



การศึกษาการไหลของอาหารสัตว์ในไซโลบนพื้นฐานวิธีดิสครีทเอลิเมนต์

The study of fodder flow in silo based on Discrete
Element Method



นาย กิรติ	เกินหน้า	รหัสนิสิต	60360449
นาย ศรายุทธ	ทองผา	รหัสนิสิต	60364553
นางสาว สุธิดา	พรหมทอง	รหัสนิสิต	60365239

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2563



การศึกษาการไหลของอาหารสัตว์ในไซโลบนพื้นฐานวิธีดิสครีทเอลิเมนต์

The study of fodder flow in silo based on Discrete
Element Method

นาย กิรติ	เกินหน้า	รหัสนิสิต	60360449
นาย ศรายุทธ	ทองผา	รหัสนิสิต	60364553
นางสาว สุธิดา	พรหมทอง	รหัสนิสิต	60365239

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2563



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาการไหลของอาหารสัตว์ในไซโลบนพื้นฐานวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายเกียรติ	เกินหน้า	รหัสสถิติ 60360449
	นายศรายุทธ	ทองผา	รหัสสถิติ 60364553
	นางสาวสุธิดา	พรหมทอง	รหัสสถิติ 60365239
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2563		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาการไหลของอาหารสัตว์ในไซโลบนพื้นฐานวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายกิริติ	เกินหน้า	รหัสนิสิต 60360449
	นายศรายุทธ	ทองผา	รหัสนิสิต 60364553
	นางสาวสุธิดา	พรหมทอง	รหัสนิสิต 60365239
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2563		

บทคัดย่อ

ไซโลเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเก็บรักษาวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ จากการใช้งานไซโลในปัจจุบันของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์ พบปัญหาการติดขัด (Blockage) ของอาหารสัตว์ในกระบวนการปล่อยออก (Discharge) บริเวณถังทรงกรวย (Hopper) จึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในขั้นตอนถัดไป จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอาหารสัตว์ป่นภายในไซโล โดยการศึกษาลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์ป่น ได้แก่ มุมเสียดทานภายใน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอาหารสัตว์ป่น และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอาหารสัตว์ป่นและผนัง โดยการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear tester) รวมถึงความหนาแน่น ขนาดเฉลี่ย ความชื้น ร่วมกับการจำลองการไหลของอาหารสัตว์ป่นภายในไซโลด้วยระเบียบวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์ (DEM) เพื่อแสดงพฤติกรรมการไหลภายในและพิจารณาหาอัตราการไหลที่ช่องทางออกของไซโล

จากผลการทดลองพบว่าอาหารสัตว์ป่นมีความหนาแน่นเท่ากับ 1778 kg/m^3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.2478 มิลลิเมตร ค่าความชื้นเท่ากับ 10.77% มุมเสียดทานภายในระหว่างอาหารสัตว์ป่นและมุมเสียดทานภายในระหว่างอาหารสัตว์ป่นและผนังเหล็กมีค่าเท่ากับ 33.98 องศา และ 21.16 องศาตามลำดับ รวมถึงจากผลทดสอบพบว่า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอาหารสัตว์ป่น และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอาหารสัตว์ป่นและผนังเหล็กมีค่าเท่ากับ 24.7 kN/m^2 และ 12.2 kN/m^2 ตามลำดับ จากผลการจำลองเชิงตัวเลขที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์ พบว่า มีอัตราการไหลที่ช่องทางออกถึงทรงกรวยสูงสุดเท่ากับ 105.47 kg/m^2 ที่ความเร็วในการไหลของวัสดุเท่ากับ 0.49 m/s

Project title	The study of fodder flow in silo based on Discrete Element Method		
Name	Mr.Kirati	Koenna	Student ID. 60360449
	Mr.Sarayut	Thongpha	Student ID. 60364553
	Ms.Suthida	Promthong	Student ID. 60365239
Project advisor	Assistant Professor Kwanchai Kaithong		
Major	Mechanical Engineering		
Department	Mechanical Engineering		
Academic year	2020		

Abstract

Silo is an equipment for the storage process of raw materials and animal fodder products. The problem issue of the current silo usage in the animal feed industry is the blockage of the animal feed during the discharge process within hopper. It causes loss in the production process. In order to understand the flow characteristic of the fodder, this project performed the testing of various instantaneous flow properties such as angle of internal friction, wall friction angle and cohesion of the animal feed by using the direct shear tester including density and humidity. For further investigation with the numerical simulate of flow of animal feed based on discrete Element Method (DEM) was done to show the internal flow behavior and mass flow rate determination at the outlet region of the silo.

The results of the experiment showed the animal feed density of 1778 kg/m^3 , the average particle size of 0.2478 mm , the humidity of 10.77% . The angle of internal friction between fodder particle – fodder particle and fodder particle - steel wall angle were 33.98 degree and 21.16 degree respectively and the cohesion of fodder particle and fodder particle – steel wall were 24.7 kN/m^2 and 12.2 kN/m^2 respectively. Moreover, the results of the numerical simulation obtained from the DEM presented that the maximum outlet mass flow rate was 105.47 kg/s when the velocity of 0.49 m/s .

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องการศึกษาการไหลของอาหารสัตว์ในไซโลบนพื้นฐานวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์มหาวิทยาลัยนเรศวรปี 2561 จะประสบความสำเร็จไม่ได้ หากขาดบุคคลที่ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แนะนำ และความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงการตลอดมาจนประสบความสำเร็จ ทางคณะผู้ดำเนินโครงการต้องขอขอบพระคุณ พ่อและแม่ ที่คอยอบรมสั่งสอน และคอยสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณอาจารย์ขวัญชัย ไกรทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ขอขอบพระคุณสำหรับการให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยจัดหาอุปกรณ์สำคัญในการทำโครงการนี้ ตลอดจนช่วยเหลือจนโครงการสำเร็จลุล่วง และคณาจารย์ บุคลากร และเพื่อนๆ ทุกคนสำหรับคำปรึกษา แนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงการนี้

คณะผู้ดำเนินโครงการ



สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 แผนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 รูปแบบการไหลของวัสดุภายในไซโล	5
2.2 ทฤษฎีการไหลของวัสดุในไซโล	6
2.2.1 ทฤษฎีการเฉือนของวัสดุ	6
2.2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ (อาหารสัตว์)	10
2.2.3 ความหนาแน่น	10
2.2.4 ความชื้น	11
2.3 ระเบียบวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์	11
2.4 วรรณกรรมปริทรรศน์	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การศึกษาเกี่ยวกับการทดลองการไหลของวัสดุด้วยสร้างแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ	12
2.4.2 การศึกษาเกี่ยวกับการจำลองการไหลของวัสดุด้วยระเบียบวิธีดิสครีทเอลิเมนต์ในโซโล	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	15
3.1 ทดสอบลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์	15
3.1.1 การทดสอบแรงเฉือนตรง	15
3.1.2 Sieve Test	17
3.1.3 การทดสอบความหนาแน่น	18
3.1.4 การทดสอบความชื้น	18
3.2 จำลองการไหลของอาหารสัตว์โดยใช้ DEM	19
3.2.1 Model setup	21
3.2.2 Geometry	21
3.2.3 Regions	22
3.2.4 Mesh	24
3.2.5 Solids	24
3.2.6 Initial conditions	26
3.2.7 Boundary conditions	27
3.2.8 Output	28
3.2.9 Monitors	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	30
4.1 ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์	30
4.1.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรง	30
4.1.2 ผลการทดสอบ Sieve test	32
4.1.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น	34
4.1.4 ผลการทดสอบความชื้น	34
4.2 ผลการจำลองการไหลของอาหารสัตว์โดยใช้ DEM	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	39
ภาคผนวก	40
เอกสารอ้างอิง	52



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 อาหารสัตว์ป่นและอาหารสัตว์เม็ด	1
รูปที่ 1.2 ลักษณะของไซโล	2
รูปที่ 2.1 ไซโลแบบกรวยและไซโลแบบก้นเรียบ	5
รูปที่ 2.2 รูปแบบการไหล	6
รูปที่ 2.3 การเฉือนโดยตรงของแรง	6
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงสมการเส้นตรงของสมการโมห์ - คูลอมป์	8
รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบแรงเฉือนตรง	9
รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง LC (microstrian) และ Time	15
รูปที่ 3.2 box Shear	16
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของเลเยอร์ต่างๆใน Box Shear	16
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของหมุด	16
รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Stress และ Shear Stress	17
รูปที่ 3.6 ตะแกรงแต่ละเบอร์	18
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบมวลคละ	18
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความชื้น	19
รูปที่ 3.9 แผนผังการตั้งค่าโปรแกรม MFIX ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุด	20
รูปที่ 3.10 การตั้งค่า Model setup	21
รูปที่ 3.11 การตั้งค่า Geometry	21
รูปที่ 3.12 การตั้งค่าพื้นที่ผนัง	22
รูปที่ 3.13 การตั้งค่าพื้นที่ทางออก	23
รูปที่ 3.14 การตั้งค่าพื้นที่ของวัสดุ	23
รูปที่ 3.15 การตั้งค่า Background	24
รูปที่ 3.16 การตั้งค่า Mesher	24
รูปที่ 3.17 การตั้งค่า Materials	25
รูปที่ 3.18 การตั้งค่าขนาดของ particle	25
รูปที่ 3.19 การตั้งค่า Parameters	26
รูปที่ 3.20 การเลือก Regions	26
รูปที่ 3.21 การตั้งค่า solids ใน Regions	27
รูปที่ 3.22 การตั้งค่า Regions walls	27
รูปที่ 3.23 การตั้งค่า Regions outlet	28
รูปที่ 3.24 การตั้งค่า Basic	28
รูปที่ 3.25 การตั้งค่า VTK	29
รูปที่ 3.26 การตั้งค่า Monitor	29
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า C ของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์	30
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า C ของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า C ของอาหารสัตว์กับเหล็ก	31
รูปที่ 4.4 การไหลของ Particle	35
รูปที่ 4.5 Density ที่นำไปใช้ในการคำนวณ	35
รูปที่ 4.6 Velocity ที่นำไปใช้ในการคำนวณ	35
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอัตราการไหลที่ทางออกต่อเวลาในแต่ละตำแหน่ง	36
รูปที่ 4.8 โปรไฟล์ความเร็วของ particle ที่ได้จากการจำลอง	37
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการจำลองและการทดลองโปรไฟล์ความเร็วในฮอปเปอร์ ระหว่างการปล่อย	37



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงปริมาณอาหารสัตว์ที่ถูกใช้ในปี 2555 ถึง ปี 2562	1
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงเค้นตรงของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์	30
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงเค้นตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส	30
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงเค้นตรงของอาหารสัตว์กับเหล็ก	31
ตารางที่ 4.4 ผลของการทดลอง (Sieve test)	31
ตารางที่ 4.5 เพอร์เซ็นต์การตกค้าง	32
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์หาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอาหารสัตว์	32
ตารางที่ 4.7 ผลวัดความชื้นอาหารสัตว์	32



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ของประเทศไทยมีอัตราการเติบโตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลปริมาณอาหารสัตว์ที่ถูกใช้ในปี 2555 ถึง ปี 2563 ดังตารางที่ 1.1 พบว่ามีปริมาณการใช้อาหารสัตว์เฉลี่ยมากกว่า 18.025 ล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต

ตารางที่ 1.1 แสดงปริมาณอาหารสัตว์ที่ถูกใช้ในปี 2555 ถึง ปี 2562 [1]

ปี	ปริมาณการใช้อาหารสัตว์ (ล้านตัน)
2555	15.45
2556	15.49
2557	16.75
2558	17.93
2559	18.64
2560	19.58
2561	19.92
2562	20.43

อุตสาหกรรมอาหารสัตว์เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับภาคการเกษตรเนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์นั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแปรรูปวัตถุดิบทางการเกษตร ได้แก่ กากถั่วเหลือง ข้าวโพด ปลายข้าว เป็นต้น โดยอาหารสัตว์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ อาหารสัตว์ป่น และอาหารสัตว์เม็ด ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งเป็นอาหารสำเร็จรูปที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์ ไม่ว่าจะเป็นสัตว์ที่เลี้ยงเพื่อบริโภค เลี้ยงเพื่อความสวยงาม และเลี้ยงเพื่อใช้งาน เป็นต้น



รูปที่ 1.1 อาหารสัตว์ป่นและอาหารสัตว์เม็ด [2][3]

ไซโล (Silo) เป็นอุปกรณ์หลักในการพักวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ก่อนการจำหน่ายไปยังช่องทางต่างๆ ดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากไซโลมีลักษณะเป็นถังขนาดใหญ่สามารถจัดเก็บได้ครั้งละมากๆ ผลิตจากวัสดุที่แข็งแรงทนทาน มีต้นทุนในการผลิตที่ถูกลง และสามารถบริหารจัดการได้ง่าย จึงทำให้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานในระดับอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง

อย่างไรก็ตาม จากการใช้งานไซโลในปัจจุบันของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์ พบว่า เกิดปัญหาการติดขัด (Blockage) ของอาหารสัตว์ในกระบวนการปล่อยออก (Discharge) เพื่อส่งมอบให้กับลูกค้า ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปัญหาความล่าช้าในกระบวนการส่งมอบ ผลิตภัณฑ์ ค่าเสียโอกาสจากการผลิต รวมถึงค่าเสียโอกาสจากการปิดระบบการผลิต และค่าบำรุงรักษาที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 1.2 ลักษณะของไซโล [3]

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา มีผู้สนใจทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุในไซโลด้วยวิธีการต่างๆ หลากหลายวิธี สามารถสรุปได้เป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีการทดลอง และวิธีการจำลองการไหลภายในด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่เนื่องจากการศึกษาการไหลด้วยวิธีการทดลองนั้นเป็นวิธีที่มีระยะเวลาในการทดลองนาน ค่าใช้จ่ายสูง และไม่สามารถมองเห็นพฤติกรรมการไหลภายในไซโลได้ ซึ่งแตกต่างจากวิธีการจำลองการไหลภายในด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สามารถแสดงพฤติกรรมการไหลภายในได้ทันที และใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการทดลองเป็นอย่างมาก วิธีนี้จึงได้รับความนิยมในการนำมาจำลองพฤติกรรมการไหลของวัสดุภายในไซโลในปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากปัญหาข้างต้นที่ได้กล่าวมานั้น โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของอาหารสัตว์ในระหว่างกระบวนการปล่อยออกจากไซโล โดยการจำลองการไหลด้วยระเบียบวิธีดิสครีทเอลิเมนต์ เพื่อนำผลการจำลองที่ได้รับมาอธิบายและแสดงพฤติกรรมการไหลของอาหารสัตว์ภายในไซโลในระหว่างกระบวนการปล่อยออก นำผลมาวิเคราะห์ พัฒนาต่อยอดและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์เพื่อลดปัญหาการติดขัดของอาหารสัตว์ในกระบวนการปล่อยออกในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์ป่น

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของอาหารสัตว์ป่นในไซโลระหว่างกระบวนการปล่อยออก โดยใช้วิธีดิสครีทเอลิเมนต์ (Discrete Element Method, DEM)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถเข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์ป่นได้

1.3.2 สามารถอธิบายและแสดงพฤติกรรมการไหลของอาหารสัตว์ป่นภายในไซโลในระหว่างกระบวนการปล่อยออกจากการจำลองไหลของอาหารสัตว์ป่นด้วยวิธีดิสครีทเอลิเมนต์ได้

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 ศึกษาลักษณะการไหลของอาหารสัตว์ป่นในไซโลที่มีลักษณะฮอปเปอร์เป็นทรงกรวย ซึ่งผลิตจากวัสดุประเภทเหล็ก และไฟเบอร์กลาส ได้แก่ มุมเสียดทานภายในระหว่างวัสดุ มุมเสียดทานภายในระหว่างวัสดุและผนัง และแรงยึดเหนี่ยวภายใน

1.4.2 ศึกษาลักษณะการไหลของอาหารสัตว์ป่นภายในไซโลด้วยระเบียบวิธีดิสครีทเอลิเมนต์ ซึ่งผลิตจากวัสดุประเภทเหล็ก

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาเอกสารและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับอาหารสัตว์และการไหลของวัสดุในไซโล

1.5.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์และทำการทดสอบอาหารสัตว์ด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการจำลองด้วยระเบียบวิธีดิสครีทเอลิเมนต์

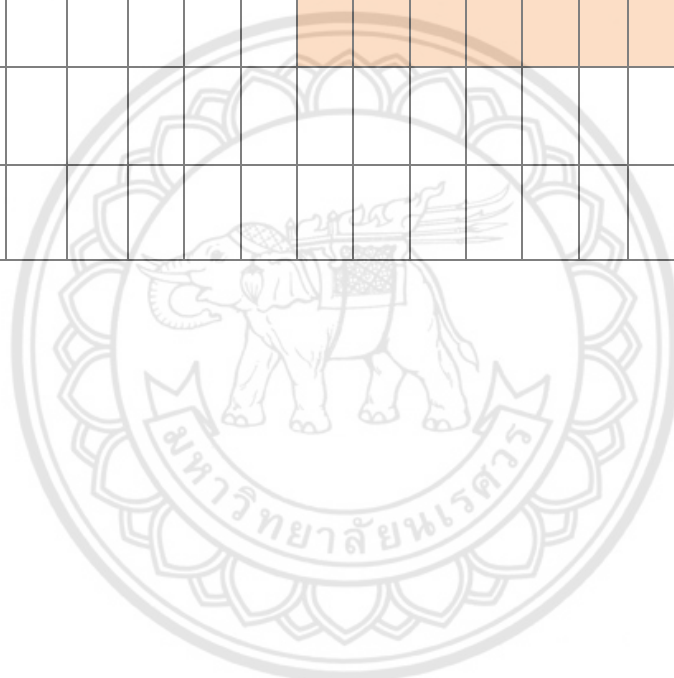
1.5.3 ทดสอบการไหลของวัสดุภายในไซโลโดยการนำค่า แรงยึดเหนี่ยวที่ปรากฏ (C) และ มุมเสียดทานภายใน (ϕ) ที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนตรงมาจำลองด้วยระเบียบวิธีดิสครีทเอลิเมนต์

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

1.5.5 จัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์

1.6 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม																				
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการไหลของวัสดุในไซโล	■	■																		
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์และทำการทดสอบอาหารสัตว์ปน		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
3. จำลองการไหลของวัสดุภายในไซโล						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้																				■
5. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์																				■

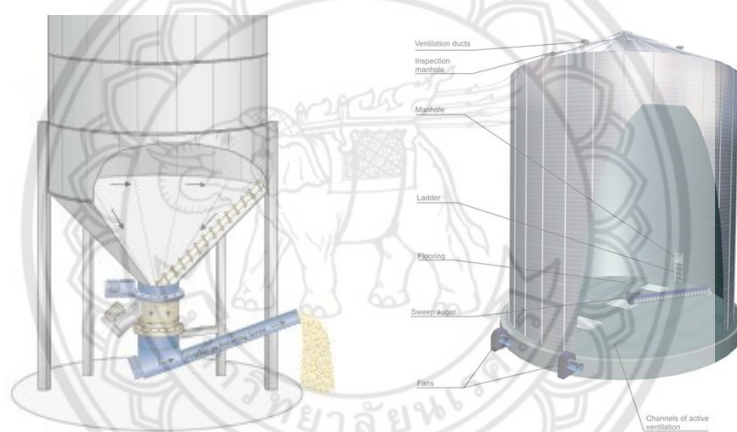


บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาศึกษาการไหลของอาหารสัตว์ในไซโลบนพื้นฐานวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1 รูปแบบการไหลของวัสดุภายในไซโล

