หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

ภาคที่ ๑

บทที่ ๑

การศึกษา Hydrodynamics ของฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ

๑.๑ บทนำ

ในระหว่างสิบปีที่ผ่านมานี้ งานวิจัยทางด้านฟลูอิดไดเซชั่นก้าวหน้าไปอย่างมากมาย และได้ขยายออกไปหลายแขนง ซึ่งรวมทั้งฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะด้วย ในหัวข้อหลังนี้ นักวิทยาศาสตร์ได้ใช้สารทั้งสามสถานะปะปนกันอยู่ในหอทดลองเดียวกัน ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างสารแต่ละสถานะ หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี หรือทำให้เกิดการผสมระหว่างสารแต่ละสถานะ เป็นต้น ที่เคยทำการทดลองกันมาแต่ก่อนนั้น มีแต่ Bubble Column (ที่มีแต่ของเหลวและก๊าซสัมผัสกัน) หรือ Packed Column (ส่วนของของแข็งถูกตรึงไว้กับที่ไม่เคลื่อนไหวในหอทดลอง) เป็นต้น ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานมีขีดความสามารถจำกัดมาก เมื่อมีการค้นพบระบบการทำงานแบบฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ ทำให้ขีดความสามารถการทำงานขยายออกไปกว้างมากขึ้น คุณสมบัติทาง hydrodynamics ที่เกิดขึ้นภายในหอทดลองดีขึ้นอย่างมากด้วย ตัวอย่างเช่น พื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว และอัตราการเกิด Turbulent เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดภายในหอทดลอง

ปัจจุบันนี้ เทคนิคของฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ ได้มีนักวิทยาศาสตร์นำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมมากมายหลายสาขา OSTERGAARD[1] ได้รวบรวมงานต่าง ๆ ที่ใช้เทคนิคนี้เอาไว้เป็นบทความที่ละเอียดและเกือบสมบูรณ์ทีเดียว

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น ๒ ภาค คือ ในภาคแรกจะศึกษา hydrodynamics ของฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ และในภาคที่สองจะศึกษาการถ่ายเทมวลสารระหว่างก๊าซแอมโมเนียกับน้ำ ก่อนอื่นจะกล่าวถึงลักษณะของฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ และคุณสมบัติบางอย่างทาง hydrodynamics ดังนี้

การศึกษาฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะสามารถแบ่งได้เป็น ๓ ประเภท ตามคุณสมบัติที่ใช้และที่เกิดขึ้นภายในหอทดลอง

๑.๑.๑ Static bed (เบดที่ไม่มีการไหลของของเหลวแบบต่อเนื่อง)

ในเบดมีของแข็งและของเหลวรวมกันในครั้งแรก เมื่อปล่อยให้ก๊าซที่ก่อตัวเป็นฟองก๊าซลอยขึ้นจากส่วนล่างและแตกกระจายตรงส่วนบนของเบด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมานี้ จะไปทำให้ของเหลวและของแข็งหมุนเวียนอยู่ในเบด มีลักษณะเป็นฟลูอิดไดเซชั่นเกิดขึ้น

๑.๑.๒ เบดที่มีการไหลของของเหลวต่อเนื่อง แบบไหลไปทางเดียวกับแก๊ซ

เม็ดของแข็งถูกทำให้ลอยตัวด้วยกระแสของเหลวที่ไหลผ่านขึ้นมา จากนั้นแก๊ซที่ก่อตัวเป็นฟองแล้ว ลอยผ่านเบดขึ้นไปออกทางส่วนบน โดยทั่ว ๆ ไปเม็ดของแข็งที่ใช้จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าของเหลวมาก ๆ

๑.๑.๓ Turbulent bed แบบการไหลของของเหลวและก๊าซสวนทางกัน

การทดลองแบบนี้มักใช้เม็ดของแข็งทีมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าของเหลวมาก ๆ เพื่อให้อากาศที่เป่าขึ้นมาทำให้เม็ดของแข็งเหล่านี้เกิดเป็นลักษณะฟลูอิดไดเซชั่นก่อน แล้วจึงพ่นของเหลวเป็นฝอย ๆ ลงมาจากส่วนบน ของเหลวจะติดอยู่บนเม็ดของแข็งเป็นฟิลม์บาง ๆ

เมื่อขยายการศึกษาแบบที่ ๑.๑.๑ ออกไปโดยทำการทดลองให้มีการไหลของของเหลวสวนทางลงมา ของแข็งยังสามารถลอยตัวอยู่ในเบดเป็นฟลูอิดไดเซชั่นได้ ก็จะได้เป็นระบบการทำงานใหม่อีกแบบหนึ่งของฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ อาจเรียกระบบใหม่นี้ว่า ฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะที่มีการไหลสวนทางกันระหว่างของเหลวกับก๊าซ และเบดเป็นแบบ homogeneous (particulate bed) ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับระบบใหม่นี้คือการเลือกใช้เม็ดของแข็ง คือถ้าใช้แบบที่มี ถ.พ. มากเกินไป เม็ดของแข็งจะหมุนเวียนอยู่เฉพาะส่วนล่างของเบด เป็นเหตุให้เกิดการไหลไม่สะดวก เกิด flooding ขึ้นได้ หรือถ้าใช้เม็ดของแข็งที่มี ถ.พ. น้อยเกินไป เม็ดของแข็งส่วนใหญ่จะลอยอยู่ส่วนบนของเบด

