



การศึกษาพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์และความสม่ำเสมอตามแนวรัศมี ในปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดชนิดไหลเวียนลงโดยการจำลองแบบซีเอฟดี

ปริญญญา คงพรหม^{1,2*} อติศร ประทุมมา^{2,3} ณัฐวุฒิ มาลัย^{2,3} สุนันท์ ลิ้มตระกูล⁴ และ เทอดไทย วัฒนธรรม⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์และความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีในปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดชนิดไหลเวียนลง (ปฏิกรณ์ดาวเนอร์) ด้วยการจำลองแบบปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร และสูง 9.3 เมตร แบบจำลองที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการไหลคือแบบจำลองของไหลสองชนิด (Two-fluid Model) ร่วมกับทฤษฎีจลน์ของการไหลของอนุภาคแกรนูลาร์ ผลการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่า การกระจายของค่าสัดส่วนอนุภาคตามแนวรัศมีเป็นแบบ Core-annulus

ค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลวนของอนุภาค (Gs) หรือลดความเร็วก๊าซป้อน (Ug) ทำให้ความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีน้อยลง ส่วนความเร็วก๊าซและอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Ug แต่ไม่เปลี่ยนแปลงกับ Gs นอกจากนี้ยังพบว่าความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของความเร็วก๊าซและอนุภาคมีค่ามากขึ้นเมื่อลด Ug

คำสำคัญ: ปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดชนิดไหลเวียนลง พฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การจำลองแบบ

¹ อาจารย์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
² ศูนย์วิจัยบูรณาการนาโน สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
³ นักศึกษา ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
⁴ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 4811 อีเมล: parinyak@kmutnb.ac.th



Study of Hydrodynamics Behavior and Radial Uniformity in a Co-current Down-flow Circulating Fluidized Bed Reactor by Means of CFD Simulation

Parinya Khongprom^{1,2*} Adisorn Pratumma^{2,3} Nuttapol Malai^{2,3} Sunun Limtrakul⁴ and Terdthai Vatanatham⁴

Abstract

This research studies the hydrodynamics behavior and radial uniformity in a co-current down-flow circulating fluidized bed (downer reactor) by means of numerical simulation. A downer reactor with 0.1 m internal diameter and 9.3 m height was used. Two-fluid model based on kinetic theory of granular flow was adopted to predict the flow behavior in the system. The simulation results show that the radial distribution of solids volume fraction exhibits a core-annulus structure. The solids volume fraction

increases with increasing of the solids circulation rate (Gs) or decreasing of gas velocity inlet (Ug). This leads to less radial uniformity of solids volume fraction. Gas and solids velocities increase with increasing of Ug but insignificantly change with Gs. In addition, the radial uniformity of gas and solids velocities increases with decreasing of Ug.

Keywords: Co-current Down-flow Circulating Fluidized Bed, Hydrodynamics Behavior, Computational Fluid Dynamics, Simulation

¹ Lecturer, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

² Integrated Nano Research Center, Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

³ Student, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

⁴ Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 4811, E-mail: parinyak@kmutnb.ac.th

1. บทนำ

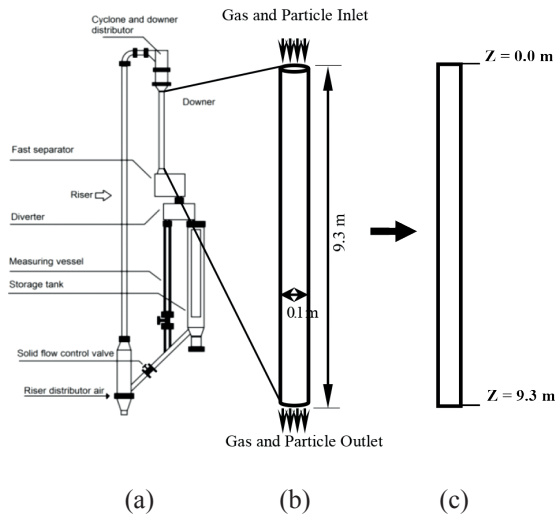
ปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตชนิดไหลเวียนเป็นปฏิกรณ์ที่สามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องจึงมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย [1], [2] ปฏิกรณ์ดังกล่าวสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดตามลักษณะการป้อนก๊าซและอนุภาค ปฏิกรณ์ชนิดแรกมีการป้อนก๊าซและอนุภาคที่บริเวณด้านล่างและไหลขึ้นด้านบนของระบบ เรียกปฏิกรณ์ดังกล่าวว่า ปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตชนิดไหลเวียนขึ้นหรือไรเซอร์ ส่วนปฏิกรณ์อีกชนิดคือปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตชนิดไหลเวียนลงหรือดาวเนอร์ ซึ่งเป็นปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตชนิดใหม่ที่มีการป้อนก๊าซและอนุภาคทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ และไหลลงในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วง ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลของก๊าซและอนุภาคมีความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีมากกว่าและการกระจายของเวลาที่แต่ละอนุภาคอยู่ในปฏิกรณ์ใกล้เคียงกันมากกว่า ปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตชนิดไหลเวียนขึ้นหรือไรเซอร์ [3] นอกจากนี้การผสมย้อนกลับตามแนวแกนของอนุภาคน้อยลง [4], [5] ดังนั้นพฤติกรรมการไหลในปฏิกรณ์ชนิดนี้จึงเข้าใกล้การไหลอุดมคติแบบปลัก จึงเหมาะสำหรับกระบวนการที่ต้องการเวลาในการสัมผัสระหว่างก๊าซและอนุภาคสั้นหรือกระบวนการที่สารชั้นกลางเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันหนัก นอกจากนี้ยังให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูงกว่าปฏิกรณ์ไรเซอร์ [6] จากสิทธิบัตรต่างๆ แสดงให้เห็นว่าปฏิกรณ์ดาวเนอร์มีศักยภาพอย่างมากที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่นยุคใหม่ [7]-[9]

การออกแบบและการขยายขนาดปฏิกรณ์ดาวเนอร์จำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำของพฤติกรรมการไหล ซึ่งข้อมูลต่างๆ เหล่านี้ยังมีการเผยแพร่ไม่มากนัก เนื่องจากปฏิกรณ์ดังกล่าวเป็นปฏิกรณ์แบบหลายวัฏภาค ทำให้พฤติกรรมการไหลมีความซับซ้อนเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค จึงมีข้อจำกัดในการออกแบบการทดลอง ส่วนปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลในระบบคือสภาวะในการดำเนินการ ปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อ

ความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ในปฏิกรณ์ฟลูอิดเบต ซึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การถ่ายโอนมวลและความร้อน และประสิทธิภาพในการสัมผัสระหว่างก๊าซ-อนุภาค เพื่อให้เข้าใจผลของปัจจัยต่างๆ ต่อความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีจึงได้มีการกำหนดดัชนีเพื่อใช้ในการบ่งชี้ระดับความสม่ำเสมอตามแนวรัศมี ดัชนีดังกล่าวคือดัชนีความไม่สม่ำเสมอตามแนวรัศมี (Radial non-uniformity, RNI) [10] ดัชนีนี้ได้ถูกนำเสนอเพื่อเปรียบเทียบความสม่ำเสมอในระบบแบบพหุวัฏภาคชนิดต่างๆ [11], [12] อย่างไรก็ตาม ดัชนีดังกล่าวสามารถใช้อธิบายความสม่ำเสมอของค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วอนุภาคเท่านั้น โดยไม่มีการพิจารณาความสม่ำเสมอของความเร็วก๊าซในระบบ ทั้งๆ ที่การกระจายของความเร็วก๊าซก็ส่งผลต่อสมรรถนะของปฏิกรณ์ด้วยเช่นกัน เพราะในทางปฏิบัติก๊าซอาจเป็นสารตั้งต้นหรือตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนหรือมวล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของสภาวะดำเนินการอันได้แก่ อัตราการไหลของอนุภาค (Gs) และความเร็วก๊าซป้อน (Ug) ต่อพฤติกรรมการไหลและความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ (ได้แก่ ค่าสัดส่วนอนุภาค ความเร็วอนุภาคและความเร็วก๊าซ) ในปฏิกรณ์ดาวเนอร์ด้วยวิธีการจำลองแบบ

2. รูปร่างของปฏิกรณ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปร่างของปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตชนิดไหลเวียนแสดงดังรูปที่ 1(a) ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ส่วนดาวเนอร์ ถึงเก็บอนุภาค ส่วนไรเซอร์และตัวกระจายก๊าซและอนุภาค เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาจะทำการจำลองแบบเฉพาะส่วนของดาวเนอร์ดังแสดงในรูปที่ 1(b) โดยปฏิกรณ์ดาวเนอร์มีความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.3 และ 0.1 เมตร ตามลำดับ ในการจำลองแบบจะป้อนอนุภาคและก๊าซเข้าทางด้านบนของดาวเนอร์และออกทางด้านล่าง และเนื่องจากส่วนดาวเนอร์มีความสมมาตรตามแนว θ จึงสามารถพิจารณาระบบเป็นแบบสองมิติ



รูปที่ 1 รูปร่างและส่วนประกอบของปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบด ชนิดไหลเวียนลง (a) ส่วนดาวเนอร์แบบ 3 มิติ (b) และส่วนดาวเนอร์แบบ 2 มิติ (c)

ดังแสดงในรูปที่ 1(c) ซึ่งการพิจารณาระบบเป็นแบบสอง มิติดังกล่าวนี้นิยมศึกษาในระบบปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบด ชนิดไหลเวียนและให้ผลการจำลองแบบที่ถูกต้อง [13], [14]

วิฏภาคของแข็งคือ อนุภาค FCC ที่มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ย $67 \mu\text{m}$ ความหนาแน่น 1500 kg/m^3 และ ใช้อากาศเป็นวิฏภาคก๊าซตลอดการจำลองแบบ

แบบจำลองที่ใช้คือ แบบจำลองของไหลสองชนิด (Two-fluid Model) แบบจำลองดังกล่าวพิจารณการไหล ของเฟสก๊าซและเฟสอนุภาคเป็นเฟสต่อเนื้อที่ที่สามารถ ไหลซึมผ่านซึ่งกัน นอกจากนี้ใช้ทฤษฎีจลน์ของการไหล ของแกรนูลาร์ในการคำนวณสมบัติเชิงของไหลของเฟส อนุภาค เช่น ความดันและความหนืด เป็นต้น สมการ ควบคุมแสดงดังตารางที่ 1 ตัวแปรที่สนใจคือความเร็วของ ก๊าซ (v_g) ความเร็วของอนุภาค (v_s) และค่าสัดส่วนอนุภาค (ε_s) ซึ่งเป็นคำตอบที่ได้จากการแก้สมการ รายละเอียด ของแบบจำลองแสดงในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [15], [16] และใช้แบบจำลอง k- ε Turbulence Model สำหรับคำนวณ ความปั่นป่วนในระบบ ระบบสมการดังกล่าวแก้ด้วย

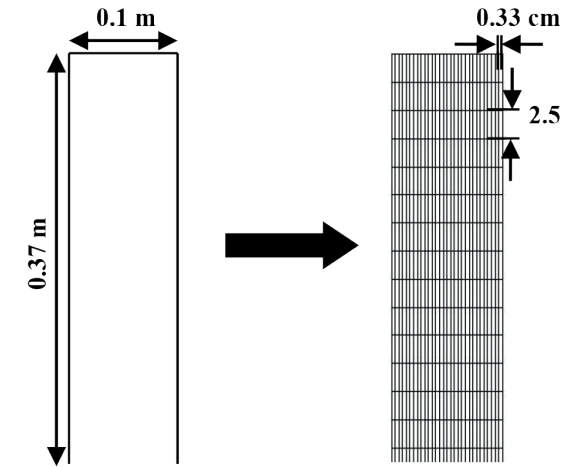
ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มกับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม และใช้วิธี SIMPLE ในการคำนวณความเร็วและความดัน และแก้ด้วยโปรแกรม Fluent สามารถดำเนินการสำหรับ แต่ละกรณีศึกษาแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมการควบคุม

สมการควบคุม	
(1) สมการความต่อเนื่อง	(1)
(a) วิฏภาคก๊าซ	
$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0$	
(b) วิฏภาคของแข็ง	(2)
(a) วิฏภาคของแข็ง	
$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0$	
(2) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม	(3)
(a) วิฏภาคก๊าซ	
$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} + K_{sg}(\vec{v}_g - \vec{v}_s)$	
(b) วิฏภาคของแข็ง	(4)
(a) วิฏภาคของแข็ง	
$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + K_{sg}(\vec{v}_g - \vec{v}_s)$	
เมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนโมเมนตัม, K_{sg} คือ [17]	
$K_{sg} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g}{d_s} \frac{ \vec{v}_s - \vec{v}_g }{\varepsilon_g} \varepsilon_g^{-2.65}$	
(3) สมการอนุรักษ์อุณหภูมิแกรนูลาร์	(5)
(a) วิฏภาคของแข็ง	
$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \overline{I} + \overline{\overline{\tau}}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{sc}$	