ไซโล คือ สิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ทำจากวัสดุที่แข็งแรง ทนทาน ภายในมีระบบกันชื้นและระบายอากาศสำหรับเก็บผลผลิตการเกษตรไว้ชั่วคราวก่อนส่งออก โดยไซลอนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ไซโลแบบกรวย (Hopper silo) และไซโลแบบก้นเรียบ (Flat silo) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์นั้น ส่วนใหญ่นิยมใช้ไซโลแบบกรวยมากกว่าไซโลแบบก้นเรียบ โดยไซโลแบบกรวยจะมีลักษณะเป็นถัง ก้นกรวยวางยกสูงจากพื้นดินเพื่อสะดวกในการลำเลียงวัตถุดิบ [11]



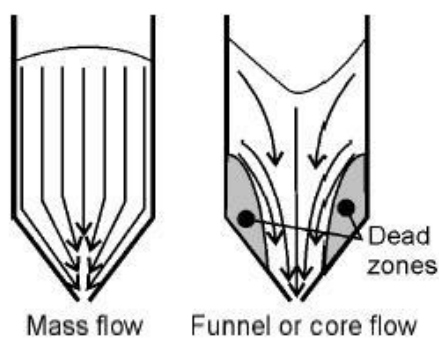
รูปที่ 2.1 ไซโลแบบกรวยและไซโลแบบก้นเรียบ [11]

รูปแบบการไหลในไซโลแบบกรวยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การไหลแบบทั้งมวล และการไหลแบบท่อระบาย ดังรูปที่ 4

1 การไหลแบบทั้งมวล (Mass flow) เป็นการไหลของวัสดุที่มีลักษณะการไหลสม่ำเสมอทุกๆตำแหน่งตลอดพื้นที่หน้าตัด การไหลลักษณะนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อช่องทางปล่อยของวัสดุมีมุมเอียงน้อยๆ และผิวของผนังไซโลราบเรียบ ไม่มีบริเวณขรุขระซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุอย่างทันทีทันใด

2 การไหลแบบท่อระบาย (Funnel flow) เป็นการไหลในลักษณะที่วัสดุส่วนหนึ่งยึดเกาะกับผนังไซโล (Stagnant zone) วัสดุที่อยู่ภายในแกนกลางไซโลเคลื่อนตัวลงมาสัมผัสกับวัสดุจะไหลตัวลงไปในแนวตั้ง มีลักษณะเป็นช่องทางการไหล โดยเริ่มจากช่องจ่ายวัสดุและซับซ้อนไปเรื่อยๆ ในแนวตั้งจนถึงผิวบนสุดของวัสดุ

การไหลลักษณะนี้จะเกิดกับช่องปล่อยวัสดุ ที่มีมุมเอียงมากๆ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการเก็บวัสดุที่มีการไหลแบบอิสระ ไม่เอนาเปื่อย มีความแข็ง และมีปริมาณมาก

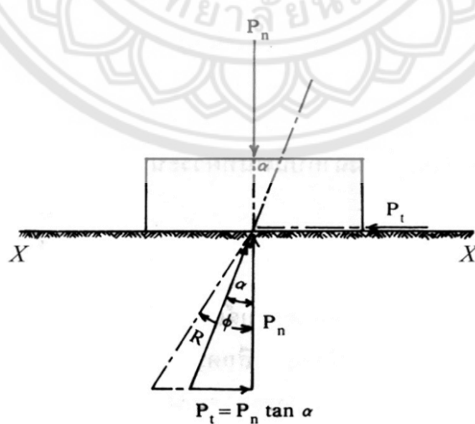


รูปที่ 2.2 รูปแบบการไหล [12]

2.2 ทฤษฎีการไหลของวัสดุในไซโล

การไหลของวัสดุในไซลอนั้น จำเป็นต้องศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของวัสดุเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของวัสดุแต่ละชนิดต่างกันอาจมีผลต่อการไหลในไซโลได้ ซึ่งลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ศึกษาจะประกอบไปด้วย กำลังต้านแรงเฉือนของวัสดุ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย ความหนาแน่น และความชื้น เพื่อนำมาประกอบกับการศึกษาระเบียบวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบ

2.2.1 ทฤษฎีการเฉือนของวัสดุ



รูปที่ 2.3 การเฉือนโดยตรงของแรง [13]

จากรูปที่ 5 P_n เป็นแรงที่กระทำต่อวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับพื้นระนาบ $X - X$ ส่วน P_t เป็นแรงกระทำต่อ วัตถุที่จะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ไปตามพื้นระนาบ $X - X$ โดยแนวแรงสัมผัสพื้นระนาบ เมื่อแรง $P_t = 0$ แรงปฏิกิริยาตั้งฉากกับพื้นที่ระนาบ $X - X$ จะเท่ากับแรง P_n และมุมเอียง (angle of obliquity) = 0 เมื่อมีการเพิ่มแรง P_t จากศูนย์จนกระทั่งวัตถุเริ่มมีการเคลื่อนที่ ค่ามุมเอียงที่เกิดขึ้นระหว่างแรงลัพธ์ R กับแรงปฏิกิริยาที่ตั้งฉากกับพื้นที่ระนาบ P_n นั้น ค่ามุมเอียงจะค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้น และเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ แรง P_t ที่เพิ่มขึ้นจะถึงค่า ๆ หนึ่งที่มุมเอียง α จะมีค่าสูงสุด ซึ่งจะมีค่าเท่ากับมุม ϕ โดยมุม ϕ นี้เรียกว่า มุมเสียดทาน (angle of friction) และค่า $\tan \phi$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction) จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าวิกฤต (critical value) ของแรง P_t เป็นสัดส่วนกับแรง P_n ดังนี้

$$P_t = P_n \tan \phi \quad (2.1)$$

นำค่า A ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัส (contact area) ทารทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการดังนี้

$$\frac{P_t}{A} = \frac{P_n}{A} \tan \phi \quad (2.2)$$

$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (2.3)$$

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยและสมการที่สอดคล้องกับสมการที่กล่าวมาข้างต้น คือ ใน ปี ค.ศ.1773 มีวิศวกรชื่อ Charles-Augustin de Coulomb ได้ยกทฤษฎีหนึ่งขึ้นมาเสนอซึ่งเกี่ยวกับความฝืดของดินเนื่องจากแรงเฉือน โดยจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับแรงของน้ำหนักที่กดทับในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสที่ระนาบใดๆ จัดอยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรงเรียกว่าสมการโมห์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb's Equation) ดังสมการที่ 2 [14]

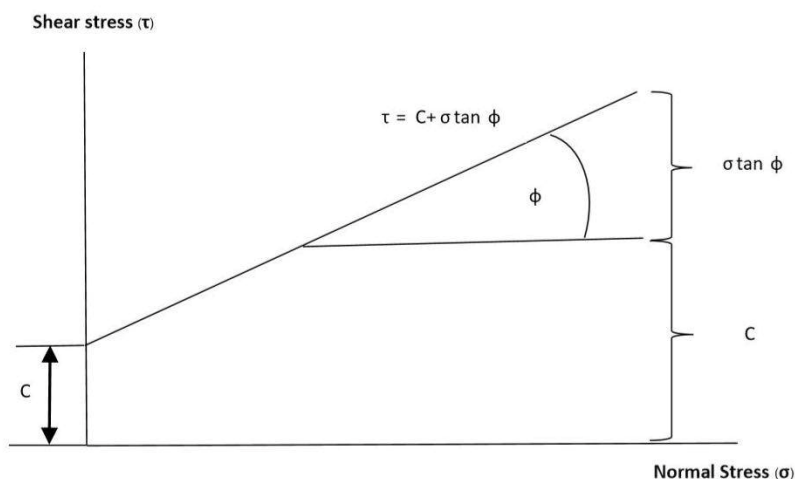
$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.4)$$

โดยที่ τ คือ ความเค้นเฉือน (Shear Stress) [kN/m^2]

c คือ แรงยึดเหนี่ยวที่ปรากฏ (Appearance Cohesive) [kN/m^2]

σ คือ ความเค้นอัด (Compressive Stress) [kN/m^2]

ϕ คือ มุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal friction) [kN/m^2]



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงสมการเส้นตรงของสมการโมห์-คูลอมบ์ [5]

สมการหา Normal force

$$Normal\ Force = Normal\ load \times 9.81 \quad (2.5)$$

โดยที่ Normal load คือ น้ำที่ใช้กดก่อนเริ่มเขื่อน

สมการหา Shear force

$$Shear\ Force = (\text{ค่าเริ่มต้นก่อนการเขื่อน} - \text{ค่าสูงสุดที่อ่านได้จากกราฟ}) \times 0.423064 \quad (2.6)$$

สมการหา Normal stress

$$Normal\ Stress = \frac{Normal\ Force}{\text{พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของบล็อกเขื่อน}} \quad (2.7)$$

สมการหา Shear stress

$$Shear\ Stress = \frac{Shear\ Force}{\text{พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด} - \text{พื้นที่หน้าตัดที่เขื่อน}} \quad (2.8)$$

สมการจุดตัดแกน x,y เพื่อหาค่า C

$$Y = mx + c ; x = 0 \quad (2.9)$$

สมการหาความชันของกราฟ

$$\text{Slope} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (2.10)$$

สมการหาค่า ϕ

$$\phi = \tan^{-1}(\text{ความชัน}) \quad (2.11)$$

จากรูปที่ 2.4 กราฟแสดงสมการเส้นตรงของสมการโมห์-คูลอมป์ ที่แสดงค่าของ C และ ϕ หรือค่าพารามิเตอร์ จะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการทดสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุโดยการใช้เครื่องทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) ดังรูปที่ 2.5 เข้ามาช่วยทดสอบ โดยค่า C และ ϕ ที่ได้ ออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่แตกต่างกันและอยู่ภายใต้สภาวะใดสภาวะหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบแรงเฉือนตรง

ถ้าคุณสมบัติมีการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ และความชื้น ซึ่งจะทำให้ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาปัจจัยดังกล่าวจะหาข้อมูลมาอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ

ขนาด รูปทรง และพื้นผิวของอนุภาค เป็นลักษณะพื้นฐานของวัสดุ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการขนถ่ายวัสดุเป็นอย่างมาก เนื่องจากขนาดอนุภาค รูปทรง และพื้นผิวของวัสดุต่างๆก็แตกต่างกัน จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการไหลในแต่ละวัสดุนี้ๆ การกำหนดขนาดของวัสดุจะดูลักษณะทั่วไปของวัสดุ โดยจะแบ่งขนาดของวัสดุเป็น 4 ประเภทหลักๆ [5] ได้แก่ ละเอียดมาก (Very fine) เป็นเม็ด (Granular) เป็นก้อน (Lumpy) และขนาดไม่แน่นอน (Irregular)

ในการวิเคราะห์ขนาดของวัสดุนั้นสามารถหาเฉพาะขนาดของวัสดุและหาจากวัสดุที่มีขนาดละเอียดมากจากการใช้ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve test) ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดลองร่อนผ่านตะแกรงควรจะอยู่ในค่ามาตรฐาน และในโครงการนี้เราใช้มาตรฐาน อเมริกัน (ASTM) ในการหาขนาดของวัสดุ ซึ่งจะเป็มาตรฐานที่ยอมรับได้และมีความคลาดเคลื่อนน้อย

เมื่อได้ผลการทดสอบมวลคละแล้วนำไปคำนวณเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การตกค้างของอาหารสัตว์ โดยหาจากสมการ

$$\%Retain = \frac{WR}{W_{total}} \quad (2.12)$$

โดยที่ %Retain คือ จำนวนผลเฉลี่ยการตกค้างบนตะแกรง
WR คือ จำนวนมวลตกค้างที่อยู่บนตะแกรง
W_{total} คือ จำนวนมวลรวม

เมื่อได้จำนวนผลเฉลี่ยการตกค้างบนตะแกรงจากนั้นจะนำผลที่ได้มีวิเคราะห์ หาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอาหารสัตว์ตามวิธีการของ Sauter จากสมการ สมการของ Sauter Mean Diameter

$$d_{sm} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (2.13)$$

โดยที่ d_{sm} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอาหารสัตว์
X_i คือ จำนวนมวลที่ตกค้างบนตะแกรงหารด้วยมวลรวม
d_{pi} คือ ขนาดความกว้างของตะแกรง

2.2.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (Density) คืออัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยวัตถุที่มีมวลในหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่กำหนดมากเท่าไร จะทำให้เห็นว่าวัตถุนั้นมีความหนาแน่นมากเท่านั้น นอกจากนี้ ความหนาแน่นยังแปรผันตามมวลอะตอม (Atomic Mass) ของธาตุหรือมวลโมเลกุลของสารประกอบด้วย โดยในการคำนวณหาความหนาแน่นของสสาร ความหนาแน่นมักถูกแสดงผลด้วยสัญลักษณ์ ρ โดยคำนวณผ่าน

ความสัมพันธ์ระหว่างมวล (Mass) หรือปริมาณเนื้อของสสารที่ถูกบรรจุอยู่ในวัตถุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Volume) จะมีสูตรในการคำนวณคือ

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.14)$$

โดยมีหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) และกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) และจากสูตรการคำนวณหาความหนาแน่นข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นนั้นเป็นอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรที่ไม่ได้คำนึงถึงปริมาณของวัตถุหรือสารตั้งต้นทั้งหมดที่มีอยู่ในขณะนั้น [15]

และมีสมการของอัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่คือ

$$\dot{m} = \rho v A \quad (2.15)$$

2.2.4 ความชื้น

ความชื้นนั้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหล โดยความชื้นที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยทางธรรมชาติของวัสดุที่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการติดขัดในไซโลที่มีความชื้นเป็นปัจจัยหลายอย่างที่มีสัมพันธ์โดยรวมทั้งเกิดจากปัจจัยที่ประกอบไปด้วย ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Product moisture) การจัดเก็บอุณหภูมิความชื้น (Storage temperature and humidity) การกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) การสั่นสะเทือนในขณะขนส่ง (Vibrations during transport) การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการจัดเก็บ (Variations throughout storage process) [16] จากการทบทวนบทความข้างต้นทำให้ทราบว่าปัจจัยของความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการทำงานของไซโลที่มีผลต่อการไหลของอาหารสัตว์ เนื่องจากความชื้นทำให้ผิวของไซโลมีลักษณะเหมือนของเหลวซึ่งทำให้วัสดุเม็ดบางส่วนยึดเกาะผนังไซโลและไม่สามารถไหลออกจากไซโลได้ทำให้เกิดบริเวณที่วัสดุเม็ดเกิดการหยุดนิ่งขึ้นภายในไซโล [17] พบว่าปัจจัยของความชื้นเป็นปัจจัยหลักและสำคัญอย่างมากที่ส่งผลต่อความสามารถในการไหลของไซโล เนื่องจากความชื้นจะทำให้ผิวภายนอกมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ความชื้นที่ทำให้เกิดของเหลวที่เคลือบอยู่กับวัสดุจะทำการยึดเกาะกันทำให้เกิดเป็นความหนืด (Viscosity) ระหว่างผิวของวัสดุส่งผลให้เกิดการอุดตันในไซโลและเกิดปัญหาการติดขัดในการทำงานในกระบวนการการส่งออกอาหารสัตว์

2.3 ระเบียบวิธีดิสครีทเอลิเมนต์

วิธีดิสครีทเอลิเมนต์ (Discrete Element Method, DEM) เป็นวิธีการใช้เทคนิคเชิงตัวเลขในการคำนวณการเคลื่อนไหวและผลกระทบจำนวนมากของอนุภาคขนาดเล็ก ด้วยความก้าวหน้าในการประมวลผลและอัลกอริทึมเชิงตัวเลขในการเรียงลำดับ DEM สามารถจำลองตัวเลขล้านอนุภาคบนโปรเซสเซอร์ตัวเดียว ปัจจุบัน DEM เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมในวัสดุเม็ด

ระเบียบวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์เป็นวิธีการที่เหมาะสมในการจำลองการไหลของอาหารสัตว์ เนื่องจากเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพในการจำลองการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด โดยมีหลักการในการติดตามทุกๆ การเคลื่อนที่ของวัสดุเพื่อประเมินตำแหน่ง ความเร็ว แรงกระทำ การสัมผัสแรงกระทำ การหมุน การชนกัน และรูปแบบการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคภายในระบบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งการจำลองในการวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม MFIX ในการจำลอง

2.4 วรรณกรรมปริทรรศน์

2.4.1 การศึกษาเกี่ยวกับการทดลองการไหลของวัสดุด้วยสร้างแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลการทดลองการไหลของวัสดุด้วยสร้างแบบจำลองในห้องปฏิบัติการเพื่ออธิบายลักษณะและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการไหลที่เกิดขึ้นภายในไซโล พบบทความที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการไหลในไซโล โดย พันคำ ศรีอุทัย [5] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของยิบซั่มในไซโล ซึ่งในการศึกษาจะต้องทำการทดลองเพื่อทราบค่าพารามิเตอร์จะมีส่วนเกี่ยวข้องในการทราบผลกระทบของวัสดุที่กระทำต่อไซโล และนำผลที่ได้ไปออกแบบไซโลที่ใช้ถ่ายฝังยิบซั่ม โดยได้ทำการหาขนาดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของยิบซั่ม และยังศึกษาผลกระทบของลักษณะรูปทรงของฮอปเปอร์ที่มีผลต่ออัตราการไหลของยิบซั่ม โดยค่าพารามิเตอร์ของแรงเฉือนที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ แรงยึดเหนี่ยว และมุมเสียดทานภายใน สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่ากำลังต้านแรงเฉือนของวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อไซโลแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการทดลองนั้นค่าแรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะทางกายภาพของวัสดุ ได้แก่ ความชื้น ขนาด และความหนาแน่น เป็นต้น ดังเห็นได้จากงานวิจัยของ ธาชาย เหลืองวรานันท์ และ เสาวนันทน์ เจียวุ่น [6] ได้ทำการศึกษาปัจจัยของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคขนาดระดับไมครอน ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในหลายอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคขนาดเล็ก เช่น อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมเคมีพลาสติก ซีเมนต์ และอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะจากผง โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคนั้นเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น แรงระหว่างพื้นผิวของอนุภาคที่มีความชื้นจากอากาศเกาะอยู่ แรงไฟฟ้าสถิต และแรง Van der Waals เป็นต้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลงโดยคาดว่าความชื้นในบรรยากาศที่ถูกดูดซับ เป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดแรงยึดติดกันส่งผลให้มีการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาค จากผลการศึกษาพบว่าผลกระทบจากการติดขัดที่มีต่อการไหลในไซโลเกิดจากปัจจัยที่แรงระหว่างพื้นผิวของอนุภาคที่มีความชื้นมาเกาะ และแรงไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะทำให้วัสดุเกิดการยึดติดกันเป็นก้อนจะมีผลต่อการไหลในไซโล นอกจากนี้ยังมีผู้สนใจทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลของอนุภาคในไซโลด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ตะวันฉาย ตุงคะนาคร [7] ได้ทำการศึกษาปัจจัยของมุมฮอปเปอร์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตของวัสดุเม็ดทรงกระบอกในฮอปเปอร์ภายใต้การสั่นในแนวตั้ง ด้วยวิธีการทดลองแบบสุ่มในฮอปเปอร์ที่มีขนาดของมุมที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ ความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งหรือมุมฮอปเปอร์จะมีผลทำให้อัตราส่วนการติดขัดและเวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมดลดลงแล้วทำให้อัตราการไหลเชิงมวลจะเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการเพิ่มจำนวนอนุภาควัสดุเม็ด หากปล่อยให้วัสดุเม็ดตกอย่างอิสระหรือสั่นแนวตั้งด้วยความเร่งไร้มิตค่า น้อยๆ ย่อมมีผลทำให้การติดขัดของวัสดุเม็ดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการสั่นแนวตั้งด้วยค่าความเร่งไร้มิตที่มากพอกลับ ทำให้การติดขัดลดลงโดยลักษณะการขัดตัวกัน ไม่สัมพันธ์กับเวลาและปริมาณวัสดุเม็ดที่ยังตกค้าง ส่วนมาก เกิดแบบไม่สมมาตรและมีความแปรผันสูงยิ่งขนาดช่องเปิดของฮอปเปอร์กว้างและมุมของฮอปเปอร์น้อยจะยิ่ง ทำให้จำนวนอนุภาคที่เรียงตัวขัดกันและแนวการโค้งตัวมาก นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง แบบจำลองโดย วาเรียม ช่วยจันทร์ และ สุทธิวัฒน์ ทองนาค [8] ได้ทำการศึกษารูปร่างของไซโลและปัจจัยที่ กระทำต่อการไหลภายในไซโล ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดและแรงดันบนผนังไซโล จาก การศึกษาพบว่า กระบวนการหลักที่เกี่ยวข้องกับวัสดุในไซโลประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ การบรรจุ (Filling Process) และการปล่อยออก (Discharging Process) และงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองเชิง คณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการออกแบบโครงสร้างของไซโลฐานแบนเรียบที่ใช้สำหรับเก็บเมล็ดถั่วเหลือง ซึ่งในการ จำลองการไหลของเมล็ดถั่วเหลืองจะใช้หลักการของกฎอนุรักษโมเมนตัมเชิงเส้นและโมเมนตัมเชิงมุม รวมถึงใช้ วิธีดิสกรีทอลิเมนต์เพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลขสำหรับศึกษาผลกระทบของสิ่งแทรกที่มีรูปร่างเป็นกรวยคว่ำและ ตำแหน่งของกรวยคว่ำต่อรูปแบบการไหล เวกเตอร์ความเร็วและแรงดันที่ผนังไซโล ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า สิ่งแทรกมีอิทธิพลต่อรูปแบบการไหลของเมล็ดถั่วเหลืองในไซโลและสามารถปรับปรุงรูปแบบการไหลจากการ ไหลแบบที่ระบายไปสู่การไหลแบบทั้งหมด นอกจากนี้การเพิ่มสิ่งแทรกยังสามารถลดแรงดันที่ผนังไซโลได้และ ยังพบว่าการวางสิ่งแทรกในตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการกระจายแรงไปยังอนุภาคที่ใกล้เคียงของไซโล ช่วยให้เกิดบริเวณที่อนุภาคหยุดเคลื่อนที่ได้