ควรเลือกใช้ขนาดที่มี ถ.พ.ใกล้เคียงกับของเหลวให้มาก จะเห็นว่าการศึกษาระบบใหม่นี้มีความยากลำบากพอสมควร จึงยังไม่ปรากฏว่ามีผลงานของนักวิทยาศาสตร์ตีพิมพ์แพร่หลายออกมา

การศึกษาในระบบใหม่นี้เปรียบเสมือนกับการขยายงานของ Bubble Column ออกไปนั่นเอง หรือเป็นการเติมเม็ดของแข็งเข้าไปใน bubble เพื่อสร้างเป็นฟลูอิดไดเซชั่นขึ้นมา

๑.๒ <u>ปริมาณของก๊าซที่ค้างอยู่ในหอทดลอง</u> (Gas hold-up = ϵ_G)

ภายในเบดจะมีปริมาตรส่วนหนึ่งที่เป็นฟองก๊าซครอบครองอยู่ ปริมาณส่วนนี้มีวิธีวัดอยู่ ๓ วิธี

๑.๒.๑ <u>วัดจากความสูงของเบด</u>

วิธีนี้เป็นวิธีหาค่าสัดส่วนของก๊าซโดยตรง โดยวัดความสูงของเบดครั้งแรกในขณะที่สารทั้งสามสถานะอยู่ในสมดุลย์ (H_T) จากนั้นทำการปิดประตูกั้นน้ำไม่ให้ก๊าซและของเหลวไหลเข้าสู่หอทดลอง รวมทั้งประตูกั้นน้ำตรงทางออกของของเหลวจากหอทดลอง วัดความสูงใหม่ได้ H_O ปริมาณของก๊าซที่ครอบครองอยู่ในเบดคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon_G = \frac{H_T - H_O}{H_T} \qquad (1)$$

๑.๒.๒ <u>วัดด้วย Manometer</u>

วัดความดันที่เกิดขึ้นในเบด อาจจะวัดเป็นช่วง ๆ หรือวัดตลอดทั้งเบดเลยก็ได้ แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณของก๊าซที่มีอยู่ภายในเบดได้ เป็นการวัดทางอ้อม ค่าความดันที่เกิดขึ้นในเบดแสดงได้ดังนี้

$$P = H_T\,(\epsilon_G \rho_G + \epsilon_S \rho_S + \epsilon_L \rho_L)\,\frac{g}{g_c} \qquad (2)$$

วิธีนี้ใช้ได้ดีสำหรับเบดที่เรารู้ปริมาณของของแข็ง และของเหลวเรียบร้อยแล้ว โดยทั่วไปนักวิจัยมักจะวัดความแตกต่างของความสูงของ manometer ที่ใช้ของเหลวชนิดเดียวกับของเหลวในเบด (H_m) แล้วหารด้วยความสูงของเบดที่ใช้วัด (H_T) อัตราส่วนที่ได้ให้คิดเป็นอัตราส่วนของก๊าซที่อยู่ภายในเบด

$$\epsilon_G = \frac{H_m}{H_T} \qquad (3)$$

วิธีการนี้นักวิทยาศาสตร์คิดว่า ความกดดันที่เกิดจากปริมาณของแข็งและก๊าซน้อยมาก

๑.๒.๓ <u>วัดความเร็วของฟองก๊าซ</u>

ในกรณีที่สามารถปรับหรือบังคับให้ฟองก๊าซมีขนาดสม่ำเสมอตลอดการทดลองแล้ว ความเร็วของฟองก๊าซก็ควรมีค่าใกล้เคียงกันมาก การเคลื่อนที่ของฟองอากาศมีลักษณะเหมือนกับการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ (Piston flow) ปริมาณของก๊าซที่ค้างอยู่ในเบดคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\epsilon_G = \frac{U_G}{U_B} \qquad (4)$$

U_G = ความเร็วของก๊าซในขณะที่หอทดลองว่างเปล่า

U_B = ความเร็วของฟองก๊าซ

การคำนวณหาความเร็วของฟองก๊าซทำได้โดยคำนวณจากดุลยภาพของแรงพยุงของเหลวที่กระทำต่อฟองก๊าซ และแรงสมดุลย์ที่เรียกว่าแรงของ Archemedes ดังสมการ

$$V_B\, g\, (\rho_L - \rho_G) = \frac{1}{2} C_D A_m \rho_L U_B^2 \qquad (5)$$

C_D = สัมประสิทธิ์การลอยตัวของฟองก๊าซ

A_m = พื้นที่ที่ฉายออกมาของฟองก๊าซ = $\frac{\pi}{4} d_B^2$

V_B = ปริมาตรของฟองก๊าซ = $\frac{\pi}{6} d_B^3$

ดังนั้นความเร็วของฟองก๊าซจึงคำนวณหาได้ดังนี้

$$U_B = \sqrt{\frac{4}{3C_D} g \, d_B \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L}\right)} \qquad (6)$$

