

# การจำลองแบบพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ในปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดชนิดไหลเวียนลง: อิทธิพลของคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ

ปริญญญา คงพรหม<sup>1,2\*</sup> อติสร ประทุมมา<sup>1,2</sup> ณ์ภูธพล มาลัย<sup>1,2</sup> และ สุนันท์ ลิ้มตระกูล<sup>3</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ในปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดชนิดไหลเวียนลง (ปฏิกรณ์ดาวเนอร์) โดยการจำลองแบบ แบบจำลองที่ใช้คือแบบจำลองของไหลสองชนิด โดยพื้นทฤษฎีจลน์ของการไหลของอนุภาคแกรนูลาร์ ปฏิกรณ์ดาวเนอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตรและสูง 9.3 เมตร อุณหภูมิของก๊าซที่ศึกษาอยู่ในช่วง 25 – 1,000 °C ความถูกต้องของผลการจำลองแบบตรวจสอบกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยในอดีต ผลการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของก๊าซมีผลต่อการกระจายค่าสัดส่วนของอนุภาคน้อยกว่าความหนืดของก๊าซ โดยร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่า 9.54 และ 15.15 เมื่อศึกษาผลของความหนาแน่นและความหนืดของก๊าซ ตามลำดับ ความสูงของพีคของค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณใกล้ผนังมีค่าสูงขึ้นเมื่อลดความหนาแน่นหรือความหนืดของก๊าซ ความเร็วอนุภาคที่บริเวณกลางท่อใกล้ทางเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 3.91 และ 3.30% เมื่อเพิ่มความหนาแน่นและความหนืดของก๊าซ ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** ปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดชนิดไหลเวียนลง, พฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์, การจำลองแบบ, แบบจำลองของไหลสองชนิด, สมบัติทางกายภาพของก๊าซ

<sup>1</sup> ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup> ศูนย์วิจัยบูรณาการนาโน, สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: parinyak@kmutnb.ac.th รับเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2556 ตอบรับเมื่อ 16 พฤษภาคม 2556

## Simulation of Hydrodynamics Behavior in a Co-Current Down-Flow Circulating Fluidized Bed Reactor: Effect of Physical Properties of Gas

Parinya Khongprom<sup>1,2\*</sup> Adisorn Pratumma<sup>1,2</sup> Nuttapol Malai<sup>1,2</sup> and Sunun Limtrakul<sup>3</sup>

### Abstract

The effect of physical properties of gas on the hydrodynamics behavior in a co-current down-flow circulating fluidized bed (downer reactor) was studied by means of numerical simulation. Two-fluid model based on the kinetic theory of granular flow was used. The diameter and the height of the downer reactor are 0.1 and 9.3 m, respectively. Temperature used in this study is in the range 20 - 1000 °C. The simulation results were validated with the experimental data obtained from the literature. The simulation results reveal that the gas density shows less effect on the solid fraction than that of gas viscosity. The highest percentages of the solid fraction changing are 9.54 and 15.15 when studying the effect of the gas density and viscosity, respectively. The peak height of the solid fraction near the wall region increases with decreasing of gas density or gas viscosity. The maximum percentages of particle velocity increasing in the center region are 3.91 and 3.30 in case of increasing of gas density and gas viscosity, respectively.

**Keywords:** Down-flow circulating fluidized bed reactor, Hydrodynamics behavior, Simulation, Two-fluid model, Physical properties of gas

---

<sup>1</sup> Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

<sup>2</sup> Integrated Nanoscience Research Center, Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineer, Kasetsart University.

\* Corresponding author, E-mail: parinyak@kmutnb.ac.th Received 6 February 2013, Accepted 16 May 2013

## 1. บทนำ

ปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบคชนิดไหลเวียนลงหรือปฏิกรณ์ดาวเนอร์เป็นปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบคชนิดใหม่ที่เพิ่งได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงข้อเสียของปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบคชนิดไหลเวียนขึ้นหรือปฏิกรณ์ไรเซอร์ ในปฏิกรณ์ไรเซอร์จะป้อนก๊าซและอนุภาคเข้าทางด้านล่างของระบบ ส่วนปฏิกรณ์ดาวเนอร์จะป้อนก๊าซและอนุภาคเข้าทางด้านบนของปฏิกรณ์และไหลลงในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วง จากระบบการป้อนดังกล่าวส่งผลให้พฤติกรรมการไหลของก๊าซและอนุภาคในปฏิกรณ์ดาวเนอร์มีความสม่ำเสมอมากกว่า และการกระจายของเวลาที่อนุภาคอยู่ในปฏิกรณ์น้อยกว่าในปฏิกรณ์ไรเซอร์ [1] นอกจากนี้การผสมย้อนกลับตามแนวแกนของอนุภาคน้อยกว่า [2,3] ดังนั้นพฤติกรรมการไหลของก๊าซและอนุภาคในปฏิกรณ์ชนิดนี้จึงเข้าใกล้การไหลในอุดมคติแบบปลั๊ก (Plug) จากข้อดีต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกรณ์ชนิดนี้เหมาะสำหรับกระบวนการที่ต้องการเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและเวลาในการสัมผัสระหว่างก๊าซและอนุภาคสั้นหรือกระบวนการที่สารชั้นกลางเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเช่น กระบวนการ FCC [4], การแตกตัวของ residual oil และ กระบวนการเผาไหม้ในที่บำบัดอากาศของสารชีวมวล [5] จากการศึกษาของ Deng และคณะ [6] พบว่าปฏิกรณ์ดาวเนอร์ให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูงกว่าปฏิกรณ์ไรเซอร์ นอกจากนี้ปฏิกรณ์ดาวเนอร์ยังให้ผลผลิตสูงแม้จะดำเนินการที่อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันต่ำ [7]

งานวิจัยต่าง ๆ ก่อนหน้านี้เน้นการศึกษาอิทธิพลของสภาวะดำเนินการและสมบัติทางกายภาพของอนุภาคต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ [8-10] พบว่า สัดส่วน

อนุภาคมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนหรือลดอัตราการใช้ไหลวนของอนุภาค [10-11] ความเร็วของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนหรืออัตราการใช้ไหลวนของอนุภาค [12] Khongprom [10] ศึกษาผลของคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ในปฏิกรณ์ดาวเนอร์ พบว่าค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีความหนาแน่นน้อยกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่า ความเร็วอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีความหนาแน่นมากกว่าหรือมีขนาดใหญ่กว่า การศึกษาต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นมักดำเนินการที่สภาวะบรรยากาศ แต่ในทางปฏิบัติปฏิกรณ์ดังกล่าวจะดำเนินการที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงเนื่องจากปฏิกิริยานิยมนำดำเนินการในปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบคมักเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง [13] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ (เช่น ความหนาแน่นและความหนืดเป็นต้น) และคุณสมบัติของก๊าซที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของอนุภาคในปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบคเช่นกัน [14] อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาผลของคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ในปฏิกรณ์ดาวเนอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ (ความหนาแน่นและความหนืด) ต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ในปฏิกรณ์ดังกล่าว

## 2. รูปร่างของปฏิกรณ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 2.1 รูปร่างของปฏิกรณ์

โดยทั่วไประบบปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบคชนิดไหลเวียนลงประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังนี้คือ

ถึงเก็บอนุภาคและระบบกระจายอนุภาคซึ่งอยู่ทางด้านบนของระบบ ทำหน้าที่ป้อนและกระจายอนุภาคเข้าสู่ส่วนดาวเนอร์ที่อยู่ทางด้านล่างของตัวกระจายอนุภาค ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ในส่วนดาวเนอร์ดังกล่าว และส่วนสุดท้ายคือส่วนไรเซอร์ซึ่งทำหน้าที่ขนถ่ายอนุภาคจากด้านล่างไปยังถังเก็บอนุภาคที่อยู่ทางด้านบนของระบบเพื่อป้อนอนุภาคเข้าสู่ส่วนดาวเนอร์อีกครั้ง เพื่อความสะดวกในการศึกษาจึงจำลองแบบเฉพาะส่วนดาวเนอร์เท่านั้นซึ่งเป็นท่อทรงกระบอกคังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โดยท่อทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร และสูง 9.3 เมตร ก๊าซและอนุภาคป้อนเข้าสู่ส่วนดาวเนอร์ทางด้านบนและไหลออกจากระบบทางด้านล่างของท่อ และเนื่องจากท่อทรงกระบอกมีความสมมาตรตามแนว  $\theta$  จึงพิจารณาระบบเป็นแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) การพิจารณาระบบเป็นแบบ 2 มิติ เป็นวิธีที่นิยมในการศึกษาในระบบดังกล่าวเนื่องจากเป็นการลดเวลาในการคำนวณและผลการจำลองแบบที่ได้ก็มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง [10,15] ความยาวของปฏิกรณ์อยู่ในแนวแกน  $z$

## 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วิธี Eulerian-Eulerian ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาพฤติกรรมการไหลในปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด [10-11, 15] เนื่องจากวิธีดังกล่าวใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Lagrangian-Eulerian อีกทั้งวิธีดังกล่าวยังให้ผลที่มีความสอดคล้องกับการทดลองอีกด้วย แบบจำลองที่ใช้คือแบบจำลองของไหลสองชนิด (two-fluid model) โดยแบบจำลองดังกล่าวจะพิจารณาให้เฟสอนุภาคเป็นเฟสต่อเนื่อง และทฤษฎีจลน์

ของการไหลของอนุภาคแกรนูลาร์ใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของไหลของเฟสอนุภาค (เช่น ความดัน, ความหนืด เป็นต้น) และแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ k- $\epsilon$  turbulent model สมการควบคุมและสมการเสริมแสดงดังตารางที่ 1 รายละเอียดของสมการต่าง ๆ แสดงในงานวิจัยก่อนหน้า [10-11]

## 2.3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

สมการต่าง ๆ จะถูก discretized โดยวิธี finite volume ร่วมกับวิธี first order upwind สำหรับพจน์การพา และใช้วิธี SIMPLE ในการแก้เพื่อหาค่าความดันและความเร็ว เกณฑ์ในการลู่เข้าคำตอบของแต่ละ residual คือ  $10^{-4}$  โดเมนที่ต้องการศึกษาวาดโดยใช้โปรแกรม Gambit และใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ Fluent ในการแก้ระบบสมการ อนุภาคที่ใช้คืออนุภาค FCC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67 ไมครอน และมีความหนาแน่น  $1500 \text{ kg/m}^3$  และใช้อากาศเป็นก๊าซสำหรับการเกิดฟลูอิดซ์ในระบบ สภาวะในการดำเนินการแต่ละกรณีแสดงดังตารางที่ 2

## 3. ผลการจำลองแบบและวิจารณ์

### 3.1 การศึกษาความอิสระของกริด

การศึกษาความอิสระของกริดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดกริดที่เหมาะสมในการจำลองแบบ การจำลองแบบโดยใช้กริดขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยแต่ให้ผลที่ไม่ถูกต้อง แต่การใช้กริดที่มีขนาดเล็กจะให้ผลการจำลองที่มีความถูกต้องแต่ใช้เวลาในการประมวลผลนาน การศึกษาความอิสระของกริดทำได้โดยการลดขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณจน

ไม่ส่งผลต่อคำตอบที่ได้จากการคำนวณ และจะใช้ระบบกริดดังกล่าวในการศึกษากรณีอื่น ๆ ต่อไป พฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ค่าความเร็วอนุภาคและค่าสัดส่วนอนุภาค โดยค่าสัดส่วนอนุภาคคือค่าสัดส่วนของปริมาตรของอนุภาคต่อปริมาตรของปฏิกรณ์ ดังนั้นถ้าค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าสูงแสดงว่าบริเวณดังกล่าวมีอนุภาคอยู่อย่างหนาแน่น ในทางกลับกันถ้าค่าสัดส่วนอนุภาคต่ำบ่งบอกว่าบริเวณดังกล่าวมีอนุภาคอยู่อย่างเบาบาง การกระจายของกริดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นแบบสมมาตร โดยส่วนแรกศึกษาผลของจำนวนกริดตามแนวแกน x การกระจายของกริดแสดงดังรูปที่ 2 (ก) โดยจำนวนกริดตามแนวแกน x ที่ศึกษามีค่า 20, 30 และ 40 กริด ซึ่งมีขนาด 0.50, 0.33, และ 0.25 cm ตามลำดับ และจำนวนกริดตามแนวแกน z มีค่าคงที่ที่ 465 กริด ซึ่งมีขนาด 2.0 cm สถานะดำเนินการและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองแบบแสดงดังตารางที่ 2 รูปที่ 3 (ก.1) และ (ข.1) แสดงผลของจำนวนกริดตามแนวแกน x ต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วอนุภาคที่ความสูงต่าง ๆ ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่าเส้นกราฟของค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วอนุภาคที่จำลองแบบโดยใช้จำนวนกริด ต่าง ๆ ทับกันเกือบสนิท โดยเฉพาะที่บริเวณกลางท่อ แสดงว่าจำนวนกริดที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อค่าที่ได้จากการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตามผลของจำนวนกริด ตามแนวแกน x มีผลต่อค่าสัดส่วนอนุภาคและค่าความเร็วอนุภาคอยู่บ้างที่บริเวณใกล้ผนัง ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟไม่ซ้อนทับกันสนิท ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้จำนวนกริดตามแนวแกน x จำนวน 30 กริด ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของจำนวนกริด ตามแนวแกน z การกระจายของกริด

