บทที่ ๑๐

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

๑๐.๑ อิทธิพลของ Froude number

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวไว้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (ซึ่งต่อไปนี้จะแสดงอยู่ในรูปของ Sherwood number) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Froude number (หรือความเร็วของก๊าซ) ในมาตราส่วน logarithmic การทดลองได้พยายามกำหนดตัวแปรอื่น ๆ ให้คงที่ ดังนั้นค่าของตัวแปรเหล่านี้จะรวมกับค่าคงที่ a_{17} เป็นค่าคงที่ใหม่ a_{18} สมการที่ (86) จึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Sh = a_{18} Fr^{m_1} Sc^{0.5} \qquad (87)$$

ค่าของ m_1 นี้ คือค่าเฉลี่ยของความชันของเส้นตรงที่ได้จากการทดลองในที่นี้มีค่าเท่ากับ ๐.๘๙๘ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (87) ก็กลายเป็น

$$Sh = a_{18} Fr^{0.898} Sc^{0.5} \qquad (88)$$

๑๐.๒ อิทธิพลของความสูงของเบด

นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาการถ่ายเทมวลสารของระบบก๊าซและของเหลว อย่างเช่นใน Bubble column, Wetted-wall column, packed column หรือแม้แต่ในฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะที่มีการไหลของก๊าซและของเหลวในทิศทางเดียวกัน ต่างก็พบว่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร เป็นสัดส่วนผกผันกับความสูงของเบดแต่ก็ไม่ได้รายงานเอาไว้ละเอียดนัก มีแต่ LYNN et al[52] กับ CULLEN et al[53] ได้ทำการทดลองใน Wetted-wall column แล้วกล่าวสรุปว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารเป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของความสูงของเบด นอกจากนี้ก็มี MOLSTAD et al[54] ทำการทดลอง

ด้วย packed column เขาได้พบว่า ความสูงของเบดไม่มีอิทธิพลเลย

ผลการทดลองที่กระทำได้ครั้งนี้ มีส่วนคล้ายกับนักวิทยาศาสตร์บางท่าน กล่าวคือ ค่า $k_G a$ ลดลงเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้เมื่อแสดงในกร๊าฟแบบ log-log ได้เป็นเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเป็นสมการแบบยกกำลัง กับความสูงของเบด การทดลองได้กระทำที่ความเร็วของของเหลวและของก๊าซคงที่ นั่นคือเทอม Fr และ Re_L คงที่ รวมทั้งจำนวนของเม็ดของแข็งก็คงที่ด้วย ดังนั้นสมการที่ (86) จึงเขียนเป็น

$$Sh = a_{19}\left(\frac{D_c}{H}\right)^{m_4} Sc^{0.5} \qquad (89)$$

ค่า m_4 คือค่าเฉลี่ยของความชันของเส้นตรงที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ ๑.๑๑๒ ดังนั้นจะได้

$$Sh = a_{19}\left(\frac{D_c}{H}\right)^{1.112} Sc^{0.5} \qquad (90)$$

๑๐.๓ <u>อิทธิพลของความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย y</u>

จากผลการทดลองครั้งนี้พบว่า ได้ผลคล้ายกับผลการทดลองของ NORMAN et al[37] กล่าวคือพบว่า ปริมาณของ $k_G a$ เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียในก๊าซผสมเพิ่มขึ้น และเป็นสัดส่วนกันแบบ exponential เพราะความสัมพันธ์ทั้งสองเป็นเส้นตรงใน semi-logarithmics การทดลองกระทำที่ความเร็วของของเหลวของก๊าซ ความสูงของเบด คงที่ตลอด นั่นคือเทอมของ Fr, Re_L, และ $\frac{D_c}{H}$ ไม่เปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ของสมการแบบ dimensionless จึงเป็น

$$Sh = a_{20} e^{m_{11} y} Sc^{0.5} \qquad (91)$$

ค่า m_{11} เป็นค่าความชันเฉลี่ยของเส้นตรง มีค่าเท่ากับ ๒.๔๓ ดังนั้นสมการที่ (91) จึงเขียนเป็น

