

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองทั้งหมดในการวิจัยเรื่องปรากฏการณ์ของไหลเชิงกลของวัสดุเม็ด ผู้วิจัยได้สรุปผล และอภิปรายผล ซึ่งมีรายละเอียดได้แก่ การไหลพาและการแยกของวัตถุเม็ดในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมเสมือน 2 มิติภายใต้ระบบการสั่นแนวตั้ง การไหลของวัตถุเม็ดบนรางลาดเอียงที่มีพื้นผิวหยาบ ความเร็วในการไหลของวัตถุเม็ดที่มีความหนาแน่นต่างกันแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน และการไหลเวียนแบบติดขัดของวัตถุเม็ดในภาชนะเสมือนสามมิติ นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะการวิจัย

5.1 อภิปรายผล

งานวิจัยเรื่องผลของมุมฮอปเปอร์รูปปลีต่อการติดขัดของวัสดุเม็ด 2 มิติ ภายใต้การสั่นแนวตั้งครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด มุมฮอปเปอร์ ความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวตั้ง และจำนวนอนุภาควัสดุเม็ดแล้วพิจารณาใน 6 หัวข้อ ดังนี้ 1) ความน่าจะเป็นของการติดขัด 2) อัตราส่วนการติดขัด 3) เวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมด 4) อัตราการไหลเชิงมวล 5) เวลาที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตัน และ 6) ลักษณะการจัดเรียงตัวของวัสดุเม็ดเมื่อเกิดการอุดตัน โดยสามารถอภิปรายผลในประเด็นสำคัญ ดังนี้

1. ความน่าจะเป็นของการติดขัด (Jamming probability, $J(d)$)

การจากทดลองพบว่าความน่าจะเป็นของการติดขัดเป็นปฏิภาคผกผันกับขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ ความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวตั้ง และมุมฮอปเปอร์ อีกทั้งความน่าจะเป็นของการติดขัดจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์หรือความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวตั้งมีค่ามากพอค่าหนึ่งหรือค่าวิกฤต โดยปัจจัยที่ทำให้ลดความน่าจะเป็นของการติดขัดมากที่สุด คือ การเพิ่มขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ รองลงมาคือ การเพิ่มค่าความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวตั้ง และการเพิ่มมุมฮอปเปอร์มีอิทธิพลน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย

ทั้งนี้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัดและอัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดสอดคล้องกับการศึกษาของ To, Lai & Pak (2001) คือ มีลักษณะเป็นแบบซิกมอยด์ เคิร์ฟ และความน่าจะเป็นของการติดขัดในการศึกษานี้ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดเท่ากับ 3 และ 4

2. อัตราส่วนการติดขัด (Jamming ratio)

การจากทดลองพบว่าอัตราส่วนการติดขัดเป็นปฏิภาคผกผันกับขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวตั้ง และมุมฮอปเปอร์ โดยปัจจัยที่ทำให้ลดอัตราส่วนการติดขัดมากที่สุด คือ การเพิ่มขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ รองลงมาคือ การเพิ่มค่าความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวตั้ง และการเพิ่มมุมฮอปเปอร์มีอิทธิพลน้อยที่สุดหรือไม่มีเลยเช่นเดียวกับความน่าจะเป็นของการติดขัด นอกจากนี้แล้ว

ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการติดขัดและอัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดหรือมุมฮอปเปอร์ มีลักษณะเป็นแบบซิกมอยด์ เคิร์ฟเช่นเดียวกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัดและอัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด และอัตราส่วนการติดขัดมีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดเท่ากับ 3 และ 4 เช่นเดียวกับความน่าจะเป็นของการติดขัด ดังนั้นอัตราส่วนการติดขัดและความน่าจะเป็นของการติดขัดมีความสัมพันธ์สอดคล้องกันคือ เมื่ออัตราส่วนการติดขัดลดลง ความน่าจะเป็นของการติดขัดจะลดลงตาม อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ที่ชัดเจน

3. เวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมด (Hopper emptying time)