เพราะว่า $\rho_L >> \rho_G$ จึงตัดเทอมของ ρ_G ออกไปได้

$$U_B = \sqrt{\frac{4}{3C_D} g \, d_B} \qquad (7)$$

DAVIE และ TAYLOR[2] ได้ทำการวัดความเร็วของฟองก๊าซขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า ๑.๓๘ ซม. ขึ้นไป เขาพบว่า

$$U_B = 0.47 \, (g \, d_B)^{1/2} \qquad (8)$$

สมการที่ (7) และ (8) คล้ายคลึงกันมาก ดังนั้นปริมาณของก๊าซที่ค้างอยู่ในเบดสามารถแสดงอยู่ในรูปของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองก๊าซได้ดังนี้

$$\epsilon_G = \frac{U_G}{\sqrt{\frac{4}{3C_D} g \, d_B}} \qquad (9)$$

๑.๓ <u>ปริมาณของของแข็งที่อยู่ในเบด</u> (ϵ_S)

สัดส่วนของของแข็งที่อยู่ในเบด คำนวณได้จากน้ำหนักของของแข็งที่เติมลงไปดังนี้

$$\epsilon_S = \frac{W}{\rho_S H_T A} \qquad (10)$$

W = น้ำหนักของของแข็งทั้งหมดที่ใช้

ρ_S = ความหนาแน่นของของแข็ง

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของหอทดลอง

H_T = ความสูงของเบดขณะทำการทดลอง

ถ้าของแข็งเป็นทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันแล้ว สมการที่ (10) แสดงใหม่ได้ดังนี้

$$\epsilon_S = \frac{\pi}{6} \frac{d_P^{\,3} \, V_S / V_P}{H_T \, A} \qquad (11)$$

d_P = ขนาดผ่าศูนย์กลางของลูกทรงกลม

$\frac{V_S}{V_P}$ = จำนวนของลูกทรงกลมที่ใช้

๑.๔ ปริมาณของของเหลวในเบด (ϵ_L)

ในเบดของฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ ปริมาณทั้งหมดของสารที่มีอยู่ในเบดแสดงได้ดังสมการ

$$\epsilon_G + \epsilon_S + \epsilon_L = 1 \qquad (12)$$

ดังนั้นปริมาณของของเหลวที่อยู่ในเบดจึงคำนวณได้ทันทีจากสมการที่ (12) นี้ เมื่อทราบค่าปริมาณของก๊าซและปริมาณของของแข็ง

$$\epsilon_L = 1 - \epsilon_G - \epsilon_S \qquad (13)$$

๑.๕ ผลงานที่ทำมาแล้วในอดีต

๑.๕.๑ Bubble Column

การศึกษาทางสาขานี้ยังแบ่งออกเป็น ๒ ประเภท ประเภทแรกศึกษาแบบที่ไม่มีการไหลของของเหลวผ่านในหอทดลอง ประเภทที่สอง ปล่อยให้ของเหลวไหลสวนทางหรือไหลไปทางเดียวกับก๊าซ

ประเภทแรกนี้ ส่วนใหญ่มักจะศึกษาถึงคุณสมบัติของฟองก๊าซที่ก่อตัวที่ orifice แล้วหลุดลอยผ่านเบดออกไปส่วนบน การก่อตัวเป็นฟองได้นี้ขึ้นอยู่กับแรงดึงผิวของของเหลวกับแรงพยุงนั่นเอง แรงทั้งสองแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\pi}{6} \rho_L g d_B^3 = d_o \sigma \tag{14}$$

เมื่อมันหลุดออกจาก orifice แล้วจะลอยตัวอยู่ในเบด การเดินทางของฟองก๊าซจะไม่เป็นเส้นตรง เพราะแรงกดลงบนหลังคาของฟองก๊าซไม่เท่ากันมันจึงเดินทางเป็นแบบซิกแซก [ROWE (3), VAN KREVELEN et. al., (4) BRIDGE et. al. (5)] ที่รอบฟองก๊าซเกิดเป็นกระแสของของเหลวไหลสวนทางลงมาแทนที่ในขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นส่วนบน ตอนท้ายของฟองก๊าซมีของเหลวไหลตามฟองก๊าซขึ้นไปด้วย ส่วนบริเวณนี้เรียกว่า หางของฟองก๊าซ

ถ้าปล่อยให้ฟองก๊าซหลาย ๆ ฟองลอยขึ้นมาพร้อม ๆ กัน พบว่าการหมุนเวียนของของเหลวภายในเบดเป็นไปอย่างชุลมุนวุ่นวายมากขึ้น (Turbulent) จะไม่มีอิทธิพลต่อความเร็วของฟองก๊าซอีกต่อหนึ่งด้วย HOUGHTON et. al. (16) พบว่าความเร็วของฟองก๊าซที่ขึ้นพร้อมกันหลาย ๆ ฟองจะมีความเร็วน้อยกว่าฟองก๊าซที่ขึ้นมาทีละฟอง