แสดงดังรูปที่ 2 (ข) โดยจำนวนกริดตามแนวแกน z ที่ศึกษามีค่า 310, 372 และ 465 กริด ซึ่งมีขนาด 3.0, 2.5, และ 2.0 cm ตามลำดับ และจำนวนกริดตามแนวแกน x มีค่าคงที่ที่ 30 กริด ซึ่งมีขนาด 0.33 cm รูปที่ 3 (ก.2) และ (ข.2) แสดงผลของจำนวนกริดตามแนวแกน z ต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วอนุภาคที่ความสูงต่าง ๆ ตามลำดับ จากรูปทั้งสองจะเห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จากการจำลองแบบเมื่อใช้จำนวนกริดตามแนวแกน z ต่าง ๆ ทับกันเกือบสนิท แสดงว่าจำนวนกริดที่เลือกใช้ไม่ส่งผลต่อคำตอบของการจำลองแบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้กริดตามแนวแกน x จำนวน 30 กริด และจำนวนกริดตามแนวแกน z มีค่า 372 กริด สำหรับคำนวณกรณีศึกษาอื่นๆ

### 3.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับผลการทดลอง

การศึกษาที่จำเป็นอีกขั้นตอนสำหรับการจำลองแบบคือการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผลการทดลองของ Zhang และคณะ [1] โดยขนาดของปฏิกรณ์ดาวเนอร์มีค่าเท่ากับคือ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 m และสูง 9.3 m ความเร็วก๊าซป้อน ( $U_g$ ) 10.2 m/s และอัตราการใช้มวลของอนุภาค ( $G_s$ ) 102 kg/m<sup>2</sup>.s รูปที่ 4 เปรียบผลที่ได้จากการจำลองแบบจากการศึกษานี้กับผลที่ได้จากการทดลองของ Zhang และคณะ [1] โดยเปรียบเทียบการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาค (รูปที่ 4 (ก)) และความเร็วอนุภาค (รูปที่ 4 (ข)) ที่ความสูงต่าง ๆ จากรูปที่ 4 (ก) พบว่าผลที่ได้จากการจำลองแบบและที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นบริเวณใกล้ทางเข้า ( $z = 0.512$  m) พบว่าค่าที่ได้

จากการจำลองแบบมีความแตกต่างจากผลการทดลองมาก โดยเฉพาะบริเวณใกล้ผนัง ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาที่กำหนดให้อนุภาคป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์อย่างสม่ำเสมอ ขณะที่การทดลองพบว่าอนุภาคมีการสะสมที่บริเวณใกล้ผนังมากเนื่องจากอิทธิพลของระบบป้อนอนุภาค ส่วนความเร็วอนุภาคที่ได้จากการจำลองแบบและการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกันคือความเร็วอนุภาคมีความสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อ และความเร็วอนุภาคลดลงที่บริเวณผนังท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) ดังนั้นพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความเหมาะสมสำหรับระบบดังกล่าว

### 3.3 ผลของสมบัติทางกายภาพของก๊าซ

คุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ความหนาแน่นและความหนืด ส่วนแรกของการศึกษาตอนนี้คือการศึกษาค่าผลของความหนาแน่นก๊าซเมื่อความหนืดของก๊าซมีค่าคงที่ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของความหนืดของก๊าซต่อพฤติกรรมการไหลในดาวเนอร์ โดยความหนาแน่นมีค่าคงที่ และส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ (ความหนาแน่นและความหนืด) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 25 – 1,000°C รายละเอียดของแต่ละผลกระทบแสดงดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 ผลของความหนาแน่นของก๊าซ

ความหนาแน่นของก๊าซเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับอุณหภูมิ โดยความหนาแน่นของก๊าซลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่ศึกษามีค่าความหนาแน่นของก๊าซที่ศึกษาอยู่ในช่วง (0.278 – 1.225 kg/m<sup>3</sup>) ซึ่งความหนาแน่นน้อยสุดและมากสุดมีค่าความแตกต่างสัมพัทธ์ประมาณ 340% ดังแสดงในตารางที่ 3 (ก) รูปที่ 5.1

แสดงผลของความหนาแน่นของก๊าซต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาคที่ความสูงต่าง ๆ จากรูปดังกล่าวพบว่าความหนาแน่นของก๊าซส่งผลน้อยมากต่อค่าสัดส่วนอนุภาค โดยเฉพาะบริเวณกลางท่อ ค่าสัดส่วนอนุภาคเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่บริเวณฟิคใกล้ผนังท่อ โดยฟิคมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นก๊าซลดลง การเปรียบเทียบเชิงปริมาณสามารถแสดงได้จากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง ซึ่งนิยามได้ดังสมการ

$$\% \text{ relative } \Delta x = \frac{|x - x_{ref}|}{x_{ref}} \times 100 \quad (13)$$

เมื่อ % relative  $\Delta x$  คือค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร  $x$  โดย  $x$  เป็นค่าความหนาแน่น, ความหนืด, ค่าสัดส่วนอนุภาค และค่าความเร็วอนุภาค ส่วน  $x_{ref}$  คือค่าอ้างอิง ถ้าศึกษาผลของความหนาแน่น ค่าอ้างอิงจะพิจารณาที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.278 kg/m<sup>3</sup> และถ้าศึกษาผลของความหนืด ค่าอ้างอิงจะพิจารณาที่ความหนืดเท่ากับ 1.789x10<sup>-5</sup> kg.m.s ตารางที่ 3 (ก) แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณกลางท่อและที่บริเวณฟิคที่ความสูง 0.512 และ 9.155 m พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่าระหว่าง 0.00 – 0.74 ที่บริเวณกลางท่อและที่บริเวณใกล้ผนังมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาคอยู่ในช่วง 0.63 – 9.54 ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 5.1