ตารางที่ 2 สมภาวะดำเนินการสำหรับใช้ในการจำลองแบบ

กรณีศึกษา	Ug (m/s)	Gs (kg/m ² s)
ผลของ Gs	5	25, 100, 150, 200
ผลของ Ug	5, 7, 12, 15	150



รูปที่ 2 รูปแบบการกระจายของกริดสำหรับการจำลองแบบ

กริดที่ใช้ในการศึกษานี้มีการกระจายขนาดแบบสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจำนวนกริดด้านแกน x และแกน z มีค่า 30 และ 372 กริด ตามลำดับ ซึ่งระบบกริดที่ใช้ดังกล่าวได้จากการศึกษาความอิสระของกริดต่อผลการจำลองแบบ โดยรายละเอียดของผลการศึกษาแสดงในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [18]

ในการจำลองแบบ กำหนดให้ตอนเริ่มต้นภายในระบบไม่มีก๊าซและอนุภาค โดยก๊าซและอนุภาคจะป้อนเข้าที่ทางเข้าด้วยความเร็วสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) นอกจากนี้ต้องระบุค่าสัดส่วนอนุภาคที่ทางเข้าด้วย ส่วนทางออกกำหนดให้การไหลเป็นแบบสมบูรณ์ (Fully Developed) ที่ผนังพิจารณาให้ความเร็วของแต่ละภูมิภาคเป็นแบบ No-slip Condition ยกเว้นความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential Velocity) ของภูมิภาคอนุภาคใช้ Boundary Condition ซึ่งนำเสนอโดย Johnson and Jackson [19]

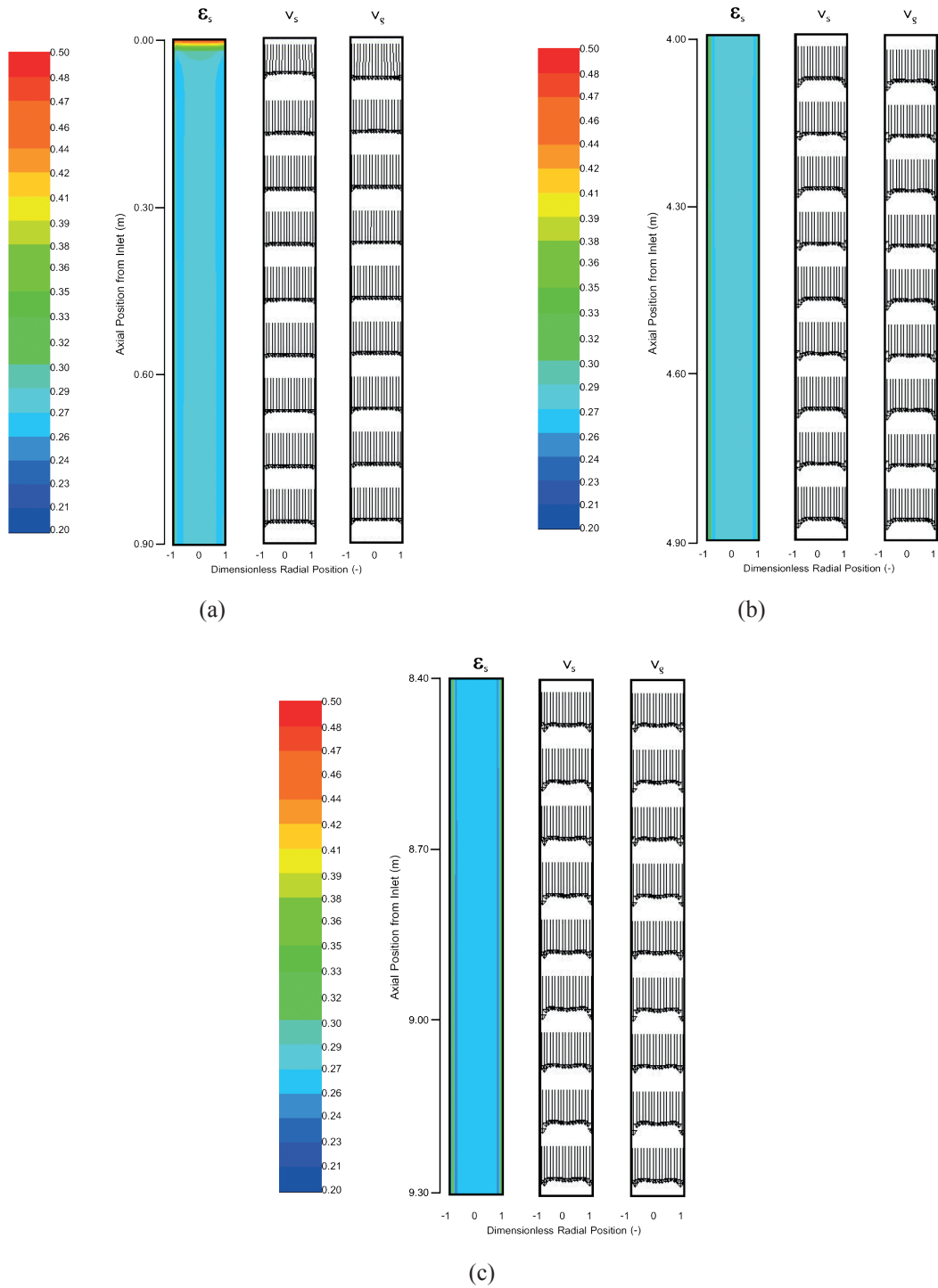
สมมติฐานที่ใช้ในการจำลองแบบประกอบด้วย

- อนุภาคที่ใช้เป็นแบบ Monodisperse
- พิจารณาระบบเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Condition)
- พิจารณาระบบเป็นแบบ 2 มิติ

3. ผลและวิจารณ์ผลการจำลองแบบ

ขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการศึกษานี้คือการจำลองแบบคือการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งงานวิจัยนี้ตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับผลการทดลองของ Zhang et al. [3] โดยข้อมูลที่เปรียบเทียบคือการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนและความเร็วของอนุภาคที่ความสูงต่างๆ ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่า ผลการจำลองแบบและผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มการกระจายเหมือนกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองแบบมีค่าเหมาะสมกับระบบที่ศึกษา รายละเอียดของการเปรียบเทียบแสดงในบทความก่อนหน้านี้ [18]

เมื่อแก้ระบบสมการของแบบจำลองที่ใช้จะทำให้ทราบพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ อันได้แก่ ค่าสัดส่วนอนุภาค ความเร็วก๊าซและอนุภาค รูปที่ 3 แสดงคอนทัวร์ของการกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคและเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคและก๊าซในปฏิกรณ์ตลอดทั้งระบบ จากรูปที่ 3(a) พบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นที่บริเวณทางเข้า จากนั้นค่าสัดส่วนอนุภาคลดลงอย่างรวดเร็วและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งปฏิกรณ์ ดังแสดงในภาพ(b) และ (c) นอกจากนี้ยังพบว่ามีกรรมรวมตัวของอนุภาคอยู่อย่างหนาแน่นที่บริเวณใกล้ผนัง (ดังจะเห็นได้จากคอนทัวร์มีค่าสีเขียว ส่วนที่บริเวณกลางท่อคอนทัวร์มีสีฟ้าซึ่งแสดงค่าสัดส่วนอนุภาคที่ต่ำกว่า) การรวมตัวของอนุภาคดังกล่าวเรียกว่าการเกิด “คลัสเตอร์” ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถพบได้ทั้งจากการทดลองและจากการจำลองแบบ [20]-[22] การเกิดคลัสเตอร์ของอนุภาคสามารถอธิบายได้ดังนี้ ที่บริเวณกลางท่อก๊าซมีความเร็วสูง ทำให้อนุภาคที่อยู่บริเวณกลางท่อมีแรงจากก๊าซมากกว่าอนุภาคจึงมีความเสถียรน้อย อนุภาคจึงพยายามเคลื่อนที่จากบริเวณกลางท่อไปยังผนังท่อ แต่ที่ผนังมีแรงเสียดทานกระทำต่ออนุภาค อนุภาคจึงพยายามเคลื่อนที่ออกจากผนังเช่นกัน อนุภาคอยู่ในสมดุลกับแรงทั้งสองที่บริเวณใกล้ผนังทำให้อนุภาคเกิดการสะสมเป็นคลัสเตอร์ จึงเกิดพืดของค่าสัดส่วนอนุภาค



รูปที่ 3 คอนทัวร์ค่าสัดส่วนอนุภาค เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคและเวกเตอร์ความเร็วของก๊าซที่บริเวณทางเข้า (a) กลางปฏิกรณ์ (b) และบริเวณใกล้ทางออก (c) เมื่อดำเนินการที่ $G_s = 600 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $U_g = 1.0 \text{ m/s}$

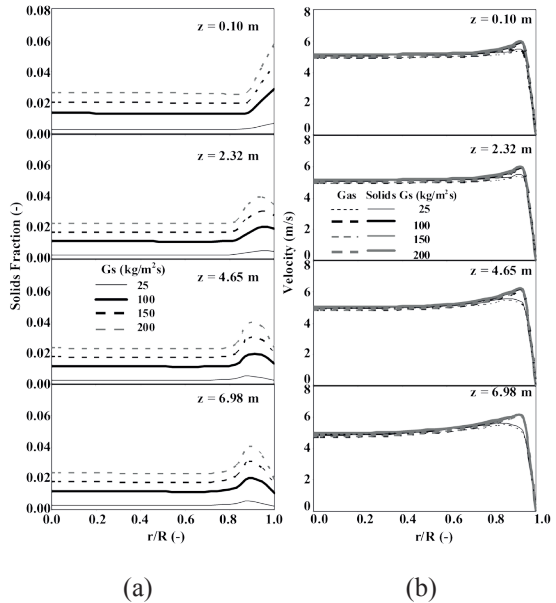
ที่บริเวณดังกล่าว เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ของความเร็วพบว่า การกระจายของเวกเตอร์ความเร็วของทั้งอนุภาคและก๊าซมีความสม่ำเสมอที่ใกล้บริเวณทางเข้าดังแสดงในรูปที่ 3(a) เนื่องจากในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความเร็วของทั้งก๊าซและอนุภาคมีความสม่ำเสมอที่บริเวณทางเข้า จากนั้นที่ความสูงต่ำลงมา (แสดงดังรูปที่ 3(b) และ (c)) ความเร็วของทั้งสองวิภูภาคยังคงมีความสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อ แต่ที่บริเวณใกล้ผนังท่อ ความเร็วของทั้งอนุภาคและก๊าซมีค่าสูง เนื่องจากการเกิดคลัสเตอร์ของอนุภาคบริเวณใกล้ผนัง ดังแสดงด้วยคอนทัวร์ของค่าสัดส่วนอนุภาค คลัสเตอร์ของอนุภาคบริเวณดังกล่าวจะลากให้อนุภาคและก๊าซเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็วที่สูงขึ้น อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์แสดงดังต่อไปนี้

3.1 ผลของสภาวะดำเนินการต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์

3.1.1 อิทธิพลของอัตราการไหลของอนุภาค (Gs)