นักวิทยาศาสตร์หลายคนได้พบว่า ขณะที่ฟองก๊าซหลุดจาก orifice มาแล้วยังมีโอกาสที่จะรวมกับฟองก๊าซที่อยู่ข้างหน้าได้ [FREEDMAN et. al. (7), HOUGHTON et. al. (6), KOETSIER et. al. (8), COPPOCK et. al. (9)] ยิ่งเพิ่มความเร็วของก๊าซมากขึ้น การรวมตัวก็ยิ่งมากขึ้น จนบางครั้งเกิดเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่เท่ากับขนาดของหอทดลอง กลายเป็นระบบใหม่ไปเรียกว่า Slugging flow จึงทำให้ยากต่อการทำนายค่าปริมาณของก๊าซที่อยู่ในหอทดลอง SHULMAN et. al. (10) และ HOUGHTON et. al. (6) ต่างก็พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซจนถึงขอบเขตอันหนึ่งแล้ว จะไม่ทำให้ปริมาณของก๊าซที่ค้างอยู่ในหอทดลองเพิ่มขึ้นอีกเลย

งานวิจัยประเภทที่สองนี้มีข้อถกเถียงกันมากในระหว่างผู้วิจัยกันเอง เพราะผลการทดลองที่ได้มีผลลัพธ์ไม่สอดคล้องกันเลย SCHULMAN et. al. (10) มีความเห็นเช่น

เดียวกับ CHEN[11] ที่พบว่ากระแสของเหลวที่ไหลสวนทางลงมานั้นมีผลทำให้ปริมาณของก๊าซที่ค้างอยู่ในเบดเพิ่มขึ้น ส่วน HIKITA et. al.[12] กับ AKITA et. al.[13] ได้ให้ความเห็นแตกต่างออกไปว่า ความเร็วของของเหลวไม่ทำให้ปริมาณของก๊าซเปลี่ยนไปไม่ว่าของเหลวนั้นจะไหลสวนทางหรือไหลทางเดียวกับก๊าซก็ตาม

ตามธรรมดาที่ฟองก๊าซและของเหลวไหลไปทางเดียวกัน ความเร็วของของเหลวควรที่จะมีส่วนช่วยเพิ่มความเร็วของฟองก๊าซให้เร็วขึ้นไปอีก NICKLIN[14] ได้ทำการทดลองในระบบนี้ เขาได้กล่าวไว้ว่า ความเร็วของฟองก๊าซเท่ากับ ผลรวมของความเร็วของฟองก๊าซในของเหลวที่นิ่งอยู่กับที่ และความเร็วของของเหลว

$$U_B = U_B \text{ stagnant} + U_G + U_L \qquad (15)$$

ซึ่ง HILL[15] และ HUGHMARK[16] ก็พบเช่นเดียวกันนี้ หลังจากได้ทำการทดลองไปแล้ว ดังนั้นปริมาณของก๊าซที่ค้างอยู่ในหอทดลองควรจะลดลงตามสมการที่ (4) จากรายงานของนักวิจัยดังกล่าวก็มิได้กล่าวไว้ว่า ϵ_G มีลักษณะอย่างไร เมื่อเพิ่มความเร็วของของเหลวแล้ว

๑.๕.๒ ฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ

ฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะเป็นระบบที่เพิ่มของแข็งเข้าไปใน Bubble Column นั่นเอง ของแข็งที่เพิ่มนี้ใช้ได้ทั้งแบบ inert และ active แล้วแต่งานที่จะทำ อย่างเช่นในหอทดลองที่มีการดูดกลืนของก๊าซในของเหลว ของแข็งที่ใช้ก็จะเป็นพวก inert ของแข็งทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสเท่านั้น แต่ถ้าในหอทดลองมีปฏิกริยาทางเคมีเกิดขึ้น ของแข็งที่ใช้มักจะเป็นตัวไปเร่งปฏิกริยา ของแข็งที่ใช้ก็เป็นพวก active หรือในทางชีวภาพของแข็งอาจจะเป็นพวก microorganism เปลี่ยนสารประกอบอย่างหนึ่งให้เป็นสารประกอบอีกอย่างหนึ่ง โดยมีอากาศหรือออกซิเจนใช้เป็นอาหารของ microorganism นั้น ๆ ก็เป็นได้

๑.๕.๒.๑ เบดที่ไม่มีการไหลของของเหลว

ในเบดที่มีของเหลวและของแข็งปนกันอยู่แล้ว เมื่อให้ฟองก๊าซผ่านเข้ามาก็ย่อมจะต้องกระทบกับของแข็งที่อยู่ในเบด ฟองก๊าซอาจจะเกิดการแตกตัว หรือขึ้นกับคุณสมบัติของเม็ดของแข็ง [HENRIKSEN et al[17], CLIFT et al[18]] คืออาจทำให้ฟองก๊าซมีรูปร่างผิดไปจากธรรมชาติ ซึ่งธรรมดาควรมีรูปร่างรี หรือรูปร่างแบบอื่นใด LEE et al[19] การที่มีเม็ดของแข็งทรงกลมปรากฏอยู่ในเบดยังทำให้คุณสมบัติทาง hydrodynamics เปลี่ยนแปลงไปจากระบบของ Bubble Column ทั้งนี้เพราะการหมุนเวียนของของแข็งแตกต่างกับของของเหลวในเบดมาก นอกจากนี้แล้วของแข็งอยู่ในเบดนี้ จะช่วยให้การกระจายของฟองก๊าซไปอยู่ตามที่ต่าง ๆ ของเบดได้อย่างทั่วถึง ผิดกับในหอทดลองแบบ Bubble Column จะมีฟองก๊าซส่วนใหญ่สะสมอยู่ตรงกลางของหอทดลอง

