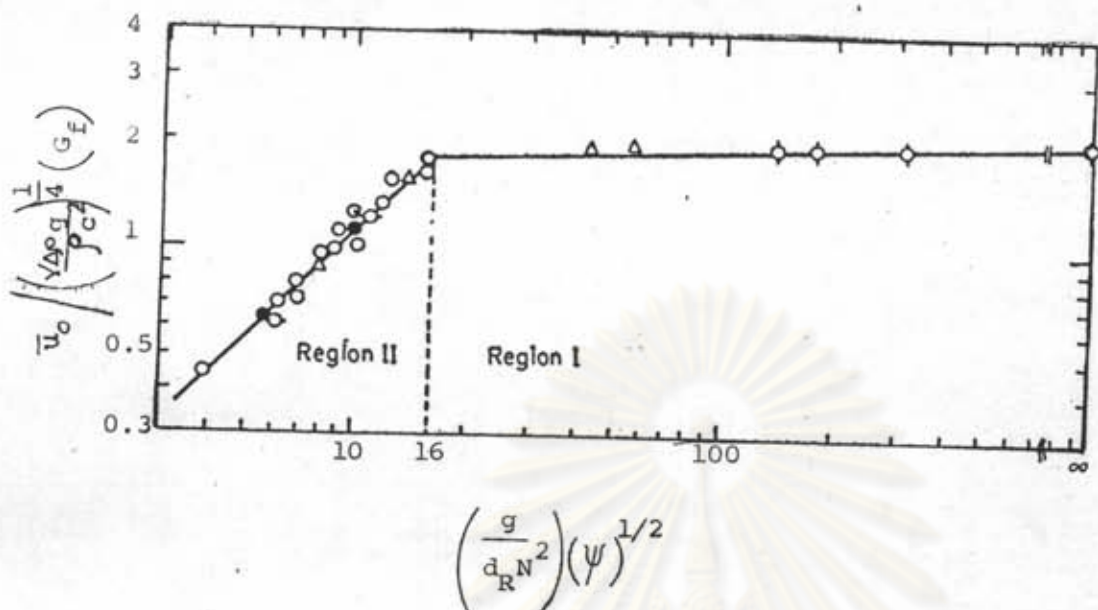
สมการแสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของสารละลายเฟสกระจาย (k_d)
หาได้จากสมการดังนี้

$$k_d = \frac{2\pi^2}{3} \frac{D_d}{d_{av}} \quad (4.10)$$

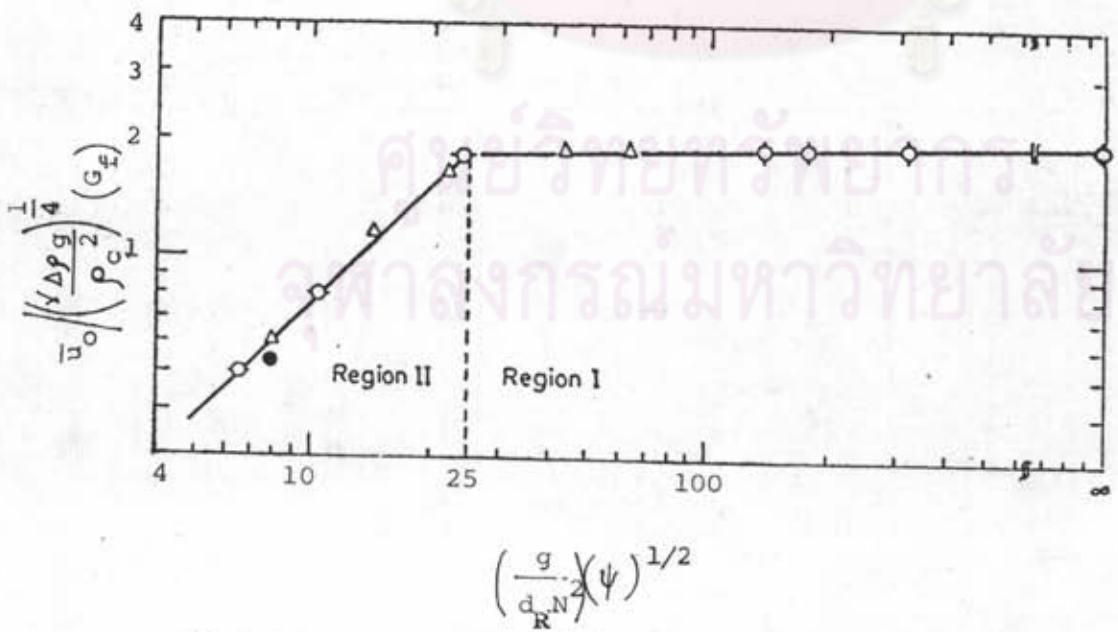
และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของสารละลายเฟสต่อเนื่อง (k_c) ได้จากสมการ
ดังนี้

