

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาและทดลองการไหลของวัสดุเม็ดภายในฮอปเปอร์ โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานวิจัย ดังนี้ การไหลพา การแยกที่เกิดโดยผนังภาชนะ การไหลและการกองตัว ในภาชนะเสมือน 2 มิติ

3.1 การทดลองรูปแบบการไหลและการกองตัวในภาชนะเสมือน 2 มิติ

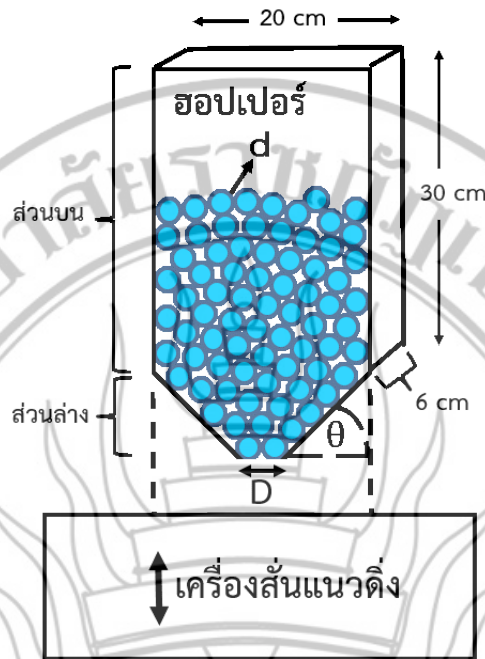
วิธีการวิจัยประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมวัสดุทดลอง การออกแบบฮอปเปอร์ การหาค่ามุมกองวัสดุ การทดลอง และการแปลผล โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.1.1 การเตรียมวัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุเม็ดรูปทรงกระบอกทำมาจากไม้เนื้อแข็งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.41 kg/m^3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) 1 เซนติเมตร แต่ละชั้นมีความยาว 6 เซนติเมตร ผิวของวัสดุเม็ดเรียบและแห้ง มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวไม้เท่ากับ 0.25 ± 0.08 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวไม้และอะคริลิกเท่ากับ 0.34 ± 0.01 และมีจำนวน 350 อนุภาค ซึ่งในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทั้ง 2 แบบ ใช้วิธีการนำวัสดุไม้เคลื่อนที่กลิ้งบนพื้นเอียงที่ทำมาจากวัสดุไม้และอะคริลิก ทำการทดลองและบันทึกวิดีโอ HD จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานโดยใช้โปรแกรมติดตามวัสดุ

3.1.2 การออกแบบฮอปเปอร์

ภาชนะที่ใช้ในการบรรจุวัสดุเม็ดคือฮอปเปอร์รูปปลีเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองการติดขัดใน 2 มิติ และวัสดุเม็ดเกิดการไหลแบบวัสดุไหลออกทั้งหมดหรือวัสดุที่อยู่ในฮอปเปอร์จะเคลื่อนที่ไปทั้งหมดทุก ๆ ตำแหน่งตลอดพื้นที่หน้าตัด ไม่เกิดบริเวณที่มีวัสดุเม็ดตกค้าง ทั้งนี้ภาชนะรูปฮอปเปอร์ที่ใช้ทำมาจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 5 มิลลิเมตร ในส่วนบนเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจะมีขนาดคงที่ คือ มีความกว้าง 20 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และความหนา 6 เซนติเมตรและส่วนล่างใช้การเลื่อนปรับขนาดมุมฮอปเปอร์ (θ) และขนาดช่องปล่อย (D) ตามต้องการ คือ 2, 3, 4, 5 และ 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด แสดงดังรูปที่ 3.1



