



บทที่ 2

แนวทฤษฎี

2.1 คอลัมน์แบบสเปรย์ (Spray Column)

คอลัมน์แบบสเปรย์ เป็นเครื่องหลักของเหลวที่ออกแบบสร้างได้ง่ายที่สุด ในคอลัมน์แบบสเปรย์นี้ ของเหลวที่อยู่ในรูปหยด (เฟลกระจาย) จะกระจายผ่านตัวกระจายที่เป็นแผ่นรูพรุน หลังจากนั้นจะไหลผ่านเฟลหลักในลักษณะการไหลของกลุ่มหยด โดยที่เฟลหลักเองจะไหลสวนทางกับหยด (ในรูปที่ 2 ก. และ 2 ข. แสดงแบบแผนคร่าว ๆ ของคอลัมน์แบบสเปรย์)

ในเครื่องมือแบบนี้ การกระจายของขนาดหยดของเฟลกระจายจะแปรเปลี่ยนไปตามความเร็วของของเหลวที่ผ่านแผ่นกระจาย (9) และถ้าหยดที่เกิดขึ้นมีขนาดล้นมาเล็กน้อยและไม่มีปรากฏการณ์อย่างอื่นเกิดขึ้น เช่น การรวมตัวของหยดและการแตกตัวของหยดระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านเฟลหลัก ก็เรียกได้ว่าเป็นการไหลที่เข้าใกล้การไหลแบบทรงกระบอก (1) ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ออกแบบคอลัมน์แบบสเปรย์ได้ถือกันมานานว่าการไหลของเฟลกระจายเป็นการไหลแบบทรงกระบอกจึงไม่ต้องใช้เบอร์เพเคลต

แต่ในปี 1950 Geankoplis และ Hixon (10) ได้ทำการวัดแนวความเข้มข้นของเฟลทั้งสองในคอลัมน์แบบสเปรย์ขนาด 3.7 ซม. โดยใช้ระบบ ferric chloride-isopropylether-aqueous hydrochloric acid ผลปรากฏว่ามีการเปลี่ยนแปลงของแนวความเข้มข้นที่ทางเข้าออกของเฟลหลัก เนื่องจากมีการเพิ่มระดับการปั่นป่วน (turbulence) ที่จุดเข้าของเฟลหลักและเนื่องจากการรวมตัวของหยดของเฟลกระจายซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจเป็นไปได้ว่าเกิดการเพิ่มอัตราการส่งผ่านมวลสารโดยการปั่นป่วนภายในคอลัมน์ ต่อมา Geankoplis, Wells และ Hawk (11) ได้วัดแนวความเข้มข้นในคอลัมน์แบบสเปรย์ขนาด 9.5 ซม. โดยใช้ระบบโทลูอีน-กรดน้ำส้ม-น้ำ และพบผลเช่นเดียวกัน ในการศึกษาได้พบว่า การเปลี่ยนแปลงแนวความเข้มข้นตรงจุดเข้าออกของเฟลหลักไม่ได้เกิดจากทิศทางของการถ่ายเทมวลสาร

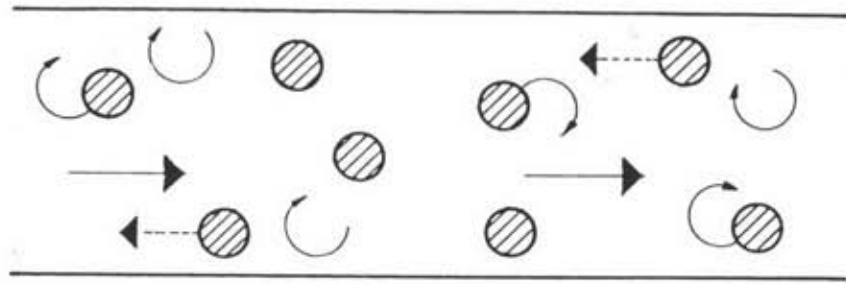
สาเหตุดังกล่าวอธิบายในเวลาต่อมาโดย Newman (12) ผู้เปรียบเทียบแนวความเข้มข้นของเฟลหลักซึ่งได้จากการทดลองกับทางทฤษฎี ซึ่งคำนวณได้ในเงื่อนไขของการไหลแบบ-