$$k_c = 0.001 U_s \quad (4.11)$$

เมื่อกำหนดให้ U_s เป็นค่า slip velocity มีค่าเท่ากับ $\left(\frac{U_d}{x} + \frac{U_c}{1-x} \right)$



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อหา characteristic velocity
 ในกรณีที่มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส d → c (Kannapan, 1973)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อหา characteristic velocity
 ในกรณีที่มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส c → d (Kannapan, 1973)

4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม $K_{od} \cdot a$

Kannappan (1973) แสดงสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่า $K_{od} \cdot a$ กับองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์ RDC ดังนี้

1) คอลัมน์ RDC ที่มีความเร็วรอบใบพัดกวนเร็วกว่าความเร็วรอบใบพัดกวนวิกฤต และมีการถ่ายเทมวลสารจากเฟส $d \rightarrow c$ หรือ $c \rightarrow d$ จากกราฟความสัมพันธ์เพื่อหาค่า $K_{od} \cdot a$ ในรูปที่ 4.6 ดังนั้นสมการที่ใช้หาค่า $K_{od} \cdot a$

$$K_{od} \cdot a = 0.95x(1-x) \left(\frac{g^3 \Delta \rho^3}{\gamma \rho_c^2} \right)^{1/4} \left(\frac{g}{d_R N^2} \right)^{1/2} / (\psi)^{1/2} \phi \quad (4.12)$$

$$\text{เมื่อกำหนดให้ค่า } \psi = \left(\frac{\gamma^3 \rho_c}{\mu_c^4 g} \right)^{1/4} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{3/5}$$