2.4.2 การศึกษาเกี่ยวกับการจำลองการไหลของวัสดุด้วยระเบียบวิธีดิสกรีทอลิเมนต์ในไซโล

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีผู้ทำการศึกษาคำจำลองการไหลของวัสดุ ด้วยระเบียบวิธีดิสกรีทอลิเมนต์ในไซโล เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดย ปรีดา ปรากฏมาก [9] ได้ทำ การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง และก๊าซซึ่งเป็นปรากฏการณ์หลักในระบบฟลูอิดส์เบดแบบสองเฟส เป็นการนำเสนอการคำนวณทาง พลศาสตร์ของไหลควบคู่ไปกับวิธีการคำนวณอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (CFD-DEM) เพื่อจำลองพฤติกรรมและ อันตรกิริยาระหว่างของไหลกับอนุภาคของแข็ง โดยได้นำแบบจำลอง DEM มาใช้เพื่อจำลองระบบอนุภาคแบบ เม็ด ในขณะที่ CFD ใช้ในการจำลองการไหลของของไหลโดยการแก้สมการ Navier-Stokes ซึ่งจะได้ค่า อิทธิพลของความเร็วอากาศ อัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิของอนุภาคและระยะเวลาการเคลื่อนที่ของ อนุภาค เพื่อหาผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคฟลูอิดส์เบดแบบต่อเนื่อง เช่นเดียวกันกับ จิราภรณ์ แก้วขาว [10] ที่ได้ศึกษาคำจำลองแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธี DEM โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopy) เปรียบเทียบผลการทดลองกับการทดลองจริง ซึ่งพบวาลักษณะการเกิดกลุ่มมวลรวมสอดคล้อง กัน แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการรวมกลุ่มของคอลลอยดนั้นขึ้นอยู่กับแรงกระทำอันเนื่องมาจาก Long-ranged (Spring and Dashpot) และ Short-ranged Interaction Forces ของแรงแวนเดอวาลล์ ดังนั้นการสร้า

งแบบจำลองด้วยวิธี DEM จึงสามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดกลุ่มมวลรวมของคอลลอยด์แบบ 2 มิติได้ และวิธีทางกลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics) โดยการหาความสัมพันธ์ของ Density Correlation Function เพื่อนำมาอธิบายระบบที่มีพฤติกรรมซับซ้อน เช่น วัสดุแบบเกรน (Granular Materials) และระบบคอลลอยด์ (Colloid) ได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติระดับมหภาค (Macroscopic Properties) ของระบบที่ศึกษาและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ (Mechanics Properties) ของอนุภาคในระดับจุลภาค (Microscopic) มีลักษณะใกล้เคียงกัน หมายความว่า พฤติกรรมของอนุภาคในระดับจุลภาคที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ สามารถนำมาคาดคะเนพฤติกรรมของอนุภาคในระดับมหภาคได้ นอกจากนั้นแล้วความสัมพันธ์ Density Correlation Function ยังสามารถบ่งบอกถึงสถานะของระบบคอลลอยด์ได้ Yin Wang, Jin Y. Ooi การนำเสนอแบบจำลองการไหลแบบเม็ดละเอียดและต่อเนื่องในการปล่อยของกรวยทรงกรวย วิธีองค์ประกอบแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองแบบไม่ต่อเนื่องและวิธีการ Finite Element ตามสูตร Lagrangian-Eulerian (ALE) สำหรับการสร้างแบบจำลองอย่างต่อเนื่อง แบบจำลอง ALE ได้แสดงการจำลองการไหลแบบละเอียดและพฤติกรรมมหภาคในไซโล การใช้ ALE ในการแก้ปัญหาการบิดเบี้ยวของตาข่ายเนื่องจากวัสดุมีขนาดใหญ่ การเลือกรูปแบบในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาตรฐานของการปลดปล่อยไซโล อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัด เมื่อใช้วิธีการแบบต่อเนื่องเพื่อสร้างแบบจำลองการปล่อยไซโล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพื่อติดตามคุณลักษณะระดับอนุภาคในการไหลของเม็ดละเอียดดังกล่าว ในการศึกษาครั้งนี้ศึกษาความดันผนัง รูปแบบการไหล และอัตราการไหลระหว่างการปล่อยไซโล โดยใช้การจำลองทั้ง ALE และ DEM ทฤษฎีที่ถูกใช้เป็นการเปรียบเทียบ เพื่อตรวจสอบแบบจำลองตัวเลขทั้งสอง โดยเปรียบเทียบแล้วพบว่า ทั้ง FE แบบจำลองที่ใช้สูตร ALE และแบบจำลอง DEM มีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมเม็ดละเอียดและความดันผนังสำหรับเม็ดละเอียด กระบวนการในไซโล ข้อสรุปว่า ALE มีข้อได้เปรียบที่ดีกว่า DEM ในการคาดการณ์แรงดันผนังทำให้โปรไฟล์แรงดันคงที่ด้วยแนวโน้มที่ราบรื่น ในขณะที่ DEM มีความสามารถในการประเมินหน้าที่ของพารามิเตอร์ระดับอนุภาคในการตอบสนองระดับมหภาคในนั้น การไหลแบบละเอียดหลังจากปรับผลลัพธ์ให้เรียบแล้วในการศึกษา [20] Jens-Uwe Bohrsen, Heinz, Anter, Michal Ostendorf and Jorg Schwedes ทำการทดลองและการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลในไซโล โดยอธิบายกระบวนการไหลโดยระบบสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธี Finite Element Method (FEM) ที่อิงตาม EULERian การเปลี่ยนรูป สนามความเร็ว ความพูน และการกระจายความเค้น ซึ่งจะสามารถคำนวณได้โดยไม่ต้องใช้ FE-grid อีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลที่วัดได้ โดยทำการเลือกแบบจำลองเชิงตัวเลขให้คล้ายกับไซโลทดสอบของ Institute of Mechanical Process Engineering ที่ Technical University of Braunschweig และศึกษาตรวจสอบโปรไฟล์ความเร็วการไหล [21]

ในการศึกษาโครงการเกี่ยวกับการไหลของวัสดุภายในไซโลนั้น มีการใช้หลักการหลากหลายรูปแบบแตกต่างกันไป ในโครงการเล่มนี้ได้แนะนำระเบียบวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์ มาประยุกต์ใช้งานกับโครงการนี้ เพื่อให้โครงการนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การศึกษากาการศึกษาการไหลของอาหารสัตว์ในไซโลบนพื้นฐานวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์ มีวิธีการดำเนินการศึกษาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

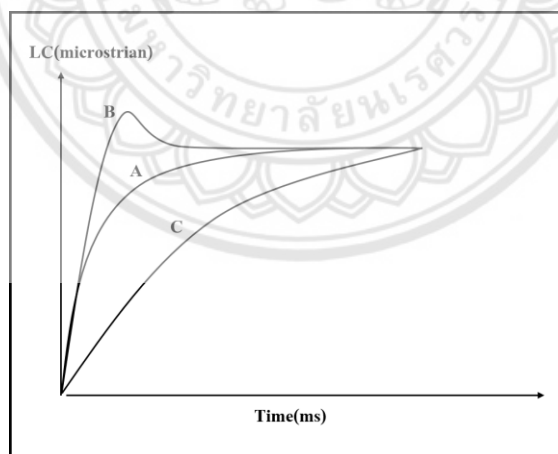
3.1 ทดสอบลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์ ประกอบด้วย การทดสอบแรงเฉือนตรง การทดสอบหามวลคละ การทดสอบความหนาแน่น และการทดสอบความชื้น

3.2 จำลองการไหลของอาหารสัตว์โดยใช้ DEM จากโปรแกรม MFIX

3.1 ทดสอบลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์

3.1.1 การทดสอบแรงเฉือนตรง

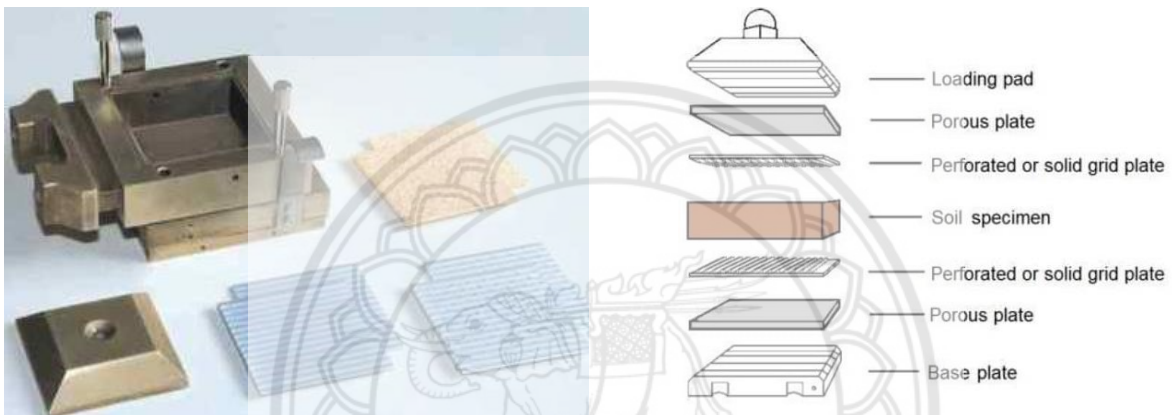
การทดสอบแรงเฉือนของอาหารสัตว์ เราทำการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งทำการทดสอบหาค่า C และ ϕ แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้ในกระบวนการ Simulation ในโปรแกรม DEM โดยมีการทดสอบการเฉือนอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ อาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ อาหารสัตว์กับผนังไฟเบอร์กลาส และอาหารสัตว์กับผนังเหล็ก ซึ่งการทดสอบการเฉือนในแต่ละรูปแบบถูกใส่ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในแต่ละรูปแบบ แล้วทำการทดสอบเพื่อให้ผลของกราฟเป็นไปตามกราฟ A หรือใกล้เคียง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง LC(microstrian) และ Time [5]

จากการทดสอบเพื่อให้ได้ผลเหมือนกราฟ A จะต้องใส่ค่าตัวแปร ได้แก่ ปริมาณอาหารสัตว์ที่ใส่ใน Box shear น้ำหนักขณะที่ทำการเฉือน (Load) และ น้ำหนักเริ่มต้น (Consolidate load) โดยการทดสอบได้ทำการทดสอบที่เวลาการจัดเก็บอาหารสัตว์ 2 ชั่วโมง เนื่องจากผู้วิจัยพบว่าในโรงงานผลิตอาหารสัตว์มีการจัดเก็บอาหารสัตว์ไม่เกิน 2 ชั่วโมง โดยขั้นตอนการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงจะแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

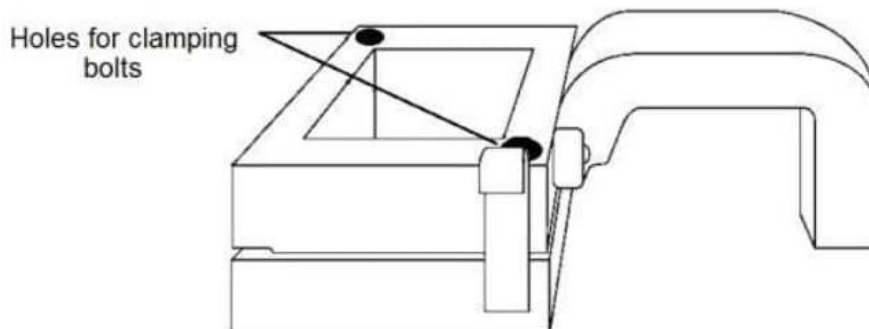
1. ทำการติดตั้งเครื่อง NI เข้ากับเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงโดยการนำสาย input เสียบเข้ากับ load cell และนำสาย output เสียบเข้ากับคอมพิวเตอร์
2. ทำการตั้งค่าโปรแกรม NI MAX เพื่อนำข้อมูลของแรงเฉือนตรงที่รับเข้ามาจากเครื่อง NI ให้พร้อมสำหรับการเป็นตัวกลางในการนำส่งข้อมูลเข้าโปรแกรม LAP View
3. เมื่อตั้งค่าโปรแกรม NI MAX เสร็จ ก็ทำการเปิดโปรแกรม LAP View
4. นำอาหารสัตว์มาใส่ใน Box Shear โดยนำ Box Shear มาวางไว้บนโต๊ะที่มีพื้นราบขนานกับ Box Shear ทำการใส่หมุดล็อก Box Shear ชั้นล่างและชั้นบนเข้ากัน โดยแสดงรูปภาพของ Box Shear ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 box Shear [18]

รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของเลเยอร์ต่างๆใน Box Shear [18]

5. ทำการจัดเรียงส่วนประกอบแต่ละชั้นใน Box Shear ตามรูปที่ 3.3 โดยอาหารสัตว์จะแทนที่ในตำแหน่งของ Soil specimen
6. เมื่อทำการใส่อาหารสัตว์เสร็จนำ Box Shear ไปวางบนเครื่องทดสอบแรงเฉือน จากนั้นนำหมุดล็อกออกพร้อมก็นำแผ่นวางรอง แสดงรูปภาพของหมุดล็อกในรูปที่ 3.4

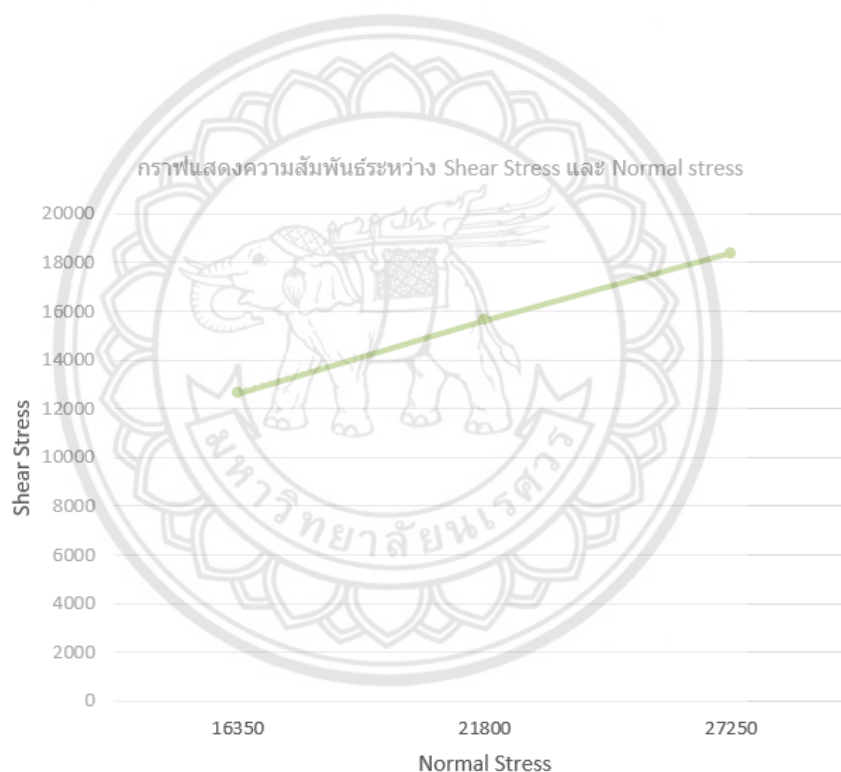


รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของหมุด [18]

หมายเหตุ ในการทดสอบแรงเฉือนตรงระหว่างอาหารสัตว์กับเหล็ก และการทดสอบแรงเฉือนตรงระหว่างอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาสจะเปลี่ยนวิธีทำเฉพาะข้อที่ 5 คือ การเปลี่ยนวัสดุรอง (porous plate) เปลี่ยนเป็นเหล็กหรือไฟเบอร์กลาสตามที่ต้องการทดสอบ

เมื่อได้ผลจากการทดสอบแรงเฉือนตรง ได้แก่ ค่าเริ่มต้นก่อนการเฉือน และค่าสูงสุดบนกราฟ และนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่า Normal Force และ Shear Force ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.5) และ (2.6)

เมื่อได้ค่า Normal Force และ Shear Force แล้ว นำไปคำนวณหาค่า Normal Stress และ Shear Stress เพื่อนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟหาค่า C และ ϕ โดยค่า Normal Stress และ Shear Stress สามารถหาได้จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) แล้วนำค่าไปพล็อตกราฟดังรูปที่ 3.5 เพื่อหาค่า C จากสมการ (2.9) และ ϕ จากสมการ (2.11)



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Stress และ Shear Stress

3.1.2 Sieve Test

การทดสอบหาขนาดมวลคละของวัสดุ ได้วิเคราะห์ขนาดของวัสดุจากการใช้ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve test) โดยใช้มาตรฐานของอเมริกัน (U.S.A. STANDARD SIEVE ASTM 11E) และค่าที่วัดได้จากการทดสอบร่อนผ่านตะแกรงถูกนำมาคำนวณเพื่อหาขนาดของมวลคละ ดังแสดงตะแกรงและเครื่อง

ทดสอบในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ซึ่งในการทดสอบจะทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยจะมีขั้นตอนในการทดลองดังต่อไปนี้

1. นำตะแกรงขนาดมาตรฐานมาเรียงเป็นชั้นโดยจะนำตะแกรงที่มีเบอร์เรียงตามลำดับต่อไปนี้ โดยที่เบอร์ 3/8, 4, 10, 40, 100 และถาดรองอยู่ล่างตามลำดับ
2. เติมหอาหารสัตว์ที่นำมาทดลองจำนวน 300 กรัม ไว้บนตะแกรงชั้นบนสุด
3. ทำการปิดฝาตะแกรง แล้วนำไปวางบนเครื่องสั่นสะเทือนพร้อมกับทำการล็อกก้านล็อกของเครื่องสั่นสะเทือนติดกับตะแกรงให้แน่น เพื่อไม่ให้เกิดการหลุดขณะทำการทดลอง
4. เปิดเครื่องสั่นสะเทือนเป็นเวลา 10-15 นาที
5. นำอาหารสัตว์ที่ตกค้างบนตะแกรงในแต่ละชั้น ไปชั่งน้ำหนักและทำการการจดบันทึกผลตามลำดับ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของอาหารสัตว์ในชั้นต่าง ๆ
6. เช็ดทำความสะอาดตะแกรง และทำการทดลองครั้งใหม่จากข้อที่1 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ตะแกรงแต่ละเบอร์