ทรงกระบอกและเงื่อนไขการไหลแบบดังกล่าว ปรากฏว่า ค่าทดลองห่างจากค่าที่ได้จากเงื่อนไขสมมุติทั้งสอง ในกรณีการสมมุติการไหลแบบดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ทางเข้าออกของเพลหลักจะมาก และจะหมดไปเมื่อเงื่อนไขเข้าใกล้การไหลแบบทรงกระบอก นั่นคือปรากฏการณ์นี้ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารลดลง ส่วนปรากฏการณ์เช่นนี้ที่ลดเข้าออกของเพลกระจายพบว่าไม่มีหรือน้อยมาก (10, 11, 13, 14)

2.2 แบบจำลองการแพร่ (Diffusion Model)

สมมุติฐานดั้งเดิมในการออกแบบคอลัมน์หลักของเหลว คือการไหลของทั้งสองเฟสในทิศทางที่สวนกัน และเพลทั้งสองจะไหลแบบทรงกระบอก เป็นแหล่งที่มาของหลักการหน่วยส่งผ่าน (HTU, NTU) ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย แต่ในทางปฏิบัติแบบจำลองการไหลแบบนี้ไม่ตรงตามข้อเท็จจริง ทั้งนี้เพราะมีผลของการไหลย้อนกลับเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งเกิดได้จากการไหลกลับ (back flow) หรือไหลขวาง (transverse flow) ดังรูปที่ 3 จากการไหลแบบนี้ความเข้มข้นของมวลสารที่ถ่ายเทระหว่างผิวสัมผัสของเพลทั้งสองลดลง และมีค่าต่ำกว่าที่สมมุติไว้ในแบบมาตรฐานของการออกแบบทั่วไป (4)

สำหรับการออกแบบในระยะหลังนี้เริ่มคำนึงถึงการไหลย้อนกลับโดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งอธิบายลักษณะการถ่ายเทมวลสาร เมื่อมีการไหลย้อนกลับเข้ามาเกี่ยวข้อง แบบจำลองนี้ที่อธิบายปรากฏการณ์การผสมย้อนกลับ คือ แบบจำลองการแพร่ ซึ่งเป็นผลงานของ Miyachi (6) ซึ่งเสนอแบบจำลองนี้ในปี ค.ศ. 1963 โดยการสมมุติว่าการไหลของเพลทั้งสองเป็นแบบปiston diffusion ดังรูปที่ 4 พารามิเตอร์ในแบบจำลองการแพร่นี้มี 3 ตัว ได้แก่ เบอร์เพเคลต (Pe) ของแต่ละเพล และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารซึ่งอยู่ในรูปของจำนวนหน่วยส่งผ่าน (NTU) ความแตกต่างของแบบจำลองทั้งสองแสดงคร่าว ๆ ไว้ในรูปที่ 1



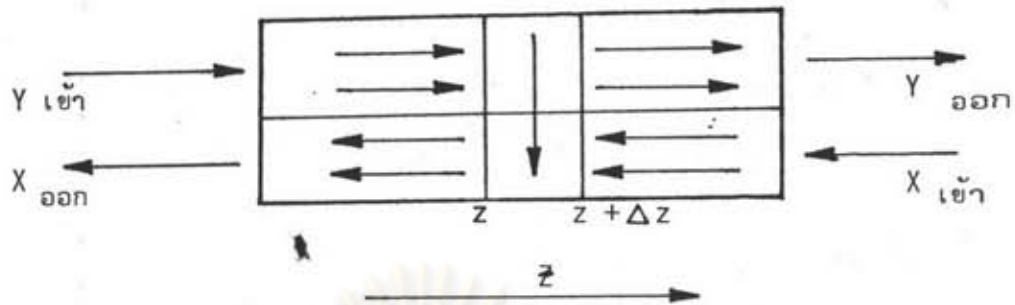
รูปที่ 3 การเกิดปรากฏการณ์ไหลย้อนกลับในคอลัมน์เล็ก ๆ ของ หลอดด้วยของ หลอดแบบไหลสวนทาง กัน