จากการศึกษาพบว่าเวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมดเป็นปฏิภาคโดยตรงกับขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ ความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวดิ่ง และมุมฮอปเปอร์ โดยปัจจัยที่ทำให้ลดเวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมดมากที่สุด คือ การเพิ่มขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ รองลงมาคือ การเพิ่มค่าความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวดิ่ง และการเพิ่มมุมฮอปเปอร์มีอิทธิพลน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ซึ่งผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Cheng (2012) คือ เวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมดจะยิ่งลดลงเมื่อขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์หรือมุมฮอปเปอร์เพิ่มขึ้น

4. อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate)

จากการศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลเป็นปฏิภาคโดยตรงกับขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ ความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวดิ่ง และมุมฮอปเปอร์ โดยปัจจัยที่ทำให้เพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลมากที่สุด คือ การเพิ่มขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ รองลงมาคือ การเพิ่มค่าความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวดิ่ง และการเพิ่มมุมฮอปเปอร์มีอิทธิพลน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ทั้งนี้สังเกตได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากมวลของวัสดุเม็ดที่ไหลออกเพิ่มขึ้นและเวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมดลดลงประกอบกัน ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Cheng (2012) เช่นเดียวกัน คือ อัตราการไหลเชิงมวลจะยิ่งเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์หรือมุมฮอปเปอร์เพิ่มขึ้น

5. เวลาที่เกิดการอุดตัน (Clogging time)

การอุดตันเป็นผลมาจากการเกิดการติดขัดในบริเวณต่างๆ มากเกินไป ในการศึกษาครั้งนี้ค้นพบว่าการอุดตันจะเกิดขึ้นแน่นอนก็ต่อเมื่อขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์หรือมีการสั่นแนวดิ่งด้วยความเร่งโน้มถ่วงค่าน้อยๆ เท่านั้น ดังนั้นจะมีค่าวิกฤตของขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์หรือความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวดิ่งที่ทำให้ไม่เกิดการอุดตันขึ้น สำหรับผลของมุมฮอปเปอร์ต่อการอุดตันนั้นไม่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือเห็นแนวโน้มที่ชัดเจน

6. ลักษณะการขัดตัวกันของวัสดุเม็ด

จากการสังเกตการไหลออกจากฮอปเปอร์ของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนแนวดิ่งพบว่าเมื่ออนุภาคมีการจัดเรียงตัวแบบขัดตัวกันเป็นรูปโค้งจะทำให้เกิดการติดขัดขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Nowak, Knight, Naim, Jaeger, & Nagel (1998) ที่ได้อธิบายว่าการขัดตัวกันนี้เป็นกลไกทำให้ระบบอยู่ในสมดุล อยู่หนึ่งได้โดยไม่ไหลออกจากฮอปเปอร์ โดยเป็นการตอบสนองจากการส่งต่อของแรงเค้นแล้วมีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนเชิงปริมาตร (O'Hern, Langer, Liu, & Nagel, 2001) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์พบว่าจำนวนอนุภาคที่เรียงขัดตัวกันเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องปล่อยฮอปเปอร์สอดคล้องกับการศึกษาของ To, Lai, & Pak (2001) โดยขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์

ฮอปเปอร์ยิ่งมาก ยิ่งทำให้แนวการโค้งตัวของวัสดุเมตมากขึ้นตาม อีกทั้งยังค้นพบว่าขนาดมุม ฮอปเปอร์ มีผลต่อลักษณะการขัดตัวกันคือ ยิ่งขนาดของมุมฮอปเปอร์มาก จำนวนอนุภาคที่ขัดตัวกันจะน้อยกว่า ทำให้แนวการโค้งน้อยกว่าตาม ดังนั้นยิ่งช่องเปิดฮอปเปอร์แคบ มุมฮอปเปอร์น้อย จะทำให้จำนวนอนุภาคที่เรียงตัวขัดกันมาก และแนวการโค้งตัวมาก ทั้งนี้ลักษณะการขัดตัวกันที่เกิดขึ้นไม่พบความสัมพันธ์กับเวลาและปริมาณวัสดุเมตที่คงค้าง ส่วนมากเกิดแบบไม่สมมาตร ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและมีความผันแปรสูง

7. ผลของจำนวนอนุภาควัสดุเมต

ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ To, Lai, & Pak (2002) ที่แสดงว่าจำนวนอนุภาควัสดุเมตขึ้นเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความน่าจะเป็นของการติดขัดมากขึ้นตาม รวมทั้งค่าวิกฤตของขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ที่ทำให้ไม่เกิดการขึ้นขัดต้องเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาควัสดุเมต ในการศึกษาครั้งนี้ค้นพบเพิ่มเติมว่าหากความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวดิ่งมากพอ และจำนวนอนุภาควัสดุเมตที่เพิ่มขึ้น กลับทำให้ความน่าจะเป็นของการติดขัดลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะพลังงานกระตุ้นจากการสั่นระบบและแรงที่เป็นผลมาจากน้ำหนักของวัสดุเพิ่มขึ้นจึงส่งเสริมทำให้มีการเคลื่อนตัวไหลออกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การสั่นแนวดิ่งสามารถช่วยให้การเกิดการติดขัดลดน้อยลง เป็นผลมาจากมีการขัดตัวกันลดลง โดยน่าจะเป็นผลมาจาก 2 กลไกที่ช่วยให้วัสดุเมตไหลดีขึ้นคือ หนึ่ง การสั่นลดความน่าจะเป็นของการเกิดการรวมตัวกันของวัสดุเมตแล้วไปบล็อกการไหล และ สอง การสั่นจะสลายการเกิดการรวมตัวกันของวัสดุเมตที่ไปบล็อกการไหลที่เกิดขึ้น (Mankoc, Garcimarti, Zuriguel, & Maza, 2009) อีกทั้งผลการศึกษาายังแสดงให้เห็นว่าหากความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวดิ่งมากพอ และจำนวนอนุภาควัสดุเมตที่เพิ่มขึ้นอัตราส่วนการติดขัดจะลดลง เวลาที่วัสดุเมตใช้ในการไหลออกหมดลดลง และอัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดมุมฮอปเปอร์กับแนวนอนมีผลทำให้ความน่าจะเป็นของการติดขัด อัตราส่วนการติดขัด และเวลาที่วัสดุเมตใช้ในการไหลออกหมดลดลง และอัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยคาดว่าเป็นผลมาจากการเพิ่มขนาดมุมฮอปเปอร์ช่วยให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้งและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไถลมีค่าน้อย ค่าแรงเสียดทานจึงน้อยตาม แรงในระบบที่ทำให้วัสดุเมตเกิดการเคลื่อนที่จึงมาก วัสดุเมตสามารถไหลออกได้ดี ความเร่งในการเคลื่อนที่มาก ความเร็วในการเคลื่อนที่ออกจากฮอปเปอร์จึงมากตาม สอดคล้องกับการศึกษาของ Zhou, Xu, Yu, & Zulli. (2002) ที่ได้อธิบายว่าหากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้งและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไถลระหว่างอนุภาควัสดุเมตด้วยกัน และระหว่างวัสดุเมตกับผนังฮอปเปอร์มีค่าน้อย มุมกองของวัสดุจะน้อยตาม กล่าวได้คือ เมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อย แรงเสียดทานจะน้อย แรงลัพธ์ในระบบที่ทำให้วัสดุเมตเคลื่อนที่จะมาก ความเร่งในการเคลื่อนที่ของวัสดุเมตจึงมากตาม ความเร็วในการไหลออกจากฮอปเปอร์จึงมาก มุมกองของวัสดุจึงน้อย และท้ายสุดนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการติดขัดและอัตราส่วนการติดขัด กับเวลาที่วัสดุเมตใช้ในการไหลออกหมดและอัตราการไหลเชิงมวล จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนการติดขัดมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ละเอียดกว่าความน่าจะเป็นของการติดขัด ดังนั้นอัตราส่วนการติดขัดจึงสามารถอธิบายและสอดคล้องกับอัตราการไหลเชิงมวลมากกว่าความน่าจะเป็นของการติดขัด สำหรับผลการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน

5.2 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการติดขัดของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นแนวตั้งในฮอปเปอร์ รูปลิ้ม 2 มิติ โดยวัสดุเม็ดที่ใช้คืออนุภาคทรงกระบอกผิวเรียบ แข็งและแห้ง จำนวน 350 อนุภาค วัสดุเม็ดจะถูกปล่อยให้ไหลออกจากฮอปเปอร์แบบตกริสระและสั่นในแนวตั้งแบบทั้งระบบด้วยความเร่งรั่วมิติในการสั่นแนวตั้ง ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ และขนาดมุมฮอปเปอร์หลายค่า โดยมุมฮอปเปอร์ที่ใช้จะมีค่าน้อยกว่ามุมกองของวัสดุเม็ด ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนการติดขัด และเวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมดจะลดลง ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมฮอปเปอร์ ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ และความเร่งรั่วมิติในการสั่นแนวตั้งเพิ่มขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการติดขัดมากที่สุด คือ ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ รองลงมา คือ ความเร่งรั่วมิติในการสั่นแนวตั้ง และมุมฮอปเปอร์ส่งผลน้อยที่สุด ทั้งนี้กลไกที่ทำให้การสั่นช่วยในการไหลของวัสดุเม็ด คือ ลดโอกาสของการรวมตัวกันของวัสดุเม็ดแล้วไปอุดกั้นการไหล และสลายอนุภาคที่เรียงขัดตัว การเพิ่มขนาดมุมฮอปเปอร์นั้นช่วยให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้งและไถลลดลง ค่าแรงเสียดทานลดลง แรงที่ทำให้วัสดุเม็ดเกิดการเคลื่อนที่กลิ้งและไถลจึงมาก วัสดุเม็ดสามารถไหลออกจากฮอปเปอร์ได้ดีขึ้นและมีการติดขัดลดลง อีกทั้งยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมฮอปเปอร์และเวลาที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตัน นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการติดขัดเป็นผลมาจากอนุภาควัสดุเม็ดเรียงขัดตัวกันบริเวณช่องปล่อยฮอปเปอร์ โดยลักษณะการขัดตัวกันไม่สัมพันธ์กับเวลาและปริมาณวัสดุเม็ดที่คงค้าง ส่วนมากเกิดแบบไม่สมมาตร ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และมีความแปรผันสูง ยิ่งขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์กว้างหรือมุมฮอปเปอร์น้อย จะทำให้จำนวนอนุภาคที่เรียงตัวขัดกันมาก และแนวการโค้งตัวมาก

จากการศึกษาในหัวข้อตั้งที่กล่าวมา สิ่งที่น่าสนใจศึกษาคือความน่าจะเป็นในการติดขัด เช่นในการศึกษาของ To et al., (2001), Ashour et al., (2017) และ Mankoc et al., (2007) ที่พบว่าเมื่อปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลออกแบบตกริสระและการใช้การสั่นแนวตั้งและมีสัมพันธ์กับขนาดช่องปล่อยซึ่งลดลงแบบเชิงเส้น โดยการสั่นแนวตั้งทำให้ความน่าจะเป็นในการติดขัดลดลงได้ แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาผลของมุมฮอปเปอร์เมื่อทำการสั่นร่วมด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการศึกษาในประเด็นนี้ต่อไป ซึ่งต้องอาศัยการทดลองซ้ำหลายครั้งในแต่ละกรณี ซึ่งผลการศึกษาจะนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติมในหัวข้อที่ 5 ที่ได้กล่าวไปแล้วนี้ด้วยเพื่อให้ผลการศึกษาถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดต่อไป นอกจากนี้การกำหนดค่ามุมฮอปเปอร์ที่ใช้สามารถทำให้อยู่ในรูปของมุมรั่วมิติ โดยหาจากอัตราส่วนของมุมฮอปเปอร์ที่ทำกับแนวแกนนอนต่อมุมกองของวัสดุเม็ด หากใช้ค่ามุมรั่วมิติจะทำให้สามารถแปรผล อธิบายได้ครอบคลุมมากขึ้นคือแม้จะเปลี่ยนชนิดของวัสดุเม็ดก็สามารถใช้เทียบกันได้