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบมวลคละ

3.1.3 การทดสอบความหนาแน่น

การคำนวณหาความหนาแน่น ได้กำหนดให้มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ $1,778 \text{ kg/m}^3$ และใช้ปิเกตอร์ตวงอาหาร 1000 ml แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณอาหารสัตว์ป่น โดยคำนวณจากสมการ (2.14)

3.1.4 การทดสอบความชื้น

ในการทดสอบหาค่าความชื้นได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความชื้น Adam Equipment PMB Moisture Balances ดังรูปที่ 3.8 โดยเครื่องทดสอบความชื้นนี้มีวิธีการทำงานหลากหลายวิธี ซึ่งสามารถปรับน้ำหนักหรือเนื้อวัสดุได้ตรงตามความต้องการด้วยปุ่ม 5 ปุ่ม ได้แก่ right left down up และ enter โดยแต่ละปุ่มมีฟังก์ชันการทำงานและวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

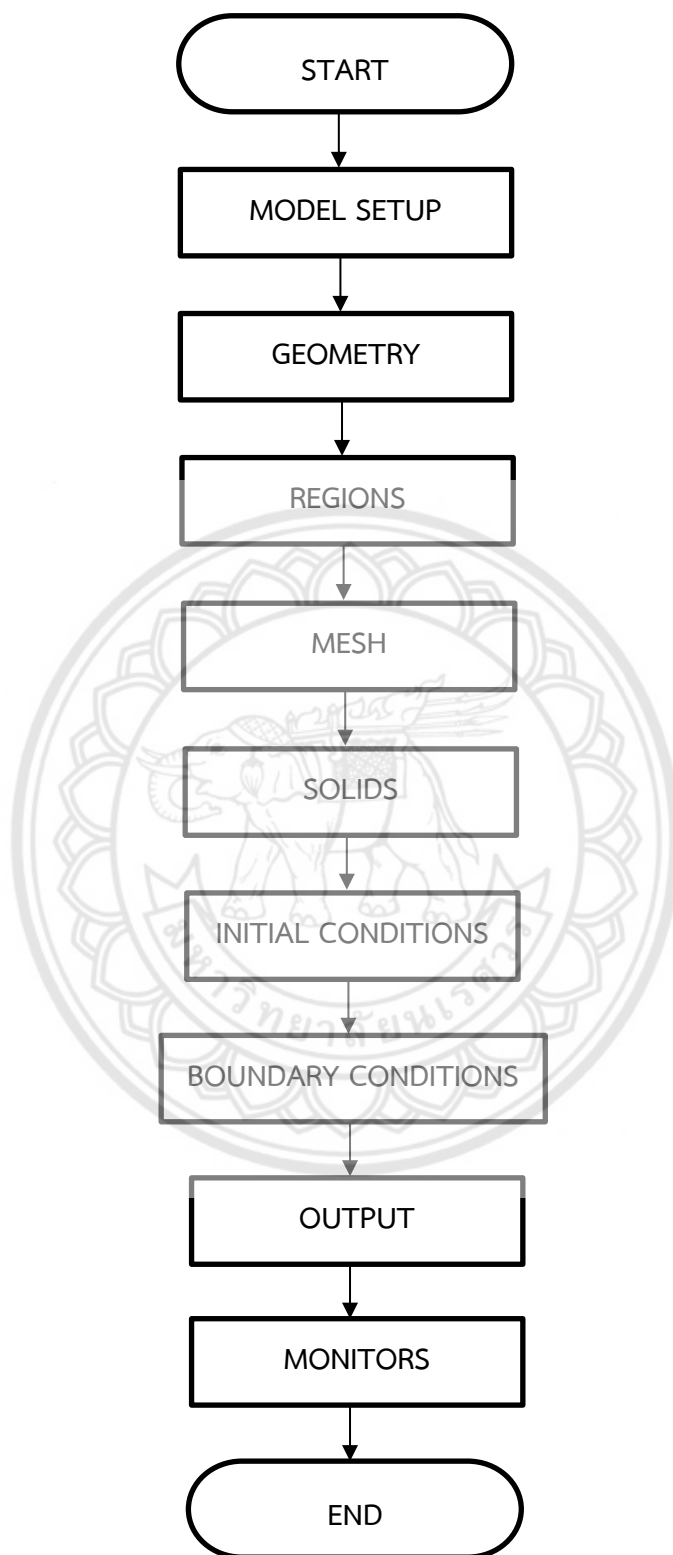
1. กดปุ่ม right เพื่อปรับค่าความชื้นหรือของแข็งตามตัวอย่างการทดสอบ
2. กด enter เพื่อตั้งค่า จากนั้นกดปุ่ม right เพื่อเลือกระดับความร้อน
3. กดปุ่ม left หรือ right เพื่อปรับอุณหภูมิขึ้นลงตามต้องการ
4. กด enter เพื่อตั้งค่า จากนั้นเลือก interval sec เพื่อปรับระยะเวลาตามตำแหน่ง โดยกดปุ่ม right เพื่อปรับเลขในหลัก 10
5. กด down เพื่อปรับเลขในหลักหน่วย จากนั้นกด enter เพื่อตั้งค่า
6. ใส่ตัวอย่างลงไปและปิดฝา จากนั้นผลของความชื้นจะแสดงบนหน้าจอของเครื่องทดสอบ และทำการจดบันทึกผล แล้วย้อนกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1 ใหม่ โดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความชื้น [19]

3.2 จำลองการไหลของอาหารสัตว์โดยใช้ DEM

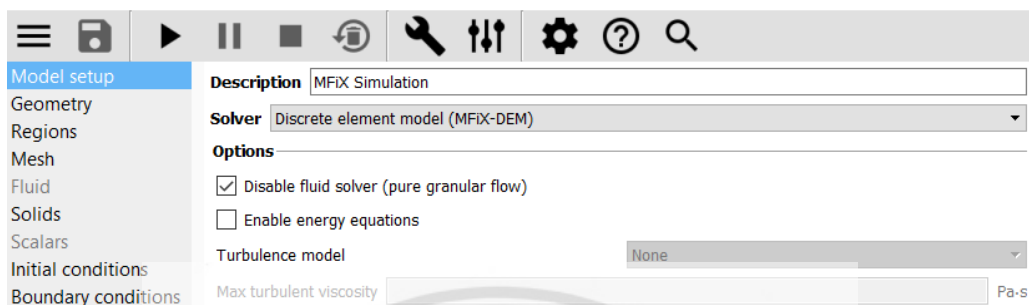
การจำลองการไหลของอาหารสัตว์ ได้ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม MFIX ซึ่งมีขั้นตอนการ setup ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนผังการตั้งค่าโปรแกรม MFX ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุด

3.2.1 Model setup

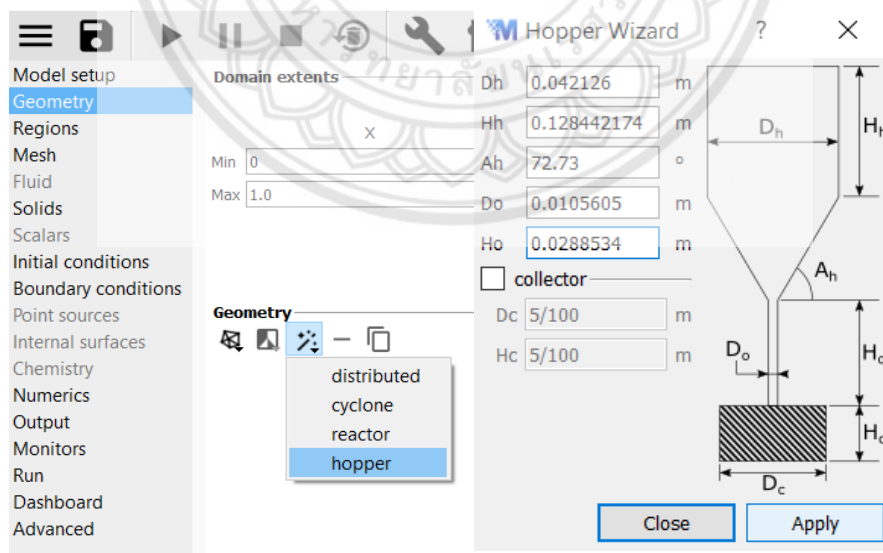
- ตั้งชื่อของงานตรง “Description”
- กดแถบข้าง Solver เพื่อเลือก “Discrete element model (MFX-DEM)”
- กดเลือก “Disable fluid solver (pure granular flow)” เพื่อปิดการใช้งานของไหล โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การตั้งค่า Model setup


3.2.2 Geometry

กำหนดค่าขนาดของ silo โดยที่ให้ค่า $D_h=0.042162$, $H_h=0.128442147$, $A_h=72.73$, $D_o=0.0105605$ และ $H_o=0.0288534$ ซึ่งเป็นขนาดไซโลโดยย่อขนาดลงมา 52 เท่า โดยมีขนาดตามรูปที่ 3.11



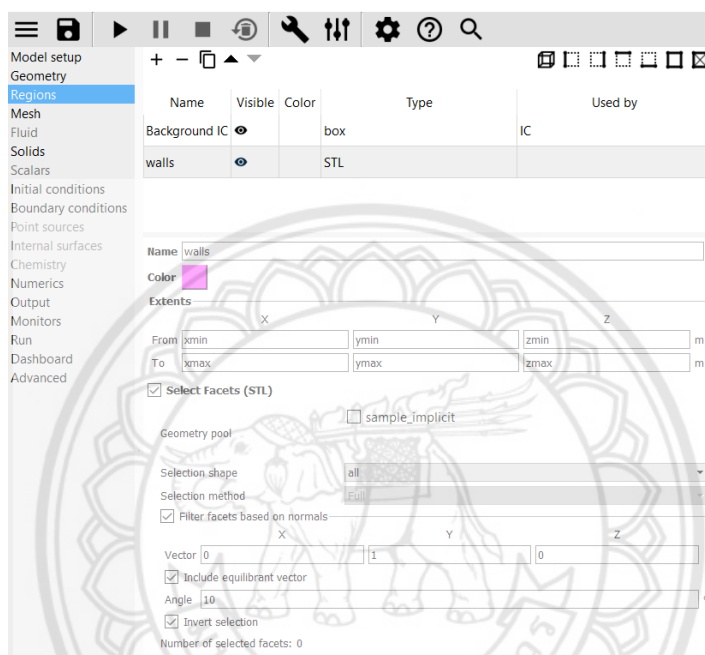
รูปที่ 3.11 การตั้งค่า Geometry

3.2.3 Regions

- เลือก  เพื่อสร้างพื้นที่ผนัง (walls)

- ตั้งชื่อตรง name เป็น “walls”

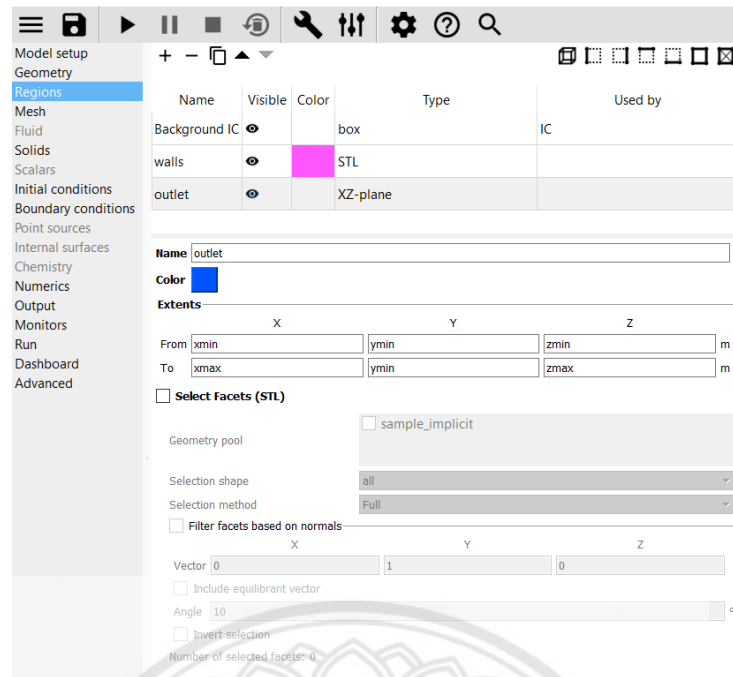
- กด ข้างหน้า Select Facets (STL), Filter facets based on normal, Include equilibrant vector และ Invert selection โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.12




รูปที่ 3.12 การตั้งค่าพื้นที่ผนัง

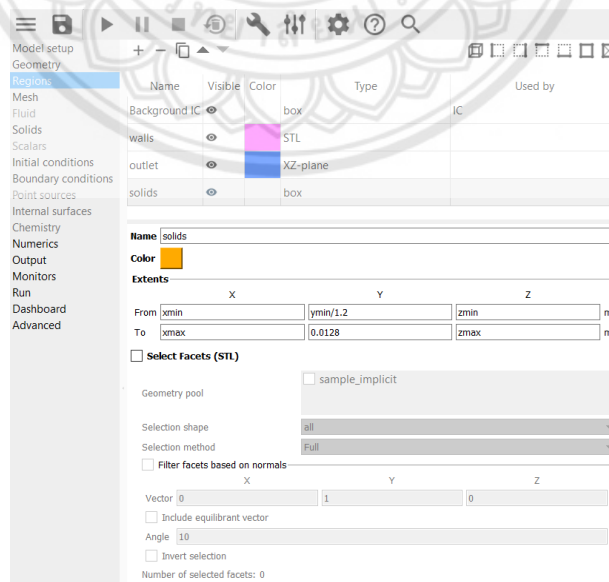
- เลือก  เพื่อสร้างพื้นที่ทางออก (outlet) โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.13

- ตั้งชื่อตรง name เป็น “outlet”



รูปที่ 3.13 การตั้งค่าพื้นที่ทางออก

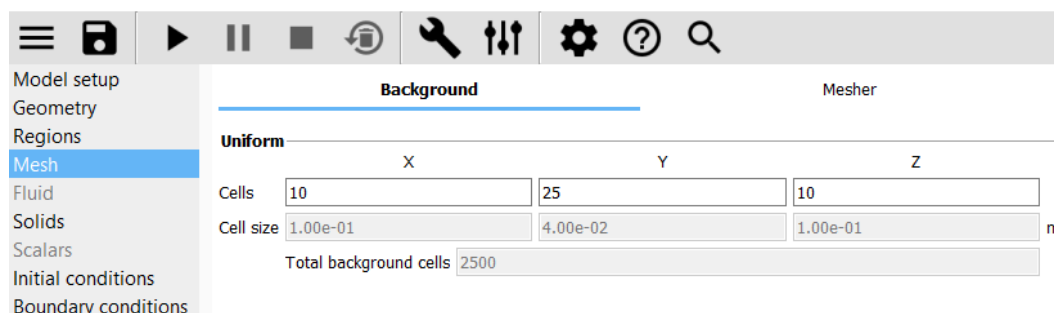
- เลือก  เพื่อสร้างพื้นที่ของวัสดุ (particle)
- ตั้งชื่อตรง name เป็น “solids”
- เปลี่ยนค่า y จาก ymin ให้เป็น “ymin/1.2” และ ymax ให้เป็น “0.0128” โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การตั้งค่าพื้นที่ของวัสดุ

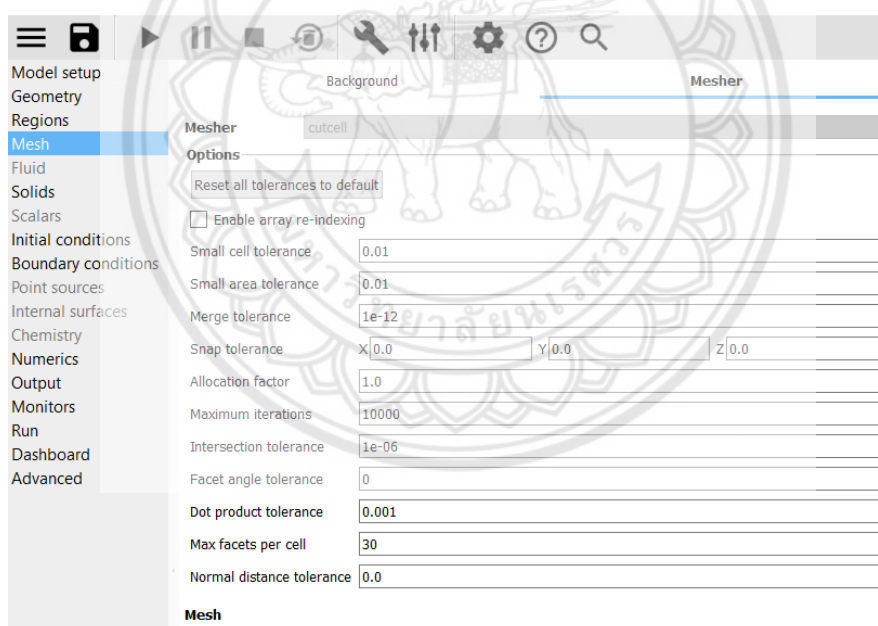
3.2.4 Mesh

- เลือก Background เพื่อเปลี่ยนค่า cell โดยกำหนดให้ค่า $x=10$, $y=25$ และ $z=10$ โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การตั้งค่า Background

- เลือก Mesher เพื่อเปลี่ยนค่า options โดยกำหนดค่า Allocation factor=1.0, Facet angle=0 และ Max facets per cell=30 โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.16



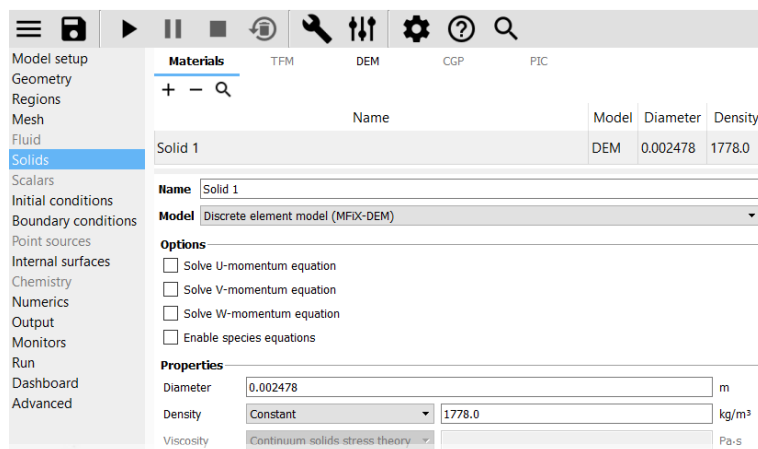
รูปที่ 3.16 การตั้งค่า Mesher

3.2.5 Solids

- ตั้งค่า Materials โดยกด + เพื่อสร้าง solids

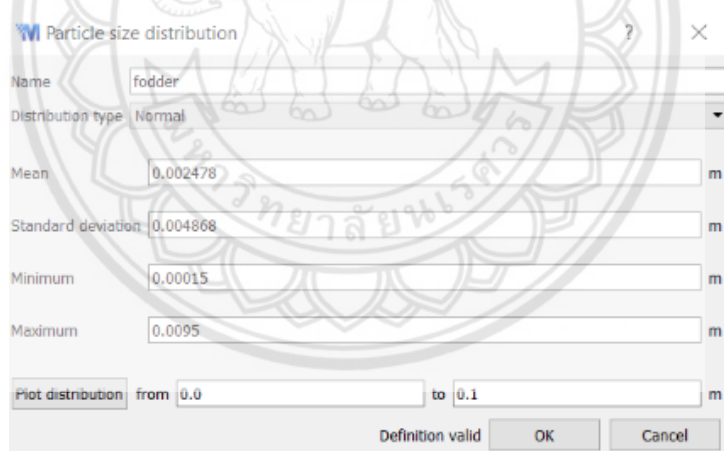
- เลือกแถบข้าง Model และเลือก “Discrete element model (MFI-X-DEM)”