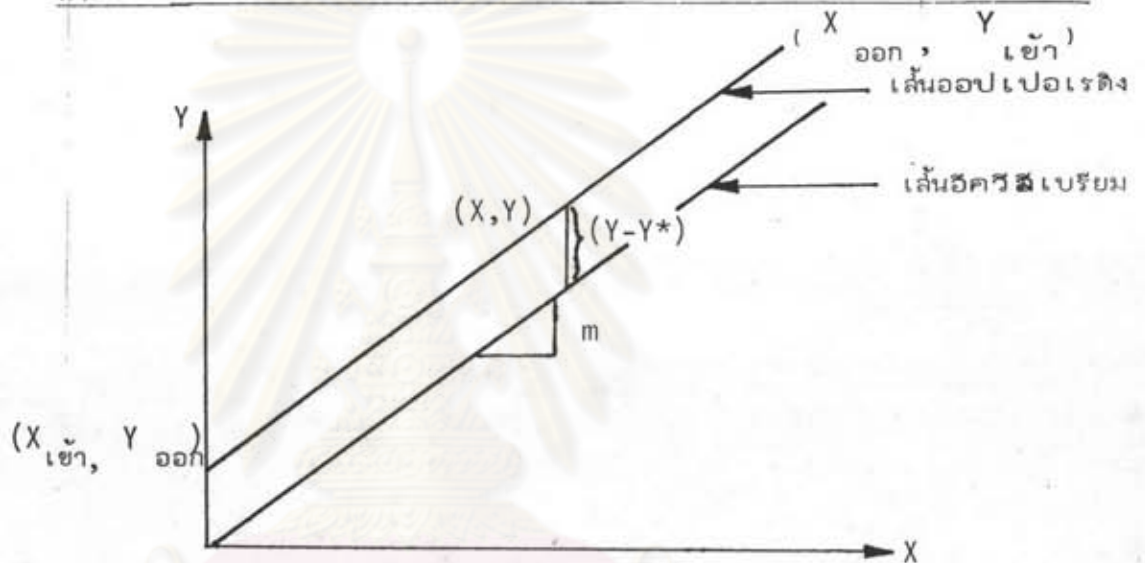
รูปที่ 4 แบบจำลองการไหลแบบปัดดันตีวชนใน เฟลท์กรอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การร่างแบบจำลองตีพวยขึ้น



ภาพแสดงการไหลของเฟสทั้งสองภายในคอลัมน์เพื่อนำมาเขียนแบบจำลองคณิตศาสตร์



ภาพแสดงเส้นออปปเปอเรติง (operating curve) และเส้นอีควิลิบเรียม

จากสมการของ Miyauchi (6) (กรณีมวลสารส่งผ่านจากเฟส Y ไปยังเฟส X)

$$v_y A_T (1 - \theta) Y|_z - v_y A_T (1 - \theta) Y|_{z+\Delta z} + J_y A_T|_z - J_y A_T|_{z+\Delta z} - K_y \cdot a \cdot A_T \cdot \Delta z (Y - Y^*) = 0 \quad (1)$$

$$(1 - \theta) v_y \frac{(Y|_z - Y|_{z+\Delta z})}{\Delta z} + \frac{(E_y (dY/dz)|_{z+\Delta z} - E_y (dY/dz)|_z)}{\Delta z}$$

$$- K_y \cdot a \cdot (Y - Y^*) = 0 \quad (2)$$

เมื่อ $\Delta z \rightarrow 0$ และจัดสมการใหม่แทนด้วยตัวแปรอิสระคือ Pe_x , Pe_y และ R_y

$$\frac{1}{Pe_y} \cdot \frac{d^2 Y}{dz^2} - \frac{dY}{dz} - R_y(Y - Y^*) = 0 \quad (3)$$

สำหรับเฟส X จะแสดงสมการได้โดยวิธีเดียวกัน คือ

$$\frac{1}{Pe_x} \cdot \frac{d^2 X}{dz^2} + \frac{dX}{dz} + R_x(Y - Y^*) = 0 \quad (4)$$

$$z = 0, \frac{dX(0)}{dz} = 0$$

$$Y_{\text{เข้า}} = Y(0) - \frac{1}{Pe_y} \cdot \frac{dY(0)}{dz} \quad (5)$$

$$\text{B.C. ที่ } z = 1, \frac{dY(1)}{dz} = 0$$

$$X_{\text{เข้า}} = X(1) + \frac{1}{Pe_x} \cdot \frac{dX(1)}{dz} \quad (6)$$

กรณีมวลสารล่องผ่านจากเฟส X ไปยัง Y จากสมการ 3 และ 4 สามารถเขียน

ได้ใหม่คือ

$$\frac{1}{Pe_y} \cdot \frac{d^2 Y}{dz^2} - \frac{dY}{dz} - R_y(X^* - X) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{Pe_x} \cdot \frac{d^2 X}{dz^2} + \frac{dX}{dz} + R_x(X^* - X) = 0 \quad (8)$$