๑.๕.๒.๒ เบดที่มีการไหลของของเหลว

เป็นที่น่าสังเกตว่าในเบดของฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะที่มีการไหลของของเหลวและก๊าซในทางเดียวกัน เมื่อปล่อยก๊าซเข้าไปในเบดที่ถูกฟลูอิดไดซ์ด้วยน้ำก่อนแล้ว ความสูงของเบดจะลดลง ทั้งนี้เพราะว่าจะมีจำนวนของแข็งจำนวนหนึ่งวิ่งตามฟองก๊าซขึ้นไปทางส่วนหางของฟองก๊าซ และจะติดตามจนฟองก๊าซผ่านเบดไปแล้วระยะหนึ่ง ของแข็งจำนวนนี้จึงตกกลับมาอยู่ในเบดเหมือนเดิม นอกจากมีของแข็งติดตามไปแล้วก็ยังมีของเหลวอีกส่วนตามฟองแก๊ซไปด้วยความเร็วเท่า ๆ กับฟองก๊าซด้วย ฉะนั้นของเหลวส่วนที่เหลืออยู่ในเบดจะมีความเร็วลดลง จึงเป็นเหตุให้ความสูงของเบดลดลง ฟองแก๊ซยังเกิดรวมตัวกันได้ง่าย และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยในเบดที่ใช้เม็ดของแข็งขนาดเล็ก [SOUNG[20], MASSIMILA et al[21], OSTERGAARD[22]] แต่ถ้าในเบดใช้เม็ดของแข็งมีขนาดโตขึ้นการหดตัวของเบดก็น้อยลง นอกจากนั้นยังทำให้ฟองก๊าซแตกตัวออกเป็นฟองเล็ก ๆ ได้อีกด้วย LEE et al[19] พบว่ายิ่งของแข็งมีขนาดโตมาก ก็จะทำให้ฟองก๊าซมีขนาดเล็กลงมากยิ่งขึ้น

ในเบดที่มีการไหลของก๊าซและของเหลวไหลสวนทางกัน เท่าที่พบในรายงานในเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ พบว่า นักวิทยาศาสตร์ทำการทดลองในลักษณะของ turbulent bed กล่าวคือ ในหอทดลองจะมีของแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำ ๆ ถูกฟลูอิดไดซ์ด้วยก๊าซ โดยมีของเหลวโปรยลงมาเหมือนกับฝน ของเหลวจะเกาะอยู่บนผิวของแข็งที่กำลังเกิดฟลูอิดไดซ์อยู่ ข้อเสียของวิธีนี้มักมีสาเหตุจากอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากปรากฏว่ามีเบดกึ่งหยุดนิ่งระหว่างของแข็งกับผนัง TICHY et al[23] ได้กล่าวไว้ว่าพื้นที่ของการทำงานในหอทดลองมีเพียง ๘๒ เปอร์เซ็นต์เท่านั้น แต่ถ้าทำการทดลองที่ความเร็วของก๊าซมาก ๆ ของเหลวแทนที่จะไหลลงมาสัมผัสกับของแข็ง มันจะปลิวไปตามกระแสของก๊าซพัดพาออกไป ทางส่วนบนของหอทดลอง ข้อเสียอีกประการหนึ่งที่ WOZNIRK et al[24] ได้ค้นพบคือ เขาพบว่าระบบการทำงานด้วยวิธีแบบ turbulent bed นี้ไม่เหมาะสำหรับการดูดกลืนของก๊าซที่เป็นชนิด gas film control เพราะเขาพบว่าปริมาณของสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารลดลงเมื่อความเร็วของของเหลวสูงขึ้นทั้ง ๆ ที่พื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวมีมากขึ้น

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดอุปสรรคระหว่างผนังและของแข็งเหมือนอย่างใน turbulent bed หรือเกิดการรวมตัวของฟองก๊าซใน Bubble column หรือในเบดแบบไหลทางเดียวกันของของไหล ในงานนี้จึงได้ติดสร้างเครื่องมือชนิดใหม่ขึ้นอีกแบบที่ยังไม่เคยปรากฏในเอกสารอ้างอิงมาก่อน นั่นคืองานทดลองนี้ได้สร้างหอทดลองที่มีเบดแบบที่มีของแข็ง ของเหลวและก๊าซรวมเป็นเนื้อเดียวกัน มีการไหลของก๊าซและของเหลวสวนทางกัน คิดว่าคุณสมบัติภายในเบดต้องแตกต่างไปจากระบบดังกล่าวแล้วข้างต้น ของแข็งที่เติมลงไปในเบดมีส่วนทำให้ปริมาณค้างอยู่ของก๊าซต้องเพิ่มขึ้นอย่างแน่นอน คงเป็นประโยชน์ในการศึกษาอย่างอื่นต่อไป