- เปลี่ยนค่า Properties โดยกำหนดค่า Diameter และ Density โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.17



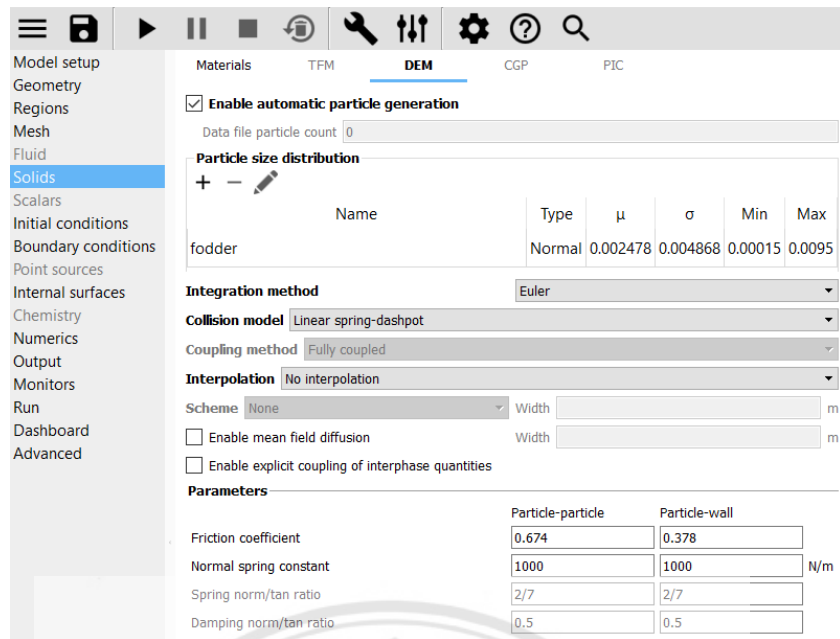
รูปที่ 3.17 การตั้งค่า Materials

- ตั้งค่า DEM โดยกด ข้างหน้า Enable automatic particle generation
- กด + เพื่อตั้งค่าขนาดของ particle โดยกำหนดให้ค่า Mean=mean diameter, Standard deviation, Minimum และ Maximum โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การตั้งค่าขนาดของ particle

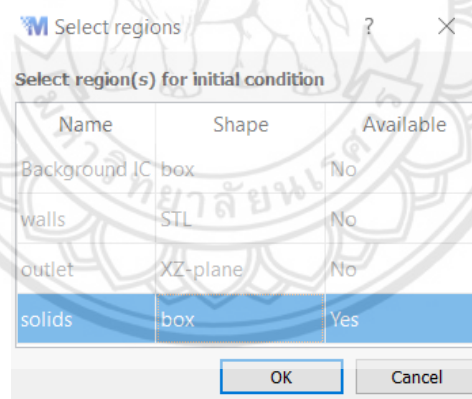
- ตั้งค่าค่า Parameters ในแถบ Friction coefficient โดยกำหนดให้ค่า Particle-Particle และ Particle-wall โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การตั้งค่า Parameters

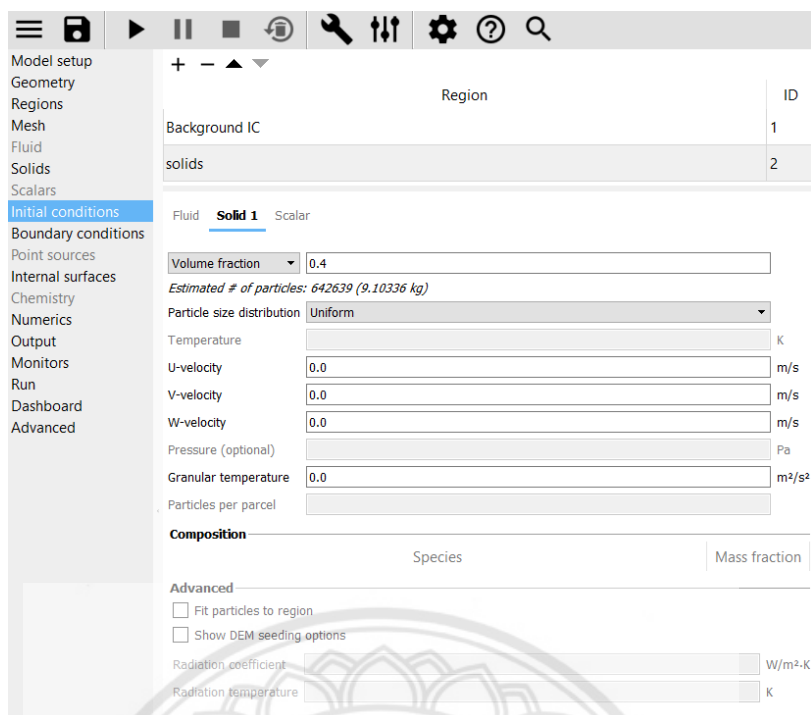
3.2.6 Initial conditions

- กด + เพื่อเลือก Regions โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การเลือก Regions

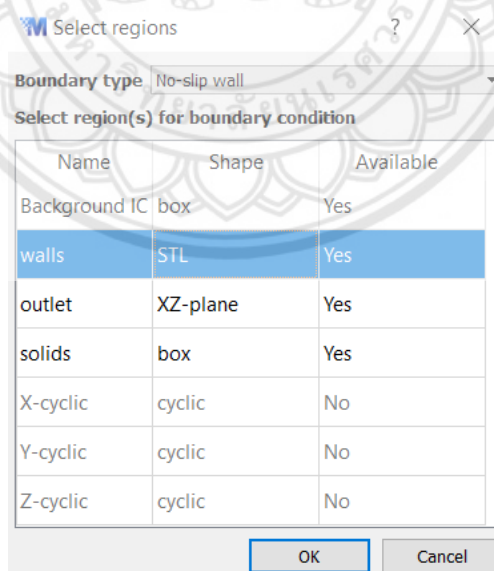
- เปลี่ยนค่าตรงแถบ Volume fraction ให้มีค่าเท่ากับ 0.4 โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การตั้งค่า solids ใน Regions

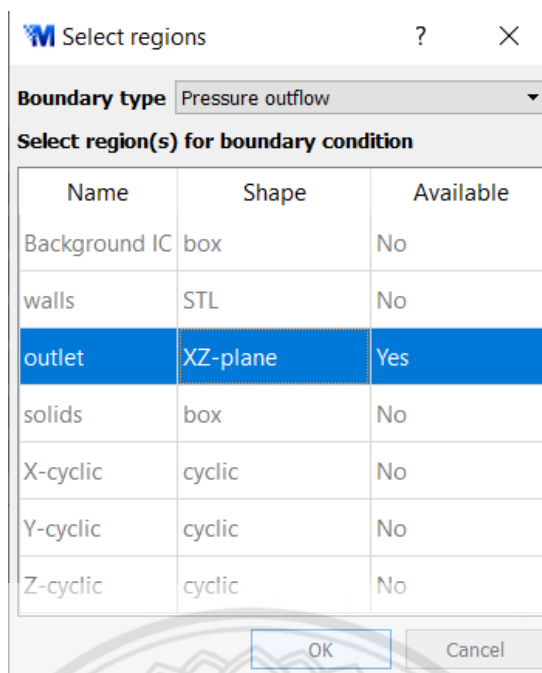
3.2.7 Boundary conditions

- กด + เพื่อเลือก Regions เป็น walls โดยกำหนดให้ Boundary type เป็น No-slip wall โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การตั้งค่า Regions walls

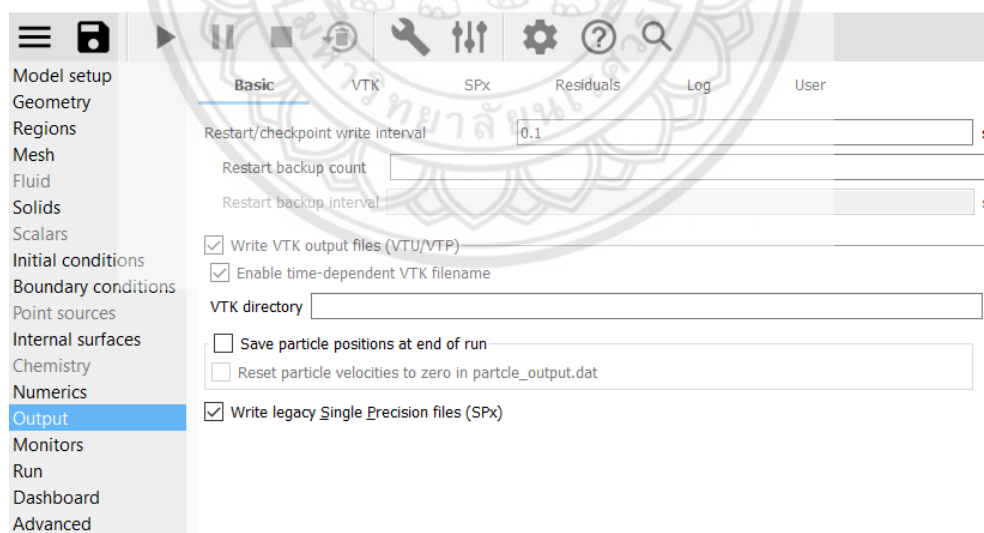
- กด + เพื่อเลือก Regions เป็น outlet โดยกำหนดให้ Boundary type เป็น Pressure outflow โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การตั้งค่า Regions outlet

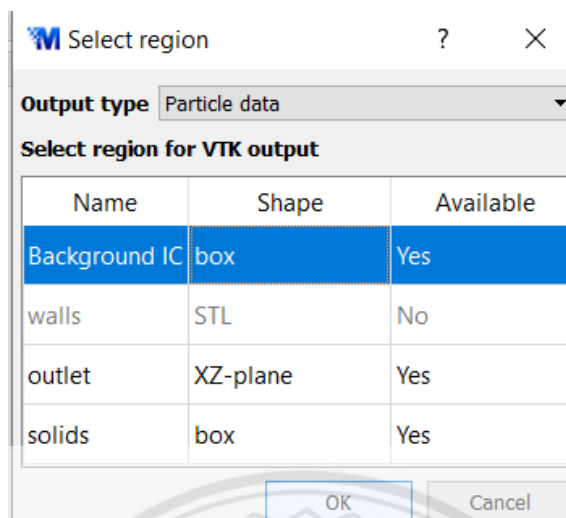
3.2.8 Output

- ตั้งค่า Basic โดยกด เพื่อเลือก Write VTK output file (VTK/VTU) โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การตั้งค่า Basic

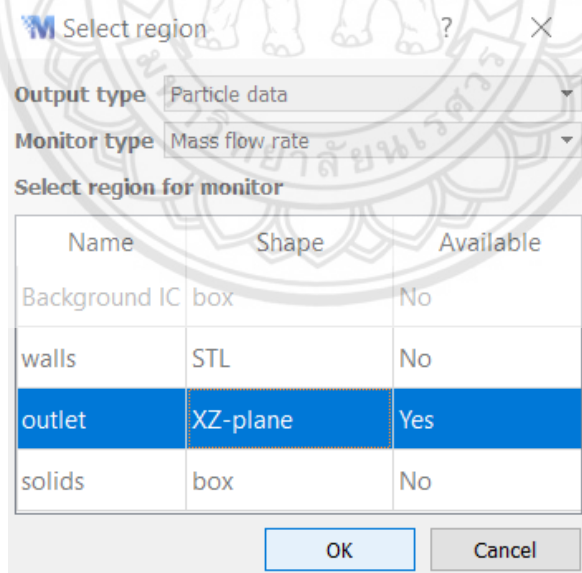
- ตั้งค่า VTK โดยกด + เพื่อเลือก Regions เป็น Background IC โดยกำหนดให้ output type เป็น Particle data โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การตั้งค่า VTK

3.2.9 Monitors

- กด + เพื่อเลือก Regions เป็น outlet โดยกำหนดให้ Output type เป็น Particle data และ Monitor type เป็น Mass flow rate โดยแสดงภาพหน้าจอการตั้งค่าดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การตั้งค่า Monitor

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

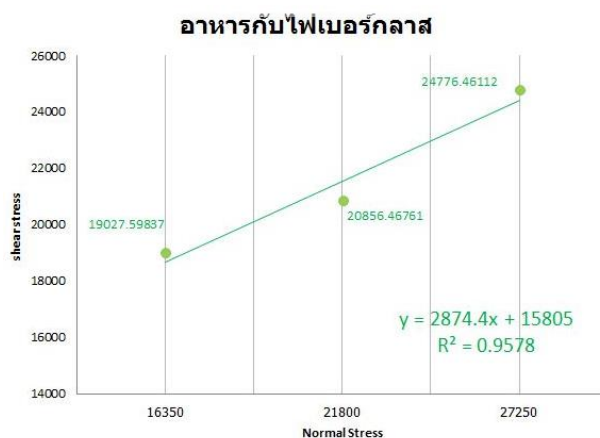
4.1 ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์

4.1.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรง

ในการทดสอบแรงเฉือนตรงกำหนดให้ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม ใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 6 8 และ 10 กิโลกรัม โดยการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ ใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 100 กรัม การทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส ใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 70 กรัม และการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส ใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 70 กรัม สามารถแสดงผลดังกราฟในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 โดยมีรายละเอียดของค่าผลทดสอบดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า C ของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า C ของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า C ของอาหารสัตว์กับเหล็ก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์

Load (kg)	Normal stress (N)	Shear stress	ค่า C (kN/m ²)	ค่า Ø องศา
6	16,350	29,158.3935	24.7	33.98
8	21,800	30,484.58163		
10	27,250	36,505.01738		

จากตารางที่ 4.1 เป็นตารางของผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ โดยได้ค่า C เท่ากับ 24.7 kN/m³ และ มุมเสียดทานเท่ากับ 33.98

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส

Load (kg)	Normal stress (N)	Shear stress (N/m ²)	ค่า C (kN/m ²)	ค่า Ø องศา
6	16,350	19,027.5984	15.8	27.8
8	21,800	20,856.4676		
10	27,250	24,776.4611		

จากตารางที่ 4.2 เป็นตารางของผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส โดยได้ค่า C เท่ากับ 15.8 kN/m^3 และ มุมเสียดทานเท่ากับ 27.8

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับเหล็ก

Load (kg)	Normal stress (N)	Shear stress (N/m^2)	ค่า C (kN/m^2)	ค่า ϕ องศา
6	16,350	14,232.53106	12.2	21.16
8	21,800	16,619.77545		
10	27,250	18,451.81884		

จากตารางที่ 4.3 เป็นตารางของผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส โดยได้ค่า C เท่ากับ 12.2 kN/m^3 และ มุมเสียดทานเท่ากับ 21.16

4.1.2 ผลการทดสอบ Sieve test

ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 โดยเป็นการแสดงค่าการหาขนาดมวลคละของอาหารสัตว์ป่น โดยทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และได้ค่าเฉลี่ยการตกค้างบนตะแกรงแต่ละเบอร์ คือ $3/8 = 0$ กรัม, $4 = 0$ กรัม, $10 = 2.816$ กรัม, $40 = 136.64$ กรัม, $100 = 133.11$ กรัม และ ภาดรอง = 26.91 กรัม

ตารางที่ 4.4 ผลของการทดสอบ Sieve test

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย (g)
Sieve No.	Material retain (g)	Sieve No.	Material retain (g)	Sieve No.	Material retain (g)	
3/8	0	3/8	0	3/8	0	0
4	0	4	0	4	0	0
10	2.03	10	3.37	10	3.05	2.816
40	137.65	40	135.78	40	136.49	136.64
100	133.17	100	132.17	100	133.98	133.11
ภาดรอง	27.13	ภาดรอง	27.46	ภาดรอง	26.13	26.91
รวม	299.98	รวม	298.78	รวม	299.65	299.476

เมื่อได้ผลทดลองมาแล้ว นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยการตกค้างในแต่ละชั้น โดยที่ใช้อาหารสัตว์ในการทดลองในแต่ละครั้ง 300 กรัม จากการทดลองด้วยตะแกรงมาตรฐานจำนวน 3 ครั้ง พบว่าขนาดเฉลี่ยของอาหารสัตว์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.15-2 mm และหาจำนวนการตกค้างเฉลี่ยของอาหารสัตว์บนตะแกรงมีค่า 0.99824 ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นการตกค้าง

Sieve No.	Sieve Size (d_{pi}) (mm)	Weight Retain (g)	Retain (x_i)
3/8	9.5	0	0
4	4.75	0	0
10	2	2.816	0.00938
40	0.425	136.64	0.45546
100	0.150	133.11	0.4437
ถาดรอง	-	26.91	0.0897
	รวม	299.476	0.99824

จากตารางที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นการตกค้างของอาหารสัตว์บนตะแกรงแต่ละเบอร์ คือ $3/8 = 0\%$, $4 = 0\%$, $10 = 2.816\%$, $40 = 136.64\%$, $100 = 133.11\%$ และ ถาดรอง = 26.91%

เมื่อได้จำนวนผลเฉลี่ยการตกค้างบนตะแกรง จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอาหารสัตว์ตามวิธีการของ Sauter ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.6 และจากผลที่ได้จากตารางเมื่อนำไปแทนค่าลงใน สมการที่ 2 (Sauter Mean Diameter) ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอาหารสัตว์ที่ได้มีค่า d_{sm} เท่ากับ 0.2478 mm

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์หาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอาหารสัตว์

d_{pi} (mm)	9.50	4.75	2	0.425	0.15	รวม
X_i	0	0	0.00938	0.45546	0.4437	
(X_i/d_{pi})	0	0	0.0047	1.072	2.958	4.0347

4.1.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น

จากการทดสอบหาค่าความหนาแน่น ได้ค่าความหนาแน่นที่ได้มาจากการทดสอบเท่ากับ 1,778 kg/m³

4.1.4 ผลการทดสอบความชื้น

ในการทดสอบความชื้นของอาหารสัตว์ป่น ใช้เวลาจัดเก็บ 2 ชั่วโมง และปริมาณอาหารที่ใช้ในการทดสอบ 3 กรัม และได้ค่าการทดสอบดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลวัดความชื้นอาหารสัตว์