$$\text{โดยที่ } R_x = NTU_y (F_y/F_x) = NTU_x \quad (9)$$

$$R_y = NTU_x = NTU_y (F_x/F_y) \quad (10)$$

$$NTU_i = K_i a/U_i \quad (11)$$

$$\text{และ } Pe_i = \frac{U_i L}{E_i} \quad (12)$$

2.3 การหาจำนวนหน่วยล่องผ่านและ เบอร์เพเคลต

2.3.1 การหาจำนวนหน่วยล่องผ่าน แบ่งได้ 2 กรณีคือ

ก. กรณีเส้นฮิคริสเบริยมเป็นเส้นตรง

จากสมการ 7 และ 8 ค่า NTU จะอยู่ในรูปของ R_i การแก้สมการสามารถกระทำ
ได้หลายวิธี เป็นต้นว่า วิธีของ Mecklenburgh และ Hartland (16) วิธีของ ROD(15)
และวิธีออปติไมเซชัน(15) Khemangkorn(15) ได้ทดลองสกัดไอโอดีนจากน้ำด้วยคาร์บอน -

เตตราคลอไรด์ (กรณีเส้นอีควิลิเบรียมเป็นเส้นตรง) โดยใช้เพอฟอร์เตดเพลทคอลัมน์แบบพัลส์ (pulsed perforated plate column) และคำนวณ NTU และเบอร์เพเคลตโดยใช้วิธี ทั้งสามที่กล่าวมานี้พบว่าได้ NTU ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนเบอร์เพเคลตได้ค่าไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งในการคำนวณ NTU ได้ งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีของ Mecklenburgh และ Hartland ดังรายละเอียดในภาคผนวก ค. ซึ่งได้ค่า NTU ที่ได้ นี้จะเป็นหลักในการออกแบบโอปติไมส์ กรณีเส้นอีควิลิเบรียมเป็นเส้นโค้ง

ข. กรณีเส้นอีควิลิเบรียมเป็นเส้นโค้ง

จากค่า NTU โดยทำการออกแบบเชิงเส้นแนวความเข้มข้นจากการทดลองและจากทฤษฎี ซึ่งแนวความเข้มข้นจากทฤษฎีนี้สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการของแบบจำลองดิฟเฟอเรนเชียลโดยวิธี นิวเมอริคัล (numerical) ดังรายละเอียดในภาคผนวก ง.

2.3.2 การหาเบอร์เพเคลต

ในการออกแบบเชิงเส้นหาค่า NTU ในกรณีเส้นอีควิลิเบรียมเป็นเส้นโค้งนั้นจำเป็นจะต้อง กำหนดค่า เบอร์เพเคลตของ เฟลท์ทั้งสองซึ่ง เบอร์เพเคลตในเฟลท์กระจายนั้นพบว่า ค้นหาไม่ง่ายนัก (10, 11, 13, 14) งานวิจัยในคราวนี้ เราจะถือว่าไม่ต้องใช้ข้อมูลการผสมย้อนกลับในเฟลท์กระจาย ส่วนเบอร์เพเคลตในเฟลท์หลักนั้นสามารถหาได้จากวิธีต่อไปนี้คือ

ก. การหาเบอร์เพเคลตในเฟลท์หลักจากการทดลอง

การทดลองที่นิยมใช้คือ ฟัลด์เตอเรเซอร์ (4) โดยใช้สีเป็นเตอเรเซอร์ฉีดเข้าไปยังช่องของเหลว ที่ไหลอยู่ภายในคอลัมน์เป็นปริมาณเล็กน้อย ขณะเครื่องมือทำงานภายใต้ภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นที่ออกมาจะลดลงเรื่อย ๆ จนเกือบจะเท่ากับศูนย์ จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นและเวลา สามารถคำนวณหา เบอร์เพเคลตได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Levenspiel (17)

$$\sigma^2 = \frac{2}{Pe} + \frac{8}{(Pe)^2} = \sigma_t^2 / (\bar{t})^2 \quad (13)$$