๑.๖ ลักษณะการรวมตัวของฟองก๊าซ

ดังที่มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านคิดว่าฟองก๊าซที่อยู่ในเบดมีแนวโน้มที่จะรวมกันเป็นฟองใหญ่ขึ้นหลังจากหลุดจาก orifice แล้ว เพื่อเป็นการพิสูจน์สมมติฐานอันนี้

REITH et al[25] ได้ทำการทดลองในถังกวน เขาได้ปล่อยก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าในถังกวนที่บรรจุน้ำอยู่จำนวนหนึ่งด้วยท่ออันหนึ่ง และก๊าซไนโตรเจนอีกท่อหนึ่ง หลังจากปล่อยก๊าซทั้งสองเข้าไปแล้วจึงทำการกวน จากนั้นคอยดักจับฟองก๊าซที่ความสูงของเบดระยะหนึ่ง เขาพบว่าในฟองก๊าซหนึ่ง ๆ มีทั้งก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนผสมกันอยู่ แสดงว่าต้องมีการเกิดการรวมตัวของฟองก๊าซขึ้นภายในเบด เพื่อทำการศึกษาถึงลักษณะการรวมตัวของฟองก๊าซ BURGESS et al[26] ได้ทำการทดลองในหอทดลองสูง ๓ เมตร ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อตัวเป็นฟอง โดยทำให้เกิดทีละสองฟอง เขาพยายามบังคับให้ฟองหนึ่งอยู่ส่วนทางของอีกฟองหนึ่ง พอลอยขึ้นมาได้ระยะหนึ่ง ฟองด้านหลังจะลอยได้เร็วกว่าความเร็วปกติ เพราะเกิดแรงดูดของฟองแรก เมื่อเข้ามาใกล้ก็รวมตัวกันทันที GRACE et al[27] ได้ศึกษารายละเอียดเพิ่มเติม เขาพบว่าจะมีอาณาเขตอยู่อาณาเขตหนึ่งทางด้านหลังของฟองแก๊ซ ถ้ามีฟองแก๊ซอีกฟองหนึ่งเข้ามาในอาณาเขตนี้แล้ว จะเกิดการรวมตัวกันขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างฟองก๊าซทั้งสอง ซึ่งเรียกอาณาเขตนั้นว่า Coalescense zone

๑.๗ การแตกตัวของฟองอากาศ (Bubble break-up)

ลักษณะภายในเบดเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่อเติมเม็ดทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ลงไป นักวิจัยทั้งหลายให้เหตุผลว่า เม็ดทรงกลมขนาดใหญ่นี้ เวลาหมุนเวียนอยู่ในเบดแล้วจะมีแรงมากกว่าแรงดึงผิวระหว่างก๊าซกับของเหลว เมื่อเม็ดทรงกลมตกลงบนหลังคาของฟองแก๊ซก็จะทำให้ผิวหนังของฟองยุบลงไป เม็ดของแข็งจะแทรกตัวต่อไปจนทำให้ฟองแก๊ซแยกออกเป็นสองส่วนได้ จากการทำดุลยภาพของแรงที่จะทำให้ฟองก๊าซแตกตัวได้ผลดังนี้

$$\text{พลังงานของแรงดึงผิวที่ถูกเม็ดทรงกลมแทรกตัวเข้าไป} = \left(\frac{\pi}{2} d_P^2 - \frac{\pi}{4} d_P^2\right)\sigma$$

$$= \frac{\pi}{4} d_P^2 \sigma$$

$\frac{\pi}{4} d_P^2$ = พื้นที่ของครึ่งทรงกลมที่เม็ดของแข็งแทรกตัวเข้ารับพลังงานจลย์ของเม็ดทรงกลม พลังงานจลย์ของเม็ดทรงกลม = $\frac{1}{2}\rho_S \frac{\pi}{6} d_P^3 U_B^2$ ดังนั้นจะได้

$$\frac{\pi}{12} \rho_S d_P^3 U_B^2 = \sigma \frac{\pi}{4} d_P^2 \quad (16)$$

หรือ

$$\frac{\rho_S U_B^2 d_P}{\sigma} = 3 \quad (17)$$

การทดลองนี้ใช้เม็ดทรงกลมขนาดผ่าศูนย์กลาง ๐.๗๘ ซม. ทำด้วยพลาสติกมีความถ่วงจำเพาะ = ๑.๐๖ แรงตึงผิวระหว่างอากาศและน้ำ = ๗๒ นิวตันต่อเมตร ความเร็วของฟองก๊าซที่มีขนาดโตกว่า .๑๐ มม. ขึ้นไปแล้ว มีค่าเฉลี่ยประมาณ ๐.๒๔ เมตรต่อวินาที ดังนั้น ปริมาณของ $\frac{\rho_S U_B^2 d_P}{\sigma}$ มีค่าประมาณ ๖.๖ ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤต ดังกล่าวแล้วข้างบน

การแตกตัวของฟองก๊าซมิได้เกิดจากของแข็งไปกระทบบนหลังคาฟองก๊าซแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น กระแสของของเหลวก็สามารถทำให้ฟองก๊าซใหญ่ ๆ แตกตัวได้เช่นกัน ซึ่งเกิดได้สองแบบด้วยกัน

ประการแรก เกิดการแตกตัวจากด้านล่าง โดย ROWE[28] พบว่าเกิดเป็นรอยแหว่งแหลมเล็กทางด้านล่าง รอยแหว่งนี้จะพัฒนาขึ้นไปจนตลอดจนทำให้ฟองก๊าซแยกออกเป็นสอง

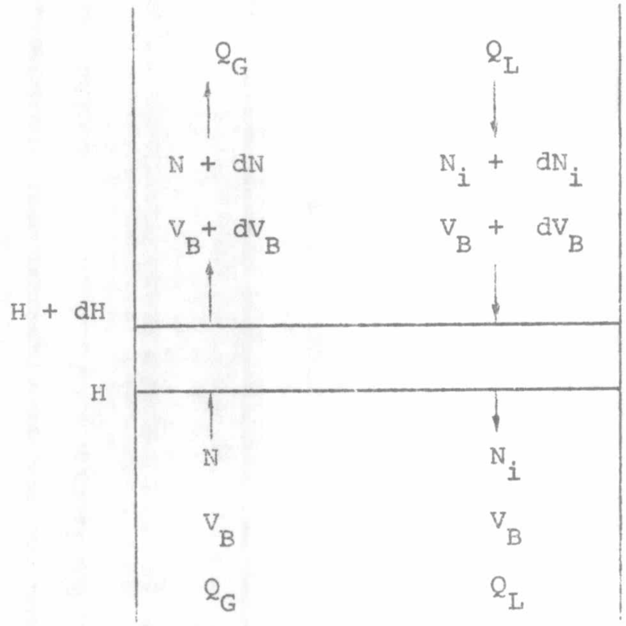
ประการที่สอง เกิดการแตกตัวแบบธรรมดาทางด้านหลังคาของฟองก๊าซ ทั้ง CLIFT et al[18] และ HENRIKSEN et al[17] ต่างก็ให้ความเห็นว่าการแตกตัวแบบนี้ เกิดจากการไม่สมดุลย์ของ Taylor บนหลังคาของฟอง เสมือนกับมีนิ้วของของเหลวที่มแทงมาจากด้านบน แล้วผ่าฟองออกเป็นสองส่วนในที่สุด

๑.๘ การคำนวณหาปริมาณก๊าซค้างในเบด

ขณะที่ของเหลวไหลจากส่วนบนของหอทดลองด้วยปริมาณคงที่ แต่การไหลของของเหลวในเบดไม่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัดเดียวกันของเบด ทั้งนี้เกิดจากความเร็วของก๊าซที่ผ่านขึ้นมา ส่วนไหนที่การไหลของของเหลวมีความเร็วมากกว่าความเร็วสุดท้ายของ

ของฟองก๊าซ จะทำให้ฟองก๊าซไหลย้อนกลับไปทางเดียวกับของเหลว และส่วนใดที่มีความเร็วน้อยกว่าความเร็วสุดท้ายของฟองก๊าซ (terminal velocity) ฟองก๊าซก็จะลอยขึ้นมาส่วนบน นอกจากนี้แล้วขนาดของฟองก๊าซก็ไม่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัดของหอทดลองด้วย ตามปกติแล้วฟองก๊าซส่วนใหญ่มักจะลอยขึ้นตรงบริเวณส่วนกลางของหอทดลอง ย่อมเป็นของธรรมดาที่ฟองก๊าซบริเวณส่วนนี้จะมีการรวมตัวกันกลายเป็นฟองใหญ่ ปรากฏการณ์เช่นนี้จะลดน้อยลงเมื่อเติมเม็ดทรงกลมลงไปในเบด เกิดเป็นเบดแบบเนื้อเดียวกัน

ลองพิจารณาส่วนหนึ่งของหอทดลองที่ความสูงของเบด H และ H + dH, รูปที่ ๑



<u>รูปที่ ๑</u>

ในส่วนนี้จะมีฟองอากาศผ่านเข้าและผ่านออก สมมติว่าให้ขนาดของฟองก๊าซมีขนาดเท่ากันในพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน แต่ขนาดของฟองก๊าซเปลี่ยนแปลงตลอดความสูงของเบด ดังนั้น

จำนวนของฟองก๊าซที่เข้าในส่วน dH นี้ $= N + (N_i + dN_i)$

ที่ความสูง H ให้ขนาดของฟองก๊าซมีปริมาตร $= V_B$

ที่ความสูง H + dH ให้ขนาดของฟองก๊าซมีปริมาตร = $V_B + dV_B$

ปริมาณของก๊าซทั้งหมดที่เข้าในส่วน dH นี้ = $NV_B + (N_i + dN_i)(V_B + dV_B)$

ในทำนองเดียวกัน

จำนวนของฟองก๊าซที่ออกจากส่วน dH = $N + dN + N_i$

มีปริมาณ ของก๊าซ = $(N+dN)(V_B+dV_B) + N_iV_B$

ปริมาณ ของก๊าซที่ค้างอยู่ในส่วน dH $= \left\{ \left[NV_B + (N_i+dN_i)(V_B+dV_B) \right] - \left[N_iV_B - (N+dN)(V_B+dV_B) \right] \right\} dH$