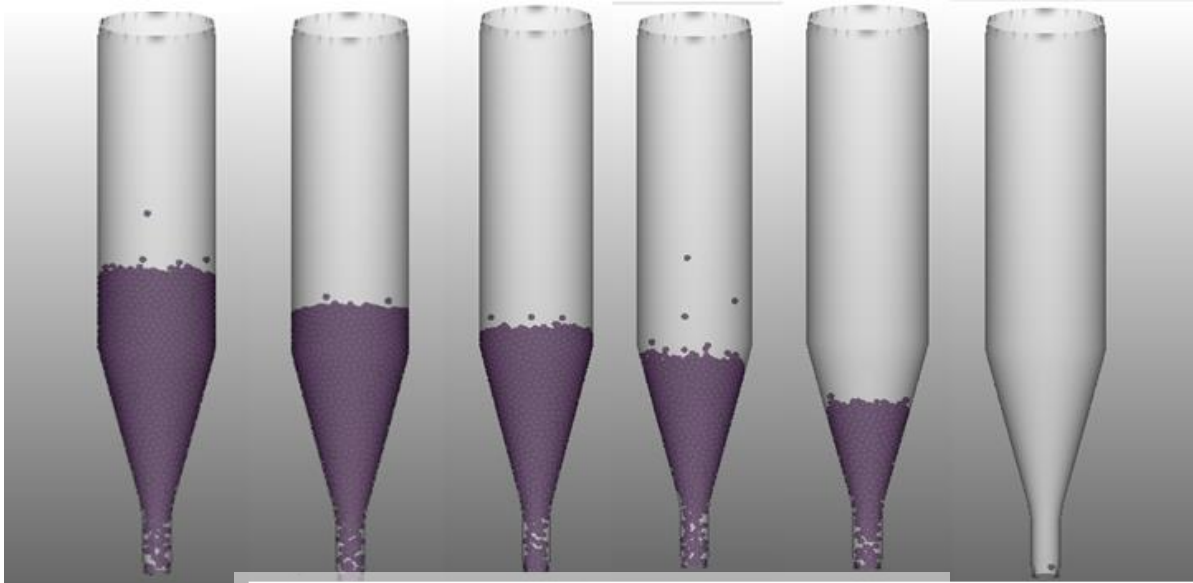
ครั้งที่	เวลาทดสอบ (นาท)	ความชื้น (%)
1	6.15	11.42
2	6.15	10.61
3	6	10.29
	เฉลี่ย	10.77

จากตารางที่ 4.7 แสดงผลของการวัดความชื้นของอาหารสัตว์ป่นที่เวลาจัดเก็บ 2 ชั่วโมง ได้ค่าเฉลี่ยของความชื้นเท่ากับ 10.77% ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการวัดความชื้นของวัสดุที่เวลาจัดเก็บ 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีค่าเฉลี่ยของความชื้นเป็น 10.93% และ 10.07% ตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บไม่ได้ส่งผลให้ค่าความชื้นของวัสดุเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงเลือกวัสดุที่จัดเก็บที่เวลา 2 ชั่วโมงมาใช้ในการทดสอบเพื่อหลีกเลี่ยงภาวะทางกายภาพ และจำลองการไหลของวัสดุต่อไป

4.2 ผลการจำลองการไหลของอาหารสัตว์

ผลการจำลองการไหลของอาหารสัตว์ในไซโลย่ขนาด 52 เท่า จากขนาดจริง โดยการใช้โปรแกรม MFIX ได้แสดงผลของการไหลในรูปแบบของวิดีโอการเคลื่อนไหวของ Particle ภายในถังไซโล แล้วนำค่าไปแสดงผลในโปรแกรม Paraview โดยจะได้ค่าความเร็ว (Velocity) และความหนาแน่น แล้วนำไปคำนวณตามสมการ (15) เพื่อแสดงผลของอัตราการไหล (\dot{m})

ในการแสดงผลในรูปแบบวิดีโอ ได้ทำการแสดงผลเป็นช่วงเวลาที่ Particle ไหลออกจันทันทีจากไซโล ซึ่งได้แสดงผลของการไหลดังรูป 4.4



รูปที่ 4.4 การไหลของ Particle

ในการคำนวณอัตราการไหล ผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม M-FIX มาแสดงผลในโปรแกรม Paraview แล้วได้ค่าความเร็วตามแกน โดยมีค่าในแกน $x=0.2293$ m/s, $y=-0.3856$ m/s และ $z=0.2191$ m/s ดังรูปที่ 4.5 ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่ทางออกมีค่าเท่ากับ $88,900$ kg/m³ ดังรูปที่ 4.6

Name	Data Type	Data Ranges
bin_extents	double	[337.727, 338.627]
bin_values	int	[0, 50]
Density_total	double	[0, 88900]
Density_average	double	[0, 1778]
Diameter_total	double	[0, 0.1239]
Diameter_average	double	[0, 0.002478]
GlyphVector_total	double	[0, 11.4681], [-19.2826, 0], [0, 10.9591]
GlyphVector_average	double	[0, 0.229362], [-0.385653, 0], [0, 0.219183]
Normals_total	double	[0, 0], [0, 0], [0, 0]
Normals_average	double	[0, 0], [0, 0], [0, 0]

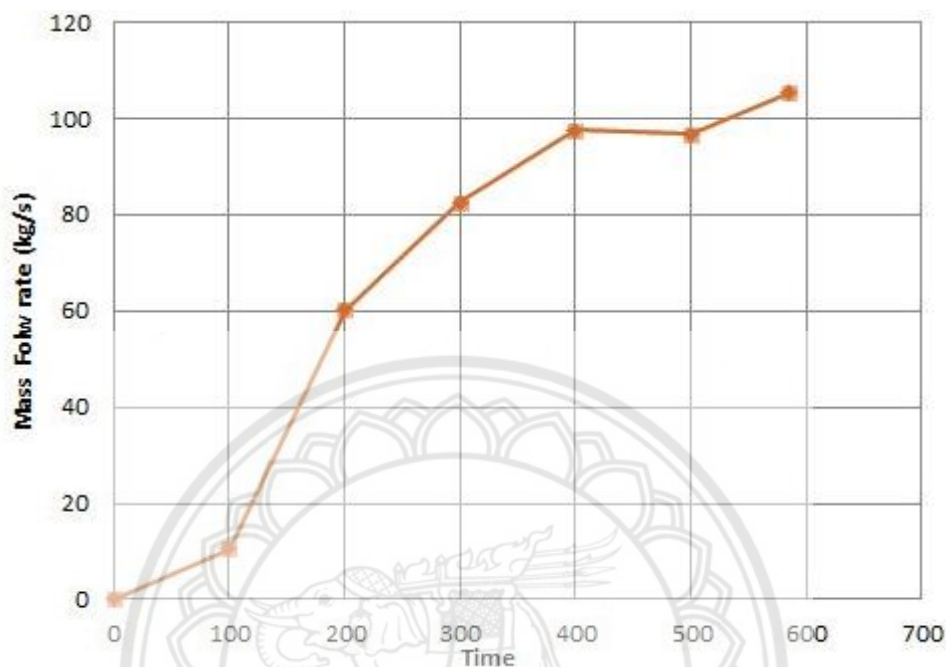
Bounds
X range: Not available

รูปที่ 4.5 Density ที่นำไปใช้ในการคำนวณ

Point ID	Diameter	Velocity	ngular_veloci	Orientation	Density	coordinates
0 0	0.002478	0.229362 -0.385653 0.219183	337.677...	0.807682...	1778	0.00200095...

รูปที่ 4.6 Velocity ที่นำไปใช้ในการคำนวณ

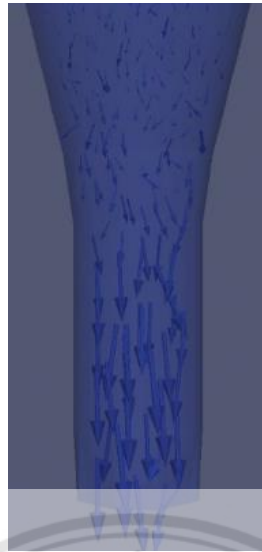
จากนั้นนำค่าความหนาแน่น และค่าความเร็ว ที่ได้มาพิจารณาหาอัตราการไหลของอาหารสัตว์ป่นที่ทางออกของไซโล จากความเร็วที่ทางออกของไซโลที่ได้จากโปรแกรม MFIX พบว่าอัตราการไหลของอาหารสัตว์ป่นในไซโลมีค่าเท่ากับ 105.47 kg/s



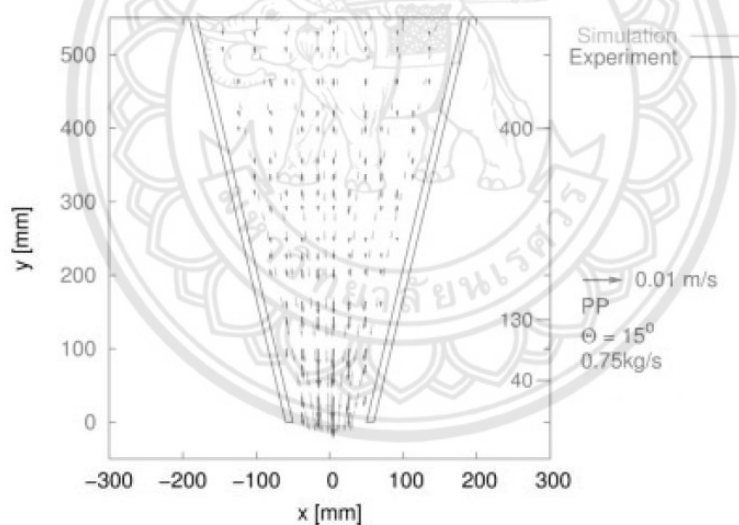
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอัตราการไหลที่ทางออก

จากวิธีการคำนวณข้างต้นสามารถหาค่าอัตราการไหลที่เวลาต่างๆได้ โดยแสดงค่าในรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงอัตราการไหลที่ทางออกต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป และพบว่าการไหลของอนุภาคเป็นเวลา 585 วินาที ที่ซึ่งในช่วงแรกอัตราการไหลจะมีค่าสูงขึ้นด้วยอัตราการเพิ่มที่มีค่าสูง จนกระทั่งในช่วงเวลาที่ 400 วินาที อัตราการเพิ่มมีค่าลดลง เนื่องจากในระหว่างกระบวนการปล่อยอาหารสัตว์ป่นออกจากภายในไซโลมีการชนกันระหว่าง particle กับ particle ทำให้เกิดการไหลอย่างไม่เป็นอิสระและเกิดการกีดกันของ particle เป็นจำนวนมากในทางออก ซึ่งเห็นได้จากความหนาแน่นของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น โดยพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้เกิดการติดขัดของวัสดุในระหว่างกระบวนการปล่อยออกทำให้การไหลช้าลงเป็นบางช่วง ดังเห็นได้จากผลการจำลองพฤติกรรมไหลในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงค่าเวกเตอร์ของความเร็ของอนุภาคในบริเวณที่ทางออกของไซโล

จากผลการจำลองการไหลในรูปที่ 4.4 และโปรไฟล์ความเร็วในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการปล่อยวัสดุออกจากไซลอนั้นมีความสอดคล้องกับรูปแบบการไหลแบบท่อระบาย ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้รับจากโรงงานผลิตอาหารสัตว์



รูปที่ 4.8 เวกเตอร์ความเร็วของ particle ที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการจำลองและการทดลองโปรไฟล์ความเร็วในฮอปเปอร์ระหว่างการปล่อย [21]

และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองด้วย DEM ผู้วิจัยจึงนำผลการจำลองที่ได้รับมา เปรียบเทียบกับการจำลองการไหลของ Jens-Uwe Bohrsen, et al. [21] ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าลักษณะของค่าเวกเตอร์ความเร็วที่ทางออกมีความสอดคล้องกับผลโปรไฟล์ความเร็วของการจำลองการไหลของ Jens-Uwe Bohrsen, et al. [21] ซึ่งทำการศึกษากการไหลของของแข็งด้วยการทดลองการไหลจริงในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหลด้วย DEM และจากผลการศึกษานี้ได้สรุปว่าแบบจำลอง

DEM มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองพฤติกรรมการไหลภายในของวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ด

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าผลลักษณะการไหลของอาหารสัตว์ที่ได้จากแบบจำลองนี้มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้เป็นแบบจำลองเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลภายในได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่แม่นยำมากยิ่งขึ้นจำเป็นต้องกำหนดลักษณะของ Particle ให้มีความใกล้เคียงกับวัสดุอาหารสัตว์จริงมากที่สุด รวมถึงต้องทำการทดลองการไหลด้วยชุดทดลองการไหลด้วยรูปแบบอนุภาคของอาหารสัตว์ชนิดเดียวกับที่ทำการจำลองด้วย DEM เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลที่ได้จากแบบจำลองและการทดลอง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงการนี้เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์ป่น ได้แก่ มุมเสียดทานภายใน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอาหารสัตว์ป่น และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอาหารสัตว์ป่นและผนัง โดยการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear tester) ความหนาแน่น ขนาดเฉลี่ย และความชื้น ร่วมกับการศึกษาลักษณะการไหลของอาหารสัตว์ป่นในไซโลระหว่างกระบวนการปล่อยออกด้วยระเบียบวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการไหลของอาหารสัตว์ป่นภายในไซโล และบอกถึงข้อเสนอแนะการนำเอาโครงการนี้ไปศึกษาต่อ ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 จากผลการทดลองลักษณะทางกายภาพของอาหารสัตว์ พบว่า

- อาหารสัตว์ป่นมีความหนาแน่นเท่ากับ 1778 kg/m^3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.2478 มิลลิเมตร และมีความชื้นเท่ากับ 10.77%
- อาหารสัตว์ป่นกับอาหารสัตว์ป่นมี มุมเสียดทานภายใน 33.98 องศา แรงยึดเหนี่ยว 24.7 kN/m^2
- อาหารสัตว์ป่นกับไฟเบอร์กลาสมี มุมเสียดทานภายใน 27.8 องศา แรงยึดเหนี่ยว 15.8 kN/m^2
- อาหารสัตว์ป่นกับเหล็กมี มุมเสียดทานภายใน 21.16 องศา แรงยึดเหนี่ยว 12.2 kN/m^2

5.1.2 จากผลการจำลองการไหลในระหว่างกระบวนการปล่อยออกของวัสดุอาหารสัตว์ป่น พบว่าการไหลของอนุภาคเป็นเวลา 585 วินาที ที่ซึ่งในช่วงแรกอัตราการไหลจะมีค่าสูงขึ้นด้วยอัตราการเพิ่มที่มีค่าสูง จนกระทั่งในช่วงเวลาที่ 400 วินาที อัตราการเพิ่มมีค่าลดลง เนื่องจากการชนกันระหว่าง particle กับ particle ทำให้เกิดการไหลอย่างไม่เป็นอิสระและเกิดการกีดกันของ particle เป็นจำนวนมากซึ่งเห็นได้จากความหนาแน่นภายในไซโลที่เพิ่มขึ้น โดยพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้เกิดการติดขัดของวัสดุในระหว่างกระบวนการปล่อยออก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 พิจารณาข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ที่จะใช้ในการศึกษาโปรแกรม เพื่อให้สามารถรับรองการทำงาน of โปรแกรมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.2.2 พิจารณาใช้โปรแกรม DEM โปรแกรมอื่นที่มีค่าขอบเขตที่สูงขึ้น สามารถจำลองได้ในขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดไซโลจริงมากขึ้น

5.2.3 พิจารณาทดลองการไหลด้วยชุดทดลองการไหลด้วยรูปแบบอนุภาคของอาหารสัตว์ชนิดเดียวกับที่ทำการจำลองด้วย DEM เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลที่ได้จากแบบจำลองและการทดลอง

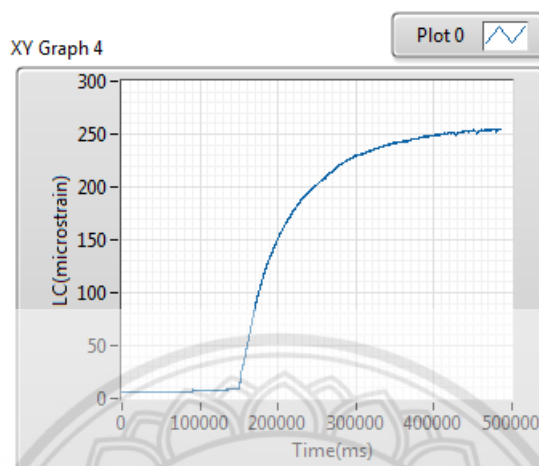


ภาคผนวก

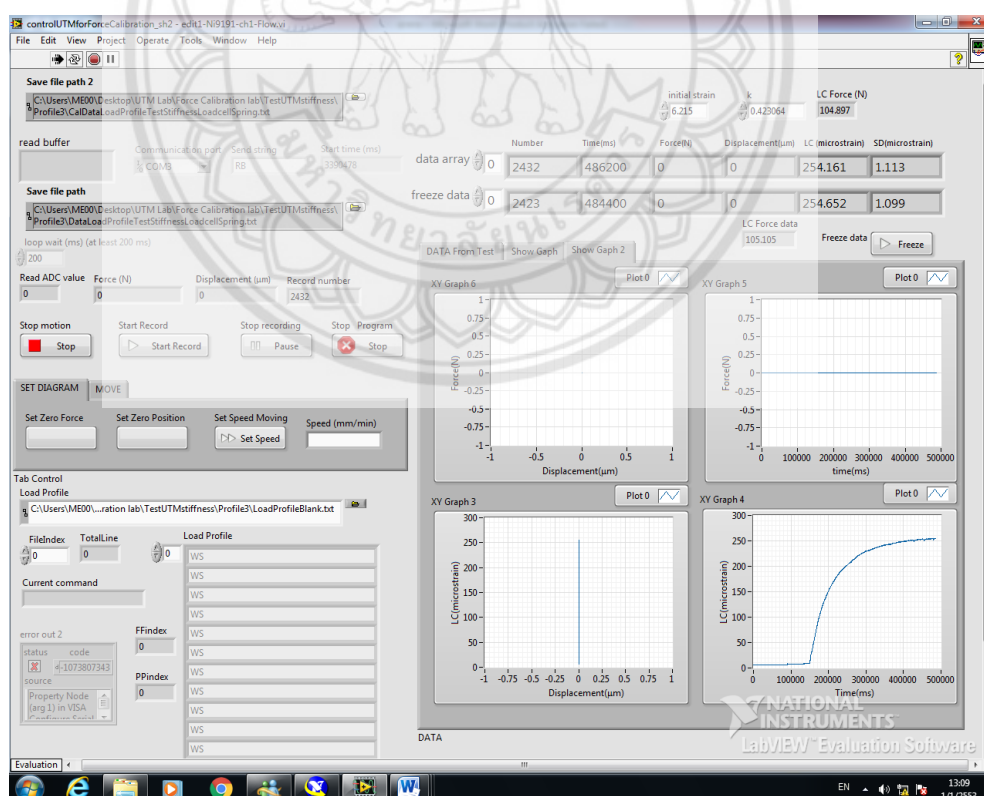
การทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์

โดย มวลอาหารสัตว์ที่ใช้เท่ากับ 100 กรัม ,Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 6

โดยจะได้ ค่าเริ่มต้น เท่ากับ 6.215 ค่าสูงสุด เท่ากับ 254.334



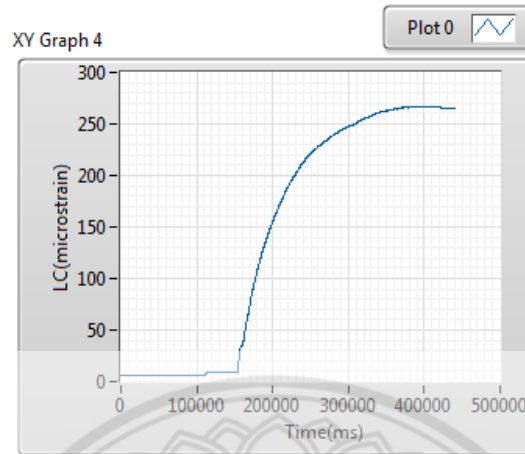
รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 6