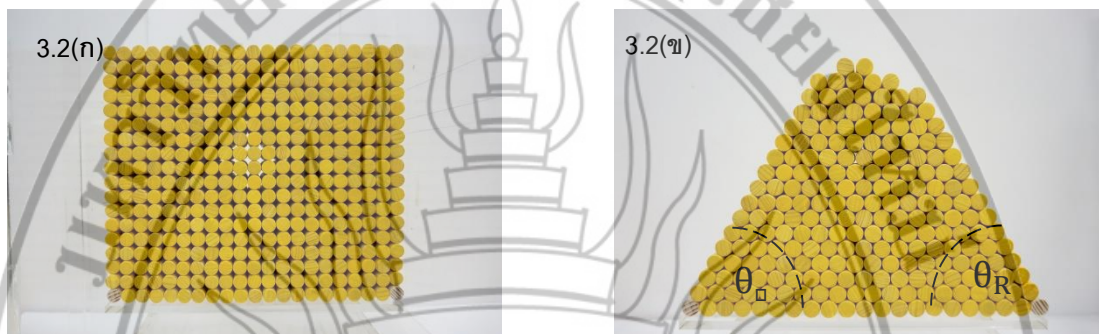
รูปที่ 3.1 แสดงภาพการทดลองของระบบที่ประกอบด้วยฮอปเปอร์และวัสดุเม็ดที่ถูกนำไปสั่นในแนวตั้งด้วยความเร่งไร้มิตหลายค่า โดย d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด D คือ ขนาดช่องเปิดฮอปเปอร์ และ θ คือขนาดมุมฮอปเปอร์

3.1.3 การหาค่ามุมกองวัสดุ

มุมกองเป็นตัวหนึ่งที่จะช่วยชี้วัดความสามารถในการไหลของวัสดุเม็ด ถ้ามุมกองมีขนาดมากความสามารถในการไหลน้อย ซึ่งในทางวิศวกรรมจะออกแบบมุมฮอปเปอร์ให้มากกว่ามุมกองของวัสดุเม็ด นั่นคือในการออกแบบฮอปเปอร์หนึ่งในปัจจัยที่นำมาพิจารณาประกอบคือขนาดมุมกองของวัสดุเม็ด เนื่องจากในเบื้องต้นแล้วต้องแบบให้มุมฮอปเปอร์กับแนวแกนนอนที่ใช้มีขนาดมากกว่ามุมกองของวัสดุที่บรรจุ เพื่อให้ไม่ทำให้วัสดุเม็ดคั่งค้างอยู่ในฮอปเปอร์ โดยมุมกองวัสดุสามารถใช้บ่งชี้ความสามารถในการไหลของวัสดุเม็ดได้ ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดขนาดมุมฮอปเปอร์ที่ใช้ให้น้อยกว่าค่ามุมกองวัสดุ เพื่อให้เกิดการติดขัดขึ้น ดังนั้นจึงทดลองหาค่ามุมกองวัสดุ โดยมีขั้นตอนคือนำวัสดุเม็ดมาเรียงซ้อนกันบนแผ่นฐานรูปทรงที่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 200, 210 และ 240 มิลลิเมตร เรียงให้เป็นแนวเดียวกันโดยใช้แผ่นอะคริลิกเป็นแนวกันในแนวตั้งทั้งสองข้าง เรียงวัสดุเม็ดแถวแรกแล้วยัดวัสดุเม็ดตอนุภาคที่อยู่ด้านซ้ายสุดและขวาสุดให้แน่นเพื่อแทนการกำหนดขนาดฐาน จากนั้นเรียงวัสดุเม็ดเป็นแนวตรงกันให้ได้ความสูง 18 ชั้น แล้วทำการเลื่อนแผ่นอะคริลิกที่กั้นทั้งสองข้างออกเพื่อให้วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ไหลตกอย่างอิสระ แล้วคำนวณหาค่ามุมกองวัสดุ จากสมการ (1)

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{2(H_c - H_p)}{D_p} \quad (1)$$

เมื่อ H_c คือ ความสูงของยอดวัสดุจากพื้น H_p คือ ความสูงของแท่นรอง $H_c - H_p$ คือ ความสูงของ กองวัสดุ และ D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมของกองวัสดุ ตัวอย่างการหามุมกองแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 จากการทดลองได้ค่ามุมกองวัสดุเท่ากับ 55.41 ± 0.76 องศา ดังนั้นจึงกำหนดขนาดมุมฮอปเปอร์ ที่ทดลองเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา กับแนวแกนนอน