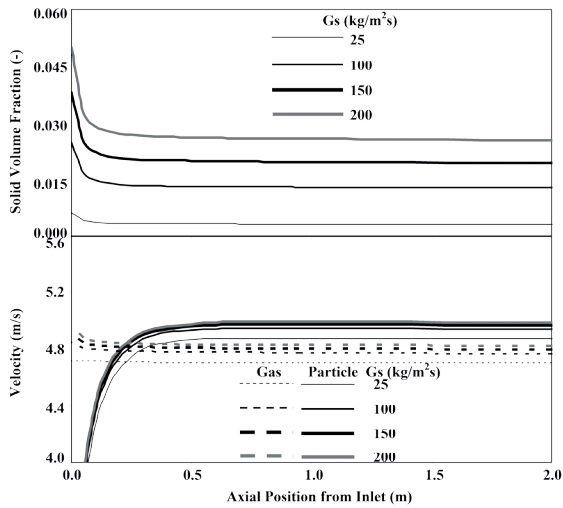
รูปที่ 4(a) แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของอนุภาค (Gs) ต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาค ที่ความสูงต่างๆ พบว่าที่บริเวณใกล้ทางเข้า ($z = 0.10$ m) การกระจายอนุภาคมีความสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อและอนุภาคเกิดการสะสมที่บริเวณผนัง เนื่องจากความเร็วก๊าซสูงที่บริเวณกลางท่อจึงพัดพาให้อนุภาคไปสะสมที่บริเวณผนัง จากนั้นที่ $z = 4.65$ และ 6.98 m ค่าสัดส่วนอนุภาคมีการกระจายแบบ Core-annulus คือค่าสัดส่วนอนุภาคมีความสม่ำเสมอบริเวณกลางท่อและเกิดพีคขึ้นที่บริเวณใกล้ผนังซึ่งสอดคล้องกับการทดลองและการจำลองแบบก่อนหน้านี้ [3], [15] เมื่อพิจารณาผลของ Gs พบว่าค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Gs จำนวนอนุภาคที่เพิ่มขึ้นในระบบทำให้เกิดคลัสเตอร์ของอนุภาคที่บริเวณใกล้ผนังมากขึ้น ทำให้ความสูงของพีคบริเวณใกล้ผนังมีค่าสูงขึ้น ความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาคจึงมีค่าลดลง

รูปที่ 4(b) แสดงผลของ Gs ต่อการกระจายตามแนว



รูปที่ 4 ผลของอัตราการไหลของอนุภาค (Gs) ต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาค (a) และความเร็วของก๊าซและอนุภาค (b) ที่ความสูงต่างๆ

รัศมีของความเร็วก๊าซ (เส้นประ) และ ความเร็วอนุภาค (เส้นทึบ) ที่ความสูงต่างๆ พบว่าเมื่อดำเนินการที่ Gs ต่ำ ($G_s = 25$ kg/m²s) ความเร็วของทั้งก๊าซและอนุภาคมีความสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อ จากนั้นความเร็วของทั้งสองเฟสมีแนวโน้มลดลงที่บริเวณใกล้ผนัง เมื่อดำเนินการที่ Gs สูง ($G_s \geq 100$ kg/m²s) การกระจายของความเร็วก๊าซและอนุภาคมีความสม่ำเสมอบริเวณกลางท่อ จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งมีความเร็วสูงสุดที่บริเวณใกล้ผนังซึ่งสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้ [3], [10] ลักษณะการกระจายของความเร็วดังกล่าวเป็นผลมาจากการเกิด Cluster ของอนุภาคที่บริเวณใกล้ผนัง ทำให้สัมประสิทธิ์แรงลาก (Effective Drag Coefficient) ระหว่างก๊าซและอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น ก๊าซและอนุภาคที่อยู่บริเวณดังกล่าวจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น ส่วนการดำเนินการที่ Gs ต่ำพบว่าไม่มีการเกิด Cluster บริเวณใกล้ผนัง (ดูรูปที่ 4(a)) ทำให้การกระจายของความเร็วมีความสม่ำเสมอมากกว่า



รูปที่ 5 ผลของอัตราการไหลของอนุภาค (G_s) ต่อการกระจายตามแนวแกนของค่าสัดส่วนอนุภาคเฉลี่ย (a) และความเร็วของก๊าซและอนุภาคเฉลี่ย (b) ที่ความสูงต่างๆ

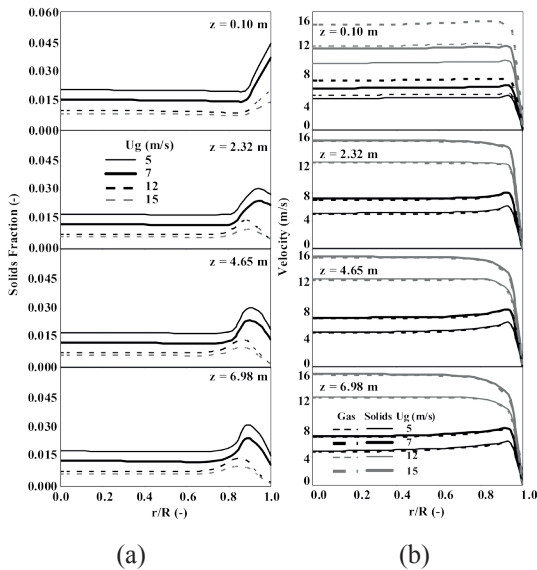
ผลของ G_s ต่อพฤติกรรมการไหลตามแนวแกนแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปดังกล่าวสามารถแบ่งลักษณะการไหลได้เป็น 3 ส่วน เช่นเดียวกับการศึกษาก่อนหน้านี้ [23], [24] โดยส่วนแรกเป็นช่วงที่ค่าสัดส่วนอนุภาคลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงที่ 2 และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่ค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าคงที่ ลักษณะการกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคดังกล่าวสอดคล้องกับการกระจายตามแนวแกนของค่าความเร็วอนุภาค โดยในช่วงแรกความเร็วอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากบริเวณดังกล่าวอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงลากจากก๊าซ เนื่องจากก๊าซมีความเร็วสูงกว่า เรียกการไหลช่วงนี้ว่า ช่วงการไหลเนื่องจากความเร่งช่วงที่ 1 (First Acceleration Zone) จากนั้นในช่วงที่ 2 ความเร็วอนุภาคมีค่าสูงกว่าความเร็วก๊าซทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากในช่วงนี้อนุภาคถูกเร่งด้วยแรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียว ส่วนก๊าซจะชะลอการไหลของอนุภาคเนื่องจากอนุภาคมีความเร็วสูงกว่าก๊าซ เรียกการไหล

ช่วงนี้ว่า ช่วงการไหลเนื่องจากความเร่งช่วงที่ 2 (Second Acceleration Zone) และเมื่อแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงลากเนื่องจากเฟสก๊าซอยู่ในสมดุลกันจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และทำให้ค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าคงที่เช่นเดียวกัน เรียกการไหลช่วงนี้ว่า ช่วงการไหลแบบสมบูรณ์ (Fully Developed Zone) เมื่อพิจารณาผลของ G_s พบว่าค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม G_s แต่เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายของค่าสัดส่วนอนุภาคพบว่า เมื่อเพิ่ม G_s ทำให้ค่าสัดส่วนอนุภาคเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงการไหลด้วยความเร่งช่วงที่ 1 เนื่องจากความเร็วอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม G_s เมื่อพิจารณาผลของ G_s ต่อความเร็วก๊าซพบว่า เมื่อ G_s เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับกฎทรงมวล กล่าวคือเมื่อ G_s เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคอยู่ในระบบมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่การไหลของก๊าซลดลง ความเร็วของก๊าซในระบบจึงเพิ่มขึ้น