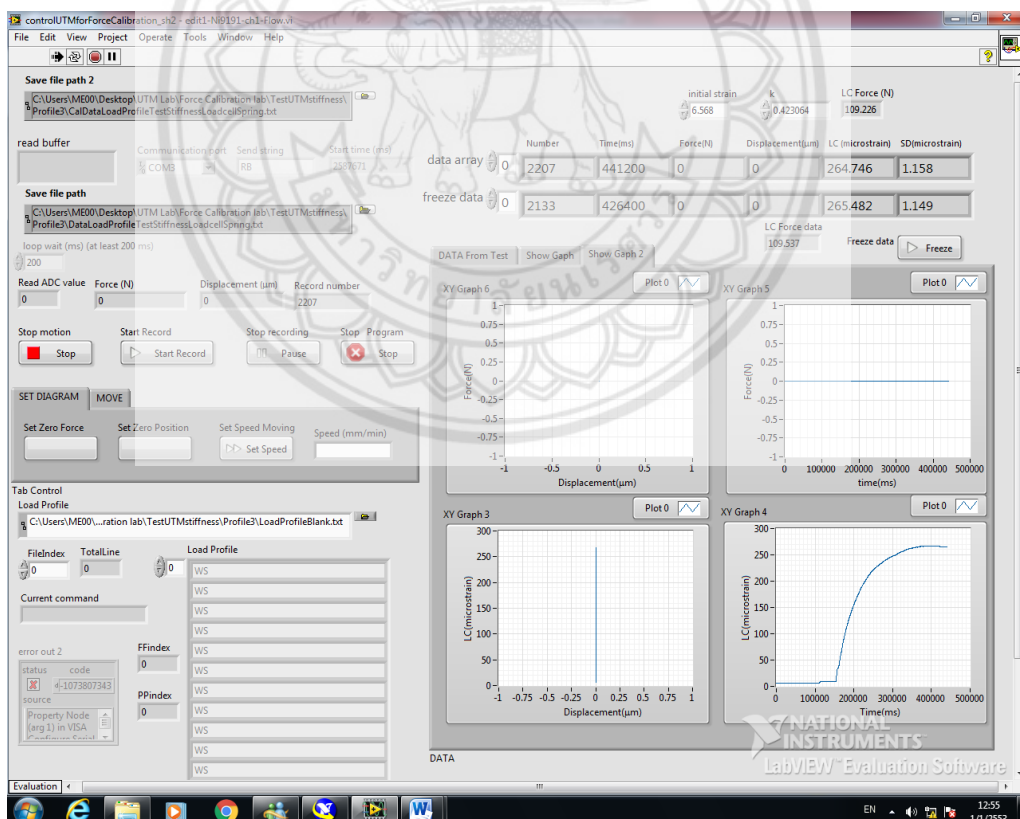
รูปที่ ก.2 หน้าต่างโปรแกรม Lab View แสดงผลอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 6

การทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์

โดย มวลอาหารสัตว์ที่ใช้เท่ากับ 100 กรัม ,Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8 โดยจะได้ ค่าเริ่มต้น เท่ากับ 6.568 ค่าสูงสุด เท่ากับ 265.972



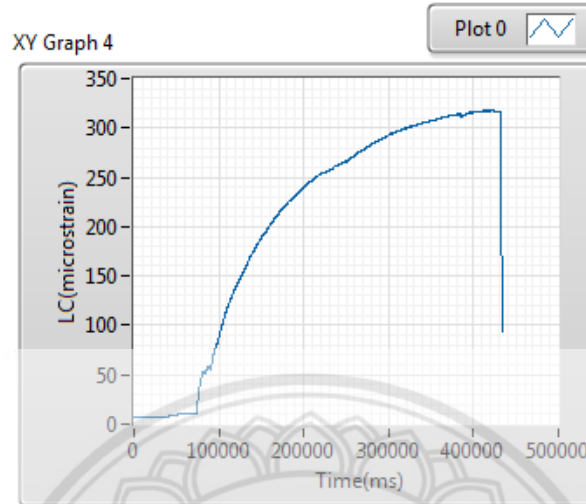
รูปที่ ก.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8



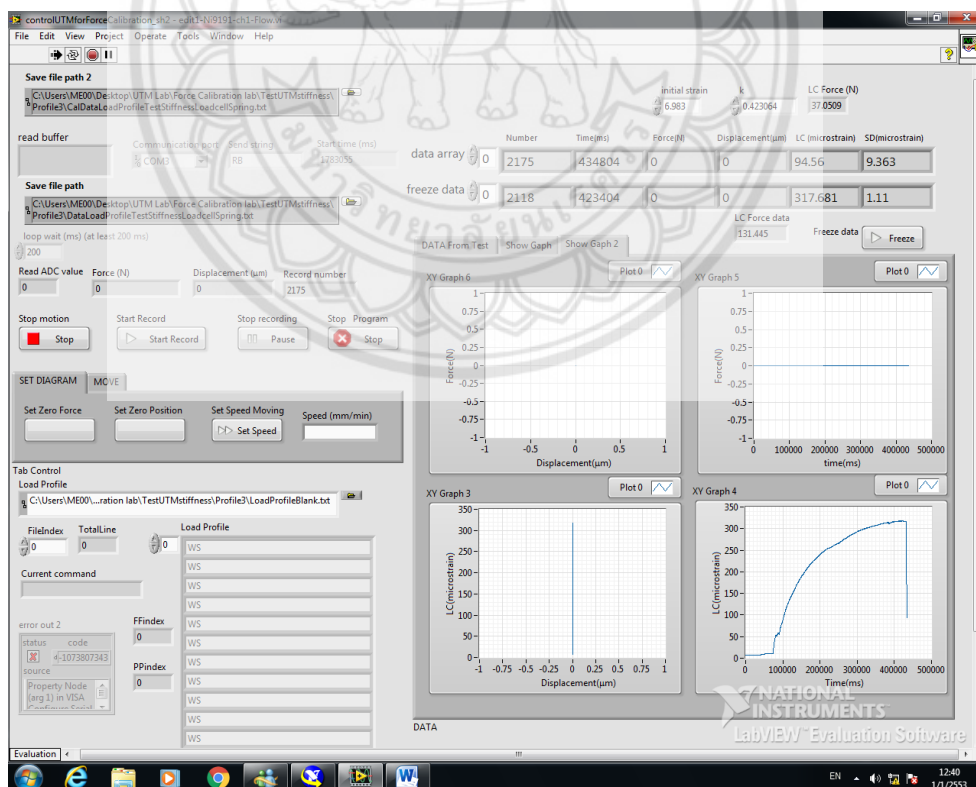
รูปที่ ก.4 หน้าต่างโปรแกรม Lab View แสดงผลอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8

การทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์

โดย มวลอาหารสัตว์ที่ใช้เท่ากับ 100 กรัม ,Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10 โดยจะได้ ค่าเริ่มต้น เท่ากับ 6.983 ค่าสูงสุด เท่ากับ 317.617



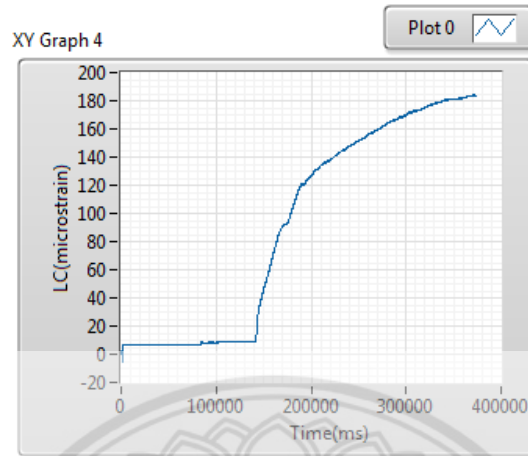
รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10



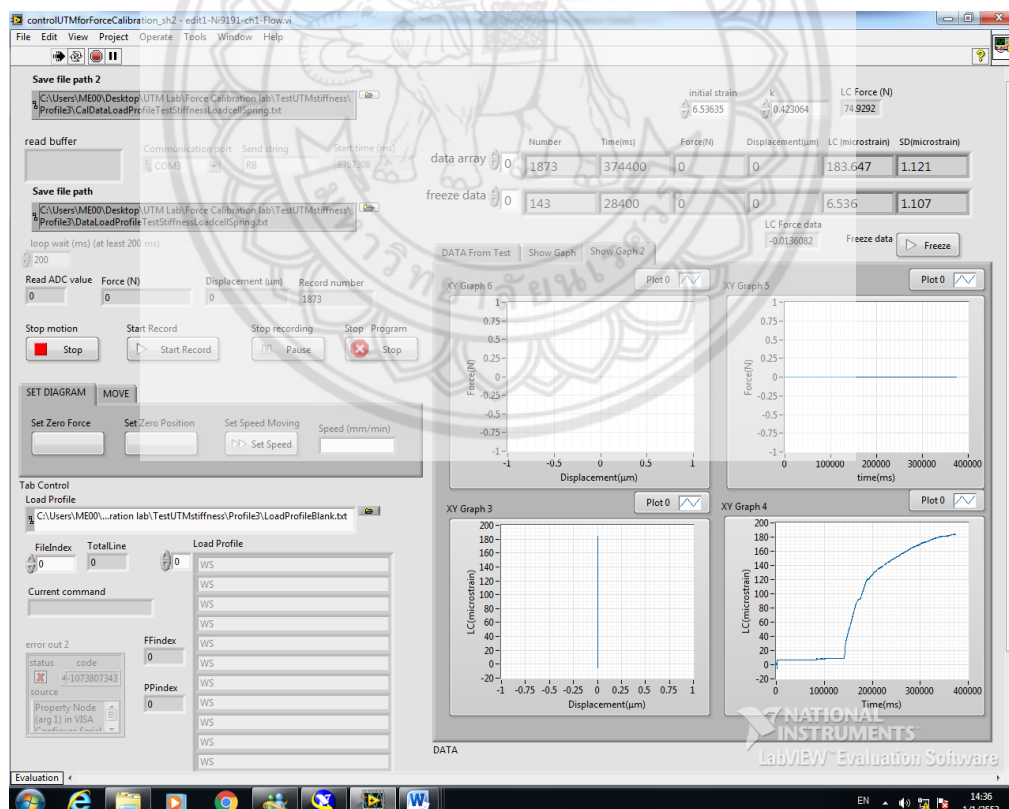
รูปที่ ก.6 หน้าต่างโปรแกรม Lab View แสดงผลอาหารสัตว์กับอาหารสัตว์ ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10

ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับเหล็ก

โดย มวลอาหารสัตว์ที่ใช้เท่ากับ 70 กรัม, Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8 โดยจะได้ ค่าเริ่มต้น เท่ากับ 6.536 ค่าสูงสุด เท่ากับ 184.011



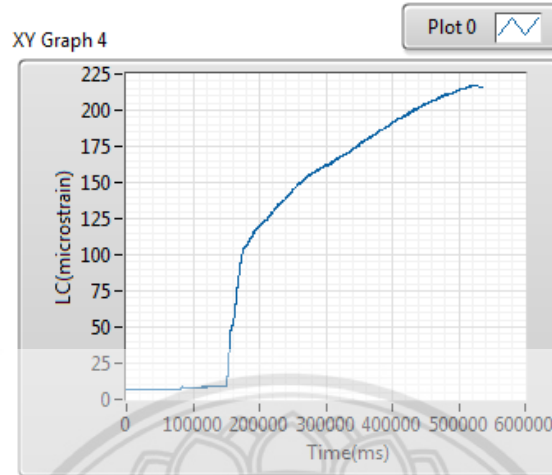
รูปที่ ก.9 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างอาหารสัตว์กับเหล็ก ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8



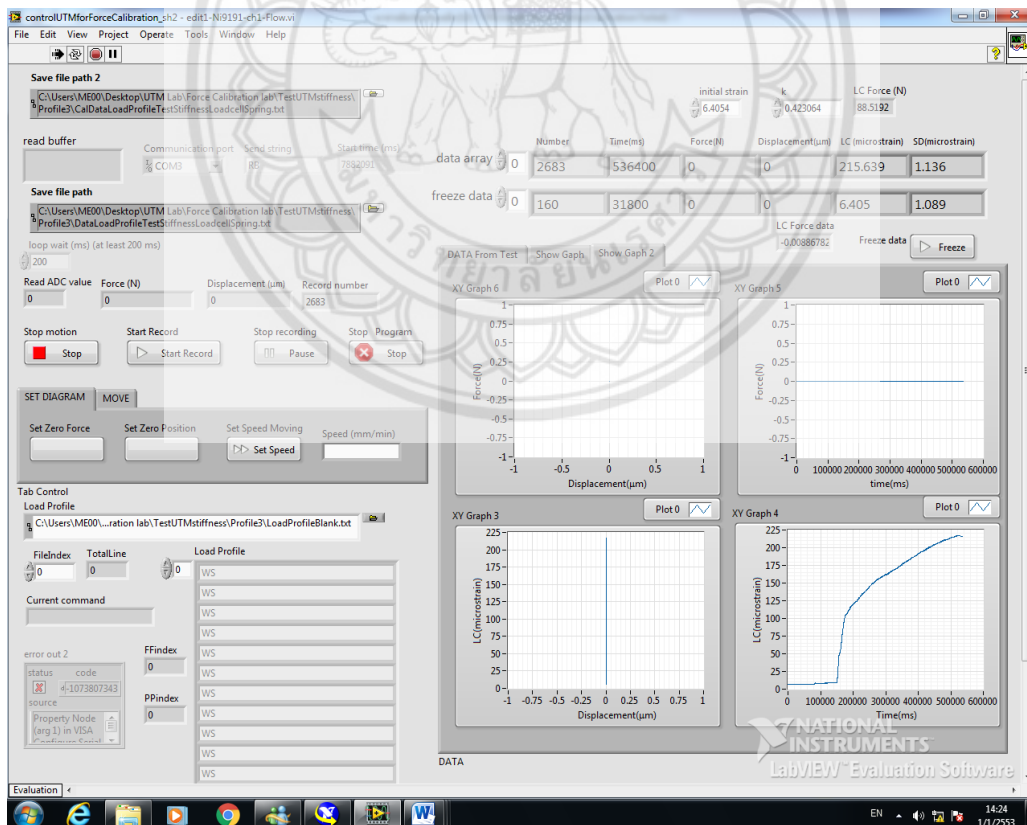
รูปที่ ก.10 หน้าต่างโปรแกรม Lab View แสดงผลอาหารสัตว์กับเหล็ก ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8

ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับเหล็ก

โดย มวลอาหารสัตว์ที่ใช้เท่ากับ 70 กรัม, Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10 โดยจะได้ ค่าเริ่มต้น เท่ากับ 6.4054 ค่าสูงสุด เท่ากับ 216.838



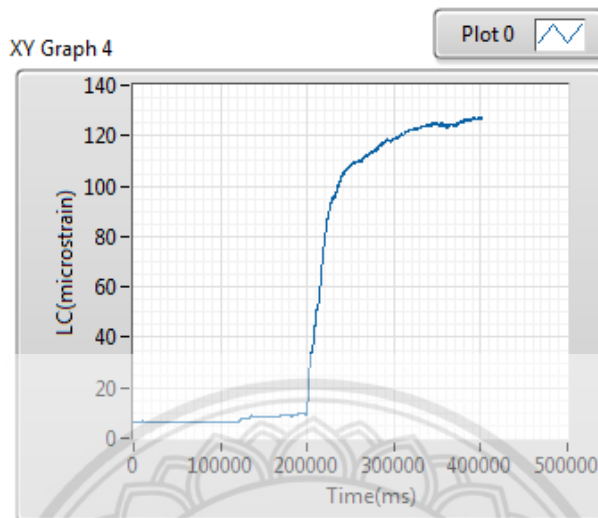
รูปที่ ก.11 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างอาหารสัตว์กับเหล็ก ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10



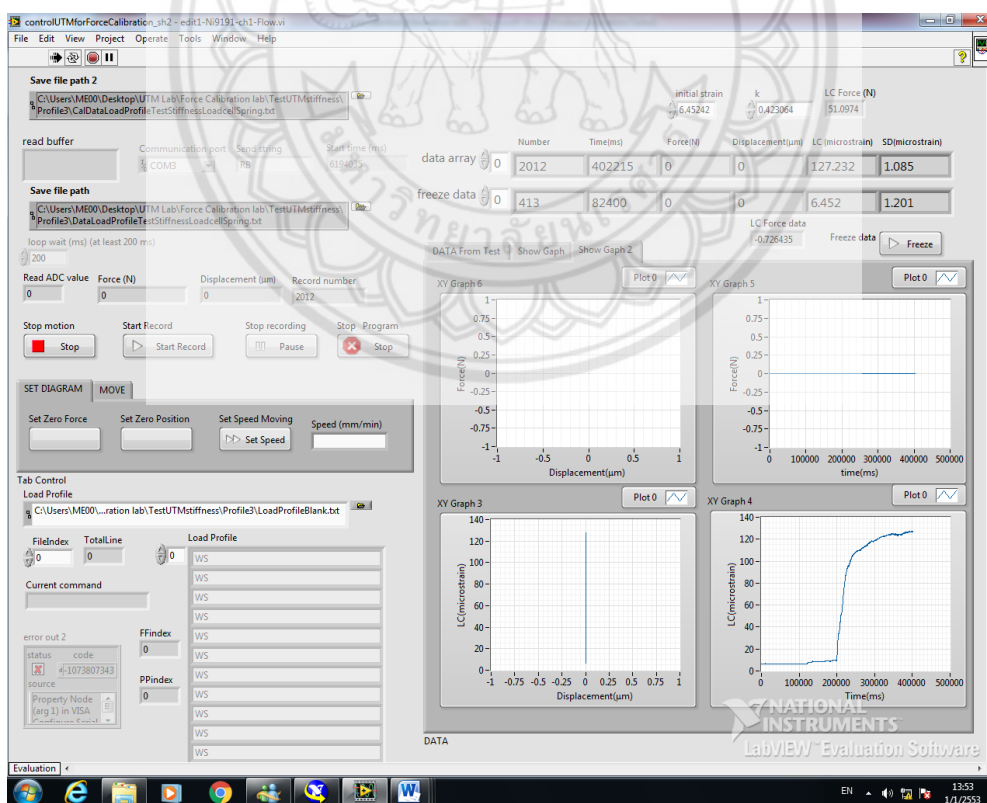
รูปที่ ก.12 หน้าต่างโปรแกรม Lab View แสดงผลอาหารสัตว์กับเหล็ก ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10

ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส

โดย มวลอาหารสัตว์ที่ใช้เท่ากับ 70 กรัม, Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 6 โดยจะได้ ค่าเริ่มต้น เท่ากับ 6.215 ค่าสูงสุด เท่ากับ 127.562



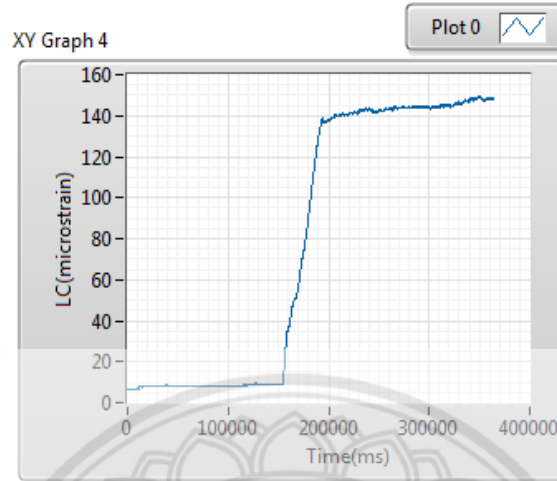
รูปที่ ก.13 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 6