$$\text{และค่า } \phi = \left[(N_{Sc_d})^{1/2} + D(N_{Sc_c}) \right]^{1/2}$$

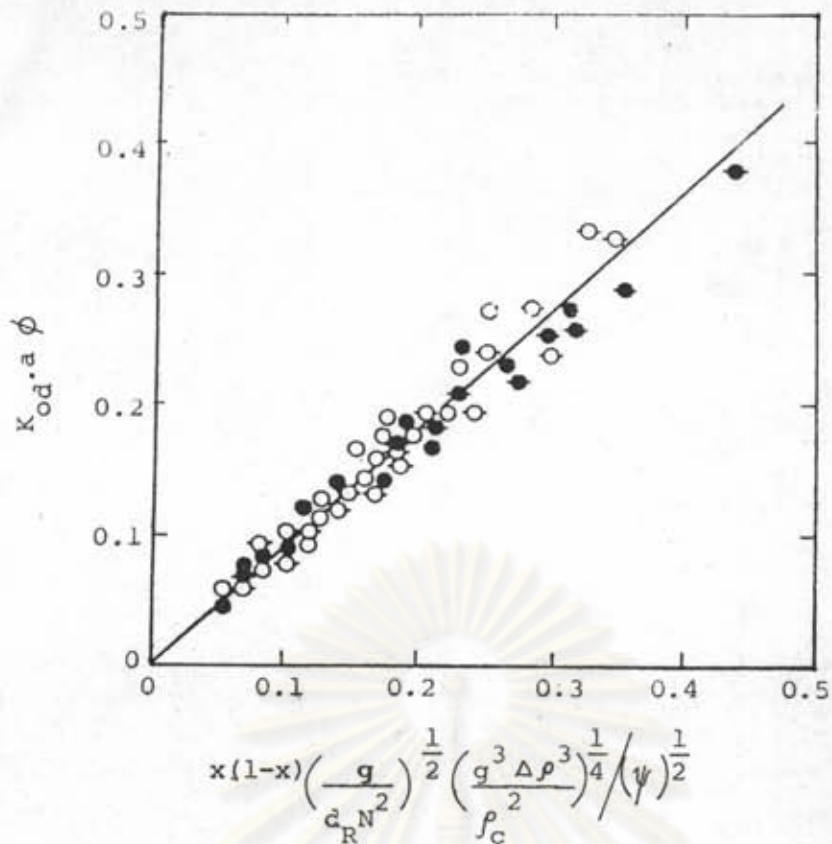
2) คอลัมน์ RDC ที่มีความเร็วรอบใบพัดกวนช้ากว่าความเร็วรอบใบพัดวิกฤตและมีการถ่ายเทมวลสารจากเฟส $d \rightarrow c$ หรือ $c \rightarrow d$ จากกราฟความสัมพันธ์เพื่อหาค่า $K_{od} \cdot a$ ในรูปที่ 4.7 ดังนั้นสมการที่ใช้หาค่า $K_{od} \cdot a$ เป็นดังนี้

$$K_{od} \cdot a = 0.068x(1-x) \left(\frac{g^3 \Delta \rho^3}{\gamma \rho_c^2} \right)^{1/4} / \left[(N_{Sc_d})^{1/2} + D(N_{Sc_c})^{1/2} \right] \quad (4.13)$$

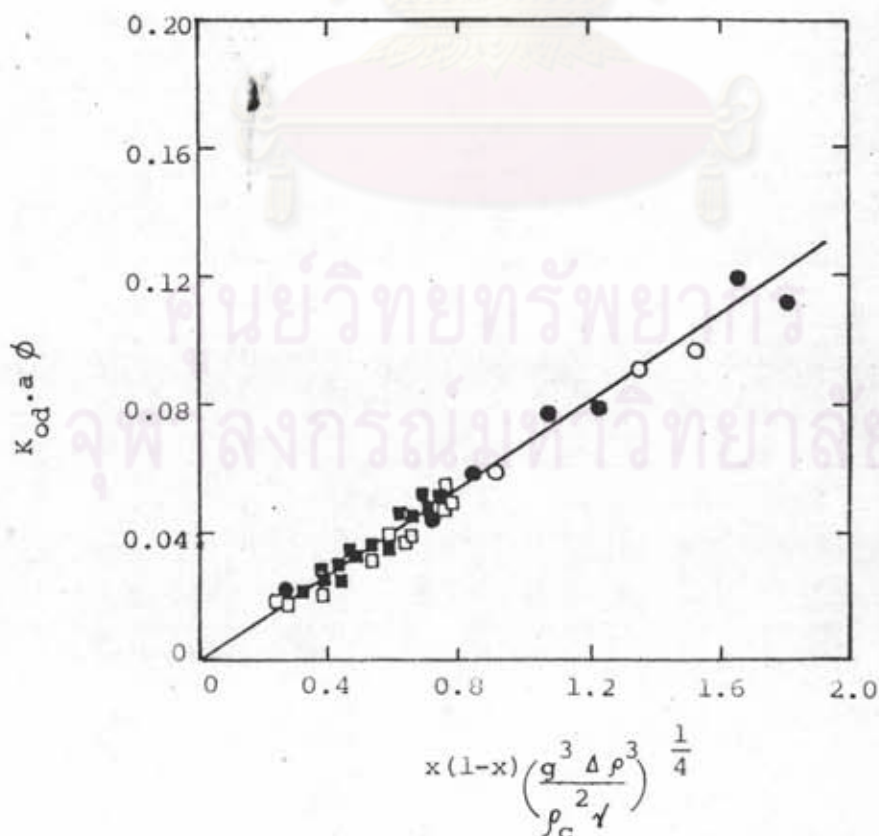
ซึ่งเห็นได้ว่าการตัดเทอมอิทธิพลของ Froude group, $(g/d_R N^2)$ และ property group, ψ ออกไป เนื่องจากมีอิทธิพลต่อค่า $K_{od} \cdot a$ น้อยลง เมื่อคอลัมน์ RDC มีความเร็วใบพัดกวนช้ากว่าความเร็วรอบใบพัดวิกฤต

Vermijs และ Kramers (1954) ทดลองหาค่า $K_{od} \cdot a$ เพื่อหาอิทธิพลของความเร็วรอบใบพัดกวนและอัตราส่วนสารละลายเฟสกระจายในสารละลายผสมในคอลัมน์ ซึ่งแสดงผลการทดลองไว้ในรูปที่ 4.8

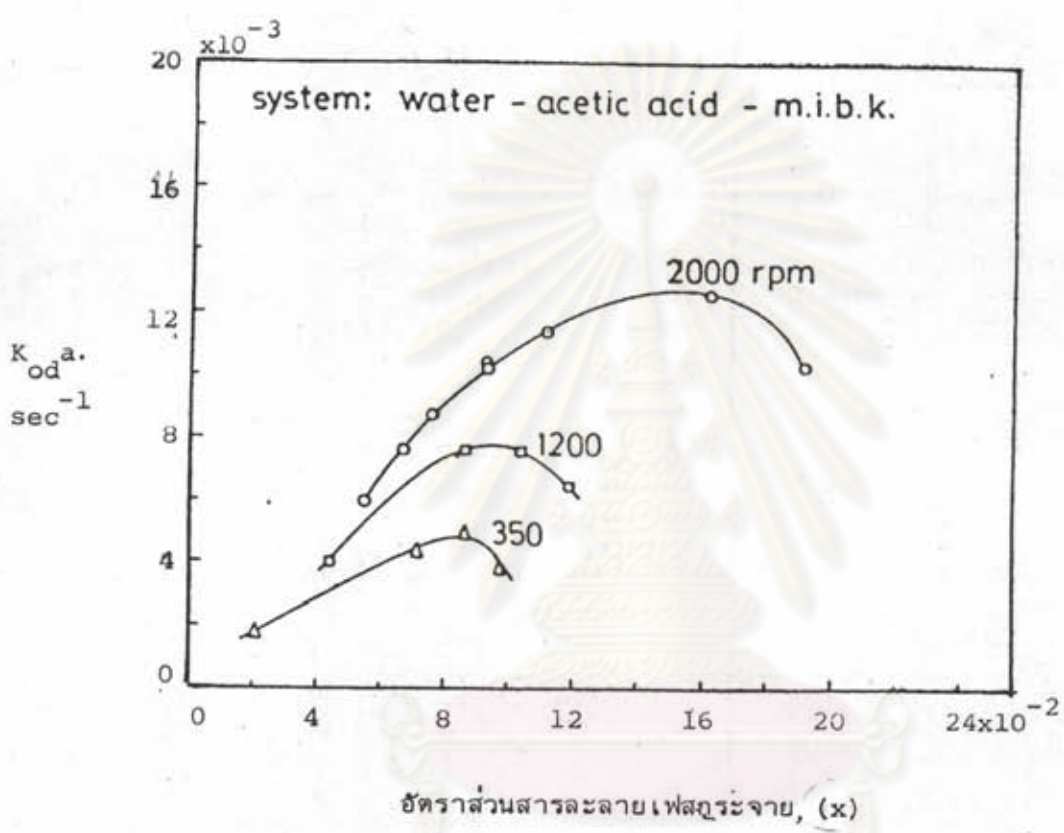
ซึ่งจะเห็นว่าที่ความเร็วรอบใบพัดกวนค่าหนึ่งถ้าเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายเข้าไปในคอลัมน์ซึ่งอัตราส่วนของสารละลายเฟสกระจาย (x) จะเพิ่มขึ้นมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_{od} \cdot a$) เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดของคอลัมน์ RDC แต่ถ้าเพิ่ม x ถึง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม
ในกรณีที่ความเร็วรอบใบพัดกวมนเร็วกว่าความเร็วใบพัดกวนวิกฤต
(Kannapan, 1973)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม
ในกรณีที่ความเร็วรอบใบพัดกวนช้ากว่าความเร็วรอบใบพัดกวนวิกฤต
(Kannapan, 1973)