$$Sh = a_{20} e^{2.43y} Sc^{0.5} \qquad (92)$$

เมื่อรวมสมการที่ (88), (90) และ (92) แล้วสมการที่ (86) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Sh = a_{17} Fr^{0.898} \left(\frac{D_c}{H}\right)^{1.112} Sc^{0.5} \exp 2.43y \left[1 + a_{16}\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^{m_7}\left(\frac{H}{D_c}\right)^{m_8} Mv^{m_9} Ga^{m_{10}}\right] \quad (93)$$

๑๐.๔ ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทมวลสารในฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ

DAMRONGLERD[30] ได้ศึกษาการฟุ้งกระจายของออกซิเจนในน้ำ โดยให้อากาศผ่านเข้าไปในหอทดลองที่เป็นฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ เม็ดของแข็งทรงกลมที่ใช้มีขนาดต่าง ๆ กัน และความถ่วงจำเพาะต่าง ๆ กัน เขาได้พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดทรงกลมที่ใช้ทำเป็นเบดมีอิทธิพลต่อการละลายของออกซิเจนในน้ำเป็นอย่างมาก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มมาก Bubble column ได้ถึง ๓๐ เปอร์เซ็นต์ การศึกษาได้กระทำอย่างละเอียดถึงตัวแปรแต่ละตัวที่มีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร โดยแสดงอยู่ในรูปของสมการ

$$Sh = 1.55 \times 10^{3} Fr^{0.429} Re_L^{0.595} \left(\frac{D_c}{H}\right)^{0.705} Sc^{0.5} \left[1 + 6.2 \times 10^{-4} \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^{0.206} \left(\frac{H}{D_c}\right)^{0.098} Mv^{0.155} Ga^{0.305}\right] \quad (94)$$

เพราะว่าออกซิเจนเป็นสารที่ละลายได้น้อยในน้ำ ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนจึงไม่มีผลต่อการฟุ้งกระจายเลย

การทดลองครั้งนี้ใช้เม็ดทรงกลมพลาสติกขนาด ๐.๗๘ ซม.ขนาดเดียวและมีความถ่วงจำเพาะ ๑.๐๖ หอทดลองที่ใช้ใหญ่ ๗.๘ ซม. การทดลองเพียงแต่เปลี่ยนขนาดความสูงของเบด และจำนวนเม็ดทรงกลมพลาสติกเท่านั้น ดังนั้นค่าของ m_8, m_9, m_{10}, และ a_{16} จะใช้ค่าจากการทดลองของ DAMRONGLERD[30] ดังนั้นสมการของการถ่ายเทมวลสารระหว่างก๊าซแอมโมเนียกับน้ำ ในฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ

พัฒนาจากสมการที่ (93) และ (94) ได้ดังนี้

$$Sh = a_{17} Fr^{0.898} \left(\frac{D_c}{H}\right)^{1.112} Sc^{0.5} \exp 2.43y \left[1 + 6.20 \times 10^{-4} \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^{m_7} \left(\frac{H}{D_c}\right)^{0.098} Mv^{0.155} Ga^{0.305}\right] \quad (95)$$