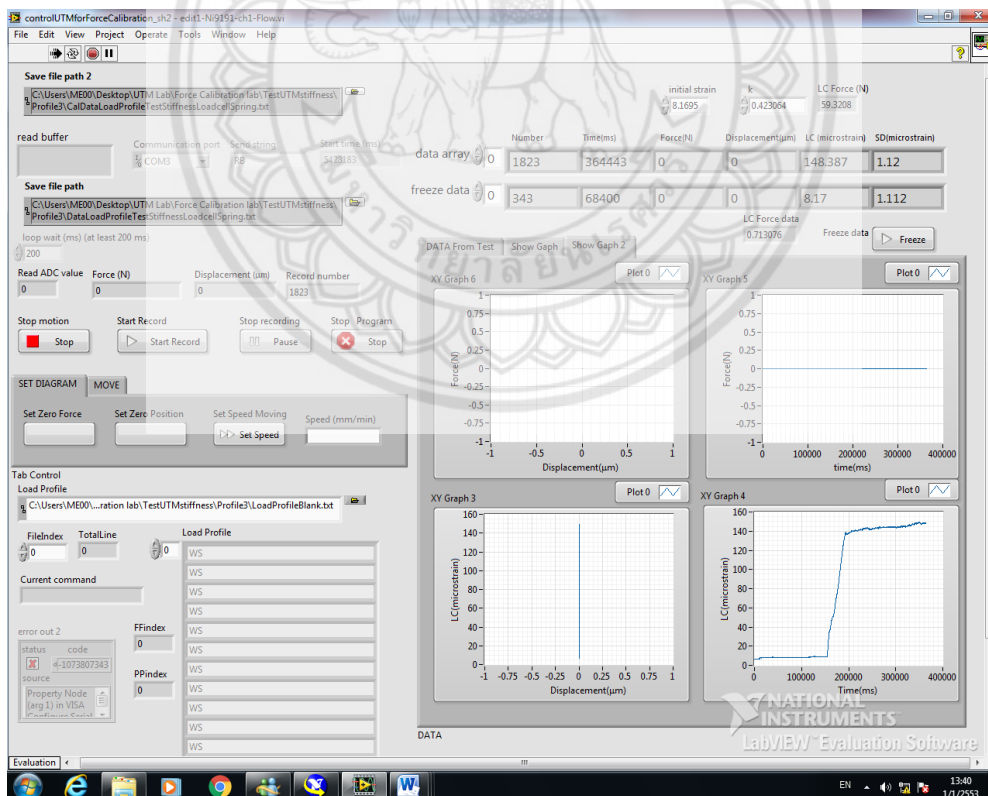
รูปที่ ก.14 หน้าต่างโปรแกรม Lab View แสดงผลอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 6

ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส

โดย มวลอาหารสัตว์ที่ใช้เท่ากับ 70 กรัม, Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8 โดยจะได้ ค่าเริ่มต้น เท่ากับ 8.1695 ค่าสูงสุด เท่ากับ 149.073



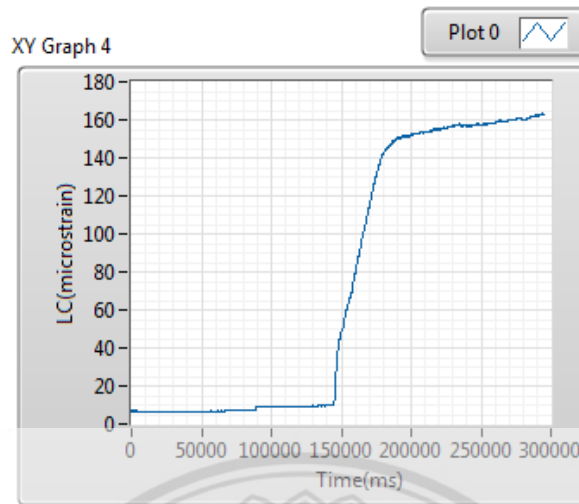
รูปที่ ก.15 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8



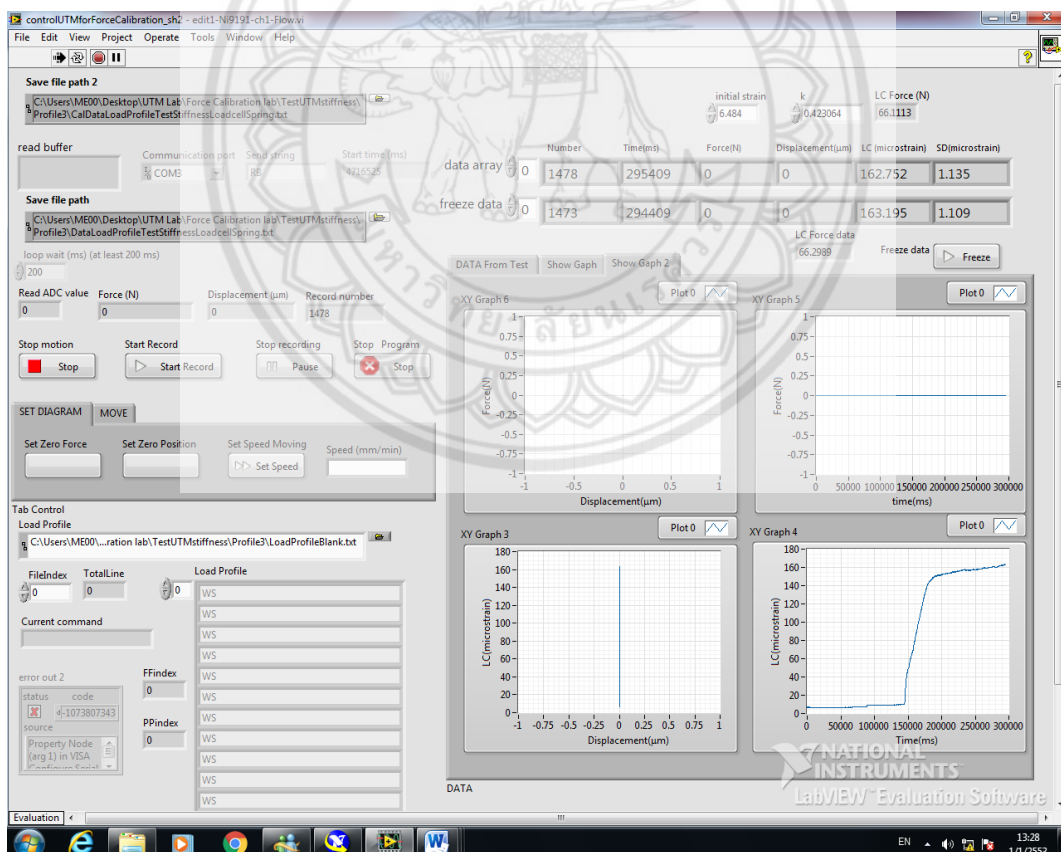
รูปที่ ก.16 หน้าต่างโปรแกรม Lab View แสดงผลอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 8

ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส

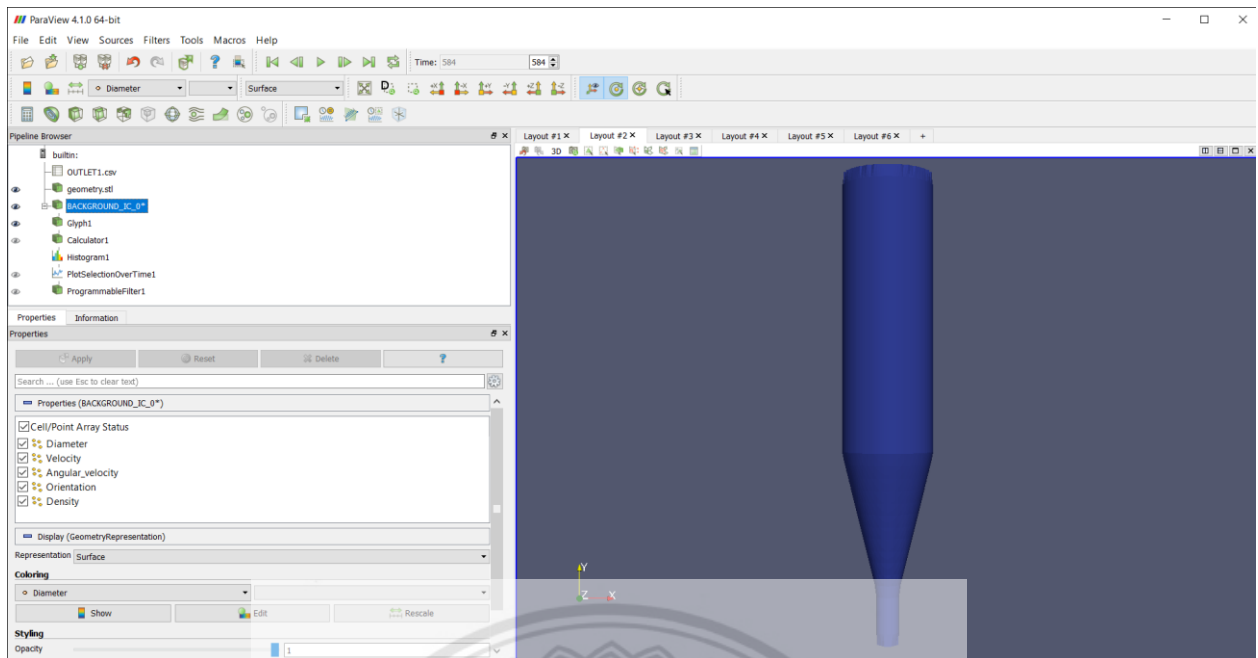
โดย มวลอาหารสัตว์ที่ใช้เท่ากับ 70 กรัม, Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10 โดยจะได้ ค่าเริ่มต้น เท่ากับ 6.484 ค่าสูงสุด เท่ากับ 163.497



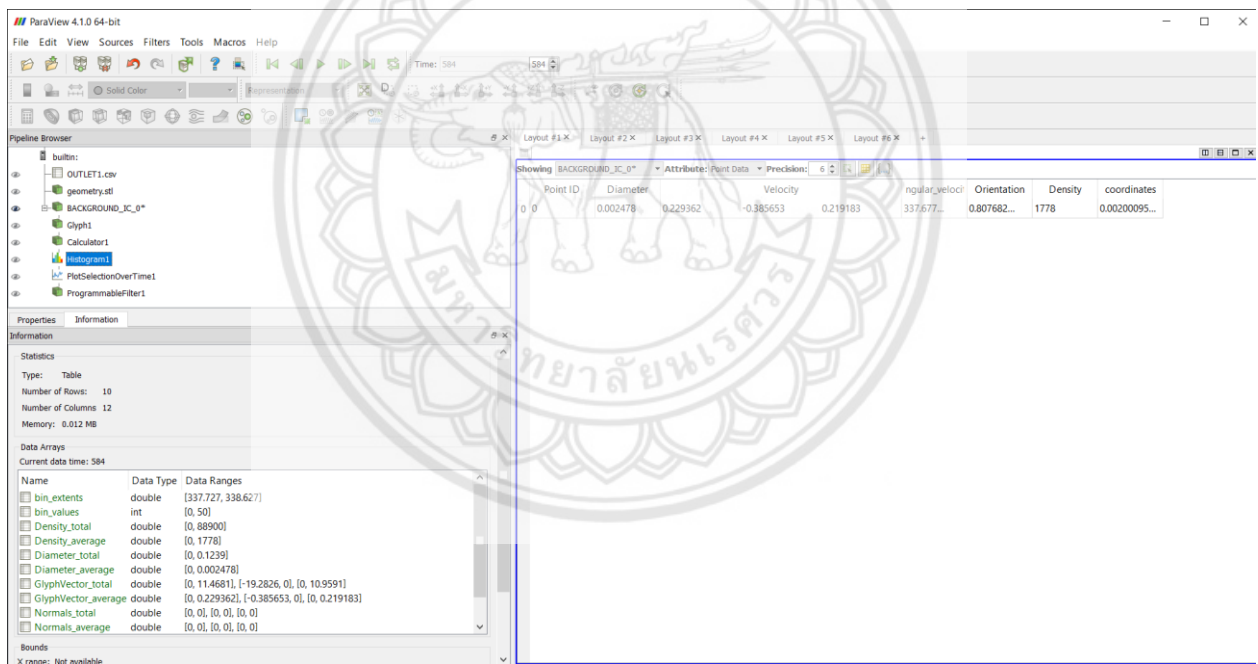
รูปที่ ก.17 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10



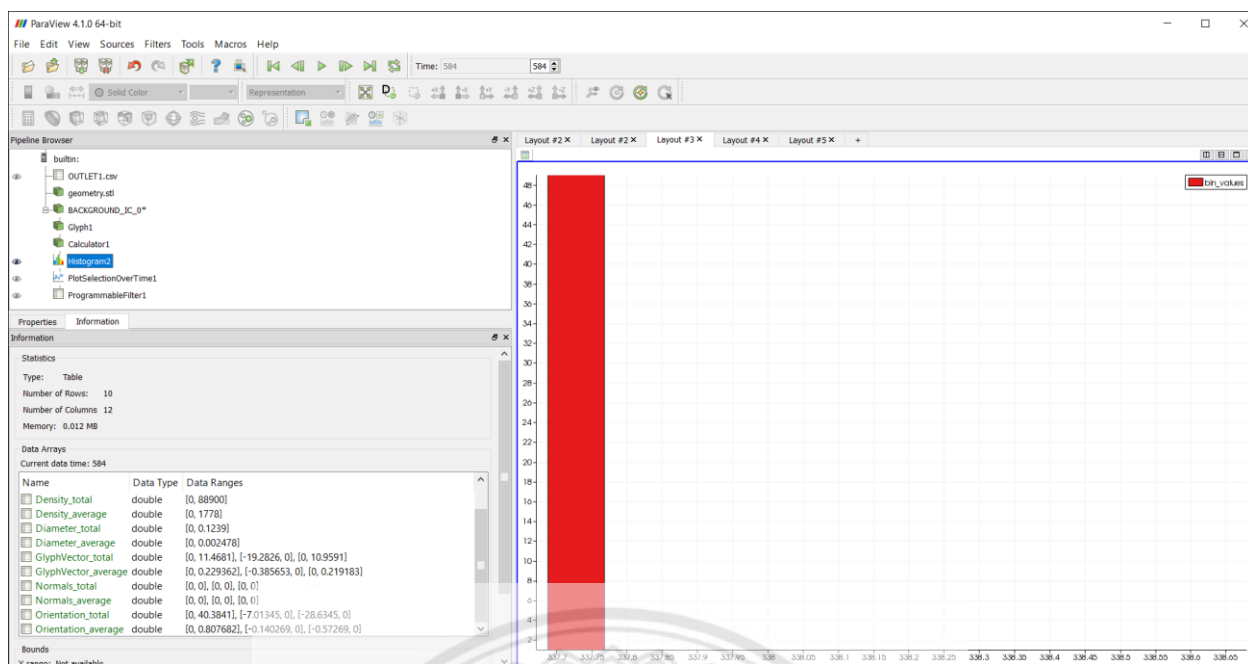
รูปที่ ก.18 หน้าต่างโปรแกรม Lab View แสดงผลอาหารสัตว์กับไฟเบอร์กลาส ที่ Consolidate load เท่ากับ 25 กิโลกรัม และ Load เท่ากับ 10



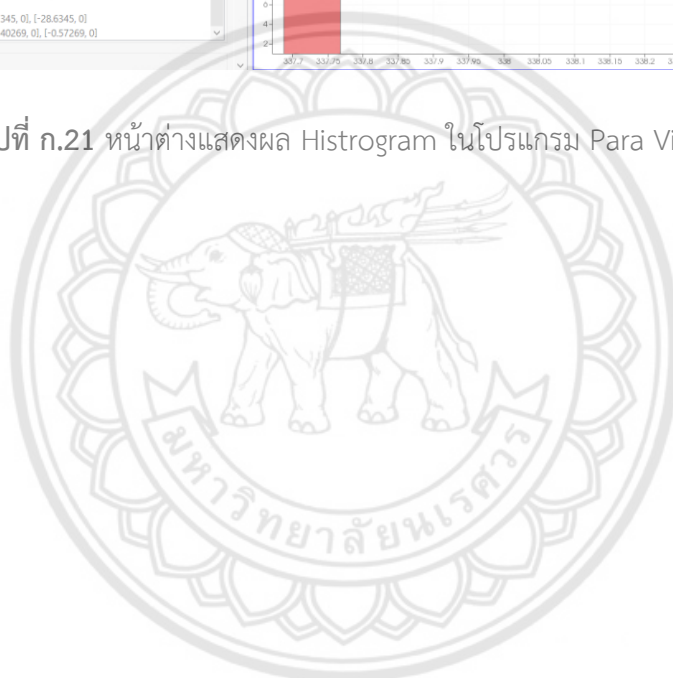
รูปที่ ก.19 หน้าต่างแสดงการ Input BACKGROUND ในโปรแกรม Para Viwe



รูปที่ ก.20 หน้าต่างแสดงผลจากการ Run BACKGROUND ในโปรแกรม Para Viwe



รูปที่ ก.21 หน้าต่างแสดงผล Histogram ในโปรแกรม Para Viwe



เอกสารอ้างอิง

1. สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย.(2562).ประชากรสัตว์ความต้องการใช้อาหารสัตว์.สืบค้นจาก <http://www.thaifeedmill.com/tabid/56/Default.aspx>
2. อาหารสัตว์ป่น.สืบค้นจาก <http://smartfeed.lnwshop.com/>
3. ASIAN SEAFOODS.(2559).ผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์น้ำ. สืบค้นจาก <https://www.irplus.in.th/Listed/ASIAN/aquatic.asp>
4. ppfpoultry.(2019).ไซโล [Silo].สืบค้นจาก <https://www.ppf-poultry.com/product/44502?Fbclid=IwAR18PJT6q3ZKrUz-L4YJoflnH2eywH4WRUXCVrX4Uyc1CtxELOgJ4u8nCE>
5. พันคำ ศรีอุทัย.(2537).การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยิบซัมในไซโล.วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
6. ธาชาย เหลืองวรานันท์ และ เสาวนันท์ เจียวุ่น.(2554).การศึกษาผลของความชื้นและสภาพแวดล้อมต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวและการอัดตัวของผงโลหะ.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. ตะวันฉาย ตุงคนาคกร.(2560).ผลของมุมฮอปเปอร์รูปสี่เหลี่ยมต่อการติดขัดของวัสดุเม็ด 2 มิติภายใต้การสั่นแนวตั้ง.วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการสอนวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
8. วาเรียม ช่วยจันทร์ และ สุทธิวัฒน์ ทองนาค.(2560).การศึกษาผลกระทบของสิ่งแทรกในไซโลฐานแบนเรียบ.มหาวิทยาลัยทักษิณ.
9. ปรีดา ปรากูมมาก.(2562).แบบจำลอง CFD-DEM สำหรับพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็ง ในระบบฟลูอิดส์เบดแบบต่อเนื่อง.ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
10. จิราภรณ์ แก้วขาว.(2550).การศึกษากลุ่มมวลรวมของคอลลอยด์แบบ 2 มิติ โดยการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีดิสกรีทเอลิเมนต์. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
11. Noppawanpanseekhae.(2558).ไซโล (SILO) คืออะไร.สืบค้นจาก <https://constructionasia.wordpress.com/2014/03/21/%E0%B9%84%E0%B8%8B%E0%B9%82%E0%B8%A5-silo-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3/>

12. Food Network Solution ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร.Silo/ไซโล.สืบค้นจาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0494/silo%E0%B9%84%E0%B8%8B%E0%B9%82%E0%B8%A5>
13. การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง.(Direct Shear test).ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
14. สรวุฒ จริตงาม.(2545).กลศาสตร์ของดิน.ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
15. <https://ngthai.com/science/25623/density/>
16. Rosentrater, K., Understanding distillers grains storage, handling, and flowability challenges. Vol. 1. 2006. 18-21.
17. Ganesan, V., Rosentrater, K. A., and Muthukumarappan, K., Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders – a review with implications for DDGS. Biosystems Engineering, 2008. 101(4): p. 425-435.
18. The constructor building ideas.from https://theconstructor.org/geotechnical/shear-strength-soil-direct-shear-test/3112/?fbclid=IwAR1dubEjX98XsV3Uw5df_Lcqs5lmAMRK1ivsFU41k-WgP6FzQ8XnCYrEcyw
19. PMB53 ADAM เครื่องวิเคราะห์ความชื้น.สืบค้นจาก https://www.spscience.com/16844617/pmb53-adam-เครื่องวิเคราะห์ความชื้น?fbclid=IwAR2SNli9TxwiiuxL10PqpCmq1-xl0JHvHTtnUDet18HYZSznpn_-4F1gTNo
20. Yin Wanga, Jin Y. Ooi.(2015) A Study of Granular Flow in A Conical Hopper Discharge Using Discrete and Continuum Approach
21. Jens-Uwe Bohrsen,Heinz,Anter,Michal Ostendorf and Jorg Schwdes.(2004).Silo Discharge: Measurement and Simulation of Dynamic Behavior in Bulk Solids