ซึ่ง σ^2 คือ วาเรียนซ์ซึ่งหาได้จาก การทดลอง

ข. การหาเบอร์เพเคลตในเฟลท์หลักจากการคำนวณ

ในการศึกษาพฤติกรรมของคอลัมน์ Gier และ Hougen (18) ยืนยันว่าอัตราส่วนระหว่าง เส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวเป็นสิ่งสำคัญในการตัดสินการเกิดของการไหลย้อนกลับในเฟลท์หลักว่า มากหรือน้อย Henton และ Cavers (19) รายงานว่าความสูงของคอลัมน์มีผลเล็กน้อยต่อสัมประสิทธิ์ดิสเพอร์ชันแนวแกนกลาง (axial dispersion coefficient) แต่เส้น -

ผ่านศูนย์กลางของคอสมันมีผลมากกว่าและการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางจะเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์ ดิส-
เปอร์ชัน (มีรายงานว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคอสมันเพิ่มจาก 1.5 นิ้ว เป็น 3 นิ้ว สามารถเพิ่ม
สัมประสิทธิ์ดิสเปอร์ชันของเฟสหลักได้ถึง 6-17 เท่า) เมื่อภาวะในการเดินเครื่องเหมือนกัน

ในปีค.ศ. 1966 Vermeulen และคณะ (20) ได้สร้างสมการสำหรับประมาณสัม-
ประสิทธิ์ดิสเปอร์ชันของเฟสหลัก (E_c) โดยอาศัยข้อมูลของคนอื่น ๆ สำหรับคอสมันซึ่งมีเส้น-
ผ่านศูนย์กลางในช่วง 1.4 - 6.0 นิ้ว

$$E_c = 12(U_d \cdot d_T)^{1/2} \quad (14)$$

เมื่อ d_T = เส้นผ่านศูนย์กลางของคอสมัน (ซม.)

และสามารถคำนวณเบอร์เพเคลตได้จาก

$$Pe_c = \frac{(U_c)(L)}{E_c} \quad (15)$$

นอกจากนี้ E_c อาจจะได้จากสมการของ Zheleznyak และ

Landau (21) (ค.ศ.1973)

$$\text{เมื่อ } E_c / \nu_c = 6.5 Re^{0.987} \mu^{0.814} \mu^{3.89} \quad (16)$$

$$\text{เมื่อ } \bar{\mu} = (\mu_c + \mu_d) / \left(\frac{2}{3} \mu_c + \mu_d \right) \quad (17)$$

$$\text{และ } Re = \rho_c d v_s / \mu_c \quad (18)$$

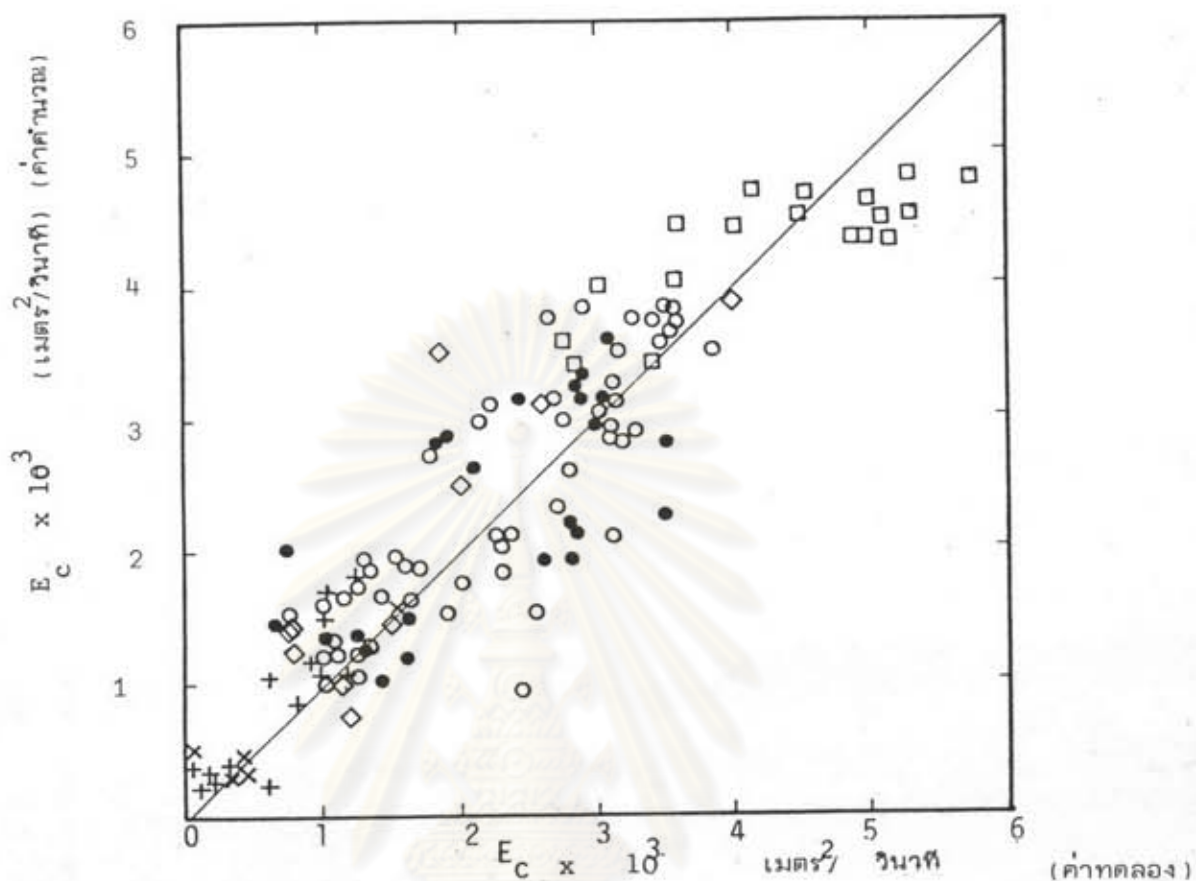
ค่าที่ได้จากการทดลองและการคำนวณเปรียบเทียบกันในรูปที่ 5 (22) ส่วนเรย์โนลด์
นัมเบอร์ (Reynold number, Re) ขึ้นอยู่กับขนาดของหยด หยดที่เกิดขึ้นจะเป็นอย่างไร พอจะตัด-
สินได้จากสมการของ Scheele และ Meister (23)

$$v_j = \left[\frac{3 \gamma (1-d_n/d)^{1/2}}{\rho_d d_n} \right] \quad (19)$$

เมื่อความเร็วของเฟสกระจายยิ่งมากกว่าความเร็วเจตติง (jetting velocity)
ขนาดของหยดจะไม่สม่ำเสมอและคำนวณขนาดได้ยาก ดังนั้นต้องเพิ่มความเร็วให้ถึงค่าวิกฤตซึ่งจะ
มีการกระจายให้หยดที่มีขนาดสม่ำเสมอ

ความเร็ววิกฤต (critical velocity, v_{nc}) ได้จากสมการของ Skelland และ
Johnson (24)

$$v_{nc} = 2.69 \left(\frac{d_{jc}}{d_n} \right)^2 \left[\frac{\gamma}{d_{jc} (0.514 \rho_d + 0.472 \rho_c)} \right]^{1/2} \quad (20)$$



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การไหลย้อนกลับในเฟสหลัก (E_C) คำนวณจากสมการ

(16) และอาศัยข้อมูลการทดลองต่อไปนี้ (21)

- น้ำ - o-xylene
- acetone ส่งผ่านจากน้ำ (c) ไปยัง o-xylene (d)
- ข้อมูลของ Hupfauf — น้ำ - น้ำหนักัด โดย Perrut et al.
- ◇ DMSO - Heptane (Benzene)
- × Heptane - DMSO (Benzene)
- + Heptane - น้ำ (Acetone)

$$d_{jc} = d_n / (0.485 K^2 + 1) \quad K < 0.785 \quad (21)$$

$$d_{jc} = d_n / (1.51 K + 0.12) \quad K \geq 0.785 \quad (22)$$

$$\text{เมื่อ } K = d_n / \left(\frac{\delta}{\Delta \rho \cdot g} \right)^{1/2} \quad (23)$$

สำหรับแผ่นรูพรุน (perforated plate) สามารถหาเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติของหยดได้จากสมการของ Perrut และ Loutaty (25)

$$d_{jc} = 2.07 d_n (1 - 0.193 E\delta) \quad (24)$$

$$\text{เมื่อ } E\delta = (gd_n^2 \Delta \rho) / \delta \quad (25)$$

นั่นคือ เราสามารถจะหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยด (Sauter - mean diameter, d_{vs} หรือ d_{32}) ได้จากสมการของ Skelland และ Johnson (24)

$$d_{vs}/d_{jc} = 2.06 (v_n / v_{nc}) + 1.47 \ln (v_n / v_{nc}) \quad (26)$$

เมื่อความเร็วของเฟสกระจายน้อย กว่าความเร็วเจตติง อยู่ในช่องของพรี่เจก (prejet) สามารถคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดได้จากสมการของ Chazal และ Ryan (26)