รูปที่ 6.1 แสดงอิทธิพลของความหนาแน่นของก๊าซต่อค่าความเร็วอนุภาคที่ความสูงต่าง ๆ พบว่าความหนาแน่นของก๊าซส่งผลต่อค่าความเร็วอนุภาคที่บริเวณใกล้ทางเข้า ( $z = 0.512$  m) โดยบริเวณกลางท่อความเร็วอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นก๊าซ

แต่ที่บริเวณใกล้ผนังพบว่าความสูงของปีกของความเร็วนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความหนาแน่นของก๊าซ เนื่องจากก๊าซที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีโมเมนตัมน้อยกว่าก๊าซที่มีความหนาแน่นสูงกว่า (กรณีความเร็วก๊าซเท่ากัน) ดังนั้นโมเมนตัมที่ถ่ายโอนไปให้เฟสอนุภาคจึงน้อยกว่า ทำให้ความเร็วของอนุภาคของระบบที่ดำเนินการ โดยใช้ก๊าซความหนาแน่นต่ำมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ดำเนินการโดยใช้ก๊าซที่มีความหนาแน่นสูง แต่ที่บริเวณใกล้ผนังพบว่าความเร็วอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อก๊าซมีความหนาแน่นน้อยลง เนื่องจากกรณีดังกล่าวอนุภาคมีการรวมตัวกันเกิดเป็น cluster มากขึ้นที่บริเวณใกล้ผนัง (ปีกของค่าสัดส่วนอนุภาคสูงขึ้นเมื่อลดความหนาแน่นก๊าซดังแสดงในรูปที่ 5.1 ที่  $z = 0.512$  m) cluster ดังกล่าวเคลื่อนที่ลงได้เร็วขึ้นเพราะ effective drag force ที่กระทำต่ออนุภาคใน cluster น้อยลง

เมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่นของก๊าซต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วอนุภาคดังแสดงในตารางที่ 4 (ก) พบว่า ที่  $z = 0.512$  m มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความเร็วสูงกว่าที่  $z = 9.155$  m โดยค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่บริเวณกลางท่อและที่บริเวณพีกมีค่า 3.19 และ 3.55 ตามลำดับ ที่  $z = 0.512$  m แต่ที่  $z = 9.155$  m ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่บริเวณกลางท่อและที่บริเวณพีกมีค่า 0.66 และ 0.70 ตามลำดับ

จากการศึกษาผลของความหนาแน่นของก๊าซพบว่าความหนาแน่นส่งผลต่อพฤติกรรมของการไหลที่บริเวณใกล้ทางเข้ามากกว่าที่บริเวณใกล้ทางออก เนื่องจากที่บริเวณใกล้ทางเข้าค่าสัดส่วนอนุภาคสูง ดังนั้นจึงมีอิทธิพลระหว่างเฟสมากกว่าบริเวณอื่น นอกจากนี้บริเวณดังกล่าวเป็นช่วงที่ยังมีการเปลี่ยนแปลงของการไหลอยู่ (developing region) ขณะที่บริเวณใกล้ทางออกเป็นช่วง

ที่มีการไหลแบบสมบูรณ์ (fully developed region) ทำให้อิทธิพลระหว่างเฟสน้อยลง

### 3.3.2 ผลของความหนืดของก๊าซ

ความหนืดของก๊าซมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความหนืดของก๊าซส่งผลโดยตรงต่อแรงเฉือน โดยเฉพาะบริเวณใกล้ผนัง รูปที่ 5.2 แสดงผลของความหนืดต่อค่าการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาคที่ความสูงต่าง ๆ พบว่าความหนืดมีผลต่อการกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณกลางท่อน้อย ดังจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟทับกันเกือบสนิทไม่ว่าที่ความสูงใดก็ตาม แต่ความหนืดมีผลต่อค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณใกล้ผนังต่อมากกว่า โดยความสูงของปีกของค่าสัดส่วนอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดของก๊าซลดลง เนื่องจากก๊าซที่มีความหนืดสูงจะต้านการไหลของอนุภาค ขณะที่ก๊าซที่มีความหนืดน้อยจะต้านการไหลของอนุภาคน้อยกว่า ดังนั้นอนุภาคจึงเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมากกว่า อนุภาคจึงมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่จากบริเวณกลางท่อซึ่งเป็นบริเวณที่มี drag force กระทำต่ออนุภาคมากกว่า ไปยังบริเวณใกล้ผนังท่อ ดังนั้นค่าสัดส่วนอนุภาคจึงมีค่าสูงที่บริเวณดังกล่าว

เมื่อพิจารณาผลของความหนืดของก๊าซต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาคดังแสดงในตารางที่ 3 (ข) พบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 5.2 กล่าวคือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณกลางท่อกมีค่าน้อยกว่าที่บริเวณพีก โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณกลางท่อกมีค่า 0.45 และ 6.10 ที่ความสูง  $z = 0.512$  และ 9.155 m ตามลำดับ ขณะที่ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่บริเวณพีกมีค่า 5.58 และ 15.15 ที่ความสูง  $z = 0.512$  และ 9.155 m ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความหนืดส่งผลต่อค่าสัดส่วนอนุภาคมากกว่าค่าความหนาแน่นของก๊าซ (ดูรูปที่ 5.1 และ 5.2) และความหนืดยังส่งผลต่อค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณใกล้ผนังท่อที่ทุกความสูงของปฏิกรณ์

รูปที่ 6.2 แสดงผลของความหนืดของก๊าซต่อการกระจายตามแนวรัศมีของความเร็วอนุภาคที่ความสูงต่างๆ พบว่า ที่บริเวณใกล้ทางเข้า ( $z = 0.512$  m) ความเร็วอนุภาคเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความหนืดก๊าซ โดยเฉพาะบริเวณกลางท่อ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเร็วก๊าซเมื่อดำเนินการแบบท่อเปล่า (ไม่มีการป้อนอนุภาค) พบว่า ที่บริเวณกลางท่อความเร็วก๊าซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดของก๊าซเพิ่มขึ้น (ไม่ได้แสดงในงานวิจัยนี้) และที่บริเวณดังกล่าวมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วอนุภาคค่อนข้างสูง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.30 เมื่อดำเนินการที่ความหนืด  $4.330 \times 10^{-5}$  และ  $4.931 \times 10^{-5}$  ดังแสดงในตารางที่ 4 (ข) แต่ที่ความสูงต่ำลงมา ( $z = 6.227$  และ  $9.155$  m) พบว่าอิทธิพลของความหนืดของก๊าซต่อค่าความเร็วอนุภาคมีค่าน้อยลง โดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วอนุภาคอยู่ในช่วง  $0.09 - 2.43$  ที่  $z = 9.155$  m (ดูตารางที่ 4 (ข))

### 3.3.3 ผลของความหนาแน่นและความหนืดของก๊าซที่อุณหภูมิต่างๆ

สิ่งที่ทราบกันแล้วว่าความหนาแน่นและความหนืดของก๊าซเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก๊าซมีความหนาแน่นน้อยลง แต่มีความหนืดมากขึ้น ผลของความหนาแน่นและความหนืดที่อุณหภูมิใดๆ ต่อค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วอนุภาคแสดงดังรูปที่ 5.3 และ 6.3 ตามลำดับ แนวโน้มและลักษณะการกระจายของค่าสัดส่วนอนุภาคสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด คือความสูงของฟลักของ

ค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณใกล้ผนังท่อมียค่าสูงขึ้นเมื่อความหนืดของก๊าซลดลง (ดูรูปที่ 5.3) เนื่องจากความหนืดส่งผลต่อค่าสัดส่วนอนุภาคมากกว่าค่าความหนาแน่นของก๊าซดังแสดงในตอน 3.3.1 และ 3.3.2 กล่าวคือ ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าความแตกต่างสัมพัทธ์ของความหนาแน่นสูงสุดถึง 340.65% แต่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาคสูงสุดเพียง 9.54 (ซึ่งเป็นค่าที่บริเวณฟลักเมื่อความหนืดมีค่า  $1.225 \text{ kg/m}^3$  ดังแสดงในตารางที่ 3 (ก) ขณะที่ช่วงความหนืดที่ศึกษามีค่าความแตกต่างสัมพัทธ์สูงสุดแค่ 175.63% แต่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาคสูงสุดมีค่า 15.15 (ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนอนุภาคที่บริเวณฟลักเมื่อดำเนินการที่ความหนืด  $4.931 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$  ดังแสดงในตารางที่ 3 (ข)) แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในช่วงที่ศึกษามีผลต่อค่าสัดส่วนอนุภาคมากกว่ากรณีที่ศึกษาผลของความหนาแน่นหรือความหนืดเพียงอย่างเดียว

เนื่องจากทั้งความหนืดและความหนาแน่นส่งผลต่อค่าความเร็วอนุภาคเฉพาะที่บริเวณใกล้ทางเข้า (ดูรูปที่ 6.1 และ 6.2) ดังนั้นเมื่อศึกษาผลของความหนาแน่นและความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าความเร็วอนุภาคพบว่า ที่บริเวณใกล้ทางเข้า ( $z = 0.512$  m) ผลของอุณหภูมิมีผลต่อความเร็วอนุภาคมากกว่าที่ความสูงอื่นดังแสดงในรูปที่ 6.3

## 4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของสมบัติทางกายภาพของก๊าซต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ในปฏิกรณ์ดาวเนอร์ โดยการจำลองแบบ จากการเปรียบเทียบผลแบบจำลองที่ใช้กับผลการทดลองของ Zhang และคณะ [1] พบว่ามีความสอดคล้องกันผลการศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติ



ของก๊าซต่อค่าสัดส่วนอนุภาคพบว่าความหนาแน่นก๊าซมีผลต่อค่าสัดส่วนอนุภาคน้อยกว่าความหนืดของก๊าซ ดังนั้นเมื่อจำลองแบบที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าค่าสัดส่วนอนุภาคเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันผลของค่าความหนืดโดยร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่าสูง 9.54 และ 15.15 เมื่อศึกษาผลของความหนาแน่นและความหนืดของก๊าซตามลำดับ เมื่อศึกษาผลของความเร็วนุภาคพบว่า ทั้งความหนาแน่นและความหนืดมีผลอย่างมากบริเวณใกล้ทางเข้าปฏิกรณ์ โดยความเร็วอนุภาคที่บริเวณกลางท่อใกล้ทางเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 3.91 และ 3.30% เมื่อเพิ่มความหนาแน่นและความหนืดของก๊าซ ตามลำดับ

### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### 6. สัญลักษณ์

- $C_D$  = สัมประสิทธิ์แรงลาก (-)
- $e_{ss}$  = Restitution coefficient between particles (-)
- $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )
- $g_{o,ss}$  = Radial distribution function (-)
- $G_{kg}$  = Production of turbulent kinetic energy ( $kg/m.s^3$ )
- $G_s$  = อัตราการไหลวนของอนุภาค ( $kg/m^2.s$ )
- $I$  = Unit tensor (-)

- $k_g$  = Turbulent kinetic energy ( $m^2/s^2$ )
- $K_{sg}$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างเฟส ( $kg/m^3.s$ )
- $k\theta_s$  = Diffusion coefficient of granular temperature ( $kg/m.s$ )
- $p$  = ความดัน (Pa)
- $t$  = เวลา (s)
- $U_g$  = ความเร็วก๊าซป้อนเข้า (m/s)
- $V_g$  = ความเร็วก๊าซ (m/s)
- $V_s$  = ความเร็วนุภาค (m/s)
- $\mathcal{E}_g$  = สัดส่วนก๊าซ (-)
- $\mathcal{E}_s$  = สัดส่วนอนุภาค (-)
- $\mathcal{E}_{turb}$  = Turbulent dissipation rate ( $m^2/s^3$ )
- $\rho_g$  = ความหนาแน่นเฟสก๊าซ ( $kg/m^3$ )
- $\rho_s$  = ความหนาแน่นเฟสอนุภาค ( $kg/m^3$ )
- $\tau_g$  = แรงเฉือนภายในเฟสก๊าซ (Pa)
- $\tau_s$  = แรงเฉือนภายในเฟสอนุภาค (Pa)
- $\mu_g$  = ความหนืดของเฟสก๊าซ ( $kg/m.s$ )
- $\mu_s$  = ความหนืดของเฟสอนุภาค ( $kg/m.s$ )
- $\mu_t$  = ความหนืดเนื่องจากความปั่นป่วน ( $kg/m.s$ )
- $\gamma_{\theta s}$  = Collisional dissipation of solid fluctuating energy ( $kg/m.s^3$ )
- $\varphi_{sc}$  = Transfer of kinetic energy ( $kg/m.s^3$ )
- $\theta_s$  = อุณหภูมิเกรนูลาร์ ( $m^2/s^2$ )
- $\lambda_s$  = Bulk viscosity ( $kg/m.s$ )
- $\sigma_k$  = Turbulent Prandtl number (-)

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Zhang, W.X. Huang and J.X. Zhu, “Gas-Solid Flow Behavior: CFB Risers. Downer”, *AICHE Journal* 47, 2001, pp. 2000-2011.
- [2] 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* 64, 1996, pp. 345-352.
- [3] Y. Zhao, Y. Ding, C. Wu and Y. Cheng, “Numerical Simulation of Hydrodynamics in Downers Using a CFD-DEM Coupled Approach”, *Powder Technology* 199, 2010, pp. 2-12.
- [4] R. Pontier, F. Hoffmann and P. Galtier, “Downflow fluid catalytic cracking system and process”, *US Patent* 5,449,496.
- [5] D.A. Berg, C.L. Briens and M.A. Bergougnou, “Reactor development for the ultra fast pyrolysis reactor”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 67, 1989, pp. 96-101.
- [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* 41, 2002, pp. 6015-6019.
- [7] M.A. Abul-Hamayel, “Comparison of Downer and Riser Based Fluid Catalytic Cracking Process at High Severity Condition: a Pilot Plant Study”, *Petroleum Science and Technology* 22, 2004, pp. 475-490.
- [8] H. Zhang, J.X. Zhu and M.A. Bergougnou, “Hydrodynamics in Downflow Fluidized Beds (1): Solids Concentration Profiles and Pressure Gradient Distributions”, *Chemical Engineering Science* 54, 1999, pp. 5461-5470.
- [9] S. Limtrakul, “Mathematical Modeling and Simulation in a Downflow Circulating Fluidized Bed” Final Report to TRF, 28 May 2009. (in Thai)
- [10] P. Khongprom, “Modeling and simulation of hydrodynamics, and heat and mass transfer in a down-flow circulating fluidized bed reactor”, *PhD. Thesis, Graduate School, Kasetsart University, Thailand.* 2011.
- [11] 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* 73, 2012, pp. 8-19.
- [12] S. Limtrakul, N. Thanomboom, T. Vatanatham and P. Khongprom, “DEM modeling and Simulation of a down-flow circulating fluidized bed”, *Chemical Engineering Communications* 195, 2008, pp. 1328-1344.
- [13] L. L. Upson, “FCC Process with High Temperature Cracking Zone”, *U.S. Patent* 6113776.

[14] M. Ye, M.A. vander Hoef and J.A.M. Kuipers, “The effects of particle and gas properties on the fluidization of Geldart A particles”, Chemical Engineering Science 60, 2005, pp. 4567-4580.

[15] B. Chalermssinsuwan, T. Chanchuey, W. Buakhao, D. Gidaspow and P. Piumsomboon, “Computational fluid dynamics of circulating fluidized bed downer: Study of modeling parameters and system hydrodynamic characteristics”, Chemical Engineering Journal 189-190, 2012, pp. 314-335.

**ตารางที่ 1** สมการควบคุมและสมการเสริม

(1) สมการความต่อเนื่อง

(a) วัฏภาคก๊าซ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \tag{1}$$

(b) วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \tag{2}$$

(2) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

(a) วัฏภาคก๊าซ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \nabla \bar{\tau}_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} + K_{sg}(\vec{v}_s - \vec{v}_g) \tag{3}$$

(b) วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla p + \nabla \bar{\tau}_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \tag{4}$$

(3) สมการการถ่ายโอนสำหรับอุณหภูมิแกรนูลาร์

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = \left( -p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \vec{v}_s + \nabla(k_{os} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{sc} \tag{5}$$

(4)  $k - \varepsilon$  turbulent model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g k_g) + \nabla(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g k_g) = \nabla \left( \varepsilon_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_k} \nabla k_g \right) + \varepsilon_g G_{k,g} - \varepsilon_g \rho_g \varepsilon_{turb} + \varepsilon_g \rho_g \pi_{k,g} \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \varepsilon_{turb}) + \nabla(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \varepsilon_{turb}) = \nabla \left( \varepsilon_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_k} \nabla \varepsilon_{turb} \right) + \varepsilon_g \frac{\varepsilon_{turb}}{k_g} (C_{1\varepsilon} G_{k,g} - C_{2\varepsilon} \rho_g \varepsilon_{turb}) + \rho_g \pi_{\varepsilon,turb} \tag{7}$$

(5) สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างโมเมนตัม,  $K_{sg}$

$$K_{sg} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \varepsilon_g^{-2.65} \tag{8}$$

(6) ค่า stress-strain ภายใน

$$\bar{\tau}_g = \varepsilon_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) \tag{9}$$

$$\bar{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \varepsilon_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \vec{v}_s \bar{I} \tag{10}$$

(7) solid bulk viscosity

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \tag{11}$$

(8) shear viscosity

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fri} \tag{12}$$

**ตารางที่ 2** สภาวะดำเนินการและค่าสมบัติทางกายภาพของก๊าซที่ใช้ในการจำลองแบบ

กรณีศึกษา	$U_g$ (m/s)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_g$ (kg/m.s)x10 <sup>5</sup>
1) ความอิสระของกริด	7.2	208	1.225	1.789
2) เปรียบเทียบผลการจำลองแบบ	10.2	102	1.225	1.789
3) สมบัติทางกายภาพของก๊าซ				
3.1) ความหนาแน่น	10.2	102	0.278,0.346,0.458, 0.676,1.225	1.789
3.2) ความหนืด	10.2	102	1.225	1.789,2.813,3.640, 4.330,4.931
3.3) ความหนาแน่นและความ หนืด	10.2	102	1.225 0.676 0.458 0.346 0.278	1.789 2.813 3.640 4.330 4.931

**ตารางที่ 3 (ก)** ผลของความหนาแน่นของก๊าซต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาค

$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	%	Z = 0.512 m				Z = 9.155 m			
		%		%		%		%	
		$\Delta\rho_g$	$\mathcal{E}_{s,cen}$	$\Delta\mathcal{E}_{s,cen}$	$\mathcal{E}_{s,peak}$	$\Delta\mathcal{E}_{s,peak}$	$\mathcal{E}_{s,cen}$	$\Delta\mathcal{E}_{s,cen}$	$\mathcal{E}_{s,peak}$
0.278	0	0.675	0.00	0.912	0.00	0.626	0.00	0.955	0.00
0.346	24.46	0.675	0.00	0.900	1.32	0.625	0.16	0.949	0.63
0.458	64.75	0.680	0.74	0.880	3.51	0.630	0.64	0.940	1.57
0.676	143.17	0.675	0.00	0.861	5.59	0.625	0.16	0.941	1.47
1.225	340.65	0.674	0.15	0.825	9.54	0.623	0.48	0.937	1.88

**ตารางที่ 3 (ข)** ผลของความหนืดของก๊าซต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนอนุภาค

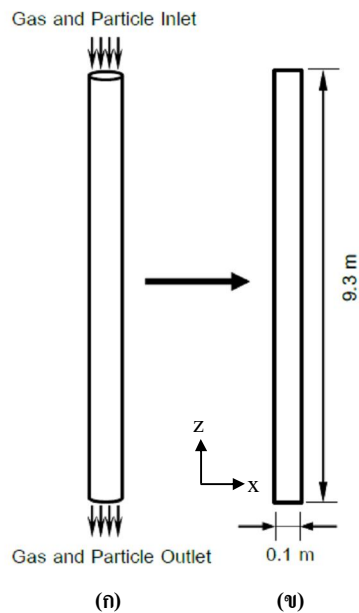
$\mu_g$ (kg/m.s) x 10 <sup>5</sup>	%	Z = 0.512 m				Z = 9.155 m			
		%		%		%		%	
		$\Delta\mu_g$	$\mathcal{E}_{s,cen}$	$\Delta\mathcal{E}_{s,cen}$	$\mathcal{E}_{s,peak}$	$\Delta\mathcal{E}_{s,peak}$	$\mathcal{E}_{s,cen}$	$\Delta\mathcal{E}_{s,cen}$	$\mathcal{E}_{s,peak}$
1.789	0	0.674	0.00	0.825	0.00	0.623	0.00	0.937	0.00
2.813	57.24	0.670	0.59	0.806	2.30	0.635	1.93	0.870	7.15
3.640	103.47	0.669	0.74	0.798	3.27	0.636	2.09	0.856	8.64
4.330	142.03	0.669	0.74	0.788	4.48	0.659	5.78	0.808	13.77
4.931	175.63	0.671	0.45	0.779	5.58	0.661	6.10	0.795	15.15

**ตารางที่ 4 (ก)** ผลของความหนาแน่นของก๊าซต่อค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วอนุภาค

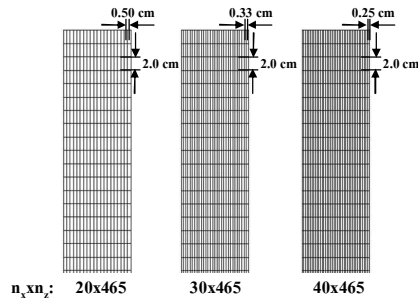
$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	% relative $\Delta\rho_g$	Z = 0.512 m				Z = 9.155 m			
		$v_{s,cen}$	% relative	$v_{s,peak}$	% relative	$v_{s,cen}$	% relative	$v_{s,peak}$	% relative
		$\Delta v_{s,cen}$		$\Delta v_{s,peak}$		$\Delta v_{s,cen}$		$\Delta v_{s,peak}$	
0.278	0	9.41	0.00	11.45	0.00	9.94	0.00	11.34	0.00
0.346	24.46	9.45	0.45	11.41	0.35	9.96	0.10	11.33	0.04
0.458	64.75	9.51	1.07	11.34	0.89	9.96	0.19	11.33	0.08
0.676	143.17	9.60	2.07	11.24	1.80	9.98	0.37	11.31	0.26
1.225	340.65	9.77	3.91	11.04	3.55	10.01	0.66	11.26	0.70

**ตารางที่ 4 (ข)** ผลของความหนืดของก๊าซต่อค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วอนุภาค

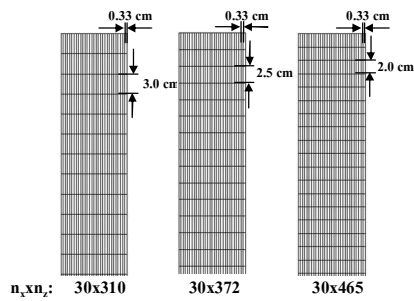
$\mu_g$ (kg/m.s) $\times 10^5$	% relative $\Delta\mu_g$	Z = 0.512 m				Z = 9.155 m			
		$v_{s,cen}$	% relative	$v_{s,peak}$	% relative	$v_{s,cen}$	% relative	$v_{s,peak}$	% relative
		$\Delta v_{s,cen}$		$\Delta v_{s,peak}$		$\Delta v_{s,cen}$		$\Delta v_{s,peak}$	
1.789	0	9.77	0.00	11.04	0.00	10.01	0.00	11.26	0.00
2.813	57.24	9.95	1.79	11.00	0.35	9.96	0.50	11.21	0.45
3.640	103.47	10.00	2.30	10.93	1.03	9.89	1.16	11.18	0.70
4.330	142.03	10.10	3.30	10.91	1.16	10.00	0.09	10.98	2.43
4.931	175.63	10.10	3.30	11.06	0.14	9.99	0.17	11.00	2.28



**รูปที่ 1** รูปร่างของส่วนดาวเนอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ: (ก) ทรงกระบอก 3 มิติ; (ข) รูปร่างแบบ 2 มิติ

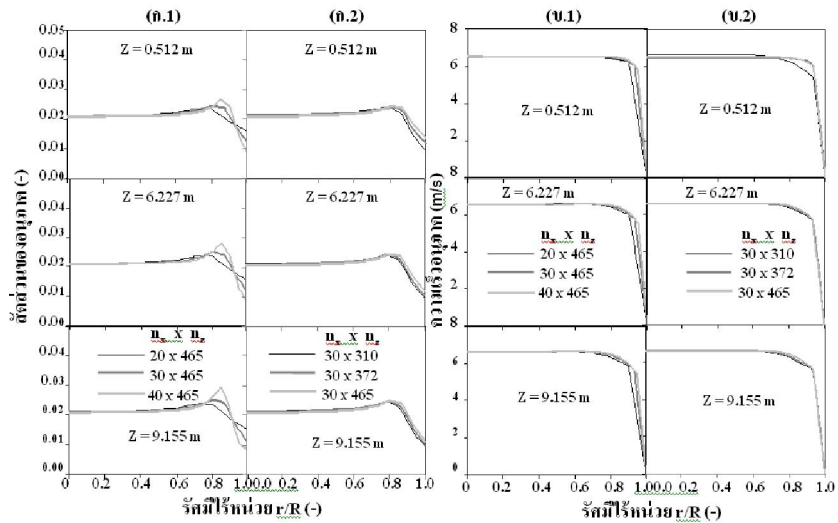


(ก)