3.1.2 อิทธิพลของความเร็วก๊าซป้อน (U_g)

ผลของความเร็วก๊าซป้อน (U_g) ต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาคที่ความสูงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6(a) พบว่าการเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนทำให้ค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าลดลงตลอดแนวรัศมีและความสูงของพีคบริเวณใกล้ผนังลดลงอีกด้วย และที่บริเวณที่มีการไหลลงตัว ($z = 4.65, 6.98$ m) การกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคเป็นแบบ Core-annulus ที่ทุกความเร็วก๊าซป้อนที่ศึกษา การเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนทำให้อนุภาคมีความเร็วมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 อนุภาคจึงเคลื่อนที่ออกจากระบบได้มากขึ้น จำนวนอนุภาคที่สะสมอยู่ในระบบจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าสัดส่วนอนุภาคลดลง

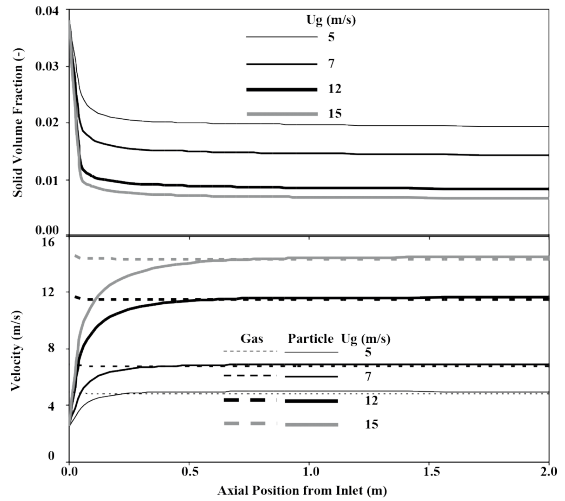
รูปที่ 6(b) แสดงผลของความเร็วก๊าซป้อน (U_g) ต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าความเร็วก๊าซและอนุภาคที่ความสูงต่างๆ พบว่าที่บริเวณใกล้ทางเข้า ($z = 0.10$ m) ความเร็วก๊าซและอนุภาคมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแนวรัศมีและมีค่าลดต่ำลงที่บริเวณใกล้ผนัง ที่บริเวณที่มีการไหลสมบูรณ์ ($z = 4.65, 6.98$ m) พบว่าการดำเนินการที่ความเร็วก๊าซป้อนต่ำ ($U_g \leq 7$ m/s) ความเร็วของ



รูปที่ 6 ผลของความเร็วก๊าซป้อน (U_g) ต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาค (a) และความเร็ว ก๊าซและอนุภาค (b) ที่ความสูงต่างๆ

ทั้งก๊าซและอนุภาคมีความสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อแล้วเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีพีคของความเร็วเกิดขึ้นเล็กน้อยที่บริเวณใกล้ผนัง เนื่องจากการดำเนินการในช่วงดังกล่าวทำให้เกิด Cluster ของอนุภาคขึ้นที่บริเวณใกล้ผนัง (ดูรูปที่ 6(a)) ส่วนการดำเนินการที่ความเร็วก๊าซป้อนสูง ($U_g \geq 12$ m/s) พบว่าการกระจายของความเร็วเป็นแบบพาราโบลา เนื่องจากการดำเนินการในช่วงความเร็วก๊าซป้อนดังกล่าวทำให้มีอนุภาคอยู่ในระบบน้อย การไหลในระบบจึงได้รับอิทธิพลจากการไหลของเฟสก๊าซเป็นหลัก ซึ่งจากการจำลองแบบในระบบที่ไม่มีการป้อนอนุภาคพบว่าการกระจายความเร็วของก๊าซเป็นแบบพาราโบลาเช่นเดียวกัน (ไม่ได้แสดง ณ ที่นี้)

รูปที่ 7(a) และ (b) แสดงผลของความเร็วก๊าซป้อนต่อการกระจายตามแนวแกนของค่าสัดส่วนอนุภาคเฉลี่ยและความเร็วก๊าซและอนุภาคเฉลี่ย ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า ค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซป้อน เนื่องจากการเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนทำให้ความเร็วของอนุภาคในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น อนุภาคจึงใช้เวลาอยู่ใน



รูปที่ 7 ผลของความเร็วก๊าซป้อน (U_g) ต่อการกระจายตามแนวแกนของค่าสัดส่วนอนุภาคเฉลี่ย (a) และความเร็วก๊าซและอนุภาคเฉลี่ย (b) ที่ความสูงต่างๆ

ระบบน้อยลง ค่าสัดส่วนอนุภาคจึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนทำให้ความเร็วของก๊าซและอนุภาคในระบบเพิ่มขึ้นและทำให้ช่วงการไหลเนื่องจากความเร่งของความเร็วอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 7(b))

3.2 ความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์

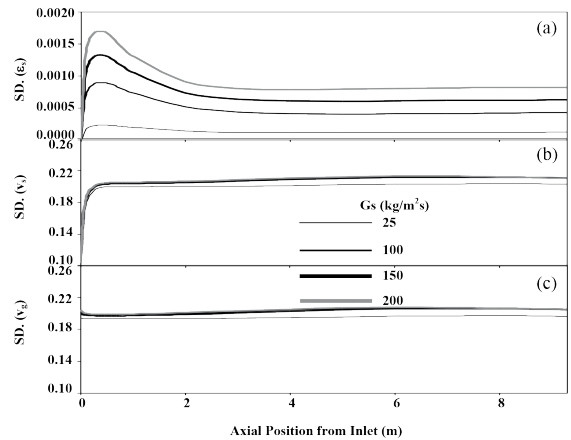
การศึกษาพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ก่อนหน้านี้สามารถบ่งบอกความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของพฤติกรรมต่างๆ ได้โดยพิจารณาจากลักษณะแนวโน้มของการกระจายซึ่งเป็นการศึกษาเชิงวิเคราะห์ ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบระดับความสม่ำเสมอได้ชัดเจนขึ้น จึงได้นิยามตัวแปรที่ใช้บ่งบอกระดับความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังทำให้สามารถเข้าใจผลของตัวแปรต่างๆ ต่อความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีได้ง่ายขึ้น ซึ่งระดับความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ที่ความสูงใดๆ สามารถบ่งบอกจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) ของพฤติกรรมนั้นๆ ตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของปฏิกรณ์ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\sigma(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N [\lambda(\varphi_i) - \bar{\lambda}]^2} \quad (6)$$