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความเร็วยกวนและอัตราส่วนสารละลายเฟสกระจาย ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Vermijs และ Kramers, 1954)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าหนึ่ง $K_{od} \cdot a$ จะลดลงซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์การรวมตัวของ dispersed drop (coalescence) ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง

4.3.3 การหาค่า overall height of Transfer unit , $(H.T.U.)_{oc}$

Logsdial และคณะ (1957) ได้หาสมการแสดงความสัมพันธ์จากผลการทดลอง เพื่อหาค่า $(HTU)_{oc}$ ได้ดังนี้

$$\frac{(HTU)_{oc}(x)}{U_c} \left(\frac{g^2 \rho_c}{\mu_c} \right)^{1/3} = \beta' \left(\frac{\mu_c g}{u_o^3 (1-x)^3 \rho_c} \right)^{2k/3} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{2(k-1)/3} \quad (4.14)$$

สำหรับค่าคงที่ β' และ k มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง ดังนั้น ค่าคงที่ β' และ k สำหรับสารละลายแต่ละชนิดจะหาได้จากผลการทดลอง

4.3.4 อิทธิพลของการไหลย้อนกลับ ที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร

ในเครื่องสกัดแบบ RDC ซึ่งมีการกวนอย่างรุนแรง ผลของการไหลย้อนกลับ (axial mixing) จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัด โดยเฉพาะ height of transfer unit

Miyachi และ Vermeulen (1963), Stemmerding และคณะ (1963) ทดลองหา อิทธิพลของ axial mixing ในรูป axial dispersion coefficient (E_c, E_d) ที่มีต่อค่า $(HTU)_{oc}$ ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นสมการดังนี้

$$\left[(HTU)_{oc} \right]_{app} = \left[(HTU)_{oc} \right]_{plug} + \frac{E_d}{U_c} + \frac{E_c}{U_c} \quad (4.15)$$

Strand และคณะ (1962) ทดลองหาค่า E_c และ E_d ซึ่งจากสมการแสดงความสัมพันธ์ กับลักษณะโครงสร้างของคอลัมน์ RDC และคุณสมบัติของสารละลายได้ดังนี้

การหาค่า axial dispersion coefficient ของเฟสต่อเนื่อง (E_c)

$$\frac{(1-x)E_c}{U_c Z_c} = 0.5 + 0.09(1-x) \left(\frac{d_R N}{U_c} \right) \left(\frac{d_R}{d_T} \right)^2 \left[\left(\frac{d_S}{d_T} \right)^2 - \left(\frac{d_R}{d_T} \right)^2 \right] \quad (4.16)$$

การหาค่า axial dispersion coefficient ของเฟสกระจาย (E_d)

$$\frac{x E_d}{U_d Z_c} = 0.5 + 0.09(x) \left(\frac{d_R N}{U_d} \right) \left(\frac{d_R}{d_T} \right)^2 \left[\left(\frac{d_S}{d_T} \right)^2 - \left(\frac{d_R}{d_T} \right)^2 \right] \quad (4.17)$$