รูปที่ 3.2 ภาพตัวอย่างการหามุมกองของวัสดุเม็ดด้วยวิธีกำหนดขนาดฐาน 3.2(ก) เตรียมการทดลอง โดยนำวัสดุเม็ดมาเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ 3.2(ข) ลักษณะการเรียงตัวของวัสดุเม็ดหลังจากเคลื่อนที่ไหล ตกอย่างอิสระโดย θ_R คือ มุมกองของวัสดุเม็ด

3.1.4 การทดลอง

ในการทดลองจะเริ่มจากการปรับขนาดมุมฮอปเปอร์และขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ แล้ว จัดเรียงอนุภาควัสดุเม็ดทั้งหมดลงในฮอปเปอร์ให้อยู่ในสภาวะเริ่มต้นก่อนการทดลอง แล้วทำการ ปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลตกอย่างอิสระพร้อมบันทึกภาพวิดีโอ จากนั้นเตรียมการทดลองเช่นเดิมแต่ เปลี่ยนเป็นนำไปวางบนเครื่องสั่นแนวดิ่งและสั่นระบบด้วยค่าความเร่งไร้มิติ (Γ) ในช่วง จำนวน 5 ค่า เวลาที่ใช้ในการสั่นวัสดุเม็ดคือ 600 วินาที ทำการทดลองจนครบทุกขนาดมุมฮอปเปอร์และขนาด ช่องปล่อยฮอปเปอร์พร้อมทดลองซ้ำกรณีละ 3 ครั้ง โดยเครื่องสั่นแนวดิ่งนี้อาศัยหลักการทำงานคือ เป็นการสั่นเชิงกลที่ใช้ลูกเบี้ยวเป็นตัวบังคับให้ระบบมีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงซึ่งเป็นการสั่นอย่างง่าย มี รูปแบบตามคลื่นรูปไซน์ ที่มีรูปของสมการฟังก์ชันไซน์ดังสมการที่ 2 โดยที่ค่าแอมพลิจูดคงที่ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) = A \sin(\omega t) \quad (2)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดในการสั่น (เมตร) f คือความถี่ในการสั่น (รอบต่อวินาที) คือความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที) และ t คือเวลาที่ใช้ในการสั่น ทั้งนี้ค่าความเร่งไร้มิติเป็นปริมาณที่มีตัวแปรสำคัญคือ ความถี่ในการสั่นและแอมพลิจูดในการสั่น (Hunt et al., 1999) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} = \frac{A\omega^2}{g} \quad (3)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที²

ในงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสั่นแฉ่งได้ใช้ค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแฉ่งเป็นตัวบ่งบอกปริมาณการสั่น ซึ่งเมื่อคำนวณจากสูตรสมการที่ (3) ความเร่งไร้มิติในการสั่นแฉ่งจะไม่มีหน่วย อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการสื่อถึงคุณสมบัติของความเร่งไร้มิติในการสั่นแฉ่งให้เข้าใจง่าย โดยเปรียบเทียบเป็นจำนวนเท่าของค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลกจึงจะนำค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแฉ่งที่คำนวณได้มาหารด้วยค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลกที่เป็นตัวเลขและคูณตัวความเร่งโน้มถ่วงของโลกซึ่งเป็นสัญลักษณ์ g เพื่อให้ความเร่งไร้มิติในการสั่นแฉ่งมีค่าเท่าเดิม ยกตัวอย่าง เช่น เมื่อ $\Gamma = 0.110 = \frac{0.110g}{g} = \frac{0.110g}{9.81} = 0.011g$ สำหรับกรณีที่ไม่มีสั่นแฉ่ง ความเร่งไร้มิติในการสั่นแฉ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.000 หรือในที่นี้เท่ากับ 0.000g เนื่องจากไม่มีการสั่นหรือให้อยู่ภายใต้สภาวะแรงโน้มถ่วงของโลก