เมื่อ $\sigma(\lambda)$ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร λ , N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดตลอดพื้นที่หน้าตัดที่สนใจ $\bar{\lambda}$ คือค่าเฉลี่ยตามพื้นที่หน้าตัดของตัวแปร λ จากนิยามของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะได้ว่า ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าต่ำแสดงว่าค่าตัวแปรดังกล่าวมีการกระจายตัวตามแนวรัศมีอย่างสม่ำเสมอ ในทางกลับกันถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงแสดงว่าการกระจายตามแนวรัศมีของค่าตัวแปรนั้นมีความสม่ำเสมอของผลของสภาวะดำเนินการต่อความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์แสดงดังต่อไปนี้

3.2.1 อิทธิพลของอัตราการไหลวนของอนุภาค (Gs) รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลวนของอนุภาค (Gs) ต่อการกระจายตามแนวแกนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัดส่วนอนุภาค (รูปที่ 8 (a)) ความเร็วอนุภาค (รูปที่ 8(b)) และความเร็วก๊าซ (รูปที่ 8 (c)) จากรูปที่ 8 (a)

พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าต่ำที่บริเวณทางเข้าเนื่องจากการศึกษานี้มีการป้อนอนุภาคเข้าสู่ปฏิกรณ์แบบสม่ำเสมอ จากนั้นค่าเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงการไหลเนื่องจากการเร่งช่วงที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4(a) ที่ $z = 0.10$ m ที่บริเวณดังกล่าวอนุภาคมีการสะสมที่บริเวณหนึ่งเป็นจำนวนมาก ทำให้การกระจายตามแนวรัศมีมีความสม่ำเสมอลดลง จากนั้นในช่วงการไหลเนื่องจากความเร่งช่วงที่ 2 พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเริ่มมีค่าลดลง ที่บริเวณดังกล่าวอนุภาคที่บริเวณหนึ่งเริ่มเคลื่อนที่ออกจากผนังและเกิดเป็นพืดบริเวณใกล้เคียง ทำให้ความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีเริ่มมีค่ามากขึ้น และเมื่อเข้าสู่ช่วงที่มีการไหลสมบูรณ์พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าคงที่เนื่องจากไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายของค่าสัดส่วนอนุภาคตามแนวรัศมี และการเพิ่ม Gs ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4(a) คือเมื่อเพิ่ม Gs ทำให้ความสูงของพืดที่บริเวณใกล้เคียงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า

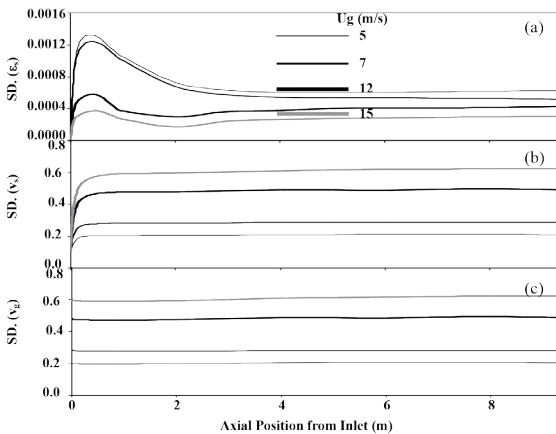


รูปที่ 8 ผลของอัตราการไหลวนของอนุภาค (Gs) ต่อการกระจายตามแนวแกนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัดส่วนอนุภาค (a) ความเร็วอนุภาค (b) และความเร็วก๊าซ (c) ที่ความสูงต่างๆ

ความเร็วอนุภาคมีค่าน้อยที่ใกล้บริเวณทางเข้า จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงการไหลด้วยความเร่งช่วงที่ 1 และ 2 และสุดท้ายมีค่าคงที่ในช่วงที่มีการไหลสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 8(b) ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเร็วก๊าซมีค่าคงที่ตลอดทั้งความยาวปฏิกรณ์ เนื่องจากการกระจายตามแนวรัศมีของความเร็วก๊าซที่ความสูงต่างๆ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นความสม่ำเสมอจึงมีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 8(c)

3.2.2 อิทธิพลของความเร็วก๊าซป้อน (Ug)

ผลของความเร็วก๊าซป้อนต่อความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์แสดงดังรูปที่ 9 จากรูปที่ 9 (a) พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซป้อน บ่งบอกว่าค่าสัดส่วนอนุภาคมีความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีมากขึ้นเมื่อเพิ่ม U_g เนื่องจากการเพิ่ม U_g ทำให้มีอนุภาคอยู่ในระบบน้อยลงและทำให้การกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคมีความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6(a) แต่การเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วอนุภาคและก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 9 (b) และ (c)) เนื่องจากการเพิ่ม



รูปที่ 9 ผลของความเร็วก๊าซป้อน (U_g) ต่อการกระจายตามแนวแกนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัดส่วนอนุภาค (a) ความเร็วอนุภาค (b) และความเร็วก๊าซ (c) ที่ความสูงต่างๆ

ความเร็วก๊าซป้อนทำให้ความเร็วของก๊าซและอนุภาคบริเวณกลางท่อมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความเร็วของทั้งสองภูมิภาคมีค่าเป็นศูนย์ที่ผนัง ดังนั้นการเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนทำให้มีความแตกต่างของความเร็วที่ผนังกับที่บริเวณกลางท่อมีค่ามากขึ้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจึงมีค่าสูงขึ้น

4. สรุป

4.1 ค่าสัดส่วนอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม G_s หรือลด U_g ส่วนค่าความเร็วก๊าซและอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงกับค่า G_s มากนัก แต่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่ม U_g

4.2 ความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่ามากขึ้นเมื่อลด G_s หรือเพิ่ม U_g ส่วนความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของค่าความเร็วก๊าซและอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงกับค่า G_s มากนัก แต่ขึ้นกับความเร็วก๊าซป้อน โดยการเพิ่ม U_g ทำให้ความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีของค่าความเร็วก๊าซและอนุภาคมีค่าลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือและคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยเกษตรศาสตร์