$$v = \frac{\pi d_n \delta}{\Delta \rho g} \left[\psi + \frac{1.648 g \Delta \rho d_n v^{1/3}}{2 \delta v_s} - 0.857 \frac{d_n \rho_d v_n^2}{2 \delta} (1 + \beta) \right] \quad (27)$$

$$\psi = \frac{\Delta \rho g v_o}{\pi \delta d_n} \quad (v_o = 0.625) \quad (28)$$

$$\beta = 0 \text{ เมื่อ } \left[\frac{\rho_d d_n v_n^2}{2 \delta} \right]^{1/2} \leq 1.07 - 0.75 \left[\frac{\Delta \rho \cdot g d_n^2}{4 \delta} \right] \quad (29)$$

$$\text{หรือ } \beta = 0.286 \left(\frac{\Delta \rho \cdot g d_n^2}{4 \delta} \right)^{1/2} \quad (30)$$

และ slip velocity ซึ่งมิ hold-up ต่ำ สามารถคำนวณจาก

$$v_s = \frac{\mu_c^{0.15}}{f_c d} (0.798 Q^{0.784} - 0.75) \text{ สำหรับ } 2 \leq Q \leq 70 \quad (31)$$

$$v_s = \frac{\mu_c p^{0.15}}{\rho_c d} (3.701 Q^{0.422} - 0.75) \quad Q > 70 \quad (32)$$

$$Q = (4 \Delta \rho d^2 g p^{0.15}) / (3 \gamma_I) \quad (33)$$

$$p = \frac{\rho_c^2 \gamma_I^3}{\mu_c^4 \Delta \rho g} \quad (34)$$

ส่วน hold-up (\emptyset) คำนวณจากสมการต่อไปนี้ (4)

$$v_s = \frac{U_c}{(1 - \emptyset)} + \frac{U_d}{\emptyset} \quad (35)$$

ซึ่งอาจจะเขียนได้ในรูปของความเร็วคาแรคเตอร์ลิสติก (characteristic velocity, \bar{U}_0) (27)

$$\bar{U}_0 (1 - \emptyset) = \frac{U_c}{(1 - \emptyset)} + \frac{U_d}{\emptyset} \quad (36)$$

\bar{U}_0 จะได้จากสมการของ Laddha และคณะ (28)

$$\bar{U}_0 / \left[\frac{\gamma_I \Delta \rho g}{\rho_c} \right]^{1/4} = 1.09 \left[\frac{U_n^2}{2g d_n} \right]^{-0.082} \quad (37)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยด สามารถหาได้อีกวิธีหนึ่งจากสมการต่อไปนี้ (28)

$$d_{vs} / \left[\frac{\gamma_I}{\Delta \rho g} \right]^{1/2} = 1.59 \left[\frac{U_n^2}{2g d_n} \right]^{-0.067} \quad (38)$$

ซึ่งสองสมการหลังนี้ (การหา \bar{U}_0 และ d_{vs}) สมการแรกมีความผิดพลาดเฉลี่ยถึง $\pm 11\%$ (คิดจากการทดลอง 560 ชุด ของข้อมูลของ Minard และ Johnson)

(29) สมการหลังมีความผิดพลาดเฉลี่ยถึง $\pm 8.28\%$ (คิดจากการวัด 253 ชุดจากหยดจำนวน 25,000 หยด) (28)

สองสมการหลังนี้กำหนดเงื่อนไขของนอส์เซล (nozzle) (28) คือ

$$\frac{1}{2} (\gamma_I / \Delta \rho g)^{1/2} < d_n < \pi (\gamma_I / \Delta \rho g)^{1/2}$$

ซึ่งเมื่อเราทราบเส้นผ่านศูนย์กลางของหยด ก็ย่อมทราบเรย์โนลด์คัมเบอร์ และหาสัมประสิทธิ์ดิสเปอรัชันของเฟสหลัก (E_c) และเบอร์เพเคลตของเฟสหลัก (Pe_c) ได้ ซึ่ง Pe_c อาจจะได้จากผลพลอยได้ในการหาค่า NTU ในกรณีเส้นอีควิลิเบรียมเป็นเส้นตรง เป็นต้นว่า ไซริชของ Mecklenburgh และ Hartland (16) (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค.)