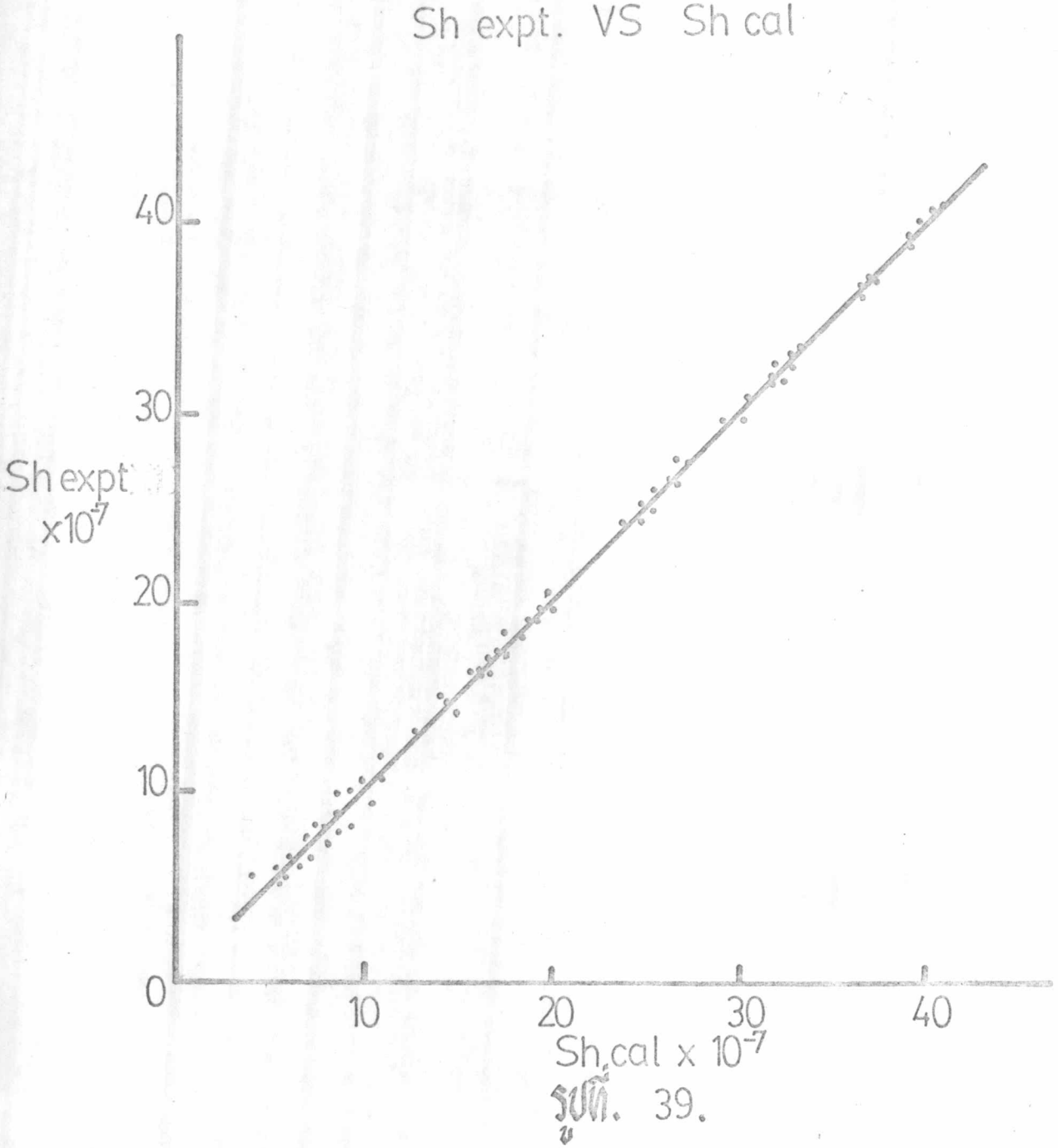
ในสมการที่ (95) นี้ จะมีตัวแปรอีก ๒ ตัวคือ a_{17} และ m_7 จึงใช้วิธี trial and error กล่าวคือ จากการทดลองทราบค่าตัวแปรทั้งหมด เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ทางขวามือของสมการที่ (95) แล้วควรจะได้ค่าของ Sherwood number เท่ากับที่วัดได้จากการทดลอง ด้วยวิธีดังกล่าวสามารถหาค่า a_{17} และ m_7 ได้เท่ากับ 6.19×10^5 และ 0.098 ตามลำดับ ดังนั้นสมการที่สมบูรณ์ของการถ่ายเทมวลสารระหว่างก๊าซแอมโมเนียและน้ำในฟลูอิดไดซ์เบดควรเป็น

$$Sh = 6.19 \times 10^5 Fr^{0.898} \left(\frac{D_c}{H}\right)^{1.112} Sc^{0.5} \exp 2.43y \left[1 + 6.2 \times 10^{-4} \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^{0.098} \left(\frac{H}{D_c}\right)^{0.098} Mv^{0.155} Ga^{0.305}\right] \quad (96)$$