3.1.5 การแปลผล

เมื่อปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลออกจากฮอปเปอร์ วัสดุเม็ดอาจเกิดการไหลออกหมด หรือเกิดการอุดตันขึ้น และเมื่อทำการสั่นแฉ่งแกระบบ อนุภาคจะเกิดการสั่นขึ้นลงร่วมด้วย จะนับการเคลื่อนที่ขึ้นและลงเป็น 1 รอบ จะแปลผลในรูปของอัตราส่วนการติดขัด (Jamming Ratio) ซึ่งคำนวณจากจำนวนรอบการสั่นที่เกิดการติดขัดต่อจำนวนรอบการสั่นทั้งหมดจนวัสดุเม็ดไหลออกหมด ดังนั้นอัตราส่วนการติดขัดจึงมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่ง 0 หมายถึง วัสดุเม็ดไม่เกิดการติดขัดในรอบการสั่น และ 1 หมายถึง วัสดุเม็ดเกิดการติดขัดในรอบการสั่น ในกรณีที่ปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลตกอย่างอิสระกำหนดให้หากวัสดุเม็ดสามารถไหลออกได้โดยไม่เกิดการอุดตัน ค่าอัตราส่วนการติดขัดจะเท่ากับ 0 และหากไหลแล้วเกิดการอุดตัน อัตราส่วนการติดขัดจะมีค่าคือ 1 นอกจากนี้บันทึกเวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดของวัสดุเม็ด (Hopper emptying time) เวลาที่เกิดการอุดตัน (Clogging Time) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) ซึ่งคืออัตราส่วนของมวลต่อเวลาที่ใช้ในการไหลออกหมด สำหรับกรณีที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตัน เวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดจะใช้เวลาที่สังเกตสูงสุดเท่านั้นคือ 600 วินาที และลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคเมื่อเกิดการขัดตัวกัน (Arching) จากนั้นนำผลที่ได้มาเขียนในรูปของกราฟความสัมพันธ์และวิเคราะห์เปรียบเทียบกันไป จะแปลผลในรูปของอัตราส่วนการติดขัด (Jamming Ratio) หาได้จากสมการที่ 4

$$\text{อัตราส่วนการติดขัด} = \frac{\text{จำนวนรอบการสั่นที่เกิดการติดขัด}}{\text{จำนวนรอบการสั่นทั้งหมดจนวัสดุเม็ดไหลออกหมด}} \quad (4)$$

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปแบบการไหลและการก่อกวนในภาชนะเสมือน 2 มิติ

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบการไหลและการก่อกวนในภาชนะเสมือน 2 มิติ ผู้วิจัยได้จำลองใช้วัสดุเม็ดที่มีขนาด 2 mm ใส่ในภาชนะฮอปเปอร์รูปกรวย มีมุมฮอปเปอร์ (θ_h) ขนาด 30 45 และ 60 องศา (Ghazavi, Hosseini & Mollanouri, 2008). และความกว้างช่องเปิดฮอปเปอร์ (W_h) ได้แก่ 3d และ 5d (เมื่อ d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด) ในการตกของวัสดุเม็ดผ่านช่องเปิดของฮอปเปอร์อยู่ภายใต้ความเร่งโน้มถ่วง โดยใช้เวลาทั้งหมดที่วัสดุตกหมดจากฮอปเปอร์ และเกิดการก่อกวนภายใต้ฮอปเปอร์ (Kiwing, 2002) ซึ่งมีลักษณะและรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.7 นอกจากนี้ผู้วิจัยได้อัตราการปลดปล่อยของวัสดุเม็ดต่อวินาที (Discharging rate particles per sec) ในแต่ละมุมฮอปเปอร์ (θ_h) ได้แก่ 30 45 และ 60 องศา Chukwu & Akande, 2007) และความกว้างของช่องเปิดฮอปเปอร์ (W_h) ได้แก่ 3d และ 5d (เมื่อ d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด) มุมก่อกวนของวัสดุเม็ดที่มุมฮอปเปอร์และความกว้างของช่องเปิดของฮอปเปอร์ที่แตกต่างกัน (Zhou, 2002) และพลังงานจลน์ของการไหลและการก่อกวนของวัสดุเม็ดและความกว้างของช่องเปิดของฮอปเปอร์ที่แตกต่างกัน (Cheng, 2012) โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ XXXXXX ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับรูปแบบการไหลและการก่อกวนในภาชนะเสมือน 2 มิติ ภายใต้แรงโน้มถ่วง