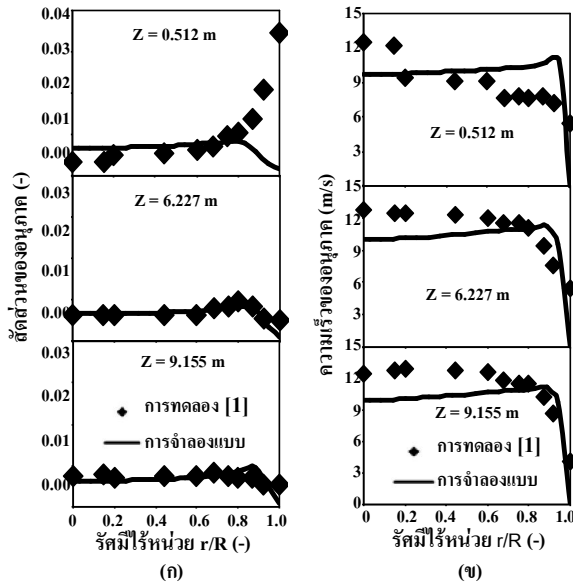


(ข)

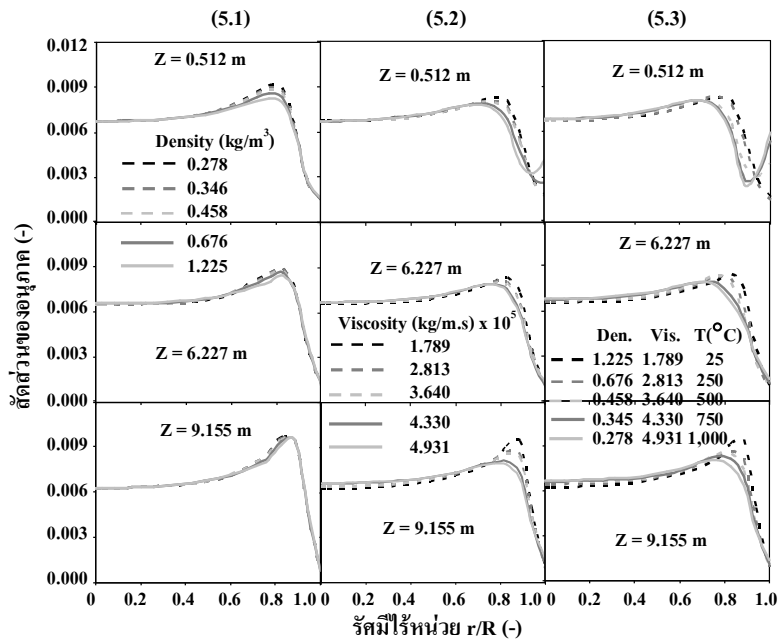
รูปที่ 2 การกระจายของกริดที่ใช้ในการจำลองแบบ: (ก) กรณีศึกษาผลการกระจายของกริดตามแนวแกน x, (ข) กรณีศึกษาผลการกระจายของกริดตามแนวแกน z



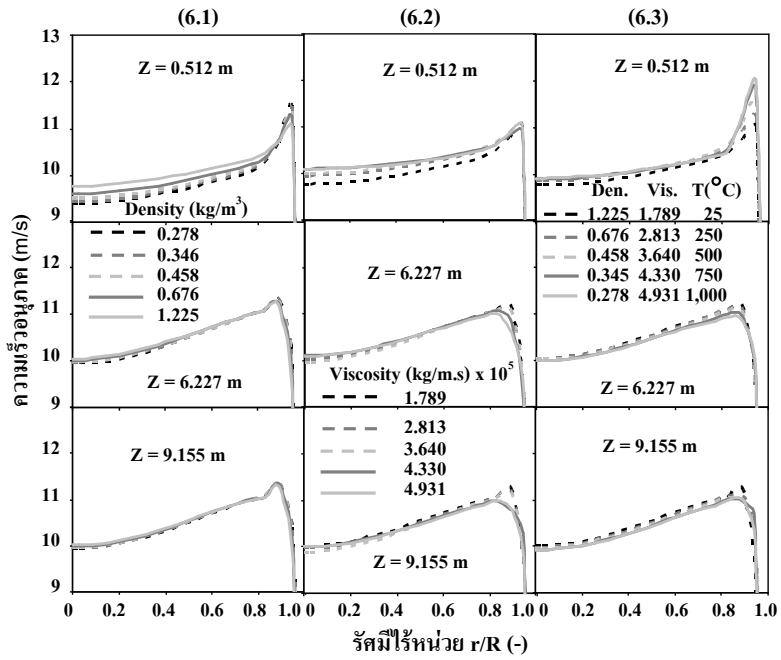
รูปที่ 3 ผลของจำนวนกริดต่อผลการจำลองแบบ: (ก.1), (ข.1) ผลของจำนวนกริดตามแนวแกน x และแนวแกน z ต่อการกระจายค่าสัดส่วนอนุภาค ตามลำดับ; (ก.2), (ข.2) ผลของจำนวนกริดตามแนวแกน x และแนวแกน z ต่อการกระจายค่าความเร็วอนุภาค ตามลำดับ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วน (ก) และความเร็วอนุภาค (ข) ระหว่างการจำลองแบบและการทดลอง [1]



รูปที่ 5 ผลของความหนาแน่นและความหนืดของก๊าซต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนอนุภาค: (5.1) ผลของความหนาแน่นก๊าซ; (5.2) ผลของความหนืดก๊าซ; (5.3) ผลของความหนาแน่นและความหนืดที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 6 ผลของความหนาแน่นและความหนืดของก๊าซต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าความเร็วอนุภาค: (6.1) ผลของความหนาแน่นก๊าซ; (6.2) ผลของความหนืดก๊าซ; (6.3) ผลของความหนาแน่นและความหนืดที่อุณหภูมิต่าง ๆ