ปริมาณของก๊าซที่ค้างอยู่ในส่วน dH

$$d\epsilon_G = \frac{\left\{ \left[NV_B + (N_i+dN_i)(V_B+dV_B) \right] - \left[N_iV_B - (N+dN)(V_B+dV_B) \right] \right\} dH}{AdH} \qquad (18)$$

ปริมาณก๊าซค้างทั้งหมด

$$\epsilon_G = \frac{1}{A}\int_0^{H_T} V_B(dN_i-dN) + (N_i-N)\,dV_B + (dN_i-dN)\,dV_B \qquad (19)$$

เทอมสุดท้ายทางขวามือของสมการที่ (19) มีค่าน้อยมากตัดทิ้งได้ คงเหลือ

$$\epsilon_G = \frac{1}{A}\int_0^{H_T} V_B(dN_i-dN) + (N_i-N)\ dV_B \qquad (20)$$

หลังจากที่ฟองก๊าซหลุดจาก orifice แล้ว จะพบกับเม็ดทรงกลมของแข็งทันที และจะพบต่อไปเรื่อย ๆ ตลอดความสูงของเบด ฟองก๊าซก็จะถูกแบ่งย่อยให้เล็กลงถึงขนาดหนึ่งแล้วฟองก๊าซจะไม่แตกตัวต่อไป โอกาสของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นใหม่ในเบดนี้ จะขึ้นกับความสูงแล้วยังขึ้นอยู่กับจำนวนของเม็ดทรงกลมที่ใช้ และคุณสมบัติของของแข็งด้วย ซึ่งเขียนเป็นสมการบอกความสัมพันธ์ ดังนี้

$$N = f\left(H, \frac{V_S}{V_P}, d_P, \rho_S \ldots\ldots\right) \qquad (21)$$

$$\frac{V_S}{V_P} = \text{จำนวนของเม็ดของแข็งที่ใช้}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_B = f(H, \frac{V_S}{V_P}, d_P, \rho_S \; .....) \qquad (22)$$

ผลลัพธ์ของสมการที่ (25) จะหาได้ต่อเมื่อรู้ปริมาณของ N และ V_B จากสมการที่ (21) และ (22) ก่อน

ในกรณีที่ปริมาตรของฟองก๊าซเท่ากันตลอดทั้งหมด (เข้าข่ายของ Bubble column) สมการที่ (20) จะกลายเป็น

005287

$$\epsilon_G = \frac{1}{A}\int_0^{H_T} V_B(dN_i - dN)$$

$$= \frac{V_B}{A}\int_0^{H_T} (dN_i - dN) \qquad (23)$$

หรือ $$\epsilon_G = \frac{U_G}{U_B} = \frac{Q_G}{U_B A} \qquad (24)$$

ดังนั้น $$Q_G = U_B V_B \int_0^{H_T} (dN_i - dN) \qquad (25)$$

และถ้าไม่มีการไหลย้อนกลับของฟองก๊าซ ดังนั้น dN ก็จะเป็นค่า absolute ดังนี้

$$Q_G = U_B V_B \int_0^{H_T} |dN|$$

$$= U_B V_B \rho_B \qquad (26)$$

117766345

$$\rho_B = \text{ความหนาแน่นของฟองก๊าซ} = \frac{\text{จำนวนฟองก๊าซ}}{\text{ปริมาตรของหนึ่งฟองก๊าซ}}$$

นั่นก็คือกรณีของ Bubble Column นั่นเอง

๑.๙ สรุป

การศึกษาคุณสมบัติภายในเบดที่มีมาแล้วเกี่ยวกับ Bubble Column และฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะยังไม่กระจ่างชัด นักวิจัยได้ให้ความเห็นออกไปอย่างกว้างขวางจนไม่สามารถสรุปให้เป็นความสัมพันธ์อันใดอันหนึ่ง หนทางที่จะพยายามสร้างเป็นสมการที่จะใช้เชื่อมทั้ง Bubble Column และฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะรู้สึกจะลำบากมาก ข้อแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากระบบและสภาพการทำงานในหอทดลองของแต่ละคนแตกต่างกันออกไป นักวิจัยมิได้ศึกษาอย่างละเอียดถึงอิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดที่มีอยู่ในระบบ เช่น แรงตึงผิว ขนาดของเม็ดของแข็ง คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว เป็นต้น นักวิจัยเหล่านี้เพียงแต่ชี้แนะว่า ตัวแปรอะไรบ้างที่มีอิทธิพลต่อปริมาณก๊าซค้างในเบด การศึกษาถึงเบดแบบเนื้อเดียวกัน บางทีอาจสามารถคลี่คลายปัญหาที่ยังค้างอยู่ในปัจจุบันนี้ลงไปได้บ้าง