สัญลักษณ์

- g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
- \underline{G}_s = อัตราการไหลของอนุภาค ($kg/m^2.s$)
- \underline{I} = Unit tensor (-)
- K_{sg} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างเฟส ($kg/m^3.s$)
- p = ความดัน (Pa)
- t = เวลา (s)
- U_g = ความเร็วก๊าซป้อนเข้า (m/s)
- v_g = ความเร็วก๊าซ (m/s)
- v_s = ความเร็วอนุภาค (m/s)
- ε_g = สัดส่วนก๊าซ (-)
- ε_s = สัดส่วนอนุภาค (-)
- ρ_g = ความหนาแน่นเฟสก๊าซ (kg/m^3)
- ρ_s = ความหนาแน่นเฟสอนุภาค (kg/m^3)
- \overline{T}_g = แรงเฉือนภายในเฟสก๊าซ (Pa)
- \overline{T}_s = แรงเฉือนภายในเฟสอนุภาค (Pa)
- γ = Collisional dissipation of solid fluctuating energy ($kg/m.s^3$)
- φ = Transfer of kinetic energy ($kg/m.s^3$)
- θ_s = อุณหภูมิแกรนูลาร์ (m^2/s^2)

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Y. Jiao, J-X. Zhu, M.A. Bergougnou, M. Ikura, and M. Stanculescu, "Investigation and modeling of the thermal cracking of waste plastics derived oil in a downer reactor," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 76, pp.319-331, 1998.
- [2] J.A. Talman and L. Reh, "An experimental study of fluid catalytic cracking in a downer reactor," *Chemical Engineering Journal*, vol. 84, pp. 517-523, 2001.



- [3] H. Zhang, W.-X. Huang, and J.-X. Zhu, "Gas-Solid Flow Behavior: CFB Riser vs. Downer," *AIChE Journal*, vol.47, no.9, pp. 2000-2011, 2001.
- [4] F. Wei and J.-X. Zhu, "Effect of flow direction on axial solid dispersion in gas-solids cocurrent upflow and downflow systems," *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, vol. 64, pp. 345-352, 1996.
- [5] Y. Zhao, Y. Ding, C. Wu, and Y. Cheng, "Numerical simulation of hydrodynamics in downers using a CFD-DEM coupled approach," *Power Technology*, vol. 199, pp. 2-12, 2010.
- [6] R.S. Deng, R. Wei, Y. Jin, Q.H. Zhang, and Y. Jin, "Experimental study of the deep catalytic cracking process in a downer reactor," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 41, pp. 6015-6019, 2002.
- [7] T.S. Dewitz, *Downflow Fluidized Catalytic Cracking System*, U.S. Patent 797262, 1989.
- [8] B. Gross, *Heat Balance in FCC Process and Apparatus with Downflow Reactor Riser*, U.S. Patent 4411773, 1983.
- [9] B. Gross and M.P. Ramage, *FCC Reactor with a Downflow Reactor Riser*, U.S. Patent 4385985, 1983.
- [10] J.X. Zhu and S.V. Manyele, "Radial nonuniformity index (RNI) in fluidized beds and other multiphase flow systems," *The Canadian Journal for Chemical Engineering*, vol. 79, pp. 203-213, 2001.
- [11] P. Khongprom, S. Limtrakul, and T. Vatanatham, "Study of flow behavior in high-density riser and downerreactors," *Burapha University International Conference 2012*, Thailand July 9-11, 2012.
- [12] G. Qiang, W. Lu, L. Zhichao, L. Chunyi, L. Yibin, and Y. Xinghua, "Radial non-uniformity index research on high-density, high-flux CFB riser with stratified injection," *China Petro. Proc. And Petro. Technol.*, vol. 14, pp. 64-72, 2012.
- [13] B. Chalermssinsuwan, P. Piumsomboon, and D. Gidaspow, "Kinetic theory based computation of PSRI riser: Part I—estimation of mass transfer coefficient," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, pp. 1195-1211, 2009.
- [14] S. Benyahia, H. Arastoopour, T.M. Knowlton, "Two dimensional transient numerical simulation of solids and gas flow in the riser section of the circulating fluidized bed," *Chem. Eng. Commu.*, vol. 189, pp. 510-527, 2002.
- [15] P. Khongprom, "Modeling and simulation of hydrodynamics, and heat and mass transfer in a down-flow circulating fluidized bed reactor," Ph.D. Thesis, Kasetsart University, 2011.
- [16] P. Khongprom, A. Aimdilokwong, S. Limtrakul, T. Vatanatham, and P.A. Ramachandran, "Axial gas and solids mixing in a down flow circulating fluidized bed reactor based on CFD simulation," *Chemical Engineering Science*, vol. 73, pp. 8-19, 2012.
- [17] C.Y. Wen and Y.H. Yu, "Mechanics of fluidization," *Chem. Eng. Prog. Symp. Series 62*, pp. 100-111, 1966.
- [18] P. Khongprom, A. Pratumma, N. Malai, and S. Limtrakul, "Simulation of hydrodynamics behavior in a co-current downflow circulating fluidized bed reactor: effect of physical properties of gas," *J. Indus. Technol.*, Accepted.
- [19] P.C. Johnson and R. Jackson, "Frictional-collisional constitutive relations for granular



- materials, with application to plane shearing,” *J. of Fluid Mech.*, vol. 176, pp. 67-93, 1987.
- [20] P. Lehner and K.E. Wirth, “Characterization of the flow pattern in a downer reactor,” *Chemical Engineering Science*, vol. 54, pp. 5471-5483, 1999.
- [21] X. Lu, S. Li, L. Du, J. Yao., W. Lin, and H. Li, “Flow structures in the downer circulating fluidized bed,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 112, pp. 23-31, 2005.
- [22] A. Lanza, M.A. Islam, and H. de Lasa, “Particle clusters and drag coefficients in gas-solid downer units,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 200-202, pp. 439-451, 2012.
- [23] Z. Wang, D. Bai, and Y. Jin, “Hydrodynamics of concurrent downflow circulating fluidized bed (CDCFB),” *Powder Technology*, vol. 70, pp. 271-275, 1992.
- [24] S. Limtrakul, N. Thanomboon, T. Vatanatham, and P. Khongprom, “DEM modeling and simulation of a down-flow circulating fluidized bed,” *Chemical Engineering Communications*, vol. 195, pp. 1328-1344, 2008.