เมื่อลองนำค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (96) นี้ กับค่าของ Sherwood number ที่ได้จากการทดลองมาแสดงไว้ในรูปที่ 39 จะเห็นว่าจุดต่าง ๆ จะวางเรียงอยู่รอบเส้นทะแยงมุม มีความผิดพลาดไม่เกิน ๕ เปอร์เซนต์ แสดงว่าสมการที่ (96) นี้มีความแม่นยำพอสมควร

๑.๕ สรุป

การดูดกลืนระหว่างก๊าซละลายง่ายกับของเหลวเป็นที่สนใจในวงการอุตสาหกรรมมากขึ้น ทั้งใช้ในโรงงานและการกำจัดอากาศเสีย ผลงานที่นักวิทยาศาสตร์ทำมาแล้วก็ยังได้ข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับการนำเครื่องมือไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะการศึกษาส่วนใหญ่ของนักวิทยาศาสตร์มุ่งแต่เพียงปริมาณของก๊าซถูกดูดกลืนด้วยของเหลว



รูปที่ 39.

มิได้เห็นความสำคัญของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบการทำงาน มาในระยะหลังนี้ นักวิทยาศาสตร์เริ่มให้ความสนใจขึ้นบ้าง และแนะนำว่าอะไรบ้างที่เป็นตัวแปรที่จะมีอิทธิพลต่อปริมาณการดูดกลืน แต่บางครั้งความคิดเห็นก็ยังไม่ตรงกันดีนัก การทดลองครั้งนี้ จึงได้พยายามศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ พบว่า ทั้งตัวแปรทางด้าน hydrodynamic และคุณสมบัติทางกายภาพของทั้งของเหลวและของแข็ง มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทมวลสาร หลังจากทำการทดลองแล้วพบว่าสอดคล้องกับข้อสมมติฐานที่ได้ตั้งเอาไว้ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการของการถ่ายเทมวลสารแบบดูดกลืนของก๊าซละลายง่ายในฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะดังนี้

$$Sh = 6.19 \times 10^{5}\, Fr^{0.898} \left(\frac{D_c}{H}\right)^{1.112} Sc^{0.5} \exp 2.43y \left[1 + 6.2 \times 10^{-4} \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^{0.098} \left(\frac{H}{D_c}\right)^{0.098} Mv^{0.155} Ga^{0.305}\right]$$

สมการที่พบนี้ยังสามารถใช้กับกรณีของเบดที่ไม่มีของแข็งซึ่งเรียกว่า Bubble column ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่า สำหรับก๊าซที่ละลายได้ง่ายนั้น ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในก๊าซผสมก็มีความสำคัญเป็นอย่างมากด้วย ซึ่งส่วนใหญ่แล้วนักวิทยาศาสตร์มิค่อยได้ให้ความสนใจตัวแปรตัวนี้มากนัก

การศึกษาทางด้านนี้จะเห็นว่ายังมีอีกหลายสิ่งที่น่าจะทำการศึกษาต่อไป อย่างเช่น การดูดกลืนแบบมีปฏิกริยาทางเคมี และการออกแบบหอทดลองที่มีขนาดใช้ได้ในอุตสาหกรรม คิดว่าในอนาคตอันใกล้นี้ระบบฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะควรจะได้นำไปใช้ในวงกลมอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง

สัญญลักษณ์

a	=	พื้นที่สัมผัสเฉพาะ
$a_1 - a_{21}$	=	ค่าคงที่
A	=	พื้นที่ภาคตัดขวางของหอทดลอง
A_m	=	พื้นที่ที่ฉายออกจากฟองก๊าซ
$b_1 - b_{10}$	=	ค่ายกกำลังของเทอมต่าง ๆ
C	=	ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำ
C_1	=	ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำ ทางเข้าหอทดลอง
C_2	=	ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำ ทางออกหอทดลอง
C_D	=	สัมประสิทธิ์การลอยตัวของฟองก๊าซ
d	=	ขนาดของของแข็งที่บรรจุในหอทดลอง
d_B	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองก๊าซ
d_{B_i}	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองก๊าซใด ๆ
$\overline{d_B}$	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ
d_p	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทรงกลม
D_c	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหอทดลอง
D_f	=	สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายของก๊าซ
f	=	ฟังชั่น
g	=	อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก
G	=	ปริมาณการไหลของก๊าซคิดเป็นน้ำหนัก
H	=	ความสูงของเบด
H_o	=	ความสูงของเบดที่ไม่ผ่านก๊าซเข้าไปในหอทดลอง
H_m	=	ความสูงที่วัดได้จาก manometer
H_T	=	ความสูงของเบดในขณะทำการทดลอง

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

k_G = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ควบคุมด้วย Gass film

L = ปริมาณการไหลของของเหลวคิดเป็นน้ำหนัก

$m - m_{10}$ = ค่ายกกำลังของเทอมต่าง ๆ

M = น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ

n = ค่ายกกำลังของเทอมต่าง ๆ

N = จำนวนฟองก๊าซ

N = ความเข้มข้นของกรดเกลือ

N_i = จำนวนฟองก๊าซ

N_{NH_3} = ปริมาณของแอมโมเนียที่สูญหายไป

p = ค่ายกกำลังของเทอมต่าง ๆ

P = ความกดดันทั้งหมด

q = ค่ายกกำลังของเทอมต่าง ๆ

Q_G = ปริมาณการไหลของก๊าซคิดเป็นปริมาตร

Q_L = ปริมาณการไหลของของเหลวคิดเป็นปริมาตร

U_B = ความเร็วของฟองก๊าซ

U_G = ความเร็วของก๊าซในหอทดลองเปล่า

U_L = ความเร็วของของเหลวในหอทดลองเปล่า

V = ปริมาตรโมล่าของก๊าซตัวถูกละลาย

V_B = ปริมาตรของฟองก๊าซ

V_p = ปริมาตรของเม็ดทรงกลม

V_s = ปริมาตรของของแข็ง

W = น้ำหนักของของแข็งทั้งหมด

x = ระยะทางที่โมเลกุลของก๊าซฟุ้งกระจายไป

X = association parameter

y = สัดส่วนโมเลกุลของก๊าซในก๊าซผสม

y_1 = สัดส่วนโมเลกุลของก๊าซตอนเข้าหอทดลอง

y_2 = สัดส่วนโมเลกุลของก๊าซตอนออกจากหอทดลอง

y_i = สัดส่วนโมเลกุลของก๊าซที่ผิวสัมผัส

Δy = logarithmic mean mole fraction

z = ความสูงของเบด

ϵ_G = ปริมาณแก๊ซค้างในเบด

ϵ_L = ปริมาณของเหลวในเบด

ϵ_s = ปริมาณของแข็งในเบด

μ_L = ความหนืดของของเหลว

ρ_L = ความหนาแน่นของของเหลว

ρ_s = ความหนาแน่นของของแข็ง

σ = แรงดึงผิว

Fr = Froude number $\left(\frac{U_G}{\sqrt{gD_c}}\right)$

Ga = Galileo number $\left(\frac{\rho_L^2 d_p^3 g}{\mu_L^2}\right)$

Mv = Mass volumique number $\left(\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L}\right)$

Re_L = Liquid Reynolds number $\left(\frac{\rho_L D_c U_L}{\mu_L}\right)$

Sc = Schmidt number $\left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_f}\right)$

Sh = Sherwood number $\left(\frac{k_G a D_c^2}{D_f}\right)$

We = Weber number $\left(\frac{\rho_s U_B^2 d_p}{\sigma}\right)$

Bo = Bond number $\left(\frac{\rho_L D_c^2 g}{\sigma}\right)$