อัตราการปลดปล่อยของวัสดุเม็ดต่อวินาที ในแต่ละมุมฮอปเปอร์ (θ_h) ได้แก่ 30 45 และ 60 องศา และความกว้างของช่องเปิดฮอปเปอร์ (W_h) ได้แก่ 3d และ 5d (เมื่อ d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด) มุมกองของวัสดุเม็ดที่มุมฮอปเปอร์และความกว้างของช่องเปิดของฮอปเปอร์ที่แตกต่างกัน และพลังงานจลน์ของการไหลและการกองของวัสดุเม็ดและความกว้างของช่องเปิดของฮอปเปอร์ที่แตกต่าง ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับรูปแบบการไหลและการกองตัวในภาชนะเสมือน 2 มิติ กรณีใช้ความกว้างของช่องเปิดของฮอปเปอร์ที่มีขนาดเป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด เวลาในการกองค่อนข้างช้า ทำให้ความสูงของการกองตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบสม่ำเสมอ เมื่อเพิ่มขนาดเป็น 5 เท่าของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดพบว่า เวลาในการกองค่อนข้างเร็ว ทำให้ความสูงของการกองตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบไม่สม่ำเสมอ มี

การพังทลายลงของวัสดุเม็ด และมีการกองตัวขึ้นใหม่แบบเพิ่มขึ้น ส่วนการคำนวณพลังงานจลน์ของการไหลและการกองของวัสดุเม็ดย่อย การการติดขัดมาก เนื่องจากการขัดตัวระหว่างวัสดุเม็ด ทำให้การกองตัวได้ดี แต่ในกรณีที่ มุมฮอปเปอร์มาก การขัดตัวน้อยลงการไหลได้ดีขึ้น พลังงานจลน์มีแนวโน้มสูงขึ้น พลังงานจลน์ของการไหลและการกองของวัสดุเม็ดมาก การการติดขัดน้อย เนื่องจากการขัดตัวระหว่างวัสดุเม็ด ทำให้การกองตัวได้เร็วกว่า แต่ในกรณีที่ มุมฮอปเปอร์มากกว่า การขัดตัวน้อยลงการไหลได้ดีมากกว่า พลังงานจลน์มีแนวโน้มสูงขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 สามารถเปลี่ยนตัวแปรเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้ เช่น แอมพลิจูด กรามา ความหนาแน่น
- 5.3.2 สามารถใช้วัสดุเม็ดที่มีชนิดแตกต่างจากงานวิจัยนี้ได้
- 5.3.3 การออกแบบฮอปเปอร์ ควรออกแบบให้การลือกมุมฮอปเปอร์และขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์แน่น เนื่องจากหากใช้ค่าความเร่งไร้มิตในการสั่นมาก ฮอปเปอร์อาจมีการเคลื่อนขยับได้ และควรออกแบบให้ฮอปเปอร์สามารถปล่อยวัสดุให้ไหลออกเองได้อัตโนมัติ
- 5.3.4 ในการวิเคราะห์ผลการติดขัด อัตราส่วนการติดขัดสามารถอธิบายและสอดคล้องกับเวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดของวัสดุเม็ดและอัตราการไหลเชิงมวลมากกว่าความน่าจะเป็นของการติดขัด
- 5.3.5 สามารถนำไปทดสอบในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการไหลที่อยู่ช่วงความหนาแน่นต่ำกว่าหรือสูงกว่าจากงานวิจัยนี้
- 5.3.6 สามารถสนับสนุนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเม็ด และเป็นแนวทางในการทดสอบปรากฏการณ์ต่างๆของวัสดุเม็ดได้แก่ การพา (Convection), การกอง (Heaping), การก่อตัว (Arching) และการแยกตัว (Segregation)
- 5.3.7 การวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลการทดลองที่สอดคล้องสามารถเปลี่ยนเงื่อนไขของพารามิเตอร์ได้มากกว่าขึ้น
- 5.3.8 สามารถเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับการคัดกรองผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุทางอุตสาหกรรม