

## การออกแบบและพัฒนาไถดินดานสำหรับการทำงานในไร่อ้อย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF SUBSOILER  
FOR SUGARCANE FIELD**



**Kriengkrai Rayanasuk**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Agricultural and Food Engineering**

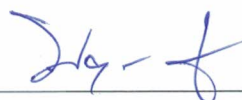
**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2017**

## การออกแบบและพัฒนาไถดินดานสำหรับการทำงานในไร่อ้อย

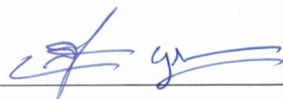
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. พงษ์ศักดิ์ จิตยแสน)

ประธานกรรมการ



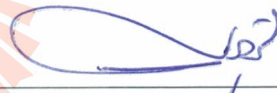
(อ. ดร. สามารถ บุญอาจ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(ผศ. ดร. สุภกิตต์ สายสุนทร)

กรรมการ



(อ. ดร. ประภากรณ์ แสงวิจิตร)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล





(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เกรียงไกร ราชณะสุข : การออกแบบและพัฒนาไถดินดานสำหรับการทำงานไร่อ้อย  
(DESIGN AND DEVELOPMENT OF SUBSOILER FOR SUGARCANE FIELD)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ, 144 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลอง ออกแบบ พัฒนา สร้าง ทดสอบ และ ประเมินผลไถดินดานสำหรับการทำงานไร่อ้อย ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งเป็น 8 ขั้นตอนดังนี้ คือ 1) ศึกษารูปทรงขาไถดินดาน 2) หาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร 3) สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล 4) ออกแบบ และสร้างขาไถดินดาน 5) วิเคราะห์ความแข็งแรงของไถดินดาน 6) ทดสอบการทำงานในภาคสนาม 7) เปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลจากแบบจำลอง และ 8) ประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของไถดินดานต้นแบบ ลักษณะของดินที่ใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ ได้แก่ ความชื้นของดิน ความหนาแน่นรวมของดิน ความเค้นเฉือนของดิน และความหนืดเฉือนของดิน แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์หาแรงต้านของดิน คือแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลการวิจัยพบว่า ไถดินดานชนิดขาโค้งมีความเหมาะสมสำหรับเป็นอุปกรณ์ต้นแบบ สร้างไถดินดานชนิดขาโค้งมีมุมไถ 30 องศา ทดสอบในภาคสนามใช้ความเร็วในการทำงานที่ 2.95 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีความสามารถในการทำงาน 1.85 ไร่ต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการทำงานร้อยละ 64.83 การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 2.82 ลิตรต่อไร่ แรงฉุดลาก 9,350 นิวตัน เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าแรงฉุดลากจากการวัดจริงเทียบกับค่าแรงต้านจากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เศรษฐศาสตร์ของการใช้ไถดินดานต้นแบบ พบว่า จุดคุ้มทุน 11.55 ไร่ต่อปี และระยะเวลาในการคืนทุนภายใน 1 ปี พื้นที่ทำงาน 60 ไร่

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร  
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา   
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

KRIENGGKRAI RAYANASUK : DESIGN AND DEVELOPMENT OF  
SUBSOILER FOR SUGARCANE FIELED. THESIS ADVISOR : SAMART  
BUN-ART, Ph.D., 144 PP.

SUBSOILER/COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS/DRAFT FORCE

This research aimed to create a model, designed, developed, built, tested and evaluated subsoiler for sugarcane plantations. The procedure is divided into 8 steps as follows 1) study the shape of the subsoiler legs 2) find the visco-plastic parameters of soil 3) model and analyze the flow behavior 4) design and build the subsoiler leg 5) analysis strength 6) field test 7) comparison of the results from the experiment with the results from the model 8) economic evaluation of the subsoiler. The research found that subsoiler type curve leg was suitable for prototype. Soil properties used for soil analysis were soil moisture content, soil density, shear stress and shear viscosity of the soil. The model used for soil resistance analysis was a computational fluid dynamics model. The rake angle of 30 degree of subsoiler has field testers. The speed was 2.95 km/h, field capacity of 1.85 rai/h and field efficiency of 64.83%. The fuel consumption was 2.82 L/rai and draft force was 9,350 N. Correlation analysis of the measurement draft force versus the drag force from the model, the statistical correlation was at the level of 95% confidence. Economic analysis showed that the subsoiler found breakeven point 11.55 rai/year with a consequence of payback period within 1 year for filed 60 rai.

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ปัญหา และมีความเมตตาแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงค์ศักดิ์ จุลยุเสนา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร และอาจารย์ ดร.ประภาภรณ์ แสงวิจิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรา วาทกิจ ที่สอนการใช้โปรแกรมด้านการวัดและเครื่องมือวัด คุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ ที่คอยแนะนำปรึกษาการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด คุณเกรียงศักดิ์ ปรีมพรชัย ที่ช่วยสอนการใช้เครื่องมือวัดด้านปฐพีกลศาสตร์ คุณเกียรติศักดิ์ ใจโต คุณชนากร แนวกกลาง และน้อง ๆ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ช่วยในการทดสอบงานวิจัยจนเสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา และสำคัญที่สุดขอเทิดทูลไว้ซึ่งหลักธรรมคำสอนของพระผู้มีพระภาคเจ้าที่ได้ยึดเป็นแนวทางในการดำเนินชีวิต อีกทั้งกราบขอบพระคุณ คุณพ่อมานิตย์ ราษฎร์สุข ที่ให้คอยให้กำลังใจ คุณอาจินตนา ราษฎร์สุข ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการเรียน ทำวิจัย และให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

เกรียงไกร ราษฎร์สุข

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฒ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 บทนำ.....	4
2.2 อ้อย.....	4
2.3 ชั้นดินดานไถพรวน.....	5
2.4 ไถดินดาน.....	7
2.5 ทฤษฎีของระบบดิน .....	10
2.5.1 สมบัติทางพลศาสตร์ของดิน .....	10
2.5.2 การอัดตัวแน่นของดิน.....	16
2.5.3 สมบัติรีโอโลยีของดิน.....	21
2.5.4 แรงตัดดิน.....	25
2.6 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ .....	28

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	การออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร .....	31
2.8	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์การใช้งานเครื่องจักรกลเกษตร .....	34
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	35
<b>3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>38</b>
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.1.1	เครื่องมือวัดการทะลุทะลวงของกรวย (cone penetrometer) .....	38
3.1.2	ทรานสดิวเซอร์วัดระยะทางเชิงเส้นแบบ Linear Variable Differential Transformer (LVDT).....	39
3.1.3	อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล.....	40
3.1.4	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวัดและเครื่องมือวัด.....	40
3.1.5	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบทางวิศวกรรม.....	41
3.1.6	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรง .....	41
3.1.7	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิง คำนวณ.....	42
3.1.8	รถแทรกเตอร์.....	42
3.1.9	เตาอบเพื่อหาความชื้น.....	43
3.1.10	เครื่องชั่งแบบละเอียด.....	43
3.1.11	อุปกรณ์วัดแรงลากในแนวระดับ.....	44
3.1.12	อุปกรณ์วัดความเร็วของรถแทรกเตอร์ขณะทำงาน .....	44
3.1.13	อุปกรณ์วัดการสิ้นเปลืองของล้อรถแทรกเตอร์ .....	45
3.1.14	อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง.....	45
3.1.15	เครื่องเคาะดิน (Liquid Limit Device) .....	46
3.1.16	เครื่องมือวัดการแตกตัวของดิน (Soil Profile Meter) .....	46
3.1.17	เครื่องมือวัดกำลังต้านทานเฉือนของดิน .....	47
3.2	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	48
3.2.1	การศึกษารูปทรงของไถดินดาน .....	48



## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.2.2	การศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร .....	49
3.2.3	การทดสอบแรงลากในภาคสนามเทียบกับแรงต้านของดินที่ได้จากการ จำลองสถานการณ์ของไถดินดานที่มีโซ้อยู่แล้ว .....	54
3.2.4	การออกแบบไถดินดานต้นแบบ .....	56
3.2.5	การจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานต้นแบบ .....	58
3.2.6	การวิเคราะห์แรงต้านของดินสำหรับไถดินดานต้นแบบ .....	62
3.2.7	การวิเคราะห์ความแข็งแรงของไถดินดานต้นแบบด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ .....	63
3.2.8	การทดลองไถดินดานต้นแบบที่ระดับความลึกการไถต่างกัน .....	63
3.2.9	การทดสอบประเมินผลสมรรถนะไถดินดานในภาคสนาม .....	67
3.2.10	การเปรียบเทียบแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามกับ การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของไถดินดานต้นแบบ .....	69
3.2.11	การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ไถดินดานต้นแบบ .....	69
3.3	สถานที่ทำการทดสอบ .....	69
<b>4</b>	<b>ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>70</b>
4.1	ผลการศึกษารูปร่างของไถดินดาน .....	70
4.2	ผลการศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร .....	74
4.3	ผลการทดสอบแรงลากในภาคสนามเทียบกับแรงต้านของดินที่ได้จากการ จำลองสถานการณ์ของไถดินดานที่มีโซ้อยู่แล้ว .....	79
4.4	ผลการออกแบบไถดินดานต้นแบบ .....	80
4.5	ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานต้นแบบ .....	82
4.6	ผลการวิเคราะห์แรงต้านของดินสำหรับไถดินดานต้นแบบ .....	85
4.7	ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงไถดินดานต้นแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	91
4.8	ผลการทดลองไถดินดานต้นแบบที่ระดับความลึกการไถต่างกัน .....	92
4.8.1	สภาพดินในแปลงทดลอง .....	92
4.8.2	การบดอัดในแปลงทดลอง .....	92

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

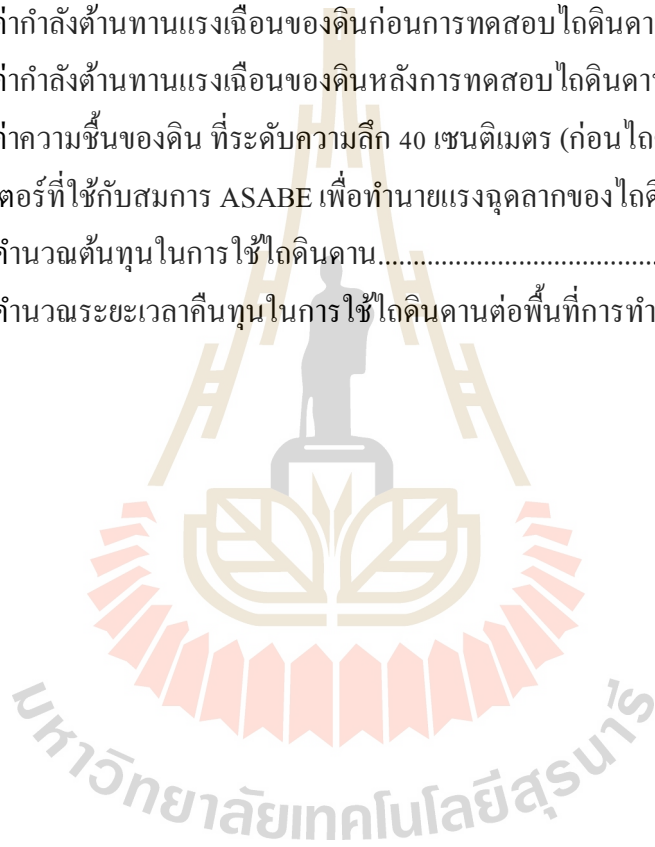
4.8.3	แรงลากในแนวระดับ.....	94
4.8.4	กำลังจุดลาก.....	95
4.8.5	พื้นที่การแตกตัวของดิน.....	95
4.8.6	การลื่นไถล.....	97
4.8.7	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการทดลองของไถดินคานที่ระดับเกียร์ และความลึกการไถต่างกัน.....	97
4.9	ผลการทดสอบประเมินสมรรถนะไถดินคานในภาคสนาม.....	98
4.10	ผลการเปรียบเทียบแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามกับการ จำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของไถดินคานต้นแบบ.....	101
4.11	ผลการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ไถดินคานต้นแบบ.....	108
4.11.1	ผลการวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่าย.....	108
4.11.2	ผลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของไถดินคาน.....	108
4.11.3	ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของการใช้ไถดินคาน.....	109
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	111
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	111
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	112
	รายการอ้างอิง.....	113
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ตารางผลการทดสอบ.....	118
	ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ.....	125
	ภาคผนวก ค. แบบขาไถดินคาน.....	130
	ภาคผนวก ง. รูปประกอบการทดสอบ.....	132
	ภาคผนวก จ. การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์.....	136
	ภาคผนวก ฉ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	142
	ประวัติผู้เขียน.....	144

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	Material Property for Finite Element Analysis ..... 62
4.1	แสดงผลความเร็วของดินที่ผ่านไถดินดานรูปทรงต่าง ๆ ..... 69
4.2	Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 119 g)..... 77
4.3	Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 199 g)..... 77
4.4	Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 279 g)..... 78
4.5	ผลแรงลากในภาคสนามเทียบกับแรงต้านจากการจำลองของไถดินดานที่มีใช้อยู่แล้ว ..... 79
4.6	ผลจากการจำลองแรงต้านของดินผ่านไถดินดานต้นแบบทั้ง 3 รูปแบบ ..... 84
4.7	ผลการทดลองแรงลากในแนวระดับ ..... 93
4.8	กำลังขุดลาก..... 94
4.9	พื้นที่การแตกตัวเฉลี่ย แรงลากในแนวระดับต่อพื้นที่การแตกตัวและกำลังขุดลากต่อพื้นที่การแตกตัว..... 95
4.10	การสิ้นเปลืองของล้อรถแทรกเตอร์ ..... 96
4.11	แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของแรงลากในแนวระดับและกำลังขุดลากของไถดินดานที่ระดับเกียร์และความลึกการไถต่างกัน..... 97
4.12	ผลการทดสอบประเมินสมรรถนะไถดินดานในภาคสนาม ..... 98
4.13	ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง CFD สำหรับไถดินดาน ..... 101
4.14	แสดงผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ..... 106
4.15	แสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างไถดินดานต้นแบบ..... 107
ก.1	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในระยะทาง 10 เมตร เมื่อมีภาระ ..... 118
ก.2	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในระยะทาง 10 เมตร เมื่อไม่มีภาระ ..... 118
ก.3	การวัดค่าแรงลากไถในแนวระดับ เมื่อมีภาระ ..... 118
ก.4	การวัดค่าแรงลากไถในแนวระดับ เมื่อไม่มีภาระ..... 119
ก.5	การวัดระยะทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ 3 รอบล้อ เมื่อมีภาระ ..... 119
ก.6	การวัดระยะทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ 3 รอบล้อ เมื่อไม่มีภาระ..... 119

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.7	ข้อมูลจำเพาะของรถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Massey Ferguson รุ่น 4245 .....	120
ก.8	การวัดค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินก่อนการทดสอบไถดินดาน .....	121
ก.9	การวัดค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินหลังการทดสอบไถดินดาน .....	121
ก.10	การวัดค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินก่อนการทดสอบไถดินดาน .....	122
ก.11	การวัดค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินหลังการทดสอบไถดินดาน .....	122
ก.12	การวัดค่าความชื้นของดิน ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร (ก่อนไถดินดาน).....	122
ก.13	พารามิเตอร์ที่ใช้กับสมการ ASABE เพื่อทำนายแรงจุดลากของไถดินดาน .....	123
จ.1	ผลการคำนวณต้นทุนในการใช้ไถดินดาน.....	139
จ.2	ผลการคำนวณระยะเวลาคืนทุนในการใช้ไถดินดานต่อพื้นที่การทำงาน.....	140



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การทำงานของไถดินดาน ..... 7
2.2	ไถดินดานชนิดธรรมดา ..... 8
2.3	ไถดินดานชนิดตีคี่..... 9
2.4	ไถดินดานชนิดสั้น ..... 9
2.5	ไถสี่ล้อ..... 10
2.6	แสดงความเข้มของแรงที่กระทำในดิน โดยไถซี่ ..... 11
2.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในดิน 3 ลักษณะ ..... 13
2.8	แสดงการกระจายตัวของความเค้น ณ จุดสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน..... 14
2.9	แสดงอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ของดินด้วยวิธีทางตรงในสนาม ..... 15
2.10	แสดงลักษณะอุปกรณ์การทดสอบแบบสามแกน..... 16
2.11	แสดงชั้นของดินต่าง ๆ..... 17
2.12	แสดงช่องว่างระหว่างเม็ดดินในดินหลวมและดินที่ถูกอัดตัว ..... 20
2.13	แสดงเส้นโค้งการไหลของของไหลอุคคตินิวโตเนียนและพลาสติกหนืดแบบบิงแฮม และแบบจำลองเชิงกลที่แสดงด้วยแดชพอดและสไปเดอร์ ..... 24
2.14	แสดงการไหลของดินผ่านเครื่องมือ ..... 25
2.15	แสดงลักษณะการวิบัติของดิน ตามแบบจำลองของ Hettiaratchi และ Reece ..... 26
2.16	แสดงลักษณะการวิบัติของดิน ตามทฤษฎีของ Godwin และ Spoor ..... 26
2.17	แสดงลักษณะการวิบัติของดิน ตามทฤษฎีของ McKyes และ Ali ..... 27
2.18	แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ..... 31
3.1	เครื่องมือวัดการทะลุทะลวงของกรวย ยี่ห้อ Wykeham Farrance..... 38
3.2	ทรานสดิวเซอร์ LVDT ..... 38
3.3	ชุดขยายสัญญาณ ยี่ห้อ NATIONAL INSTRUMENTS รุ่น NI USB-6212..... 39
3.4	ชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabView ..... 39
3.5	แบบจำลองไถดินดาน ..... 40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	40
3.7	41
3.8	41
3.9	42
3.10	42
3.11	43
3.12	43
3.13	44
3.14	44
3.15	45
3.16	46
3.17	46
3.18	47
3.19	47
3.20	48
3.21	49
3.22	51
3.23	54
3.24	56
3.25	56
3.26	57
3.27	57
3.28	61
3.29	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 Velocity streamline ของไถดินดานรูปขาตัว C.....	70
4.2 Velocity streamline ของไถดินดานรูปขาตัว L.....	70
4.3 Velocity streamline ของไถดินดานรูปขาเอียง.....	71
4.4 Velocity contour ของไถดินดานรูปขาตัว C.....	71
4.5 Velocity contour ของไถดินดานรูปขาตัว L.....	72
4.6 Velocity contour ของไถดินดานรูปขาเอียง.....	72
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของกรวยเทียบกับเวลา.....	73
4.8 ความเร็วของกรวย ณ ระยะจมต่าง ๆ.....	74
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะจมของกรวยที่น้ำหนักกรวยต่าง ๆ กัน.....	75
4.10 พลังงานรวมที่ระยะจมของกรวยต่าง ๆ กัน.....	76
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับดัชนีสภาพเหลวของดินในแปลงเกษตร (ดินร่วนปนทราย).....	77
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงลากจากการวัดในภาคสนามกับค่าแรงต้านของดินจาก การจำลองสถานการณ์ของไถดินดานที่มีใช้อยู่แล้ว.....	79
4.13 แบบไถดินดานต้นแบบ.....	80
4.14 ไถดินดานต้นแบบที่สร้างเสร็จแล้ว.....	80
4.15 การไหลของดินบริเวณส่วนบน ไถดินดานที่พื้นผิวอิสระ (top view).....	81
4.16 การไหลของดินบริเวณปลายไถดินดาน.....	82
4.17 เวกเตอร์ความเร็วของดินที่ไหลผ่าน ไถดินดาน.....	82
4.18 การแตกตัวของดินเมื่อถูก ไถดินดานกระทำ.....	83
4.19 การแตกตัวของดินเชิงปริมาตร.....	83
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของดินกับระยะการวิบัติของดินด้านหน้าไถดินดาน.....	84
4.21 เส้นระดับของความเค้นเฉือนบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 1.....	85
4.22 เส้นระดับของความเค้นเฉือนบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 2.....	85
4.23 เส้นระดับของความเค้นเฉือนบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 3.....	86
4.24 เส้นระดับของแรงดันที่กระทำบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 1.....	87

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25	เส้นระดับของแรงดันที่กระทำบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 2 ..... 87
4.26	เส้นระดับของแรงดันที่กระทำบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 3 ..... 88
4.27	เส้นระดับของความเร็วของดินที่ผ่านไถดินดานแบบที่ 3..... 89
4.28	เส้นทางการไหลของความเร็วของดินที่ไหลผ่านไถดินดานแบบที่ 3 ..... 89
4.29	ค่าการกระจายตัวของความเค้นแบบ Von-Mises ..... 90
4.30	ค่าการกระจายตัวของการโค้งตัวของไถดินดานต้นแบบ ..... 91
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยววิ่งและความหนาแน่นของดิน ..... 92
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินกับความลึก ..... 93
4.33	ค่า Specific Draft และ Specific Power ..... 95
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินกับความลึก ก่อนและหลังการทดสอบไถดินดาน ..... 100
4.35	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์กับแรงลากในแนว ระดับจากการทดสอบในภาคสนามของไถดินดานต้นแบบที่ใช้เกียร์ L1 และความลึก การไถต่างกัน ..... 102
4.36	แสดงสหสัมพันธ์ระหว่างการวัดจริงกับการจำลองสถานการณ์ของการหาแรงจูดลาก ที่เกียร์ L1 ..... 102
4.37	เปรียบเทียบค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์กับค่าแรงลากในแนว ระดับจากการทดสอบในภาคสนามของไถดินดานต้นแบบที่ใช้เกียร์ L1 และ ความลึกการไถต่างกัน ..... 103
4.38	เปรียบเทียบค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์กับค่าแรงลากในแนวระดับ จากการทดสอบในภาคสนามของไถดินดานต้นแบบที่ใช้เกียร์ L2 และความลึก การไถต่างกัน ..... 104
4.39	แสดงสหสัมพันธ์ระหว่างการวัดจริงกับการจำลองสถานการณ์ของการหาแรงจูดลาก ที่เกียร์ L2 ..... 104



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.40	เปรียบเทียบค่าแรงด้านของดินจากการจำลองสถานการณ์กับค่าแรงลากในแนวระดับ จากการทดสอบในภาคสนามของไถดินดันต้นแบบที่ใช้เกียร์ L2 และความลึก การไถต่างกัน.....	105
4.41	เปรียบเทียบแรงที่วัดค่าได้จริงกับแรงที่ได้จากการทำนายของสมการ ASABE และ แรงที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์.....	105
4.42	แสดงจุดคุ้มทุนของการใช้ไถดินดัน.....	108
4.43	ระยะเวลาคืนทุนไถดินดันต่อพื้นที่การทำงาน .....	109
ข.1	แรงที่กระทำต่อขาไถดินดัน .....	126
ง.1	การทดสอบวัดแรงลากในแนวระดับ .....	132
ง.2	การทดสอบสมรรถนะไถดินดัน .....	132
ง.3	แปลงทดสอบหลังจากไถดินดันเสร็จ.....	133
ง.4	การวัดการสิ้นไถลของรถแทรกเตอร์ .....	133
ง.5	การวัดการแตกตัวของดิน .....	134

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	=	พื้นที่ หรือพื้นที่ปลูกใน 1 ปี
$A_C$	=	ต้นทุนการใช้เครื่อง
$b$	=	ความกว้างของขาไถ
$BWV$	=	ปริมาตรโดยน้ำหนักมวลรวม
$c$	=	ระยะแกนสะเทิน
$C_a$	=	ความสามารถในการทำงานจริง
$C_D$	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
$C_t$	=	ความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรกลเกษตร
$D$	=	ค่าเสื่อมราคา
$E_f$	=	ประสิทธิภาพการทำงาน
$F$	=	แรงที่กระทำต่อขาไถ
$F$	=	ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง
$F_C$	=	ต้นทุนคงที่
$h$	=	ความหนาของขาไถ
$h_{eq}$	=	ระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์
$h_f$	=	ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง
$I$	=	ดอกเบี้ยว
$I$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด
$L$	=	ระยะทางจากจุดหมุนถึงแนวที่แรงกระทำ
$L$	=	ค่าแรงงาน
$LL$	=	ขีดจำกัดเหลว
$M$	=	โมเมนต์ดัด
$M_s$	=	มวลของเมล็ดดิน
$M_w$	=	มวลของน้ำ
$N$	=	ค่าความปลอดภัย
$N$	=	อายุการใช้งาน

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$O$	=	ค่าน้ำมันหล่อลื่น
$P$	=	ช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
$P$	=	ราคาแรงซื้อ
$PI$	=	ดัชนีสภาพพลาสติก
$PL$	=	พิกัดพลาสติก
$R$	=	ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา
$r$	=	อัตราดอกเบี้ย
$S$	=	มูลค่าซาก
$T_e$	=	เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง
$T_t$	=	เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด
$U$	=	ความเร็วของของไหลที่ผ่านวัตถุที่หยุดนิ่ง
$W$	=	ปริมาณความชื้นของดินแห้ง
$W_s$	=	น้ำหนักของเม็ดดิน
$W_w$	=	น้ำหนักของน้ำ
$\varepsilon$	=	อัตราส่วนช่องว่าง
$\tau$	=	ความเค้นเฉือน
$\dot{\gamma}$	=	อัตราเฉือน
$\gamma_d$	=	น้ำหนัก โดยปริมาตรของดินแห้ง
$\tau_y$	=	ความเค้นคราก
$\mu$	=	ความหนืดเฉือน
$\rho$	=	ความหนาแน่นของของไหล
$\sigma$	=	ความเค้นปกติ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย การปลูกอ้อยเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลทราย ทั้งด้านการบริโภคในประเทศ และการส่งออกไปยังต่างประเทศ ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยสามารถผลิตอ้อยได้ประมาณ 106 ล้านตัน จากพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 9.6 ล้านไร่ ผลผลิตเฉลี่ย 11 ตันต่อไร่ เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลเพื่อบริโภคภายในประเทศ และส่งออกไปยังต่างประเทศ คิดเป็นมูลค่า 98,309 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) โดยกระบวนการผลิตอ้อยมีหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การไถเตรียมดิน การปลูก การดูแลบำรุงรักษา และการเก็บเกี่ยว เมื่อเปรียบเทียบกับพืชเศรษฐกิจต่าง ๆ ในประเทศไทยแล้ว พบว่า อ้อยเป็นพืชที่มีขั้นตอนในกระบวนการผลิตมากที่สุด เนื่องจากผลผลิตของอ้อยมีลักษณะเป็นลำต้น และมีการตัดลำต้นเพื่อนำไปเป็นท่อนพันธุ์ โดยการผลิตอ้อยมีหลายขั้นตอนซึ่งการไถเตรียมดินเป็นขั้นตอนการผลิตที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิต และคุณภาพอ้อยพร้อมที่ตัดไปเป็นท่อนพันธุ์หรือนำเข้าหีบสกัดเป็นน้ำตาลทราย จากปริมาณการปลูกอ้อยที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก หากเกษตรกรมีการไถเตรียมดินที่ไม่ถูกต้อง จะทำให้ส่งผลต่อการปลูกและบำรุงรักษา ทำให้อ้อยที่ผลิตได้มีผลผลิตและคุณภาพไม่แน่นอน มีผลกระทบต่อการผลิตน้ำตาลทรายส่งผลกระทบต่อความเสียหายทางเศรษฐกิจของประเทศทั้งในด้านปริมาณและมูลค่าเป็นจำนวนมาก (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) ซึ่งในขั้นตอนการไถเตรียมดินเกษตรกรส่วนใหญ่นิยมใช้ไถงานในการเตรียมดิน (เสมอขวัญ ดันติกุล, 2550; วินิต ชินสุวรรณ, 2530) ประกอบกับเครื่องจักรกลเกษตรที่ใช้ในไร่อ้อยส่วนใหญ่มีน้ำหนักมาก ส่งผลทำให้ดินที่ไถขึ้นไถพรวนถูกอัดแน่นเป็นเวลานาน บางแห่งมากกว่า 30 ปี ทำให้รากอ้อยไม่สามารถหยั่งลึกลงไปในดินได้ ดินไม่สามารถอุ้มน้ำได้มาก เมื่อฝนทิ้งช่วงนานอ้อยอาจแห้งตายได้ ฉะนั้นในการเตรียมดินปลูกอ้อยทุกครั้งควรมีการทำลายชั้นดินดานด้วย ปัจจุบัน เครื่องมือที่ใช้ในการไถดินดานมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย มีทั้งไถดินดานแบบรูปทรงขาเอียง ขารูปตัว C และขารูปตัว L มีทั้งรูปแบบที่โครงไม้ต้นสะเทือน และต้นสะเทือนทั้งโครง (ราวุฒิ น่วมปฐม, 2550) มีการผลิตไถดินดานออกมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายของบริษัทเอกชนในหลาย ๆ แห่ง แต่ปัญหาที่พบประการหนึ่ง คือรูปทรงขาไถดินดานของเกษตรกรที่ใช้กันและของบริษัทเอกชนที่ผลิตออกมาในแต่ละแห่งนั้น มีรูปทรงขาไถดินดานแตกต่างกัน เนื่องจากมีความ

หลากหลายของรูปทรงขาไถดินคานที่ใช้กันในปัจจุบัน มีผลต่อแรงที่กระทำกับขาไถดินคาน (Kaveh and et al., 2010) มีผลต่อต้นทุนกำลังที่ใช้ การใช้กำลังที่เกินความจำเป็น มีการใช้แรงฉุดลากมาก มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่มากขึ้น ตลอดจนอายุการใช้งานของรถแทรกเตอร์ก็น้อยลง

จากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น จึงนำมาสู่แนวความคิดในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ โดยเป็นการออกแบบและพัฒนาขาไถดินคานเพื่อลดแรงฉุดลาก ลดการใช้พลังงานในการไถดินคาน และลดการอัดแน่นของดินในไร่อ้อย ประกอบกับพัฒนารูปทรงขาไถดินคานให้มีความเหมาะสม ช่วยลดแรงฉุดลาก และไถเตรียมดินได้ดีเมื่อนำไปต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ อีกทั้งทำให้การอัดแน่นของดินลดลง ผลผลิตอ้อยเพิ่มขึ้น มีการไถต่ออ้อยได้มากขึ้น ส่งผลให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลทรายได้ และนำไปสู่อ้อยที่มีคุณภาพของประเทศในภาพรวมได้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของดิน การเสียรูปของดินจากการกระทำของไถดินคาน และการทำนายแรงต้านของดิน โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.2.2 เพื่อออกแบบ สร้าง และพัฒนาไถดินคานต้นแบบให้ใช้แรงลากในการไถลดลง และมีความแข็งแรงตามหลักการออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร

1.2.3 เพื่อทดสอบ ประเมินสมรรถนะ ประสิทธิภาพ และประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์การใช้ไถดินคานต้นแบบ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาดินในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เท่านั้น

1.3.2 การสร้างแบบจำลองการทดลองพฤติกรรมระหว่างดินกับไถดินคาน การเสียรูปของดินจากการกระทำของไถดินคาน และการทำนายแรงต้านของดิน จะใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics Modeling)

1.3.3 การออกแบบ สร้าง พัฒนา ทดสอบ และประเมินสมรรถนะไถดินคานชนิดโครงไม้สั้นสะท้อนต่อพ่วงสามจุดกับรถแทรกเตอร์ CATEGORY II

1.3.4 แรงที่กระทำกับไถดินคานถูกวิเคราะห์ภายใต้สภาวะสถิตย์ (Static Analysis)

1.3.5 ศึกษาเฉพาะรูปทรงขาไถดินคานเท่านั้น

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ที่ดินคานต้นแบบชนิดต่อพ่วงสามจุดกับรถแทรกเตอร์ CATEGORY II
- 1.4.2 สามารถลดแรงลากไถได้
- 1.4.3 เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตฮ้อย



## บทที่ 2

### ปฐพีศนั้วรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้ กล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับอ้อย ลักษณะของชั้นดินดานไทรพรวน ไถดินดาน ที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะโดยทั่วไปของการไถเตรียมดินเพื่อปลูกอ้อย สมบัติทางพลศาสตร์ของดิน การอัดตัวแน่นของดิน สมบัติรีโอโลยีของดิน แรงตักดิน พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ รวมถึงการออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.2 อ้อย

อ้อยเป็นพืชที่สามารถปลูกได้ในเขตร้อน (Tropical) และเขตกึ่งร้อน (Sub-Tropical) ของโลกตั้งแต่ละติจูดที่ 35 องศาเหนือ ในสเปน จนถึง 35 องศาใต้ในอาฟริกาใต้ ในประเทศไทยสามารถปลูกอ้อยได้ในดินหลายประเภท ตั้งแต่ดินร่วน ดินร่วนปนทราย และดินเหนียว ที่มีการระบายน้ำดี ความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง โดยเฉพาะความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 6.1-7.7 ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของอ้อย อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20 – 30 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของอ้อยประมาณ 1,200 มิลลิเมตรต่อปี (รัตนา ตั้งวงศ์กิจ, พูลประเสริฐ ปิยะอนันต์, บพิตร ตั้งวงศ์กิจ และฐิตินัย ชัยณรงค์, 2546)

นอกจากนี้ การเลือกพื้นที่ปลูกที่เหมาะสมในการปลูกอ้อย จะต้องมีลักษณะและสภาพดังต่อไปนี้

- มีความสม่ำเสมอ ลาดเอียง ไม่เกินร้อยละ 3
- มีเนื้อดินเป็นดินร่วนถึงดินเหนียว
- มีการระบายน้ำดี
- มีอินทรีย์วัตถุในดินไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.5
- มีแสงมาก และอุณหภูมิสูงเพียงพอในช่วงการเจริญทางลำต้น
- แปลงที่ปลูกอ้อยไม่ควรอยู่ห่างจากโรงงานน้ำตาลเกิน 60 กิโลเมตร

การเตรียมดินเพื่อการปลูกอ้อยในประเทศไทย นิยมไถพรวนที่ความลึกไม่ต่ำกว่า 30 เซนติเมตร และนิยมใช้ไถดินดานในบริเวณที่มีชั้นดินดานก่อนการไถพรวนปกติ และในบริเวณเขตนํ้าฝนนิยมพรวนดินเพื่อให้ดินแตกละเอียดและสามารถเก็บความชื้นให้แก่อ้อย หลังจากฤดูฝนผ่านไปแล้ว

การเตรียมดินและการปลูกอ้อย แหล่งปลูกอ้อยทั่วไปมี 3 ลักษณะ ซึ่งมีเนื้อดินที่แตกต่างกันดังนี้ คือ

1) แหล่งปลูกอ้อยในเขตชลประทาน หรือกึ่งชลประทาน ที่มีน้ำบาดาลเสริม ได้แก่แหล่งปลูก จังหวัดอ่างทอง สิงห์บุรี สุพรรณบุรี ราชบุรี นครปฐม กาญจนบุรี และกำแพงเพชร ที่ดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวหรือดินร่วน ไม่ควรปลูกเกินเดือนเมษายน

2) แหล่งปลูกอ้อยในเขตนํ้าฝนทั่วไปที่เป็นดินเหนียว หรือดินร่วนเหนียว ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกอ้อยส่วนใหญ่ของประเทศนิยมปลูกช่วงเดือนมีนาคม-พฤษภาคม

3) แหล่งปลูกอ้อยในเขตนํ้าฝนที่เป็นดินทราย ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น จังหวัด นครราชสีมา มุกดาหาร ร้อยเอ็ด อุดรธานี กาฬสินธุ์ นิยมปลูกอ้อยข้ามแล้งช่วงเดือนพฤศจิกายน ภาคเหนือตอนล่าง เช่น จังหวัดนครสวรรค์ กำแพงเพชร และภาคตะวันตก เช่น จังหวัดกาญจนบุรี ภาคตะวันออก เช่น จังหวัดสระแก้ว ส่วนใหญ่จะปลูกกลางเดือนตุลาคม-พฤศจิกายน การปลูกอ้อยโดยทั่วไปจะใช้ท่อนพันธุ์อ้อยที่อายุ 7-8 เดือน เฉลี่ย 1 ไร่ต่อพื้นที่ปลูกอ้อย 10 ไร่

### 2.3 ชั้นดินดานไถพรวน

ชั้นดินดาน หรือ ดินดาน (Hard pan) หมายถึง ชั้นดินที่อัดตัวกันแน่นทึบหรือชั้นที่มีสารเชื่อมอนุภาคของดินมาจับตัวกันแน่นทึบ และแข็งจนเป็นอุปสรรคต่อการซอนไซของรากพืช การไหลซึมของน้ำและอากาศ (คณะกรรมการจัดทำปทานุกรมปฐพีวิทยา, 2541)

ดินดานแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1) ดินดานเปราะ (Fragipan) พบในดินทั่ว ๆ ไป เป็นชั้นดินดานที่มีความหนาแน่นสูงกว่าชั้นดินบนและล่าง และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ

2) ดินดานแข็ง (Duripan) เป็นชั้นดินที่มีการเชื่อมตัวกันแน่นทึบและแข็ง เกิดขึ้นโดยการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของเม็ดดินกับสารเชื่อมต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดิน

ชั้นดินดานไถพรวน หมายถึง ชั้นดินล่างแน่นทึบซึ่งเป็นผลมาจากการใช้เครื่องจักรเกษตรขนาดใหญ่ในการเตรียมดินเป็นประจำ และการไถพรวนในขณะที่ความชื้นดินไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการอัดตัวแน่นของชั้นดินที่อยู่ข้างใต้ชั้นไถพรวน ซึ่งชั้นดินดานนี้มีผลต่อการผลิตพืชอย่างมาก



ดินที่มีแนวโน้มที่จะเกิดชั้นดินดานไถพรวนได้ง่าย ส่วนใหญ่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

ลักษณะและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดชั้นดินดานไถพรวนในดิน จะเกิดได้ง่ายในดินที่มีปริมาณอนุภาคขนาดทรายละเอียดหรือทรายแป้งในปริมาณมาก ได้แก่ กลุ่มดินที่มีเนื้อปานกลางถึงเนื้ออ่อนข้างหยาบ (ดินร่วนปนทราย ดินร่วน ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนปนทรายแป้ง ดินทรายปนดินร่วน) ดินเหล่านี้ต้านทานแรงกดทับได้น้อย โครงสร้างของดินถูกทำลาย ส่งผลให้ถูกอัดตัวได้ง่าย พบได้ทั่วไปในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออก

ลักษณะบ่งชี้ของการมีชั้นดินดานไถพรวน โดยการใช้เครื่องมือวัดความแน่นของดินในสนาม บริเวณที่พบชั้นดินดานไถพรวนจะมีค่าแรงต้านทานการแทงทะลุมากกว่า 4 เมกะปาสคาล และตั้งแต่ 2 เมกะปาสคาล แสดงว่าชั้นดินนั้นเริ่มอัดตัวแน่น และจะมีผลทำให้การเจริญเติบโตของรากพืชลดลงครั้งหนึ่ง นอกจากนี้ พื้นที่เหล่านี้จะพบการท่วมขังของน้ำที่ผิวดินภายหลังจากที่ฝนตกใหม่ๆ เนื่องจากน้ำไม่สามารถซึมผ่านชั้นดินดังกล่าวลงสู่ส่วนลึกภายในหน้าตัดดินได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาจากค่าความหนาแน่นมวลรวมของดิน โดยหากมีค่าสูงกว่า 1.65 และ 1.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับดินเนื้อหยาบและดินเนื้อละเอียดตามลำดับ แสดงว่า บริเวณนั้นเป็นชั้นดินอัดแน่นซึ่งมีแนวโน้มที่จะกลายเป็นชั้นดินดานไถพรวน และชั้นดังกล่าวมักมีค่าความหนาแน่นมวลรวมสูงกว่าชั้นดินตอนบนและชั้นดินที่อยู่ข้างใต้ชั้นนี้ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

สาเหตุการเกิดดินดานไถพรวน เช่น การใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยเฉพาะการปลูกพืชไร่ เช่น อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง การเกษตรกรรมที่ผิดวิธี เช่น การไถพรวนบ่อยครั้งและไม่ถูกวิธี การไถพรวนที่ระดับความลึกเดียวกันนานหลาย ๆ ปี ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช

แนวทางการใช้ประโยชน์บนพื้นที่ดินดานไถพรวน โดยดินดานที่พบในที่ลุ่มมีความเหมาะสมในการทำนา เพราะการทำนาต้องมีการกักเก็บน้ำไม่ให้น้ำซึมลงไปดินก่อนทำการปลูกข้าว การจัดการที่ดินโดยทั่วไป คือ การปรับระดับพื้นที่ให้สม่ำเสมอ การปรับคันนาเพื่อการเก็บกักน้ำ และการปรับปรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ เช่น ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก และปุ๋ยพืชสด เป็นต้น ส่วนดินดานที่พบบนพื้นที่ดอน ถ้าเป็นดินดานแข็งที่มีแนวสัมผัสหินแข็งและเป็นดินต้นควรใช้ประโยชน์เป็นทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ ปลูกป่าทดแทนหรือปลูกพืชไร่ที่มีระบบรากสั้น ในกรณีพบชั้นดินดานอยู่ตื้นถ้าจะทำการปลูกไม้ผลก็ควรมีการปรับปรุงเฉพาะหลุม แต่ถ้าเป็นชั้นดินดานที่เกิดเนื่องจากการใช้ประโยชน์ การจัดการดินต้องมีการไถดินดาน การเพิ่มอินทรีย์วัตถุ การเตรียมดินอย่างถูกวิธี เช่น ไม่ไถพรวนบ่อยครั้ง หรือไม่ไถพรวนขณะที่ดินเปียกเกินไป เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามควรมีการปรับปรุงบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุควบคู่ไปกับการจัดการดินเพื่อให้ดินมีโครงสร้างดีขึ้น ลดความหนาแน่นรวมของดิน เพื่อให้รากพืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีขึ้น ดังนั้นแนวทางในการจัดการดิน

งานที่เหมาะสมเพื่อให้มีการใช้ประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงมีความจำเป็นเพื่อให้เกิดการพัฒนา และสามารถเพิ่มผลผลิตพืชให้กับเกษตรกรได้อย่างยั่งยืนต่อไป

## 2.4 ไถดินดาน

ไถดินดานเป็นอุปกรณ์ที่จะทำให้ดินแตก่วนโดยไม่มีการพลิกดิน คุณภาพของงานเตรียมดินขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญคือ ความลึกในการไถ ระยะห่างระหว่างซี่ มุมของซี่ที่ทำกับแนวราบในลักษณะที่แย่งไปข้างหน้าและความชื้นในดิน การเพิ่มมุมของซี่ที่ทำกับแนวราบหรือที่เรียกว่ามุมในการคราดนั้น จะทำให้แรงจลลางที่ใส่เพิ่มมากขึ้น การประกอบซี่ขนาดเล็กให้ทำงานประสานกับซี่ขนาดใหญ่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน มุมก้มของหัวเจาะมีความสำคัญในการทำให้ชั้นดินที่อยู่เหนือขึ้นไปเกิดแตกแยก ไถดินดานที่ดีนั้นจะต้องบาง มีส่วนโค้งของขาที่ออกแบบมาถูกต้อง และต้องมีมุมของเล็บที่ไม่ม้วนดินด้านล่างขึ้นมา ไถดินดานที่ดีนั้นจะต้องใช้แรงม้าของรถแทรกเตอร์น้อยที่สุด ขาไถดินดานตั้งให้ห่างกัน ประมาณ 50 ซม. โดยมีลักษณะการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของไถดินดาน

อนุตร จำลองกุล (2551) กล่าวว่า ไถซึ่งเป็นอุปกรณ์เตรียมดินซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน แบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้

1) ไถดินดานชนิดธรรมดา (Subsoiler) ทำงานด้วยการต่อดัดกับรถแทรกเตอร์แบบ 3 จุด รถแทรกเตอร์จะลากไถดินดานไปข้างหน้าให้เจาะลึกลงไปดิน ซึ่งจะทำให้ชั้นดินล่าง ตั้งแต่ส่วน

ของหัวเจาะขึ้นมาเกิดการแตกตัวและทำให้ดินเกิดการร่วนซุยขึ้น ระยะการแตกตัวจะมีรัศมีที่จำกัด ส่วนใหญ่จะใช้ไถชนิดนี้ทำลายชั้นดินดาน ที่มักอยู่ใต้ชั้นที่ไถพรวนตามปกติลงไป วัตถุประสงค์หลักของไถดินดาน เพื่อให้ชั้นดินดานเกิดการแตกตัว ทำให้น้ำสามารถไหลซึมผ่านลงไปได้ การถ่ายเทอากาศดีขึ้น และรากของพืชจะหยั่งลงไปได้ลึกและแผ่กระจายไปได้ไกลยิ่งขึ้น ไถดินดานชนิดธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไถดินดานชนิดธรรมดา

2) ไถดินดานชนิดตีปีก (Winged Subsoiler) ไถดินดานชนิดตีปีกจะช่วยให้การแตกร่วนของดินได้มากกว่าไถดินดานชนิดธรรมดา แต่จะใช้แรงจุกลากเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ปีกที่กว้างและมีความชันมากขึ้น จะทำให้การแตกร่วนของดินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ผิวหน้าดินพูนและไม่สม่ำเสมอมากขึ้นอีกด้วย แต่ความชันของปีกจะต้องไม่มากเกินไป ไถดินดานชนิดตีปีก ดังแสดงในรูปที่ 2.3



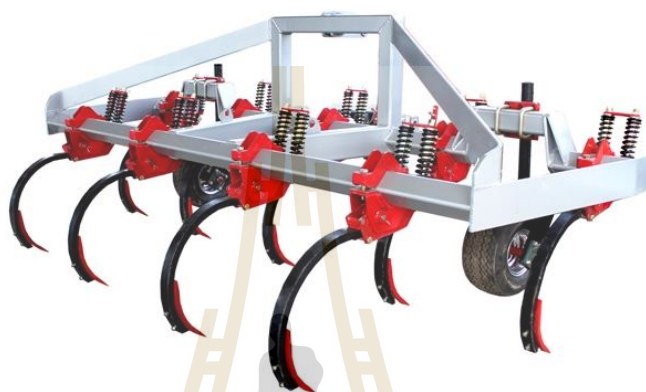
รูปที่ 2.3 ไถดินดานชนิดตีปีก

3) ไถดินดานชนิดสั่น (Vibrating Subsoiler) ไถดินดานชนิดสั่นจะติดอุปกรณ์หรือสร้างกลไกทำให้ขาไถเกิดการสั่นในขณะทำงาน เป็นผลให้การแตกตัวของดินเพิ่มมากขึ้น มากกว่าไถดินดานชนิดตีปีก ส่วนใหญ่แล้วจะใช้กำลังงานจากเพลา PTO ของรถแทรกเตอร์ เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนที่จะทำให้ขาไถดินดานเกิดการสั่น หรืออาจติดตั้งสปริงไปกับขาไถก็จะช่วยทำให้เกิดการสั่นได้เช่นกัน แต่จะไม่มากเหมือนกับการใช้ต้นกำลังจากเพลา PTO ของรถแทรกเตอร์ ไถดินดานชนิดสั่น ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ไถดินดานชนิดสั่น

4) ไถลั่ว (Chisel Plough) ไถลั่วเป็นอุปกรณ์เตรียมดินที่มีความยืดหยุ่นตัว บริเวณปลายไถ จะมีเล็บ (Share) ยึดติดอยู่ มีลักษณะแตกต่างกันออกไปสามารถเปลี่ยนได้เมื่อเกิดการสึกหรอ ใช้สำหรับการเตรียมดินที่ระดับความลึกตื้น ๆ หรือในพื้นที่ที่มีเศษหิน การใช้ไถลั่วจะมีคุณสมบัติเหมือนกับเราใช้คราดสปริงไปขูดหน้าดิน จะทำให้ดินมีความฟูตัวสามารถเก็บกักความชื้นและอากาศไว้ได้ ทำให้ดินเหมาะแก่การเจริญเติบโตของพืช ไถลั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไถลั่ว

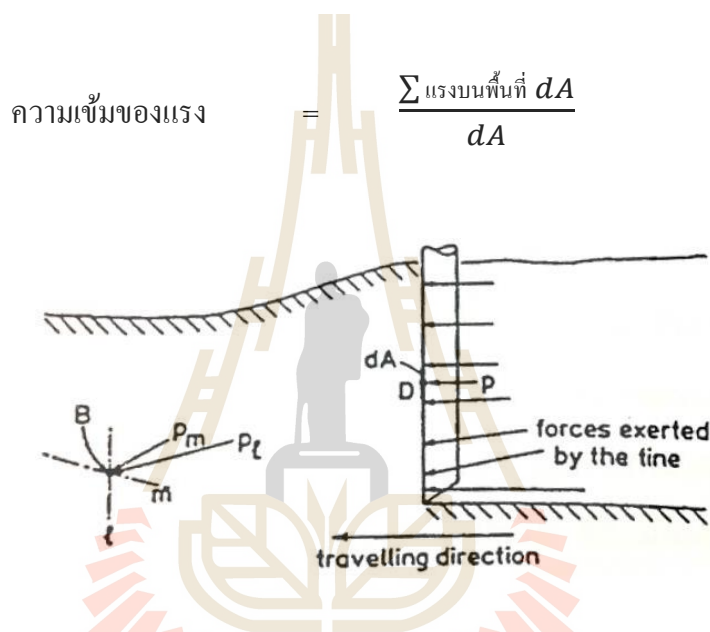
## 2.5 ทฤษฎีของระบบดิน

### 2.5.1 สมบัติทางพลศาสตร์ของดิน

อนุตร จำลองกุล (2551) กล่าวว่า ถ้ามวลดินบนพื้นราบถูกทำให้เกิดการเคลื่อนที่จะเกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ขึ้น และแรงต้านทานการเคลื่อนที่นี้คือ สมบัติทางพลศาสตร์ของดินอย่างหนึ่ง สมบัตินี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ดินถูกทำให้เกิดการเคลื่อนตัว ในขณะที่เดียวกันอนุภาคเม็ดดินที่เรียงตัวกันอยู่อย่างหลวม ๆ ก็จะถูกอัดตัว ทำให้ดินบริเวณดังกล่าวมีความต้านทานต่อการวิบัติตัวสูงขึ้น หรือกล่าวอีกนัยคือ ดินมีความแข็งแรงสูงขึ้น ซึ่งความแข็งแรงของดินนี้ก็คือ สมบัติทางพลศาสตร์อย่างหนึ่งเช่นกัน แรงที่กระทำต่อดินและทำให้ดินเกิดการเคลื่อนตัว จะมีผลทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อดิน และผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดิน สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้พารามิเตอร์หลายตัวในการวิเคราะห์ ซึ่งได้จากการวัดหาค่าสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน สมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่พิจารณา มีดังนี้

1) ความเค้นในดิน (Stress in soil) การไถพรวนเป็นการเปลี่ยนแปลงสภาพหรือการเคลื่อนย้ายดิน โดยใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือกระทำต่อดิน โดยมีการส่งผ่านแรงที่กระทำจาก

พื้นผิวของเครื่องมือไปสู่เนื้อดิน แรงกระทำดังกล่าวจะมากหรือน้อย และเครื่องมือจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กเพียงใด สิ่งสำคัญซึ่งมีผลกระทบต่อเนื้อดินมาก ไม่ใช่แรงทั้งหมดที่เกิดจากเครื่องมือกระทำต่อดิน แต่เป็นแรงที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่บนเครื่องมือ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความเข้มของแรง (Force intensity) ความเข้มของแรงที่มากจะทำให้เกิดการอัดตัวแน่นของดิน ทำให้ดินมีความเครียดสูง (Strain) และเกิดการวิบัติตัวในที่สุด การที่ไถซีมีลักษณะเป็นแท่งยาว เคลื่อนที่กระทำต่อดินและเกิดแรงที่กระทำต่อดิน เมื่อพิจารณาถึงความเข้มของแรงที่กระทำ ณ จุด D บนพื้นที่เล็กๆ  $dA$  รอบจุด P ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงความเข้มของแรงที่กระทำในดินโดยไถซี

ผลรวมของแรงที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและขนาดของ  $dA$  ถ้าเราเลือกตำแหน่งของ  $dA$  ให้สูงหรือต่ำแตกต่างกันออกไป ความเข้มของแรงก็จะแตกต่างกันออกไปเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว เราจึงให้  $dA$  มีขนาดเล็กมากๆ เพียงจุดๆ หนึ่งจนมีค่าเกือบเท่าศูนย์ เราสามารถหาความเข้มของแรง ( $P$ ) ที่กระทำ ณ จุด D บนพื้นผิวของเครื่องมือได้ดังนี้

$$P = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{\sum \text{แรงบนพื้นที่ } dA}{dA}$$

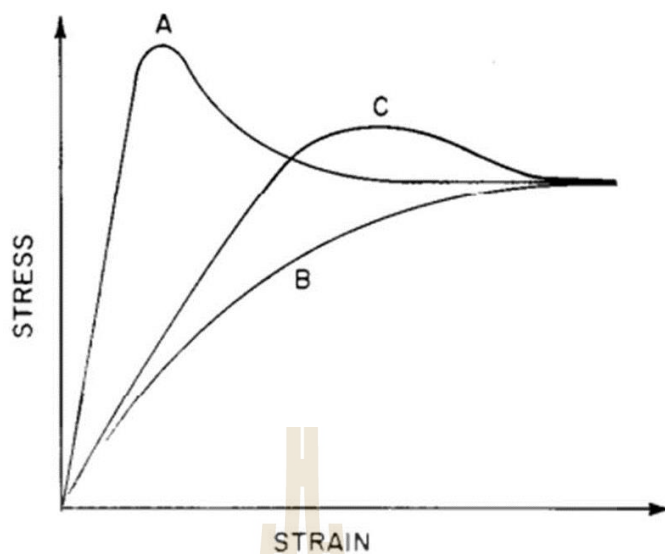
จากสมการข้างต้น แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเครื่องมือ ณ จุด D ภายใต้สมมติฐานว่าดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) นั่นคือไม่มีช่องว่างของน้ำและ

อากาศอยู่ในดิน ณ จุดดังกล่าวค่าความเค้นกระจายตัวอยู่รอบๆ จุด D การตั้งสมมติฐานดังกล่าว เนื่องจากว่าจุดที่เราพิจารณาเป็นพื้นที่ขนาดเล็กมากๆ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเครื่องมือที่เราพิจารณา

ความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นตลอดแนวความยาวของเครื่องมือ ทำให้เกิดความเค้นภายในเนื้อดิน เนื่องจากการถ่ายทอดแรงจากพื้นผิวของเครื่องมือไปสู่เนื้อดิน เมื่อเกิดความเค้นบนมวลดินถึงค่า ๆ หนึ่ง จะทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขึ้น เช่น ถูกอัดตัวแน่นให้มีปริมาตรเล็กลง หรือเกิดการแตกตัว และเกิดการเคลื่อนที่ของเม็ดดินขนาดเล็ก ๆ

2) ความเครียดในดิน (Strain in soil) แรงที่กระทำในดินจะทำให้เกิดความเค้นสูงถึงค่าหนึ่ง ทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนรูปร่างขึ้น หรือเกิดการเคลื่อนตัว หรือเกิดขึ้นได้ทั้งสองกรณี เมื่อเกิดความเค้นขึ้นในดินจะทำให้เกิดความเครียดขึ้นในขณะเดียวกันด้วย การอธิบายถึงความเครียดที่เกิดขึ้นในดิน ณ จุดใด ๆ จะต้องพิจารณาถึงตำแหน่งและความยาวที่เปลี่ยนไปของมวลดินในลักษณะเป็นแท่งดิน ซึ่งเราสามารถพิจารณาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งในแนวขวางและแนวยาวได้

3) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในดิน (Stress-Strain relations in soil) เมื่อดินถูกแรงกระทำก็จะเกิดความเค้น ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นความเค้นอัด (Compressive stress) มีผลทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร แต่ถ้าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ๆ ดินจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างชั่วคราวและจะกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้ค่าความเค้นมีค่าเท่ากับพลังงานที่สะสมอยู่ภายในมวลของดิน เมื่อเอาแรงที่กระทำออก ดินจะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ค่าความเค้นอัดที่มีค่ามาก ๆ จะมีผลทำให้เกิดความเครียดขึ้นตามมา การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจะเกิดขึ้นโดยขึ้นอยู่กับธรรมชาติและเงื่อนไขของดิน ดินที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจะมีผลในการกระจายภาระเมื่อถูกแรงกระทำซ้ำอีกครั้ง สภาวะสมดุลดังกล่าวจะเปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด อธิบายได้ด้วยทฤษฎี Linear Elasticity เป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว เมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบในดินชนิดต่างๆ แล้วนำมาเขียนกราฟจะได้กราฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

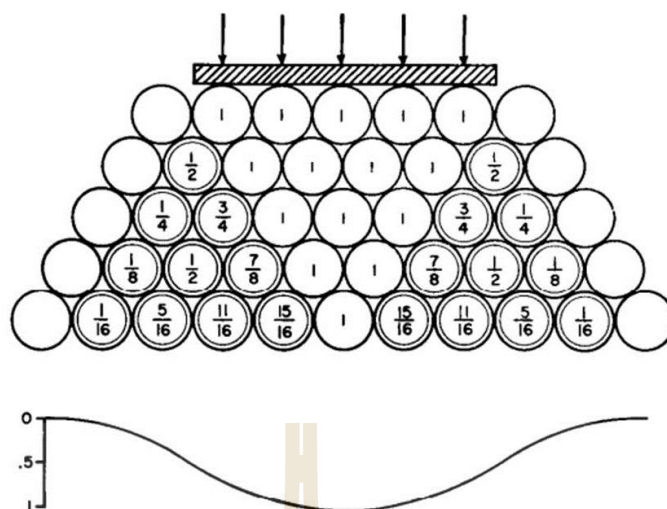


รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในดิน 3 ลักษณะ

จากรูปที่ 2.7 เป็นการทดสอบโดยกำหนดให้ค่า Normal Stress มีค่าคงที่ เส้นกราฟ A เป็นดินที่มีแรงเกาะยึดตัวกันสูง ซึ่งเป็นดินแข็งหรือดินเหนียว การวิบัติตัวของดินในช่วงเริ่มแรกเกิดจากการแตกตัวของพันธะระหว่างอนุภาคเม็ดดินด้วยกัน เส้นกราฟ B เป็นดินที่มีแรงเกาะยึดตัวกันอย่างหลวม ๆ และมีค่าความแข็งแรงต่ำ ส่วนเส้นกราฟ C เป็นดินที่มีสถานะอยู่ระหว่างดิน A และดิน B

4) การกระจายตัวของความเค้นในดิน (Stress distribution) คือการส่งผ่านแรงไปยังอนุภาคของดิน ณ จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน เนื่องจากอนุภาคของเม็ดดินมีการจัดเรียงตัวแบบกระจายตัว ณ จุดที่อนุภาคเม็ดดินสัมผัสกันจะไม่เรียงตัวกันเป็นแถว บริเวณจุดที่ไม่สัมผัสกันจะเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคขึ้น เมื่อพิจารณาถึงแรงที่กระทำ จะเกิดการส่งผ่านแรงระหว่างอนุภาคที่อยู่ชิดติดกัน และจะมีการกระจายตัวทุกทิศทาง ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยการตั้งสมมติฐานว่าดินมีการจัดเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

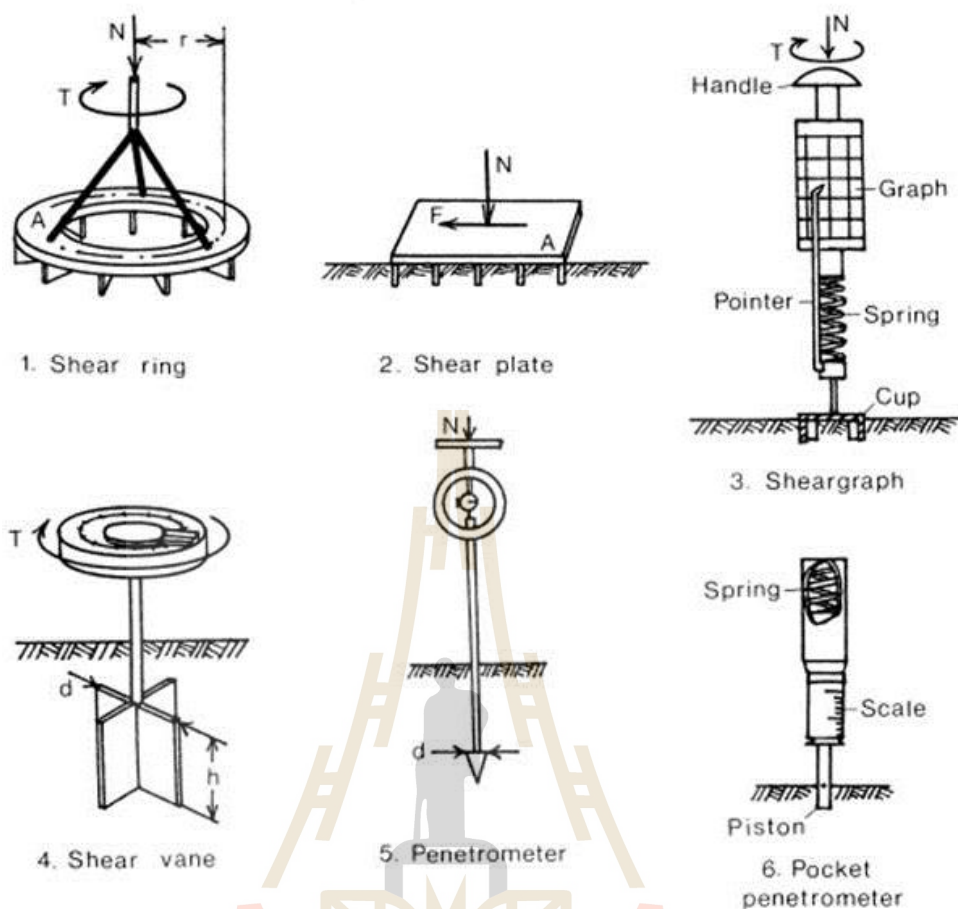




รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายตัวของความเค้น ณ จุดสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน

5) ความแข็งแรงของดิน (Soil strength) คือความสามารถของมวลดิน ที่สามารถต้านทานต่อแรงกระทำหรือการวิบัติตัวของดินได้ ความแข็งแรงของดินจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกแรงกระทำ โดยที่แรงกระทำดังกล่าวจะทำให้อนุภาคของเม็ดดินเกิดการเคลื่อนที่ ในการทำนายถึงค่าความแข็งแรงของดินจากการทดสอบในสนามด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ กับมวลดินชนิดเดียวกัน แต่ต่างสถานที่กัน พบว่า มีค่าความแข็งแรงแตกต่างกันออกไป เนื่องจากว่าดินมีการเปลี่ยนแปลงสถานะไปตามเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพดินฟ้าอากาศที่เปลี่ยนไป ในการวัดค่าความแข็งแรงของดินเป็นการประเมินค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ แรงเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคของเม็ดดินด้วยกัน (Cohesive force,  $C$ ) และค่าความต้านทานของดิน หรือกล่าวอีกนัย คือ มุมเสียดทานภายในของดิน (Internal friction angle,  $\phi$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวของดิน เราสามารถประเมินค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้ 2 วิธีคือ

5.1) วิธีทางตรง (Direct methods) การประเมินค่าพารามิเตอร์ของดินด้วยวิธีทางตรงนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นการวัดค่าในสนาม จะให้ค่า  $C$  และ  $\phi$  อย่างหยาบ ๆ อุปกรณ์ที่ใช้วัดเป็นแบบง่าย ๆ สามารถพกพาได้สะดวก ได้แก่ Shear ring, Shear plate, Shear graph, Shear vane, Penetrometer และ Pocket penetrometer ดังแสดงในรูปที่ 2.9

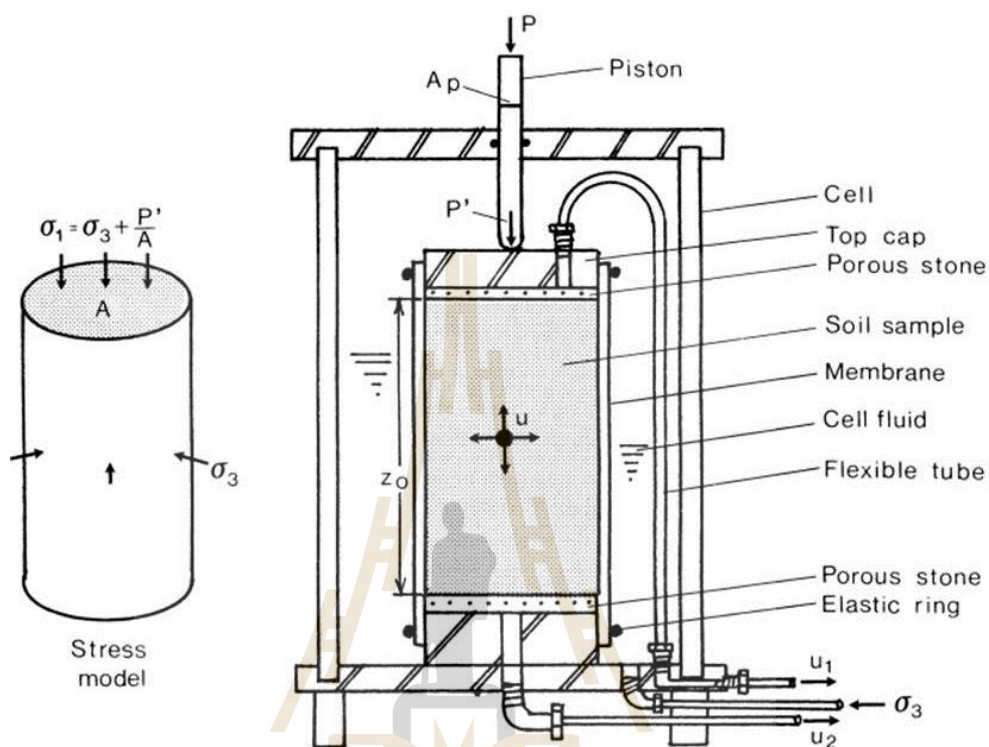


รูปที่ 2.9 แสดงอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ของดินด้วยวิธีทางตรงในสนาม

อุปกรณ์ดังกล่าวจะมีความสะดวกในการใช้งาน ให้ค่าจากการวัดได้รวดเร็ว ในการวัดค่าพารามิเตอร์ของดินเมื่อใช้อุปกรณ์เหล่านี้ จะใช้อุปกรณ์กระทำลงไปดินโดยไม่ต้องเคลื่อนย้ายดินตัวอย่าง ค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์จะเป็นค่าแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear force) ที่กระทำบนพื้นระนาบใกล้กับพื้นผิวของดิน ซึ่งทำให้ดินเกิดการวิบัติตัว และค่าความเค้นปกติ (Normal stress) ที่กระทำในแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์ ค่าดังกล่าวจะนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ เพื่อหาค่า  $C$  และ  $\phi$  ต่อไป

5.2) วิธีทางอ้อม (Indirect methods) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การทดสอบแบบสามแกน (Tri-axial test) การทดสอบแบบนี้เป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของดินในห้องปฏิบัติการ ด้วยการจำลองสภาพของตัวอย่างดิน ให้มีสภาพใกล้เคียงตามความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในชั้นดินธรรมชาติมากที่สุด ทั้งนี้เพราะความดันโดยรอบตัวอย่างดิน (Confining pressure) สามารถควบคุมให้มีความเหมาะสมตามสภาพธรรมชาติ และในระหว่างการทดสอบความดันน้ำในตัวอย่างดินหรือ

ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าหรือออกจากตัวอย่างดิน เราสามารถควบคุมได้อย่างละเอียด อุปกรณ์ที่ใช้เรียกว่า Tri-axial ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะอุปกรณ์การทดสอบแบบสามแกน

### 2.5.2 การอัดตัวแน่นของดิน

การอัดตัวแน่นของดิน หมายถึง การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของดินและทำให้อุณหภูมิของเม็ดดินเรียงชิดติดกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าความพรุนของดินมีค่าลดลง การอัดตัวแน่นของดินสามารถเกิดขึ้นได้หลายกรณี ได้แก่ ฝนตก แรงดึงภายในของน้ำ เนื่องจากการใช้เครื่องจักรกลเกษตร (อนุตร จำลองกุล, 2551) ในปัจจุบันได้มีการใช้เครื่องจักรกลเกษตรขนาดใหญ่ทำให้เกิดแรงกระทำต่อดินเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ชั้นของดินเกิดการอัดตัวแน่น ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

1) Top Soil Layer เป็นชั้นดินที่อยู่ส่วนบนสุด มีแร่ธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุสูง เหมาะแก่การเพาะปลูก ดินชั้นนี้มีสัดส่วนของความชื้นในดิน ช่องว่างอากาศ และส่วนของเนื้อดินที่เหมาะสม อนุภาคของเม็ดดินมีการจับตัวกันอย่างหลวม ๆ

2) Subsoiler Layer เป็นดินชั้นล่างที่มีการอัดตัวแน่น เนื่องจากดินเกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบหรือสัดส่วนของดินขึ้นอย่างไม่เหมาะสม ดินในชั้นนี้จะมีการจับตัวกันอย่างหนาแน่น เกิดเป็นชั้นดินดานขึ้น รากพืชไม่สามารถหยั่งลึกผ่านลงไปได้



รูปที่ 2.11 แสดงชั้นของดินต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.11 ดินชั้นบน (Top Soil) เป็นชั้นที่เมล็ดพันธุ์พืชใช้เป็นที่ยึดเกาะเติบโต ดินชั้นนี้มีการจับตัวกันอย่างหลวม ๆ สภาพดินฟ้าอากาศมีอิทธิพลต่อดินชั้นนี้มาก การชะล้างเนื่องจากน้ำบนผิวดินมีผลต่อการอัดแน่นของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจับตัวแข็งของสารเคมีบริเวณผิวดิน ยิ่งกว่านั้นการใช้เครื่องจักรกลเกษตรทำให้หน้าดินเกิดการอัดตัวโดยตรง มีผลกระทบต่อการทำงานของเมล็ดพันธุ์พืชบริเวณผิวดิน

ในชั้นดินที่มีการเขตรกรรมโดยการใช้เครื่องจักรกลเกษตร ทำให้ความหนาแน่นมวลรวม (Bulk Density) ของดินในชั้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นในการไถพรวนจึงต้องมีการพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการอัดแน่นของดิน ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช การไถพรวนที่ระดับความลึกเดิมอยู่ตลอดเวลา ทำให้ดินเกิดการอัดตัวแน่นเกิดเป็นชั้นดินดานไถพรวน (Plow Pan) การชะล้างดินเนื่องจากน้ำภายหลังจากการไถพรวน ทำให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียวชั้น Plow Pan จะจับตัวกันเป็นก้อนแข็งมาก มีผลกระทบต่อระบายน้ำและการแพร่กระจายของรากพืช

ปริมาตรของดินเป็นตัวชี้บอกถึงการอัดแน่นของดิน กรณีล้อรถแทรกเตอร์ที่กระทำต่อดิน จะทำให้ดินเกิดการยุบตัวและขยายตัวออกไปในแนวราบ ดังนั้นการอัดตัวของดินทางการเกษตรที่เกิดขึ้น ก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปของดินด้วยการอัดแน่นของดินจะมากหรือน้อยเพียงใดนั้น พิจารณาได้จาก

ก. ช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore Space, P) หมายถึง ส่วนที่เป็นของเหลวหรือแก๊สที่แทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดดิน หาได้จากอัตราส่วนที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ระหว่างปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อปริมาตรของดินทั้งก้อน

$$P = \frac{\text{ปริมาตรของช่องว่างในดิน (น้ำ+อากาศ)}}{\text{ปริมาตรของดินทั้งก้อน}} \times 100\%$$

ข. อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio, E) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ต่อปริมาตรของเม็ดดิน

$$E = \frac{\text{ปริมาตรของช่องว่างในดิน}}{\text{ปริมาตรของเม็ดดิน}}$$

ค. น้ำหนักโดยปริมาตรของดินแห้ง (Dry Volume Weight,  $\gamma_d$ ) หมายถึง น้ำหนักเม็ดดิน (ไม่รวมน้ำหนักของน้ำ) ในหนึ่งหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\gamma_d = \frac{\text{น้ำหนักรวมของดินในส่วนของแข็ง}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดของดิน}}$$

ง. ปริมาตรโดยน้ำหนักมวลรวม (Bulk Weight Volume, BWV) หมายถึง ปริมาตรของดินในหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือเป็นส่วนกลับของน้ำหนักโดยปริมาตรของดินแห้ง

$$BWV = \frac{1}{\gamma_d}$$

กรณีการใช้เครื่องจักรกลเกษตรในพื้นที่ ก่อให้เกิดการอัดตัวแน่นของดินบริเวณด้านล่างของล้อกับพื้นดิน ในการวิเคราะห์ทางด้านกลศาสตร์จะมีความยุ่งยาก เนื่องจากการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในดินมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน

#### ปัจจัยที่มีผลต่อการบดอัดดิน

1) เนื้อดิน (Soil Textures) หมายถึง สัดส่วนสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคของดินทราย ดินเหนียว และดินตะกอน ในดินแต่ละชนิดและในสถานที่ต่างกัน จะมีสัดส่วนแตกต่างกันไป

โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัดส่วนของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore Space) จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของการกระจายตัวและเรียงตัวของอนุภาคเม็ดดิน ดินที่มีอนุภาคเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ จะมีการกระจายตัวและเรียงตัวของอนุภาคเม็ดดิน ดินที่มีอนุภาคเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ จะมีการกระจายขนาดของอนุภาคที่เท่ากันด้วย สมมติว่าในแต่ละอนุภาคเม็ดดินประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กจำนวนหนึ่ง ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนช่องว่างของอากาศก็จะลดลงจนอาจทำให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Soil)

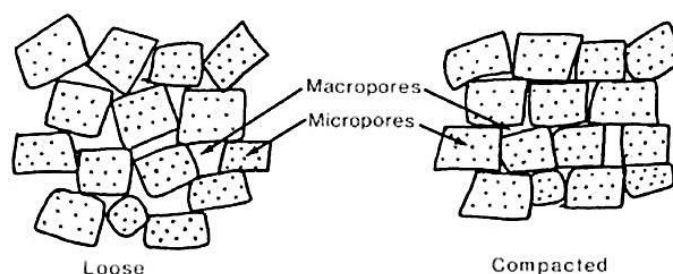
ถ้ามีแรงกระทำในลักษณะการคลุกเคล้ากันต่อดิน จะทำให้ดินถูกอัดตัวขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาตรของอนุภาคเม็ดดินที่กระจายตัวกันในดิน ในดินทรายจะมีแรงเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคเม็ดดินด้วยกัน (Cohesion) มีค่าน้อย การให้ภาระกระทำต่อดินซ้ำหลายๆ ครั้ง จะทำให้ดินเกิดการอัดตัวแน่นมากกว่าในดินเหนียว เพราะที่ดินเหนียวมีคุณสมบัติเป็น Elastic ได้มากกว่า จึงมีการคืนตัว (Rebound) ภายหลังจากถูกแรงกระทำ

2) ความชื้นในดิน (Soil Water Content) ความชื้นในดินจะมีผลต่อการอัดแน่นตัวของดิน เนื่องจากแรงกระทำเป็นอย่างมาก ได้มีการทดสอบการอัดแน่นตัวของดินในดินที่มีความชื้นต่างๆ กัน พบว่า ในดินที่มีความชื้นสูงจะมีความสามารถในการบดอัดตัวสูงเช่นกัน ดินเมื่อถูกแรงกระทำจะมีผลทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง เมื่อความชื้นดินมีค่าเพิ่มขึ้นจนอิ่มตัวด้วยน้ำ จะทำให้การบดอัดดินไม่เกิดผลใดๆ เพราะที่ดินมีน้ำมากเกินไปที่จะเก็บไว้ในช่องว่างดินได้

3) อากาศในดิน (Soil Air) การบดดินจะทำให้ช่องว่างในดินลดลง แต่อากาศจะไหลออกไปไม่หมด กรณีดินเหนียว อาจจะมีปริมาณอากาศเหลืออยู่ประมาณ 5% ดินที่ถูกบดอัดตัวจะทำให้อากาศในดินถูกกดดันด้วย เมื่อเอาภาระที่กระทำออก แรงดันของอากาศก็จะดันกลับคืนสู่สภาวะเดิมทำให้ดินมีการคืนรูปเดิม (Rebound) ดินที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีสภาพแตกต่างจากความเป็นจริงมาก เพราะตามความเป็นจริงแล้วดินจะมี Soil Body ใหญ่มากมีการไหลเข้า-ออกของอากาศในดินรอบข้าง ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดการอัดแน่นตัวของดินด้วย

4) อินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter) ดินที่มีอินทรีย์วัตถุมาก และมีความชื้นสูง จะมีความต้านทานต่อการเกิดการบดอัดตัวสูงกว่าดินที่มีอินทรีย์วัตถุน้อย แต่ถ้าในสภาพของดินแห้งดินที่มีอินทรีย์วัตถุน้อยจะต้านทานต่อการบดอัดได้ดีกว่า

การบดอัดดินจะทำให้ปริมาณความชื้น และการเคลื่อนที่ของน้ำในดินเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อขนาดช่องว่างและการกระจายตัวของช่องว่างในดิน ในโครงสร้างดินที่มีช่องว่างขนาดใหญ่ จะทำให้ขนาดของช่องว่างลดลง และปริมาตรของดินก็จะลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงช่องว่างระหว่างเม็ดดินในดินหลวมและดินที่ถูกอัดตัว

### การลดการอัดตัวแน่นของดิน

การไถพรวนจะทำให้มีการอัดแน่นตัวของดินได้ชั้นไถพรวน อันเนื่องมาจากน้ำหนักของตัวรถแทรกเตอร์และอุปกรณ์ไถกลายเป็นชั้นที่เรียกว่า ชั้นดินดานไถพรวน (Plow Pan) ซึ่งจะปิดกั้นการระบายน้ำและอากาศในดิน และการกระจายของรากพืชด้วย โครงสร้างของดินชั้นบนและชั้นล่างที่ไม่ดี จะมีผลให้น้ำตักของดินรับน้ำได้น้อยลง ก่อให้เกิดการไหลบ่า (Run Off) มาก ก่อให้เกิดการกัดกร่อนดินหรือเกิดสภาพน้ำท่วมขัง ดินจะและเป็นอุปสรรคต่อการทำงาน พืชที่ปลูกมักมีปัญหาเกี่ยวกับการงอก จึงไม่ควรทำการไถพรวนดินจนเกินความจำเป็น และต้องมีการทำลายชั้นดินดานเป็นครั้งคราว การปรับปรุงความร่วนซุยของดินสามารถทำได้โดยการส่งเสริมการเกิดเม็ดดิน และหลีกเลี่ยงการกระทำที่จะก่อให้เกิดการอัดตัวแน่นของดิน ซึ่งสามารถปฏิบัติได้ดังนี้ (อนุตร จำลองกุล, 2551)

1) หลีกเลี่ยงการใช้เครื่องทุ่นแรงฟาร์ม ที่มีแรงดันที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างล้อยางกับดินมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิ่งช้าๆ รอยเดิมในแปลงเพาะปลูก ค่าแรงดันที่ผิวสัมผัสที่เหมาะสมควรมีค่าต่ำกว่า 70 kPa

2) หลีกเลี่ยงการใช้เครื่องทุ่นแรงฟาร์มในดินที่มีความชื้นสูง เพราะจะทำให้โครงสร้างของดินถูกทำลาย เนื่องจากเม็ดดินที่มีความชื้นสูงจะมีความแข็งลดลง ดินเหลวหรือเป็นเทือก (Puddled Soil) จะเหมาะสำหรับการปลูกข้าว แต่ไม่เหมาะกับการปลูกพืชไร่ เพราะดินที่ทำเทือกแล้วเมื่อแห้งจะแข็งตัวเป็นก้อนหรือแท่ง ซึ่งจะมีความแน่นทึบมาก รากพืชไม่สามารถกระจายตัวได้ดี

3) หลีกเลี่ยงการใช้เครื่องมือทุ่นแรงฟาร์ม ที่มีการสิ้นเปลืองมากเกินไปในขณะทำงาน เพราะจะทำให้ความหนาแน่นของดินเปลี่ยนไปถึง 2 เท่า

4) ควรมีการจัดการเกี่ยวกับการเขตรกรรม เพื่อให้ระบบรากพืชมีความแข็งแรงสมบูรณ์ และดินมีอินทรีย์วัตถุเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช จากการทดสอบ พบว่า พืชที่มี

รากที่แผ่กระจายจะช่วยลดการอัดตัวแน่นของดินได้เป็นอย่างดี และการปลูกพืชหมุนเวียนอย่างต่อเนื่องจะช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

5) การใช้ความดันลมยางที่เหมาะสม จะช่วยทำให้การกระจายน้ำหนักของรถแทรกเตอร์มีความสม่ำเสมอ อาทิ การใช้ความดันลมยางที่ต่ำจะทำให้การกระจายน้ำหนักได้ดี

6) การลดการไถพรวนไม่เป็นการทำลายโครงสร้างดินและช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่จะเป็นการช่วยลดการอัดตัวแน่นของดิน ทำให้น้ำและอากาศที่อยู่ในดินเกิดการไหลเวียนได้ดี

7) หลีกเลี่ยงการไถพรวนที่ความลึกเดิมทุก ๆ ปี และใช้เครื่องทุ่นแรงฟาร์มอย่างเหมาะสม

8) การเลือกใช้น้ำหนักของล้อยางจะมีผลต่อการบดอัดดิน อาทิ ยางหน้าแคบจะทำให้การกระจายน้ำหนักไม่ดี เป็นการสนับสนุนการอัดตัวแน่นของดินให้สูงขึ้น และการใช้ล้อยางหน้ากว้างหรือใช้ล้อคู่จะช่วยทำให้การกระจายน้ำหนักได้ดี

9) ใช้น้ำใส่คลุมดินตลอดเวลาเท่าที่จะทำได้ ไม่ควรเผาซากพืชในแปลงเพาะปลูก แต่ควรไถกลบเพื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุแก่ดิน การปลูกพืชคลุมดินระหว่างฤดูกาลปลูกพืชหลัก จะช่วยป้องกันการกระแทกกระแทกของน้ำฝน การปลูกพืชคลุมดินชนิดรากลึกจะช่วยทำลายชั้นดินที่แน่น และก่อนการปลูกพืชในฤดูกาลต่อไปควรมีการไถกลบพืชคลุมดิน เพื่อเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้แก่ดิน

10) ใส่ปุ๋ยชีวภาพให้ดินตามความจำเป็นเมื่อดินมีสภาพเป็นกรด หรือมีแอมโมเนียมที่เป็นกรด เนื่องจากปุ๋ยนี้มีผลทำให้ดินจับตัวเป็นเม็ด นอกจากนี้การปรับสภาพกรดให้เป็นกลางยังช่วยส่งเสริมให้จุลินทรีย์เพิ่มกิจกรรมย่อยสลายอินทรีย์สารได้ดียิ่งขึ้น และเกิดสารเชื่อมอนุภาคดินได้ด้วย ถ้าดินเป็นดินเค็ม เนื่องจากอิทธิพลของเกลือโซเดียม อนุภาคของดินจะกระจายไม่เกาะกลุ่มเป็นเม็ด เราสามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมยิปซัม ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้

11) การเตรียมดินที่ถูกต้อง อาทิ การไถพรวนดิน จะช่วยลดการอัดตัวแน่นของดินได้ และเมื่อเกิดชั้นดินดานไถพรวนขึ้น การใช้ไถดินดาน (Subsoiler) เพื่อทำลายชั้นดินดานไถพรวนจะเป็นการปรับสภาพของดินให้ดีขึ้นได้

### 2.5.3 สมบัติรีโอโลยีของดิน (Rheological Properties of Soil)

เนื่องจากดินมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ มีพฤติกรรมอยู่ระหว่างของแข็งที่ยืดหยุ่นได้เชิงเส้นและของเหลวที่มีความหนืด พฤติกรรมของดินดังกล่าว อธิบายด้วยทฤษฎีรีโอโลยี (Gupta และ Pandya, 1966) ลักษณะทางรีโอโลยีของดินมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันและความไม่ต่อเนื่องในโครงสร้าง พฤติกรรมของดินที่มีลักษณะทางรีโอโลยีได้อธิบายในรูปแบบต่างๆ



โดยอาศัยหลักการยืดหยุ่นของสปริง แคมเปอร์ และตัวเลื่อนแบบยืดหยุ่น ความเป็นพลาสติก และความหนืด เช่นเดียวกับการไหลของของไหลหรือของเหลว (Ghezzehei และ Or, 2001)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความเค้นเฉือน และไม่ขึ้นกับเวลา ของไหลจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การเฉือนผ่านแผ่นบาง (ความหนืดลดลงเมื่อมีอัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น) การเฉือนผ่านแผ่นหนา (ความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากของไหลได้รับอัตราเฉือนเพิ่มขึ้น) และวิสโคพลาสติก (visco-plastic) วัสดุที่ทำจากวิสโคพลาสติกจะมีพฤติกรรมเหมือนของแข็ง เมื่อความเค้นเฉือนมีค่าน้อยกว่าความเค้นคราก เมื่อความเค้นครากเพิ่มขึ้น วิสโคพลาสติกจะมีการไหล เช่นเดียวกับของไหล (Bird et al., 1983) อย่างไรก็ตามคุณลักษณะที่สำคัญของพฤติกรรมพลาสติกคือ ถ้าค่าความเค้นไม่คงที่ การไหลในส่วนที่เหลือจะทำหน้าที่เหมือนการอัดตัว (solid plug) (Fredrickson, 1964) ตัวอย่างของวัสดุที่เป็นลักษณะพลาสติกหนืด เช่น ดินเหนียวผสมน้ำ โคลน น้ำมันเครื่อง ทรายของเนส ยาสีฟัน ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ จารบี เนย ซอส เลือด ฯลฯ (Bird et al., 1983)

Vyalov (1986) กล่าวว่า แบบจำลองเชิงเส้นอย่างง่ายของความเป็นพลาสติกหนืดสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนรูปของดินเหนียวภายใต้สภาวะความเค้นคงตัวได้ จากข้อมูลในการทดลองการหาความหนืดของดิน ผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินมีค่าอยู่ระหว่าง  $10^5$  ถึง  $10^{16}$  Pa s

สมบัติรีโอโลยีของดิน แสดงให้เห็นว่า ดินเปียกมีพฤติกรรมความวิสโคพลาสติก (visco-plastic) ที่มีความเค้นครากและความหนืดของพลาสติกเกือบเท่าตัว (Ghezzehei และ Or, 2001) ผลการทดลองพบว่า เมื่อดินมีความชื้นต่ำและมีอัตราการเฉือนสูง องค์ประกอบความยืดหยุ่นของการเปลี่ยนรูปของดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนืด และ โมดูลัสเฉือนลดลง

Kamarkar (2005) ได้พัฒนาเครื่องทดสอบวิทยากระแสนแบบไบพัดเฉือน (rheometer) เพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ความเป็นพลาสติกหนืด (viscos-plastic) ของดิน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนืดของดินร่วนเหนียว มีค่าอยู่ในช่วง  $53 \times 10^3$  ถึง  $280 \times 10^3$  Pa s ค่าความเค้นคราก มีค่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 23 kPa เมื่อการอัดตัวแน่นของดินเพิ่มขึ้น ความหนืดของดินก็เพิ่มขึ้นตามด้วย ส่วนความเค้นครากลดลง ในขณะที่ความชื้นของดินเพิ่มขึ้นพร้อมกับความหนืดของดินลดลง

Mahajan และ Budhu (2008) ได้ตรวจสอบหาความหนืดของดินเหนียวโดยใช้การทดสอบแบบกรวยตก (fall cone) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความหนืดของดินเหนียวมีการกระจายตัวในช่วง 55-516 Pa s ค่าความเค้นครากมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 57.2 kPa ส่วนการประมาณค่าความหนืดเฉือนจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองทางรีโอโลยี (rheological model) ที่นำมาใช้

Pipit (2009) ได้นำเครื่องรีโอมิเตอร์ทดสอบดิน (soil rheometer) นำวิธีการของ Kamarkar (2005) มาใช้ในการประเมินค่าพารามิเตอร์ความเป็นวิสโคพลาสติก (viscos-plastic) ของดิน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนืดของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าอยู่ระหว่าง  $23.9 \times 10^3$  ถึง  $38.6 \times 10^3$  kPa ส่วนค่าความเค้นครากของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าอยู่ระหว่าง 37.2 ถึง 58.2 kPa

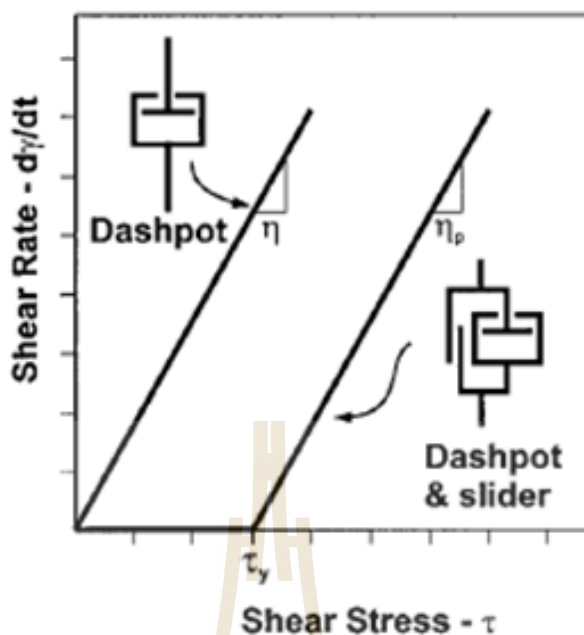
แบบจำลองที่ใช้กันทั่วไปสำหรับของไหลแบบวิสโคพลาสติก (visco-plastic) มี 3 แบบ คือ แบบจำลองการเป็นพลาสติกบิงแฮม (Bingham plastic model) แบบจำลองเฮร์เชล-บลักเลย์ (Herschel-Bulkley model) และแบบจำลองคาสสัน (Casson model) อย่างไรก็ตามสมการหลักที่ใช้ทั่วไปสำหรับอธิบายวัสดุที่เป็นของไหล คือ แบบบิงแฮม (Bingham fluid) (Lipscomb และ Denn, 1984) การรวมพฤติกรรมของแบบจำลองวิสโคพลาสติกแบบบิงแฮม (Bingham visco-plastic model) และของเหลวหนืดแบบนิวโตเนียน (Newtonian) โดยเป็นการแยกระหว่างพื้นที่ทางกายภาพสามารถอธิบายตามหลักเกณฑ์ที่ขึ้นอยู่กับความเค้นที่เกิดในเนื้อวัสดุ สำหรับวัตถุแข็งเกร็งและมีพฤติกรรมเป็นของไหลแบบพลาสติกจะแยกตามหลักเกณฑ์ของความเค้นคราก (Beris et. al., 1985)

แบบจำลองบิงแฮม (Bingham visco-plastic) สำหรับวัสดุที่เป็นวิสโคพลาสติก มีแบบจำลองทางกล ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.1 และ 2.2

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{for} \quad \tau < \tau_y \quad (2.1)$$

$$\tau = \mu \dot{\gamma} + \tau_y \quad \text{for} \quad \tau \geq \tau_y \quad (2.2)$$

โดยที่: $\tau$	=	ความเค้นเฉือน (Pa)
$\dot{\gamma}$	=	อัตราเฉือน ( $s^{-1}$ )
$\tau_y$	=	ความเค้นคราก (Pa)
$\mu$	=	ความหนืด (Pa s)



รูปที่ 2.13 แสดงเส้นโค้งการไหลของของไหลอุดมคตินิวโตเนียนและพลาสติกหนืดแบบบิงแฮม และแบบจำลองเชิงกลที่แสดงด้วยแดชพอตและสไลเดอร์

Casson (1959) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายการไหลของของไหลแบบพลาสติกหนืด เรียกว่า แบบจำลองคาสสัน (Casson model) ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

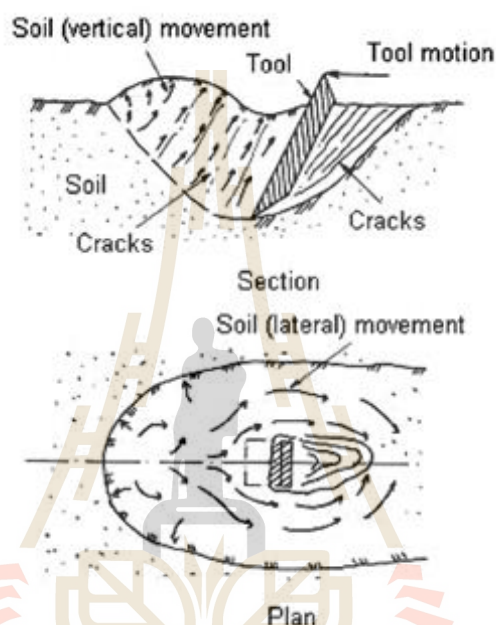
$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{for} \quad \tau < \tau_y \quad (2.3)$$

$$\tau^{1/2} = (\mu \dot{\gamma})^{1/2} + \tau_y^{1/2} \quad \text{for} \quad \tau \geq \tau_y \quad (2.4)$$

โดยที่:  $\tau$  = ความเค้นเฉือน (Pa)  
 $\dot{\gamma}$  = อัตราเฉือน ( $\text{s}^{-1}$ )  
 $\tau_y$  = ความเค้นคราก (Pa)  
 $\mu$  = ความหนืดเฉือน (Pa s)

จากการอภิปรายข้างต้นเป็นที่ชัดเจนแล้วว่า ดินสามารถถือได้ว่าเป็นวัสดุพลาสติกที่มีความหนืดสูงและมีพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) การเปลี่ยนรูป

ของดินจากการตะกุนดินของล้อเหล็กที่มีการเคลื่อนที่ จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการวิบัติของดิน เนื่องจากเครื่องมือไถพรวนดินจะทำให้เกิดการตัดดิน ในขั้นตอนทางพลศาสตร์สามารถสังเกตได้ว่า มีลักษณะการไหลของดินผ่านเครื่องมือ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการไหลภายนอก Desai และ Phan (1980) ได้นำเสนอ การกระทำของเครื่องมือกับดินใน 3 มิติ เมื่อเครื่องมือเคลื่อนที่ผ่านดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.14

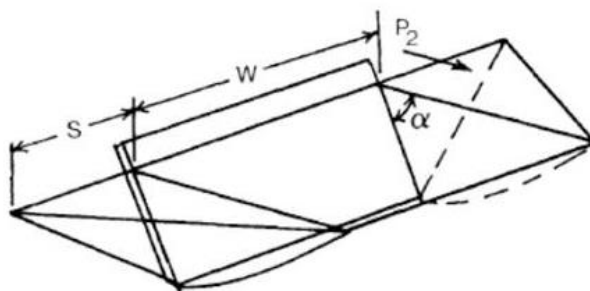


รูปที่ 2.14 แสดงการไหลของดินผ่านเครื่องมือ

#### 2.5.4 แรงตัดดิน

อนุตร จำลองกุล (2551) กล่าวว่า การวิเคราะห์ค่าความเค้นที่กระทำต่ออุปกรณ์ตัดดินด้วยการวิเคราะห์ 3 มิติ จะพิจารณาผลกระทบจากด้านข้างของแผ่นใบมีดตัดดิน ซึ่งจะทำให้ดินด้านข้างของแผ่นใบมีดตัดดินเกิดการเคลื่อนตัวออกไปด้านข้างขอบใบมีดตัดดิน ได้นำเสนอแบบจำลองของแรงตัดดิน 3 แบบ ดังนี้

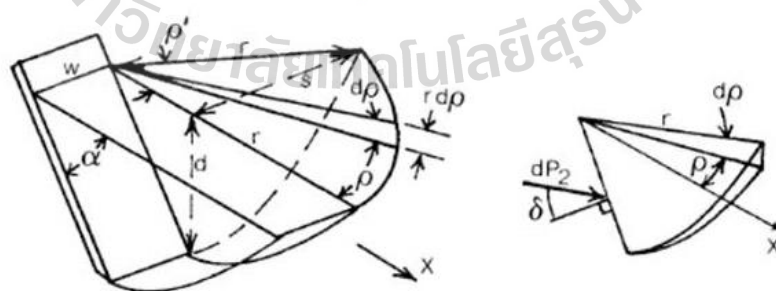
1) แบบจำลองของ Hettiaratchi และ Reece (1967) ได้อธิบายถึงแรงตัดดินที่ทำให้ดินเกิดการเคลื่อนตัวใน 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการวิบัติตัวของดิน ตามแบบจำลองของ Hettiaratchi และ Reece (1967)

จากรูปที่ 2.15 แสดงขอบเขตของดินที่ถูกกระทำให้เกิดการเคลื่อนตัวโดยแผ่นไบริมตัดดิน ดินจะถูกดันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า และถูกยกตัวขึ้นไปตามแนวของแผ่นไบริมตัดดิน บริเวณด้านข้างของแผ่นไบริมตัดดินทั้งสองข้าง จะมีแนวเขตของดินเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม ซึ่งมีความกว้างแต่ละข้างเท่ากันคือระยะ  $S$  ในการหาค่าแรงที่กระทำต่อแผ่นไบริมตัดดินในแนวระนาบทั้งหมด ประกอบด้วยแรงในแนวระนาบบริเวณจุดศูนย์กลางของแผ่นไบริมตัดดิน และแรงบริเวณด้านข้างทั้งสองของแผ่นไบริมตัดดิน

2) แบบจำลองของ Godwin และ Spoor (1977) แบบจำลองนี้ได้กล่าวถึงการวิบัติตัวของดินเนื่องจากแผ่นไบริมตัดดินหน้าแคบ การวิบัติตัวของดินจะเกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าและด้านข้างของแผ่นไบริมตัดดิน มีลักษณะเป็นเสี้ยวของทรงกลม และแนวเส้นของการวิบัติตัวจะเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.16

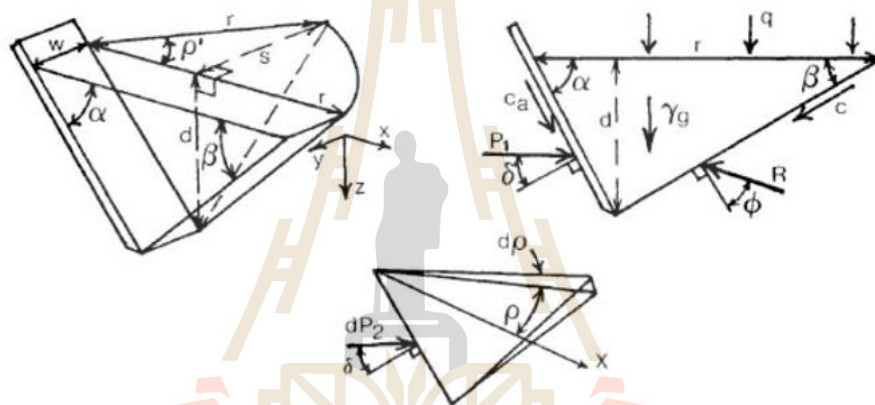


รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการวิบัติตัวของดิน ตามทฤษฎีของ Godwin และ Spoor (1977)

จากรูปที่ 2.16 ระยะการวิบัติตัวบนพื้นดินคือ  $r$  มีค่าเท่ากับระยะรัศมีด้านข้างของเสี้ยวดิน ซึ่งเกิดการวิบัติตัวด้านข้างของแผ่นไบริมตัดดิน มุมที่เกิดขึ้นเนื่องจากแนวเส้นการ

วิบัติตัวบนพื้นดินกับแนวเส้นการวิบัติด้านข้างของเสี้ยวดิน  $\rho'$  ปริมาตรของดินที่ถูกกระทำให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยแผ่นมีดตัดดิน จะมีความกว้าง  $w$  เมื่อพิจารณาลิมิตินเล็กๆ มีมุม  $d\rho$  ถูกกระทำด้วยแรง  $dP_2$  พื้นที่ส่วนบนของลิมิติน จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม

3) แบบจำลองของ Mckyes และ Ali (1977) แบบจำลองนี้ใช้ในการวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการตัดดิน ด้วยอุปกรณ์ตัดดินหน้าแคบ แสดงดังรูปที่ 2.17 โดยที่แนวเขตของลิมิตินจะถูกสมมติว่าอยู่ด้านหน้าของแผ่นใบมีดตัดดิน ซึ่งมีความกว้าง  $w$  และมีมุมการวิบัติตัวของดินเท่ากับ  $\beta$  ส่วนบริเวณด้านข้างของแผ่นใบมีดตัดดินทั้งสองข้าง จะทำให้เกิดการวิบัติตัวในลักษณะเสี้ยวของทรงกลมมีรัศมีเช่นเดียวกันแบบจำลองของ Godwin และ Spoor (1977)



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการวิบัติตัวของดิน ตามทฤษฎีของ McKyes และ Ali (1977)

จากรูปที่ 2.17 ระยะ  $r$  และ  $S$  ขึ้นอยู่กับมุมของลิมิติน ( $\beta$ ) และมุมของลิมิตินที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณของดินที่ถูกกระทำให้เกิดการเคลื่อนตัว รูปทรงของอุปกรณ์ตัดดิน และความต้องการในการเคลื่อนย้ายดินไปยังด้านข้างของแผ่นใบมีดตัดดิน ณ จุดศูนย์กลางของแผ่นใบมีดตัดดินจะต้องใช้แรง  $P_1$  ในการทำให้ลิมิตินเกิดการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาส่วนของเสี้ยวดินที่อยู่ด้านข้างของแผ่นใบมีดตัดดิน ด้วยการพิจารณาแยกส่วนออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ ดังรูปที่ 2.17 มุมเสี้ยวดินที่พิจารณาคือ  $d\rho$  และแรงที่ทำให้เสี้ยวดินเกิดการเคลื่อนตัวคือ  $dP_2$  พื้นที่บริเวณส่วนบนและด้านข้างของเสี้ยวดินดังกล่าวจะพิจารณาให้เป็นรูปสามเหลี่ยม

## 2.6 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) หรือ CFD เป็นการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และเทคนิคเชิงตัวเลข (Numerical Techniques) ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล (Fluid) การใช้ CFD วิเคราะห์ปัญหาของของไหลทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของการไหลของของไหลได้เป็นอย่างดี เนื่องมาจากการแสดงผลการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์สามารถแสดงเป็นภาพแอนิเมชัน (Color Contour Graphic) ของผลลัพธ์ ทำให้มองเห็นบริเวณที่มีค่าความรุนแรงของผลลัพธ์ได้ การปรับแก้รูปร่างของโครงสร้างบริเวณที่มีการไหลให้เกิดความเหมาะสมจึงสามารถกระทำได้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลาย ๆ ครั้ง จนได้ผลลัพธ์ที่พอใจและมั่นใจจึงนำผลการคำนวณที่ได้ไปสร้างโครงสร้างจริง (ชาคริต สุวรรณจรัส, 2561)

เทคนิคเชิงตัวเลขที่ถูกนำมาใช้ใน CFD อาจประกอบด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) หรือ วิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) โดยส่วนมากแล้ววิธีเชิงตัวเลขเหล่านี้จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ เช่น FORTRAN, C, C++ เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองการไหลของของไหล ทั้งนี้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดเป็นระเบียบวิธีที่มีการนำมาใช้งานในซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ เช่น ANSYS, STAR-CD, FLUENT

### ขั้นตอนของการจำลองการไหลด้วย CFD

การจำลองการไหลด้วย CFD ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ Pre-Processing, Solving และ Post-Processing มีรายละเอียดดังนี้

ก) Pre-Processing เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้สมการควบคุม (Governing Equation) ในรูปแบบของสมการไม่ต่อเนื่อง (Discretized Equation) การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) การกำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) ของปัญหา และการสร้างเซลล์ (Cell), Mesh หรือ กริด (Grid) เซลล์ของวิธีปริมาตรจำกัดประกอบด้วยเซลล์หลัก ซึ่งเป็นเซลล์ที่วิเคราะห์หรือให้ความสนใจ และเซลล์ที่วางล้อมรอบเซลล์หลักคือเซลล์ข้างเคียง โดยเซลล์ข้างเคียงจะอาศัยผิวหน้าเซลล์หลักด้านที่ติดกับเซลล์หลัก

ข) Solving หรือ Solution เป็นการแปลงสมการควบคุม เงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะขอบเขตของปัญหาการไหลให้อยู่ในรูปแบบของพีชคณิต หรือการสร้างความไม่ต่อเนื่อง (Discretization) ในรูปแบบสมการพีชคณิต (Algebraic Equation) และการหาผลเฉลยของปัญหาการไหลวิธีปริมาตรจำกัดจะกำหนดสมการไม่ต่อเนื่องด้วยการใช้พีชคณิตที่สนใจ และพีชคณิตข้างเคียงขึ้นกับมิติที่ทำการสร้างสมการ (1, 2 หรือ 3 มิติ) การหาผลเฉลยของสมการพีชคณิตที่ได้จากระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) ซึ่งมีทั้งแบบตรง (Direct Methods) และแบบทำซ้ำ

(Iterative Methods) แต่ที่นิยมจะเป็นแบบทำซ้ำมากกว่าแบบตรง เนื่องจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำ จะใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณน้อยกว่าแบบตรง

ค) Post-Processing เป็นการวิเคราะห์ผลของการคำนวณ และการแสดงผลการคำนวณของวิธีปริมาตรจำกัดด้วยกราฟฟิก (Graphic) หรือภาพ การแสดงผลของการคำนวณด้วยกราฟฟิกจะทำให้ผู้วิเคราะห์ผล CFD เข้าใจปรากฏการณ์การไหลของของไหลได้ดียิ่งขึ้น การเลือกชนิดของภาพกราฟฟิกจึงมีผลต่อความเข้าใจดังกล่าว ผลการวิเคราะห์ที่เป็นค่าของความเร็วและทิศทางการไหลจะนิยมใช้การแสดงผลด้วยเส้นสี (Color Contour) ซึ่งอาจจะเป็นเส้นสีเทา (Grey Contour) ก็ได้ บริเวณส่วนไหนที่ของไหลมีการไหลด้วยความเร็วสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ในโดเมนการไหลจะมีสีแดงหรือสีขาว ส่วนทิศทางการไหลจะนิยมใช้เวกเตอร์หรือภาพลูกศรชี้ไปในทิศการไหลของของไหล และเพื่อให้เห็นลักษณะของการไหลได้ดีมักนิยมแสดงโดเมนการไหลเป็นภาพตัด (Section View) ในบริเวณที่สนใจ

ระเบียบวิธีทางพลศาสตร์ของไหลในปัจจุบันได้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งระบบการใช้งานจะเป็นวิธีการเตรียมขั้นตอนของทุกกระบวนการในการวิเคราะห์ผล ทั้งในการเตรียมชิ้นงาน การกำหนดปัญหาและเงื่อนไขขอบเขต ตลอดจนการตีความผลของคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทั้งในรูปแบบของตัวเลข และรูปแบบของภาพแสดงผลต่างๆ ขั้นตอนการคำนวณผลจะแยกตามวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) (วิระยุทธ หล้าอมรชัยกุล, 2557) ได้ดังนี้

1) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Building the Mathematical Model) สำหรับการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล ทำการนำชิ้นส่วนงานที่ได้ออกแบบรูปทรงของปัญหาขอบเขตด้วยโปรแกรม CAD 3D ทั้งชิ้นส่วนที่เป็นชิ้นงานเดี่ยว และชิ้นงานประกอบ ชิ้นงานต้นแบบที่ต้องการทำการวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลข และถูกนำมาทำการแบ่งออกเป็นเมชเอลิเมนต์เล็กๆ โดยมีจำนวนหลายๆ เอลิเมนต์ แต่มีจำนวนจำกัดที่สามารถนับได้ (Finite element mesh) ขนาดของเอลิเมนต์จะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติ หรือการกำหนดพื้นที่เมชเอลิเมนต์เองเมื่อบริเวณนั้นมีรูปร่างชิ้นส่วนที่ซับซ้อนและยากต่อการสร้างเมชเอลิเมนต์ให้ต่อเชื่อมกันอย่างสมบูรณ์

2) วิธีการสร้างชิ้นส่วนเมชเอลิเมนต์ (Building the Computational Fluid Dynamics Model) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) โดยอาศัยโปรแกรม CAD ในการสร้างชิ้นงานปัญหา ทั้งในรูปแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เป็นการเตรียมชิ้นงานเพื่อเลือกชนิดพร้อมทำการแบ่งเมชเอลิเมนต์ (Meshing) โดยเวกเตอร์ของแรงกระทำ และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ของปัญหาที่กำหนด กระทำลงบนโหนด (Nodes) ของชิ้นส่วนแบบแบ่งเมชเอลิเมนต์ (Finite Element Mesh)



3) รูปแบบสมการในระบบการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล (Equation of the Computational Fluid Dynamics System) เป็นขั้นตอนที่กำหนดคุณลักษณะทางแบบจำลองทางกายภาพของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เช่น การกำหนดรูปแบบสมการของการเคลื่อนที่ของไหล สมการเอนทาลปี สมการอนุรักษ์มวล โดยพิจารณาสนามการไหลของของไหล ในการวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลขของพลศาสตร์ของไหลที่ต้องคำนึงถึงสมการควบคุมหลัก ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง (2.5)

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (2.5)$$

สมการโมเมนตัม (2.6)

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla \vec{P} + \mu(\nabla^2 \vec{V}) - \rho g_i, \quad i = x, y, z \quad (2.6)$$

เมื่อ

$\vec{V}$  คือ ค่าเวกเตอร์ความเร็ว

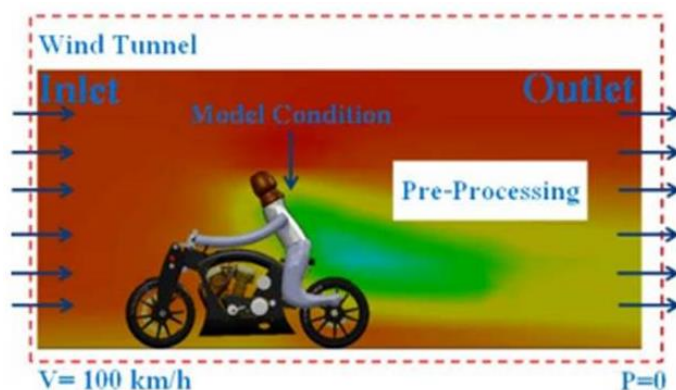
$\vec{P}$  คือ ค่าเวกเตอร์ความดัน

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของไหล

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของของไหล

$g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

4) วิธีการสร้างรูปแบบการวิเคราะห์และแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ (Solving of the Computer Fluid Dynamics Model) เป็นขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล (Boundary Condition) ก่อนทำการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์และประมวลผล ซึ่งตัวอย่างขั้นตอนการสร้างเงื่อนไขขอบเขต ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

สุเทพ และ สมชาย (2559) กล่าวว่า วัตถุใดๆ ที่เคลื่อนที่เข้าไปในของไหลจะมีแรงต้าน (Drag Force) เกิดขึ้น แรงสุทธิเนื่องจากแรงดัน (Pressure Force) และแรงเฉือน (Shear Force) ที่กระทำบนผิวของวัตถุจะอยู่ในทิศทางของการไหล แรงสุทธิดังกล่าวนี้เป็นการรวมแรงในแนวตั้งฉากกับแรงในแนวสัมผัสที่อยู่ในทิศทางของการไหล ซึ่งต้องทราบการกระจายความดัน ( $P$ ) และความเค้นเฉือน ( $\tau_w$ ) บนผิวของวัตถุ สำหรับรูปร่างที่ซับซ้อนเราอาจหาแรงต้านโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยแรงต้านหาได้จากสมการที่ 2.7

$$\text{Drag} = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (2.7)$$

เมื่อ  $C_D$  = สัมประสิทธิ์แรงต้าน  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของของไหล  
 $U$  = ความเร็วของของไหลที่ผ่านวัตถุที่หยุดนิ่ง หรือความเร็วของวัตถุในของไหลที่หยุดนิ่ง  
 $A$  = พื้นที่ของวัตถุที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

## 2.7 การออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร

วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน (2541) กล่าวว่า ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดเหมาะสมสำหรับวัสดุเหนียว มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเกณฑ์ของเทรสกา (Tresca's criterion) เป็นทฤษฎีที่

นิยมใช้กันมาก เพราะใช้ได้ง่ายและปลอดภัย ทฤษฎีนี้กล่าวว่า “วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับความต้านแรงเฉือนสูงสุดของวัสดุชนิดเดียวกัน ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงเมื่อถึงจุดคราก” ความต้านแรงเฉือนสูงสุดเมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจนถึงจุดครากมีค่าเท่ากับ  $0.5S_y$  ซึ่งเกิดบนระนาบเอียงทำมุม  $45^\circ$  กับแนวแรงดึงขึ้นทดสอบ ดังนั้น สำหรับทฤษฎีนี้ ความเสียหายจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อ

$$\tau_{\max} = S_{sy} = 0.5S_y$$

และสมการที่นำมาใช้ในการออกแบบเมื่อใช้ค่าความปลอดภัย  $N$  คือ

- ถ้า  $\sigma_1$  เป็นบวก และ  $\sigma_2$  เป็นลบ จะได้

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \pm \frac{S_y}{2N}$$

- ถ้า  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  เป็นบวกทั้งคู่ และ  $\sigma_1$  มากกว่า  $\sigma_2$  จะได้

$$\frac{\sigma_1}{2} = \pm \frac{S_y}{2N}$$

- ถ้า  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  เป็นบวกทั้งคู่ และ  $\sigma_2$  มากกว่า  $\sigma_1$  จะได้

$$\frac{\sigma_2}{2} = \pm \frac{S_y}{2N}$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \frac{S_y}{N}$$

$$\sigma_1 = \pm \frac{S_y}{N}$$

$$\sigma_2 = \pm \frac{S_y}{N}$$

ในกรณีทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสามารถกำหนดให้ความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าเป็น  $\tau_{\max} = \frac{S_{sy}}{N}$  เมื่อแทนค่า  $\tau_{\max}$  ลงในสมการความเค้นเฉือนสูงสุดแล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการสำหรับการออกแบบชิ้นงาน

$$\frac{1}{N} = \sqrt{\left(\frac{\tau}{\tau_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^2}$$

โดยที่  $S_{sy} = 0.5S_y$

ราวติ น่วมปฐม (2550) กล่าวว่า การคำนวณการออกแบบขาไถดินดาน ได้นำทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดมาใช้ในการออกแบบ และกำหนดขนาดของขาไถดินดานเพื่อให้มีความแข็งแรงของขาไถดินดาน มีรายละเอียดดังนี้

$$M = FL$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$\frac{1}{N} = \sqrt{\left(\frac{\tau}{\tau_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^2}$$

เมื่อ	$M$	=	โมเมนต์คัต (Nm)
	$F$	=	แรงที่กระทำต่อขาไถ (N)
	$L$	=	ระยะทางจากจุดหมุนถึงแนวที่แรงกระทำ (m)
	$I$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด (m <sup>4</sup> )

$c$	=	ระยะแกนสะเทิน (m)
$N$	=	ค่าความปลอดภัย
$\sigma$	=	ความเค้น ( $\text{N/m}^2$ )
$h$	=	ความหนาของขาไถ (m)
$b$	=	ความกว้างของขาไถ (m)
$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของขาไถ $= b \cdot h$ ( $\text{m}^2$ )
$\tau$	=	ความเค้นเฉือน ( $\text{N/m}^2$ )

## 2.8 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์การใช้งานเครื่องจักรกลเกษตร

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อคำนวณหาต้นทุนการใช้งานและจุดคุ้มทุนในการลงทุนเครื่องจักรกลเกษตร การคำนวณจุดคุ้มทุนใช้หลักการของ Donnell Hunt (1977) เมื่อคิดค่าเสื่อมราคาเป็นแบบเส้นตรง (Straight-Line Method) ดังนี้

ต้นทุนการใช้เครื่องจักรกลเกษตร

$$A_c = \left( \frac{F_c}{A} \right) + \left( \frac{1}{C_t} \right) [R + F + O + L]$$

$$F_c = D + I$$

$$D = \left( \frac{P - S}{N} \right)$$

$$I = \left[ \frac{P + S}{2} \right] \times \left( \frac{r}{100} \right)$$

เมื่อ	$D$	=	ค่าเสื่อมราคา	(บาท/ปี)
	$I$	=	ดอกเบี้ย	(บาท/ปี)
	$P$	=	ราคาแรกซื้อ	(บาท)
	$S$	=	มูลค่าซาก	(บาท)
	$N$	=	อายุการใช้งาน	(ปี)
	$r$	=	อัตราดอกเบี้ย	(เปอร์เซ็นต์/ปี)
	$A_c$	=	ต้นทุนการใช้เครื่อง	(บาท/ไร่)
	$F_c$	=	ต้นทุนคงที่	(บาท/ปี)
	$A$	=	พื้นที่ปลูกใน 1 ปี	(ไร่)
	$R$	=	ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา	(บาท/ชั่วโมง)

$F$	=	ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	(บาท/ชั่วโมง)
$O$	=	ค่าน้ำมันหล่อลื่น	(บาท/ชั่วโมง)
$L$	=	ค่าแรงงาน	(บาท/ชั่วโมง)
$C_t$	=	ความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรกลเกษตร	(ไร่/ชั่วโมง)

### ระยะเวลาคืนทุนของการใช้เครื่องจักรกลเกษตร

ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period, PBP) คือระยะเวลาจากการเริ่มต้นลงทุนถึงเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิ (Net Benefits) ของการใช้เครื่องจักรกลเกษตรมีค่าเท่ากับการลงทุน คำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \frac{\text{จำนวนเงินลงทุน}}{\text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี}} \\ \text{ผลประโยชน์สุทธิ} &= \text{ผลประโยชน์ (บาท/ปี)} - \text{ต้นทุนการใช้เครื่องมือ} \\ &\quad (\text{ไม่รวมค่าเสื่อมราคา}) \\ \text{ผลประโยชน์ที่ได้รับ} &= \text{พื้นที่เพาะปลูก} \times \text{ค่าจ้างไถ (บาท/ไร่)} \\ \text{ต้นทุนการใช้เครื่อง} &= \text{ดอกเบี้ย} + \text{ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา} + \text{ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง} + \text{ค่าน้ำมันหล่อลื่น} + \text{ค่าแรงงาน} \end{aligned}$$

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอัดตัวแน่นของดิน และไถดินดาน มีรายละเอียดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และรัชฎา นิยมภา (2547) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอัดแน่นของดินและการเจริญเติบโตและผลผลิตของอ้อย โดยทำการทดลองเพาะปลูกอ้อยในแปลงทดลอง ออกแบบการทดลองเป็นแบบ RCBD 4 ระดับการอัดแน่นดินในแปลง 4 ซ้ำหรือบล็อกเพื่อกำจัดอิทธิพลของการให้น้ำแบบร่องคู ได้ทำการปลูกอ้อยในแปลงที่มีระดับการอัดแน่นดินต่างกัน 4 ระดับที่ได้จากการเตรียมดินบดอัดด้วยรถแทรกเตอร์ที่ 0, 5, 15 และ 20 เทียววิ่ง เพื่อให้ได้สภาพของแปลงใกล้เคียงกับแปลงที่ทำการเพาะปลูกอยู่จริง ผลจากการทดลองพบว่า ระดับการอัดแน่นของดินมีอิทธิพลทางลบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของอ้อย แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความหวานของอ้อย โดยผลผลิตในแปลงที่มีการอัดบด 15 เทียววิ่งมีผลผลิตต่ำสุดมีค่าลดลงถึง

22.90% เมื่อเทียบกับผลผลิตของแปลงที่ไม่ได้บดอัด แต่ในแปลงที่มีการบดอัด 20 เทียวว้าง ชั้นอัดแน่นสูงสุดของดินก่อนข้างอยู่ใกล้ผิวดินทำให้ดินมีความชื้นสูงหลังการให้น้ำส่งผลให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินบริเวณดังกล่าวลดลง รากอ้อยซึ่งสามารถแทงทะลุได้ง่าย ทำให้การเจริญเติบโตหลังจากเดือนที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับแปลงที่ไม่ได้บดอัด แต่อย่างไรก็ตามผลผลิตของอ้อยในแปลงที่มีการบดอัดที่ 20 เทียวว้างมีค่าต่ำกว่าแปลงที่ไม่ได้บดอัดมาก โดยมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับแปลงที่มีการบดอัดที่ 15 เทียวว้าง เนื่องจากแปลงดังกล่าวมีอัตราการงอกต่ำ ส่วนอิทธิพลของบดอัดหรือการให้น้ำส่งผลอย่างมีนัยสำคัญยิ่งต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของอ้อย และมีแนวโน้มในการช่วยลดอิทธิพลของการอัดแน่นของดินลงด้วย

อนุตร จำลองกุล (2551) ได้ศึกษาลักษณะการแตกตัวของดิน ทดสอบไถดินดานชนิดไม่ติดปีก มุมคราด  $45^{\circ}$  ทำในกะบะดิน ที่ความชื้นของดิน 22%db ไถที่ความลึก 22 เซนติเมตร ด้วยความเร็วในการไถเฉลี่ย 0.66 เมตรต่อวินาที พบว่า อัตราการสิ้นไถล 19.40 เปอร์เซ็นต์ แรงลัพธ์ที่กระทำต่อขาไถ 3,195.89 นิวตัน มีพื้นที่หน้าตัดการแตกตัวเฉลี่ยเท่ากับ 7,311.70 ตารางเซนติเมตร

ราวุฒิ น่วมปฐม (2550) ได้พัฒนาอุปกรณ์ปรับปรุงการอัดแน่นของดินในไร่อ้อย โดยทำการศึกษาขาไถที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 4 แบบ ทำการทดสอบในชุดดินเหนียวที่กะบะดิน และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัสมบัตินของดิน พบว่า ขาไถดินดานรูปตัว C มีมุมไถ 30 องศา และขาไถเอียง 60 องศา มีมุมไถ 30 องศา มีความเหมาะสมในการใช้เป็นอุปกรณ์บรรเทาการอัดแน่นของดินในไร่อ้อย

Kaveh, Ali, and Ebrahim (2010) ได้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากความล้าเพื่อประเมินอายุการใช้งานของไถดินดานชนิด C shape, sloping shape และ L shape ในเงื่อนไขเริ่มต้นและแรงที่กระทำกับแบบจำลอง หาแรงต้านของดินร่วนเหนียวที่ไถดินดานกระทำ และวิเคราะห์แบบจำลองด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS พบว่า ไถดินดานชนิด C shape มีค่าความปลอดภัยสูงสุด และมีอายุการใช้งานนานสุด เมื่อเทียบกับชนิด Sloping shape และ L shape

Mahajan and Budhu (2008) ได้ศึกษาค่าความหนืดเฉือนของดินเหนียว โดยประยุกต์ใช้วิธี fall cone test ที่มีมุมกรวย  $30^{\circ}$  ใช้ทรานสดิวเซอร์ชนิด LVDT ที่ผ่านการสอบเทียบเป็นเครื่องมือวัดระยะจุมของกรวยเทียบเวลา และติดตั้งที่บนแกนเพลลา ใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูล Data Acquisition System ความถี่ 1 kHz สำหรับบันทึกข้อมูล พบว่า วิธีดังกล่าวนำมาประยุกต์ใช้หาค่าความหนืดเฉือนของดินที่มีค่าดัชนีสภาพเหลว (Liquidity Index) น้อยกว่า 1.5 ได้

กฤษณะ เทียนมณี, เสรี วงศ์พิเชษฐ และขวัญตรี แสงประชานารักษ์ (2559) ได้ศึกษาพารามิเตอร์แรงต้านของดินในพื้นที่ไร่ของจังหวัดขอนแก่น โดยทำการทดสอบไถรื้อต่ออ้อย ด้วยผลาดบุกเบิก 3 จาน ผลาดพรวน 7 จาน และผลาดสับกลบเศษซากอ้อย ทำการทดสอบวัดคุณสมบัติของ

ดิน แรงจุดตก หน้ากว้างและความลึกของการไถ ความเร็วเฉลี่ย และประสิทธิภาพการทำงาน เพื่อนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์แรงต้านของดิน โดยใช้สมการจากการทดลอง (empirical equation) ซึ่งพัฒนาโดยสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา พบว่า พื้นที่ที่ทดสอบมีส่วนประกอบของเนื้อดินที่มีความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์แรงต้านของดิน ( $F_t$ ) ในแต่ละพื้นที่ที่มีคุณสมบัติจำเพาะของเนื้อดิน

ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์, พงษ์ศักดิ์ ต่ายก้อนทอง, อุษฎา สุขจันทร์ และอัศพล เสนาณรงค์ (2560) ได้ออกแบบไถดินดานแบบ 2 ขา มีปีกสองข้าง ขนาดขาไถยาว 1 เมตร ปลายขาไถมีมุมจิกดินที่ 30 องศา และใช้ต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ขนาด 49-50 แรงม้า พบว่า ไถดินดานสามารถระเบิดดินดานได้ที่ความลึกเฉลี่ย 41 เซนติเมตร มีความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 2.41 ไร่ต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการทำงานเชิงพื้นที่เฉลี่ย 70.71 เปอร์เซ็นต์ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 3.52 ลิตรต่อไร่ และสามารถใช้กับรถแทรกเตอร์ขนาด 49 แรงม้าได้

ตฤณสิทธิ์ ไกรสินบุรศักดิ์ และชัยยากร จันทร์สุวรรณ (2560) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไถดินดานชนิดสั้นและไม่สั้นที่ขา 1 ขา แบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิต ทำการทดสอบสมรรถนะของไถดินดานในพื้นที่ดินร่วนเหนียวปนทราย ความชื้นของดินเฉลี่ย 20.60 %db ความหนาแน่นดินสภาวะแห้งเฉลี่ย 1.66 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเฉลี่ย 2.58 เมกกะปาสคาล ความลึกในการไถ 2 ระดับ คือ 30 และ 40 เซนติเมตร พบว่า ปัจจัยทดสอบที่เหมาะสมในการไถดินดาน คือความเร็วรถแทรกเตอร์ Low 2

Karmakar and Kushwaha (2005) ได้ทำการศึกษาการจำลองการเปลี่ยนรูปของดินรอบเครื่องมือไถดินโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยการไหลของดินมีคุณสมบัติอนินิวโตเนียน (Non-Newtonian) ที่มีพฤติกรรมของไหลแบบ Bingham ใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ CFX 4.4 ซึ่งเป็นโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) มาจำลองพฤติกรรมการไหลของดิน พบว่า การเปลี่ยนรูปของดินจะแผ่กระจายไปด้านหน้าของเครื่องมือไถดิน เกิดการไหลที่มีลักษณะ plastic flow และ plug flow โดยวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีศักยภาพในการใช้เป็นแบบจำลองการไหลของดินผ่านเครื่องมือไถดิน

เกรียงไกร ราชณะสุข, กัญญา โกสุมภ์ และสามารณ บุญอาจ (2559) ได้ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานหน้าแคบรูปทรงตัว C, L และขาเอียง ปลายขาไถมีมุมจิกดินที่ 30 องศา ด้วยการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ พบว่า การแตกตัวของดินเริ่มจากปลายขาไถดินดาน โดยดินใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านไถดินดานรูปทรงตัว C น้อยสุด รองลงมา รูปทรงขาเอียง และ รูปทรงตัว L



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหารูปร่างของไถดินดานที่ลดแรงลากในแนวระดับ โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยต่าง ๆ ดังนี้ 1) การศึกษารูปร่างของไถดินดาน 2) การศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร 3) การทดสอบแรงลากในภาคสนามเทียบกับแรงต้านที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของไถดินดานที่มีใช้อยู่แล้ว 4) การออกแบบไถดินดานต้นแบบ 5) การจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานต้นแบบ 6) การวิเคราะห์แรงต้านของดินสำหรับไถดินดานต้นแบบ 7) การวิเคราะห์ความแข็งแรงของไถดินดานต้นแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 8) การทดลองไถดินดานต้นแบบที่ระดับความลึกในการไถต่างกัน 9) การทดสอบประเมินผลสมรรถนะไถดินดานในภาคสนาม 10) การเปรียบเทียบแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามกับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของไถดินดานต้นแบบ และ 11) การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ไถดินดานต้นแบบ มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้การวิจัย

##### 3.1.1 เครื่องมือวัดการทะลุทะลวงของกรวย (Cone Penetrometer)

การวัดความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนของดินวัดด้วยเครื่องมือวัดการทะลุทะลวงของกรวย (Cone Penetrometer) ยี่ห้อ Wykeham Farrance ความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องมือวัดการทะลุทะลวงของกรวย ยี่ห้อ Wykeham Farrance

### 3.1.2 ทรานสดิวเซอร์วัดระยะทางเชิงเส้นแบบ Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

การวัดระยะการจมของกรวยเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนของกรวย เครื่องมือวัดที่ใช้คือ ทรานสดิวเซอร์ LVDT ยี่ห้อ Volfa แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ทรานสดิวเซอร์ LVDT

### 3.1.3 อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

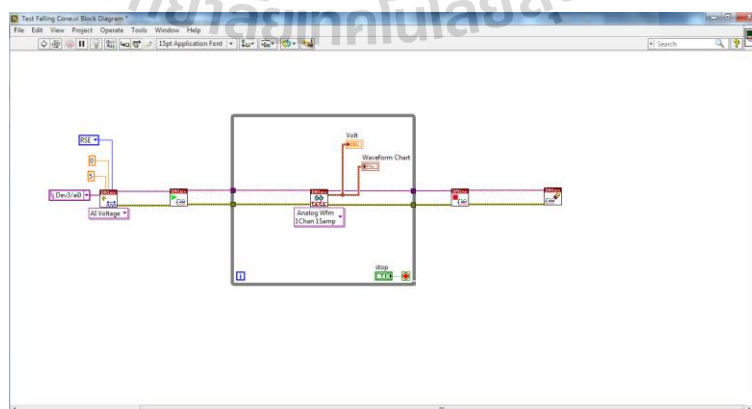
อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลยี่ห้อ NATIONAL INSTRUMENTS รุ่น NI USB-6212 ใช้รวบรวมข้อมูลที่ได้รับสัญญาณจากทรานสดิวเซอร์ที่ติดตั้งบนเครื่องมือวัดการทะลุทะลวงของกรวย ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดขยายสัญญาณยี่ห้อ NATIONAL INSTRUMENTS รุ่น NI USB-6212

### 3.1.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวัดและเครื่องมือวัด

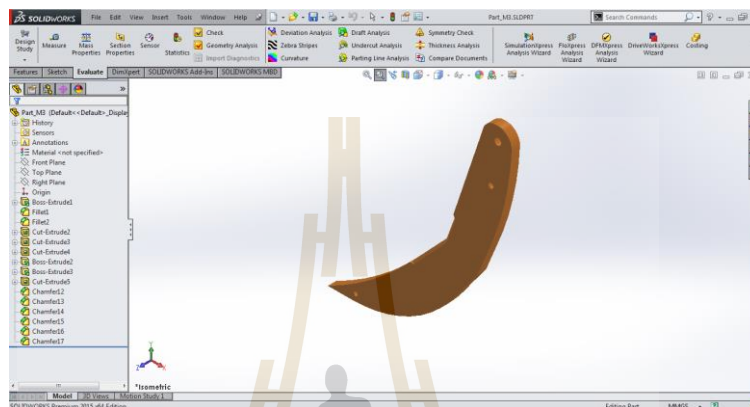
โปรแกรมที่ใช้ในการสนับสนุนการวัดทางวิศวกรรม สามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำเป็นที่ยอมรับและน่าเชื่อถือกันอย่างแพร่หลายในวงการด้านวิศวกรรม โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ LabView แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabView

### 3.1.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม

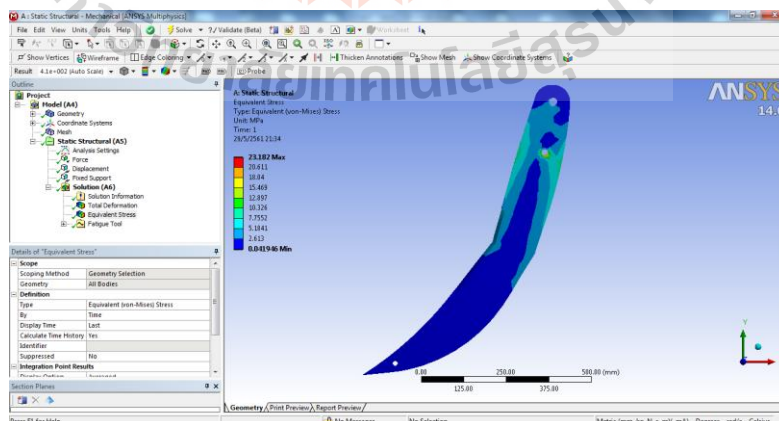
โปรแกรมที่ใช้ในการสนับสนุนการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ สามารถสร้างแบบจำลองให้มีมิติที่เหมือนของจริงได้ โดยการแสดงภาพที่มีมิติเหมือนจริงได้ในมุมมองต่าง ๆ โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานสำหรับงานวิจัยนี้คือ SolidWorks แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองไดคินดาน

### 3.1.6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรง

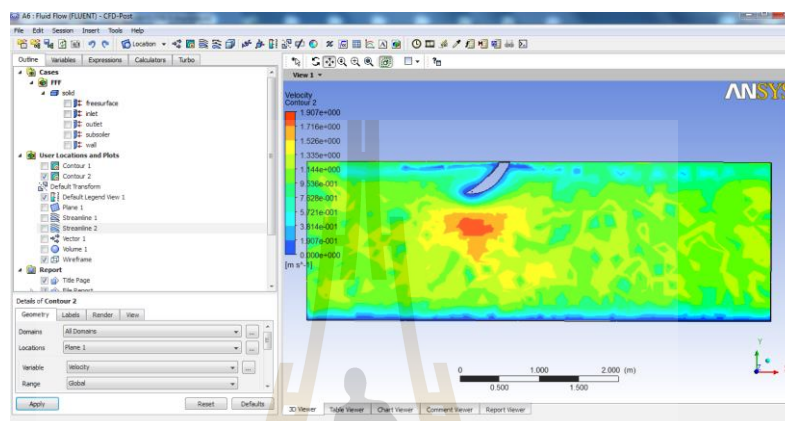
โปรแกรมที่ใช้ในการสนับสนุนการวิเคราะห์ความแข็งแรง วิเคราะห์ได้แม่นยำเป็นที่ยอมรับ และน่าเชื่อถือในวงการด้านวิศวกรรม คือ ANSYS Static Structure แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Static Structure

### 3.1.7 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

โปรแกรมที่ใช้ในการสนับสนุนการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล สามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำ เป็นที่ยอมรับและน่าเชื่อถือกันอย่างแพร่หลายในวงการด้านวิศวกรรม โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ANSYS Fluent แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent

### 3.1.8 รถแทรกเตอร์

รถแทรกเตอร์ยี่ห้อ MASSEY FERGUSON รุ่น 4245 ขนาด 85 แรงม้า สำหรับใช้ทดสอบหาแรงลาก ความเร็วในการเคลื่อนที่ และประสิทธิภาพในการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ MASSEY FERGUSON รุ่น 4245

### 3.1.9 เตาอบเพื่อหาความชื้น

เตาอบลมร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ FRANCE ETUVES รุ่น XU058 ใช้สำหรับอบดินก่อนและหลังการทดสอบ เพื่อหาความชื้นของดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เตาอบลมร้อน (Hot air oven)

### 3.1.10 เครื่องชั่งแบบละเอียด

เครื่องชั่งแบบละเอียดยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA 2245-CW มีความละเอียดในการชั่งถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ชั่งได้สูงสุด 220 กรัม อ่านละเอียด 0.0001 กรัม ใช้สำหรับการหาน้ำหนักของดินก่อนและหลังเข้าตู้อบเพื่อหาความชื้นของดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งแบบละเอียด

### 3.1.11 อุปกรณ์วัดแรงลากในแนวระดับ

อุปกรณ์วัดแรงลากในแนวระดับเป็น Load cell ยี่ห้อ TRANSMATE พิกัด 5,000 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์วัดแรงลากในแนวระดับ

### 3.1.12 อุปกรณ์วัดความเร็วของรถแทรกเตอร์ขณะทำงาน

อุปกรณ์วัดความเร็วในการทำงานคือ นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ Rhythm รุ่น LCT055 ใช้จับเวลาของรถแทรกเตอร์ที่เคลื่อนที่ไปในระยะทาง 10 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 นาฬิกาจับเวลา

### 3.1.13 อุปกรณ์วัดการสิ้นเปลืองของล้อรถแทรกเตอร์

อุปกรณ์วัดการสิ้นเปลืองของล้อรถแทรกเตอร์คือ เทปเหล็กมือถือ ยี่ห้อ PROMA รุ่น PRO-540 ใช้วัดระยะการเคลื่อนที่ของล้อที่เคลื่อนที่ไป 3 รอบล้อ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เทปเหล็กมือถือ

### 3.1.14 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง

อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงคือ บีกเกอร์พลาสติกทรงกระบอก ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ใช้ในการตวงน้ำมัน เพื่อปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ไป ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง



### 3.1.15 เครื่องเคาะดิน (Liquid Limit Device)

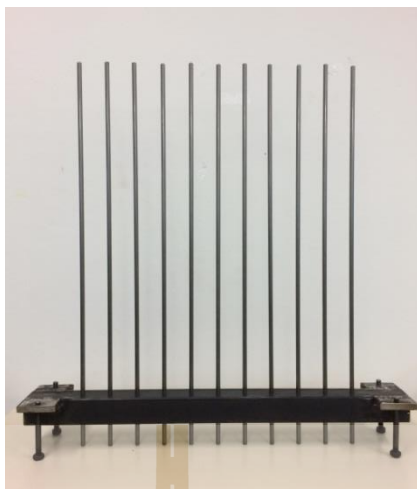
เครื่องเคาะดินใช้สำหรับหาค่า Liquid Limit โดยใช้ฐานไมกาด้า หน้า 50 มิลลิเมตร ขนาด 125 x 150 มิลลิเมตร มีกะทะทองเหลืองขนาดมาตรฐาน ใช้มีดปาดร่องดินแบบแบน ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องเคาะดิน

### 3.1.16 เครื่องมือวัดการแตกตัวของดิน (Soil Profile Meter)

เครื่องมือวัดการแตกตัวของดินสำหรับวัดการแตกตัวของดินใต้ผิวดินที่ถูกไถดิน ดานกระทำ ทำจากเหล็กเส้นจำนวน 11 เส้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้น 0.8 เซนติเมตร ยาวเส้นละ 70 เซนติเมตร ฐานรองทำจากเหล็กกล่องยาว 70 เซนติเมตร เจาะรูห่างกัน 5 เซนติเมตร จำนวน 11 รู ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่องมือวัดการแตกตัวของดิน (Soil Profile Meter)

### 3.1.17 เครื่องมือวัดกำลังต้านทานเฉือนของดิน (Shear annulus)

เครื่องมือวัดกำลังต้านทานเฉือนของดิน สำหรับวัดกำลังต้านทานเฉือนของดิน ก่อนและหลังการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องมือวัดกำลังต้านทานเฉือนของดิน

## 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 การศึกษารูปทรงของไถดินดาน

ไถดินดานชนิดธรรมดาที่มีรูปทรงลักษณะทางกายภาพสูงประมาณ 60-100 เซนติเมตร มี 3 ลักษณะรูปทรง ได้แก่ รูปทรงขาตรงหรือรูปตัว L (Straight) ขาโค้งหรือรูปตัว C (Curved) และขาเอียง (Inclined) (Singh, 2017) ดังแสดงในรูปที่ 3.18



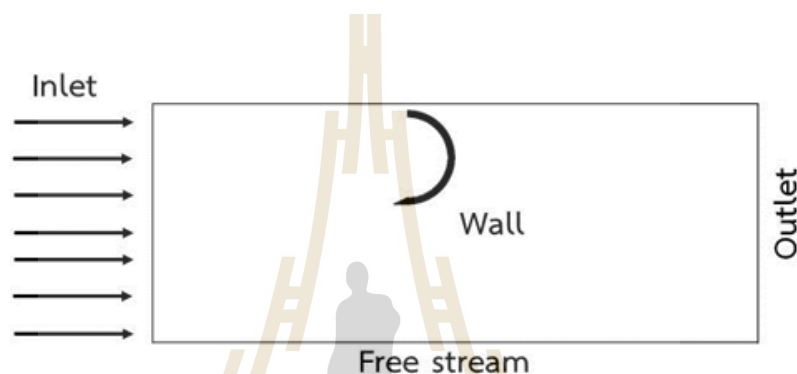
รูปที่ 3.18 ลักษณะรูปทรงไถดินดานชนิดธรรมดา

จากนั้น ดำเนินการออกแบบไถดินดานรูปทรงขาตัว L, C และขาเอียง เพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมการไหลผ่านของดิน มีความสูงขาไถ 45 เซนติเมตร มีความหนา 5 เซนติเมตร และ จากผลการศึกษามุมจิกดินของไถดินดานที่แนะนำโดย ราวติ น่วมปฐม (2550) ผู้วิจัยจึงเลือกใช้มุมไถหรือมุมจิกดิน 30 องศา เพื่อลดแรงลากในแนวระดับ โดยดำเนินการเขียนแบบไถดินดานทั้ง 3 แบบในโปรแกรม SolidWorks ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แบบขาไถดินดานรูปทรงต่าง ๆ

สร้างแบบจำลองการไหล เริ่มจากการกำหนดโดเมนของของไหลคือ ดินเป็นสารเนื้อต่อเนื่อง (continuum) และเป็นสารเนื้อเดียวกัน (homogeneous) สมมติให้ดินมีความหนาแน่น 1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สร้างเมช (meshing) ของขาไถทั้ง 3 แบบ กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) คือ ดินที่ขอบทางเข้ามีความเร็วเท่ากับ 0.8333 เมตรต่อวินาที หรือ 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ขอบทางออกมีความดันเท่ากับ 0 ปาสคาล ขอบผนังไม่มีการเลื่อนไหลราบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และแสดงผล (results) ในรูปแบบภาพ Graphic โดยใช้โปรแกรม ANSYS ช่วยวิเคราะห์ผล

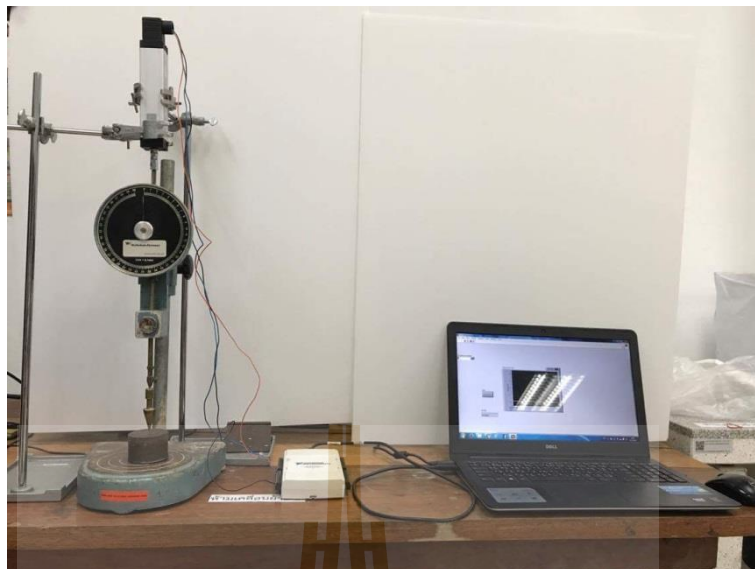


รูปที่ 3.20 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์การไหลของดินผ่านไถดินดาน

### 3.2.2 การศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร

จากการศึกษารูปทรงของขาไถดินดานด้วยการจำลองสถานการณ์การไหลของดินผ่านไถดินดานด้วยคอมพิวเตอร์แล้วนั้น จำเป็นต้องหาความเค้นเฉือนของดิน และความหนืดเฉือนของดิน เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณออกแบบหรือพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวิธีการวัดค่าต่างๆ โดยเฉพาะค่าความหนืดเฉือนของดิน ที่ยังไม่เคยมีวิธีการหาค่าดังกล่าวมาก่อน ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร ดังนี้

เริ่มจากการติดตั้งเครื่องทดสอบการทะลุทะลวงด้วยกรวย (Cone Penetrometer) ร่วมกับทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว (calibrated) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์บันทึกรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition System, DAQ) ที่มีสัญญาณความถี่ 1 kHz และคอมพิวเตอร์แบบพกพา เพื่อใช้แสดงผลทางหน้าจอ ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การติดตั้งเครื่องทดสอบการทะลุทะลวงด้วยกรวย

ทำการเก็บดินในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใช้ตะแกรงร่อนดิน (Sieve) เบอร์ 10 เพื่อแยกกรวดและดินออกจากกัน ประมาณ 300 กรัม จากนั้นใช้เครื่องไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) จำแนกชนิดดิน ส่วนขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) พิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ระยะเวลาของกรวยที่หยดนิ่ง และระยะเวลาของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ (Dynamic Equilibrium Depth) หาด้วยเครื่องวัดการทะลุทะลวงด้วยกรวย (Cone Penetrometer) โดยใช้กรวยมีมุมปลายแหลม 30 องศา พื้นผิวเรียบ น้ำหนัก 80 กรัม ปล่อยกรวยให้ตกจมลงในตัวอย่างดินที่ผสมน้ำไว้แล้วในภาชนะทรงกระบอกเป็นเวลา 5 วินาที จึงอ่านค่าระยะจมตัวของกรวยในดิน เก็บตัวอย่างไปหาค่าความชื้น ทำการทดลองซ้ำแบบเดิมอีก 3 ครั้ง (รวม 4 ครั้ง) ทุก ๆ ครั้งให้เพิ่มปริมาณน้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) โดยให้ได้การทดลองของกรวยจมอยู่ที่ระยะระหว่าง 15-25 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้ว คำนวณหาค่าความชื้นของดินในแต่ละครั้ง การทดลอง แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ แกนนอนเป็นค่าความชื้น แกนตั้งเป็นค่าระยะจมของกรวย ลากเส้นตรงเฉลี่ยผ่านจุดที่ค่าระยะจมของกรวย 20 มิลลิเมตร จะได้ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) ของดิน สำหรับการหาค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ให้เพิ่มน้ำหนักกรวยเป็น 240 กรัม และทำเหมือนขั้นตอนของ Wood และ Wroth (1978) จะได้ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI) และนำไปหาค่าดัชนีสภาพความเหลว (Liquidity Index, LI) (ASTM D4318-17, 2017) ดังสมการ 3.1

$$LI = \frac{w - PL}{PI} \quad (3.1)$$

โดยที่  $w$  คือ ความชื้นของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ, %

$PL$  คือ พิกัดพลาสติก, %

$PI$  คือ ดัชนีสภาพพลาสติก มีค่าเท่ากับ  $LL - PL$ , %

ทำการหาค่าความเค้นเฉือน โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแบบเซนเซอร์ชนิด LVDT ที่ส่วนบนของเครื่องทดสอบการทะลุทะลวงด้วยกรวย ตามรูปที่ 3.2 จากนั้นนำดินที่ผ่านการร่อนแล้วมาทำการทดสอบเหมือนกับวิธีการหาค่า Liquid Limit โดยใช้น้ำหนักของกรวยเริ่มต้นที่รวมกับน้ำหนักแกนเพลลาของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบเซนเซอร์ LVDT เท่ากับ 119 กรัม ต่อจากนั้น ทำการทดสอบโดยการเพิ่มน้ำหนักของกรวยอีก 80 และ 160 กรัม ตามลำดับ ทำการทดลองหาค่าความชื้นของดินต่างกัน 4 ระดับความชื้น เขียนโปรแกรมที่ใช้สำหรับการอ่านค่าประมวลผลสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม LabView ได้ค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง (final depth of penetration,  $h_f$ ) โดย Hansbo (1957) อ้างถึงใน Mahajan and Budhu (2008) ได้นำเสนอวิธีการหาค่าความเค้นเฉือน (shear stress) ที่มีความสัมพันธ์กับระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ดังสมการ 3.2

$$\tau_{CS} = \frac{KW}{h_f^2} \quad (3.2)$$

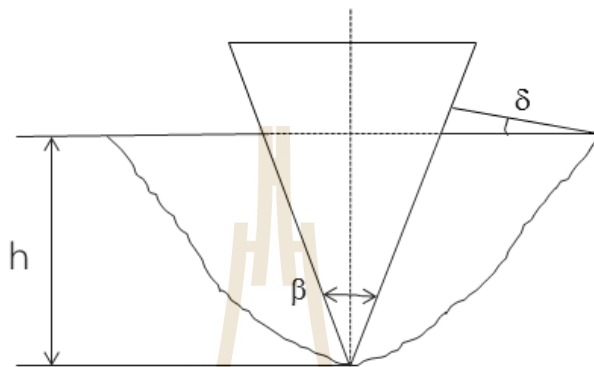
โดยที่  $\tau_{CS}$  คือ ค่าความเค้นเฉือนของดินที่สภาวะวิกฤตหรือสภาวะที่ดินไม่ระบายน้ำ ซึ่งเหมือนกับค่าความเค้นครากของของไหล (Yield Stress,  $\tau_y$ ), kPa

$W$  คือ น้ำหนักของกรวย, N

$K$  คือ ค่าคงที่ของกรวยที่มีผิวเรียบ โดยใช้ค่าคงที่ของ Koumoto and Houlsby (2001) ที่นำเสนอไว้ มีค่าเท่ากับ 2.00

ส่วนการหาค่าระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ โดยการหาความเร็วของกรวยที่จมลงในดินที่เป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น คำนวณหาความเร็วของกรวยได้จากค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่งต่อเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของกรวยที่จมลงในดิน นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง เพื่อหาค่าระยะจมของกรวยที่

สมดุลทางพลศาสตร์ (dynamic equilibrium depth,  $h_{eq}$ ) จากนั้นหาค่าความเค้นเฉือนของดินจากการประยุกต์ใช้กฎข้อที่ 2 ของนิวตันกับการตกของกรวยที่จมลงในดิน ทำให้เกิดระยะจมของกรวย (penetration depth,  $h$ ) และดินยกตัวอกรอบ ๆ ข้างของกรวย ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และได้ตามสมการที่ 3.3



รูปที่ 3.22 ไตอะแกรมของระยะจมของกรวย

$$mg - Fth^2 = ma \quad (3.3)$$

เมื่อเกิดสภาวะสมดุลทางพลศาสตร์ ทำให้ความเร่งเท่ากับศูนย์ ได้สมการ 3.4

$$mg = Fth_{eq}^2 \quad (3.4)$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนหาได้จากสมการ 3.5

$$\tau = \frac{mg}{Fh_{eq}^2} \quad (3.5)$$

โดยที่  $\tau$  คือ ความเค้นเฉือนของดิน, kPa

$m$  คือ มวลของกรวย, kg

$g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก,  $m/s^2$

$F$  คือ ค่าคงที่ของความต้านทานความหนืดของกรวย, ไม่มีหน่วย หาได้จากสมการ 3.6

$$F = \pi N_{ch} \tan^2(\theta) \quad (3.6)$$

โดยที่  $N_{ch}$  คือ ค่าความสามารถในการรองรับของกรวย (bearing capacity of the cone) ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 4.992 (Koumoto and Houlsby, 2001)

$\theta$  คือ มุมที่มีค่าครึ่งหนึ่งของมุมกรวย หรือ  $\beta/2$ , องศา

ส่วนการหาอัตราส่วนความเครียดเฉือน (shear strain rate) ได้จากวิธีการของ Koumoto and Houlsby (2001) ดังสมการ 3.7

$$\dot{\gamma} = \frac{2\delta}{2.44} \sqrt{\frac{g\sqrt{3}}{hf}} \quad (3.7)$$

โดยที่  $\dot{\gamma}$  คือ ค่าอัตราส่วนความเครียดเฉือน, 1/s

$\delta$  คือ มุมเอียงที่ผิวดินยกตัวขึ้นจากการตกของกรวยที่มีมุม 30 องศา ผิวเรียบ (Koumoto and Houlsby, 2001) หน่วย rad

การหาค่าความหนืดเฉือน เริ่มจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแบบทรานสดิวเซอร์ชนิด LVDT กับเครื่องทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย ตามรูปที่ 3.21 จากนั้น นำดินที่ผ่านการร่อนแล้วมาทำการทดสอบเหมือนกับวิธีการหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) โดยใช้น้ำหนักของกรวยเริ่มต้น และเพิ่มน้ำหนักของกรวยอีก 80 กรัม และ 160 กรัม ตามลำดับ ทดลองหาค่าความชื้นของดินต่างกัน 4 ระดับความชื้น เขียนโปรแกรมสำหรับใช้ในการอ่านค่าประมวลผลสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม LabView จะได้ค่าระยะจมของกรวยที่หยุดหนึ่ง (final depth of penetration)

จากนั้นหาค่าระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ โดยการหาความเร็วของกรวยที่จมลงในดิน เป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น คำนวณหาความเร็วของกรวยได้จากค่าระยะจมของกรวยที่หยุดหนึ่งต่อเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของกรวยที่จมลงในดิน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะจมของกรวยที่หยุดหนึ่ง ได้ค่าระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ (dynamic equilibrium depth) และการไหลของดินมีลักษณะการไหลแบบ Non-Newtonian ที่มีพฤติกรรมของของไหลแบบ Bingham plastic fluids กล่าวคือ พฤติกรรมเหมือนของแข็งในระยะเริ่มต้น เมื่อถูกความเค้นเฉือนมากจะทำจนกระทั่งถึงจุดคราก (yield point) จะเปลี่ยนเป็นลักษณะของไหล Newtonian งานวิจัยในครั้งนี้ ใช้แบบจำลองของไหลคาสตัน



(Casson fluid model) ที่ได้พัฒนามาจาก Bingham plastic model สามารถอธิบายพฤติกรรมของของไหลแบบ Non-Newtonian ที่เหมาะกับวัสดุชีวภาพ (biological materials) (Chhabra and Richardson, 2008) ดังสมการ 3.8

$$\tau^{0.5} = \tau_y^{0.5} + (\mu\dot{\gamma})^{0.5} \quad (3.8)$$

จากความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือน ความเค้นคราก และอัตราส่วนความเค้นเฉือน หาค่าความหนืดเฉือนของดินได้ตามสมการ 3.9

$$\mu = 2.17KW\sqrt{h_f}\left(\frac{0.67}{h_{eq}} - \frac{1}{h_f}\right) \quad (3.9)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ค่าความหนืดเฉือนของดิน, Pa s

$W$  คือ น้ำหนักของกรวย, N

$h_f$  คือ ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง, mm

$h_{eq}$  คือ ระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์, mm

0.67 และ 2.17 คือ ค่าคงที่ ที่ได้จากการแทนค่าต่าง ๆ จากสมการ 3.2, 3.5, 3.6 และ 3.7 ลงในสมการ 3.8

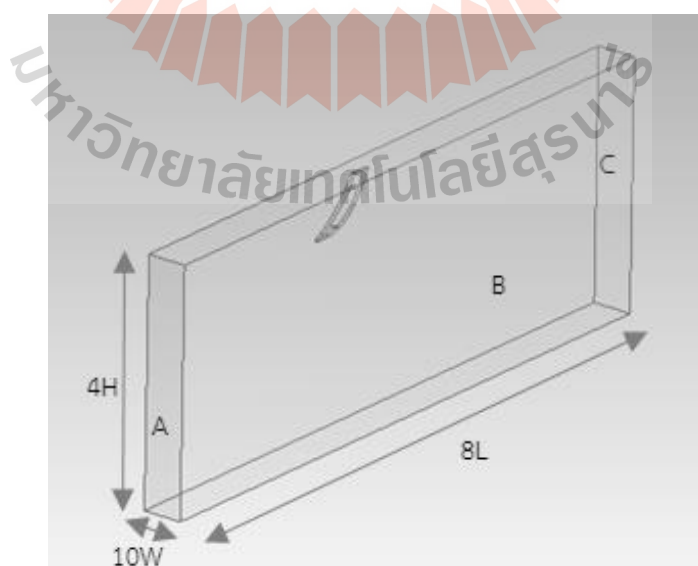
### 3.2.3 การทดสอบแรงลากในภาคสนามเทียบกับแรงต้านที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของไถดินดานที่มีไช้อยู่แล้ว

จากการศึกษารูปทรงของขาไถดินดานด้วยการจำลองสถานการณ์ และการศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตรแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแรงลากของไถดินดานที่มีไช้อยู่แล้วในภาคสนามเปรียบเทียบกับแรงต้านที่ได้จากการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ เพื่อเป็นการตรวจสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา โดยนำข้อมูลที่ได้จากการวัดในภาคสนาม ได้แก่ ความชื้นของดิน ความหนาแน่นรวมของดิน ความเร็วในการเคลื่อนที่ และความลึกการไถ นำมาใช้เป็นข้อมูลในการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบในภาคสนาม

- 1) เตรียมแปลงสำหรับการทดสอบตามที่วางแผนไว้
- 2) ติดเครื่องยนต์รถแทรกเตอร์ปรับความเร็วรอบไปที่ 1,500 รอบต่อนาที และตั้งรอบเครื่องยนต์เท่ากันทุกการทดสอบ ขับเคลื่อน 4 ล้อ ตำแหน่งเกียร์ที่ใช้คือ L3 พร้อมติดตั้งไถดินดานที่มีอยู่แล้วต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์เพื่อเตรียมทดสอบ
- 3) ทำการทดสอบในแปลงที่ระดับความลึกในการไถ 40 เซนติเมตร โดยทดสอบไถ 4 ครั้ง พร้อมทั้งวัดแรงลากทั้ง 4 ครั้ง เมื่อทดสอบเสร็จสิ้นทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

ไถดินดานที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เป็นไถดินดานที่มีใช้อยู่แล้วรูปตัว C ที่ใช้ในการไถดินดาน มีขนาดความกว้าง (W) 0.03 เมตร สูง (H) 0.80 เมตร และความยาวตัวขาไถ (L) 0.66 เมตร ส่วนการหาแรงต้านจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดเมนในการจำลองการไถล กำหนดให้ความกว้างของโดเมนมีขนาด 10 เท่าของความกว้างขาไถ โดยแบ่งเป็นความกว้างโดเมนด้านซ้ายมีขนาด 5 เท่าของความกว้างขาไถ (5W) และความกว้างโดเมนด้านขวามีขนาด 5 เท่าของความกว้างขาไถ (5W) ความสูงของโดเมนมีขนาด 4 เท่าของความสูงของขาไถ (4H) ความยาวโดเมนรวมมีขนาด 8 เท่าของความยาวขาไถ โดยแบ่งเป็นความยาวโดเมนด้านหน้ามีขนาด 3 เท่าของความยาวขาไถ (3L) และความยาวโดเมนด้านหลังมีขนาด 5 เท่าของความยาวขาไถ (5L) ดังแสดงในรูป 3.23



รูปที่ 3.23 ขนาดโดเมนและเงื่อนไขการจำลองการไถล โดย A: Inlet, B: Wall, C: Outlet

สำหรับข้อกำหนดในการจำลองสถานการณ์การไหลของดินผ่านไถดินดาน ข้อมูลที่ใช้ในวิจัยครั้งนี้ ใช้ข้อมูลที่ได้ศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตรจากหัวข้อที่ 3.2.2 โดยดินเป็นดินร่วนปนทราย ความหนาแน่นรวมของดิน  $1.45 \text{ g/cm}^3$  ความชื้นของดิน 13.62 %db ความเค้นเฉือนของดิน 16.38 kPa ความหนืดเฉือนของดิน 991.48 Pa s

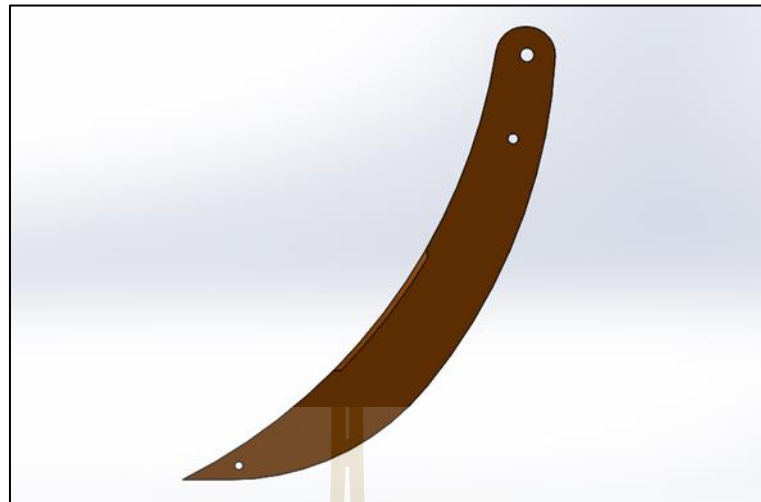
### 3.2.4 การออกแบบไถดินดานต้นแบบ

จากการที่ได้ศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร และการทดสอบแรงลากของไถดินดานที่มีใช้อยู่แล้วในภาคสนามเทียบกับแรงต้านที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ แล้วนั้น จึงทำการออกแบบไถดินดาน ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วนของโครงไถ และส่วนของขาไถดินดาน ซึ่งสองส่วนนี้จะประกอบเข้าด้วยกันเป็นไถดินดาน ในการออกแบบไถดินดานได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัย เพื่อรวบรวมข้อมูลที่ได้มาออกแบบไถดินดาน หลักการต่าง ๆ ที่ใช้การออกแบบมีดังนี้

1) โครงไถ ผู้วิจัยเลือกใช้โครงไถที่มีอยู่แล้วและใช้ทำงานในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นโครงไถเชิงพาณิชย์ของห้างหุ้นส่วนจำกัด ศรีกำแพงแสมมอเตอร์

2) การออกแบบขาไถดินดาน ขาไถดินดานต้นแบบที่ได้ศึกษารูปทรงที่เหมาะสมที่สุดคือ ขาไถดินดานรูปทรงตัว C (เกรียงไกร และคณะ, 2559) จึงได้ทำการออกแบบไถดินดานเป็นรูปทรงชนิดขาโค้ง (Curved leg) ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปทรงตัว C จำนวน 3 รูปแบบ โดยให้มีความสูง ความหนาและมุมไถหรือมุมจิกดินเท่ากัน ส่วนที่ต้องปะทะกับดินหรือด้านหน้าขาไถดินดานมีลักษณะไม่เหมือนกัน ด้วยโปรแกรมออกแบบทางวิศวกรรม คือโปรแกรม SolidWorks แนวคิดในการออกแบบขาไถดินดานแต่ละรูปแบบ คือแบบที่ 1 ด้านหน้าขาไถบริเวณตรงกลางมีมุมคมและขาที่มีความโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.24 แบบที่ 2 ด้านหน้าขาไถเรียบและบริเวณตรงกลางขาไถทำมุมแทนความโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และแบบที่ 3 ด้านหน้าขาไถบริเวณตรงกลางมีมุมคมและขาไถทำมุมแทนความโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.26 จากนั้นทำการจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดาน ตามหัวข้อ 3.2.5 และวิเคราะห์แรงต้านของดินสำหรับไถดินดานทั้ง 3 รูปแบบตามหัวข้อ 3.2.6 เพื่อเลือกไถดินดานที่มีแรงต้านของดินน้อยสุด จึงนำมาทำการสร้างไถดินดานต้นแบบต่อไป

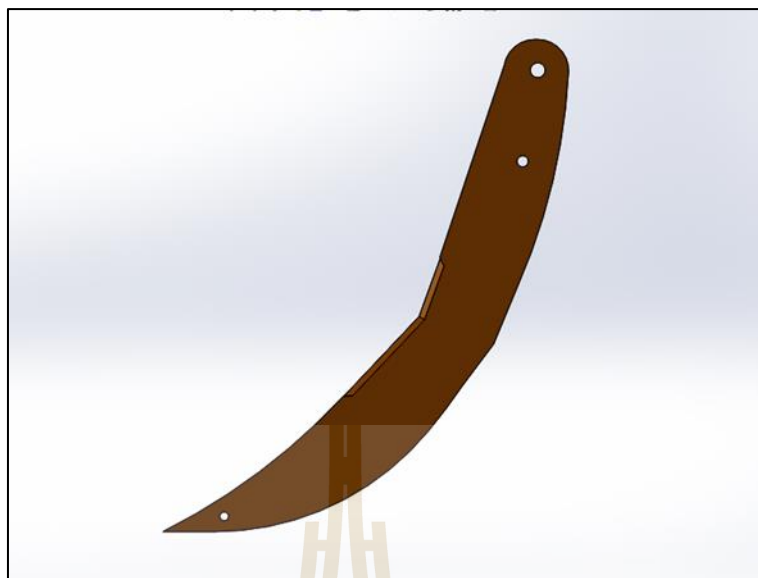
3) การสร้างขาไถดินดาน ดำเนินการตัดเหล็กให้ได้ความหนาและรูปทรงตามขนาดที่ออกแบบและคำนวณไว้ จากนั้นนำเหล็กที่ตัดได้ตามแบบที่กำหนดมาใส่ให้เรียบและได้มุมตามที่ออกแบบไว้ นำเหล็กมาเจาะรูและขึ้นรูปตามแบบเพื่อจับยึดระหว่างคานของขาไถและตัวขาไถ โดยวิธีที่กล่าวมา ดำเนินการสร้างที่โรงกลึงเอกชนในอำเภอเมืองนครราชสีมา



รูปที่ 3.24 ไถดินดานแบบที่ 1



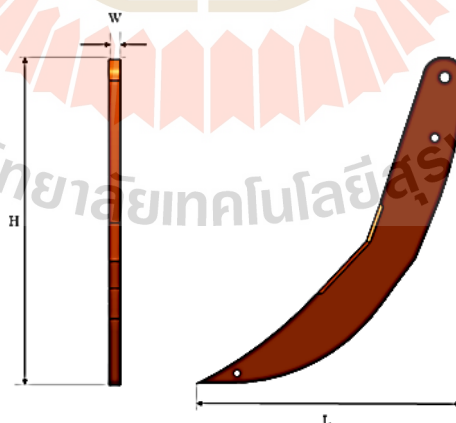
รูปที่ 3.25 ไถดินดานแบบที่ 2



รูปที่ 3.26 ไถดินดานแบบที่ 3

### 3.2.5 การจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานต้นแบบ

จากการที่ได้ออกแบบไถดินดานชนิดขาโค้งที่มีมุมจิกดิน 30 องศา ความกว้าง (W) 0.03 เมตร ความยาว (L) 0.58 เมตร และความสูง (H) 0.80 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แบบไถดินดานชนิดขาโค้ง

เริ่มการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของดินที่ไหลผ่านไถดินดานชนิดขาโค้ง ใช้การจำลองเชิงเลขบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด

(Finite volume method) โปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ใช้คือ ANSYS Fluent สำหรับการวิเคราะห์บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้วิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สำหรับวิเคราะห์การไหลใน 2 มิติ บนสมการพื้นฐานของการไหลคือ สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ซึ่งเป็นพื้นฐานของผลการหาผลเฉลยของการไหลของของไหล (Patankar, 1980) สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล 2 สมการคือ สมมติให้มีการอนุรักษ์มวลที่ผ่านปริมาตรควบคุม และเป็นสมการความต่อเนื่อง ดังสมการ 3.10

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i) = 0 \quad (3.10)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล,  $\text{kg/m}^3$

$t$  คือ เวลาในการไหล, s

$u_i$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของของไหล, m/s

ที่ตำแหน่งของการไหลใด ๆ อัตราส่วนเวลาของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจะถูกปรับให้สมดุลโดยมวลของมวลสาร ณ จุดนั้น ในการจำลองสถานการณ์เริ่มจากดินมีความหนาแน่นคงที่ และดินเป็นสารเนื้อต่อเนื่อง ดังนั้น ความหนาแน่นของดิน ( $\rho$ ) เปรียบเสมือนช่องว่างของน้ำในดิน สมการข้างต้นสามารถลดรูปองค์ประกอบของปริมาตรของไหลได้และไม่มี การเปลี่ยนแปลง โดยใช้สมการ 3.11

$$\nabla u_i = 0 \quad (3.11)$$

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ที่อธิบายการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของอนุภาคของไหลและแรงสุทธิที่กระทำบนของไหล หาได้จากสมการโมเมนตัม ดังสมการ 3.12

$$\rho \frac{du_i}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x} + \rho g \quad (3.12)$$

อนุพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลาเขียนแยกเป็นฟังก์ชันชั่วคราวได้ ดังสมการ 3.13 (Desai and Phan, 1980)

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.13)$$

โดยที่  $d/dt$  คือ ฟังก์ชันของสสาร

$P$  คือ ความดันไฮโดรสแตติก, Pa

$g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก,  $m/s^2$

$\tau_{ij}$  คือ เทนเซอร์ความเค้นเฉือน, Pa

$x$  คือ ระยะห่าง, m

ส่วนวิทยากระแสของดินมีลักษณะเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) มีแบบจำลองของไหลพลาสติกแบบบิงแฮม นำเสนอในรูปแบบเทนเซอร์ความเค้นเฉือนในสมการโมเมนต์ ดังสมการ 3.14, 3.15 และ 3.16 (Desai and Phan, 1980)

$$\tau_{ij} = \sigma_i = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.14)$$

$$\tau_{ij} = \tau_y + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \tau_y + \mu \dot{\gamma} ; |\tau_{ij}| > \tau_y \quad (3.15)$$

$$\dot{\gamma} = 0 ; |\tau_{ij}| \leq \tau_y \quad (3.16)$$

โดยที่  $\dot{\gamma}$  คือ อัตราเฉือน (shear rate),  $1/s$

$\tau_y$  คือ ความเค้นคราก, Pa

$\mu$  คือ ความหนืดพลศาสตร์, Pa s

$\sigma_i$  คือ ความเค้นปกติ, Pa

ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้แบบจำลองของไหลของคาสสัน (Casson fluid model) ที่อธิบายพฤติกรรมกรการไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) และใช้นำเสนอค่าความเค้นและ

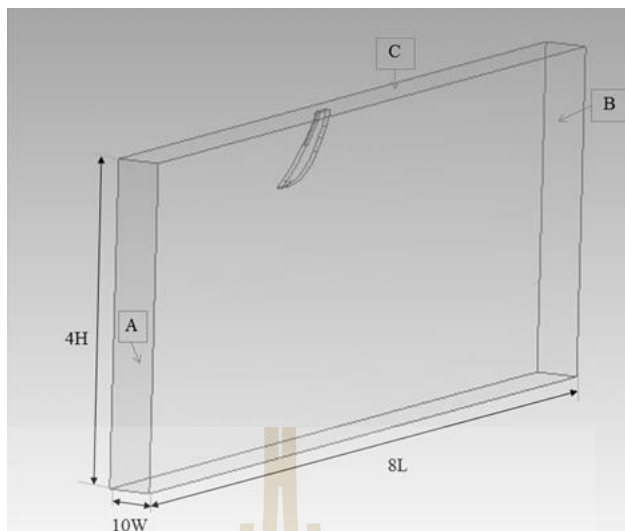
อัตราความเครียดเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับการไหลแบบพลาสติก ที่เหมาะกับวัสดุชีวภาพ (biological materials) (Chhabra and Richardson, 2008)

สำหรับข้อกำหนดในการจำลองสถานการณ์การไหลของดินผ่านไถดินดาน ข้อมูลที่ใช้ในวิจัยครั้งนี้ ใช้ข้อมูลที่ได้ศึกษาพารามิเตอร์ของดินในแปลงเกษตรในหัวข้อที่ 3.2.2 โดยดินเป็นดินร่วนปนทราย ความหนาแน่นรวมของดิน  $1.45 \text{ g/cm}^3$  ความชื้นของดิน 13.62% d.b ความเค้นเฉือนของดิน 16.38 kPa ความหนืดเฉือนของดิน 991.48 Pa s ความเร็วในการเคลื่อนที่ 1.02 m/s ไถดินดานไถที่ความลึกคงที่ สมมติให้ดินมีการไหลแบบราบเรียบ (laminar) มีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ไม่มีช่องว่างระหว่างดิน พฤติกรรมของดินเป็นแบบพลาสติกบิงแฮมและใช้แบบจำลองการไหลของคาสสัน (Casson fluid model)

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองสถานการณ์ในครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย ขอบเขตความเร็วที่ทางเข้า (inlet velocity) เท่ากับ 1.02 m/s ขอบเขตทางออกแรงดัน (outlet pressure) เท่ากับ 0 kPa ผนังไม่มีการลื่นไถล (no slip wall) ที่ผนังด้านข้างและด้านใต้ ส่วนผนังด้านบนเป็นพื้นที่ผิวอิสระ (free surface) และกริดเคลื่อนที่ (grid movement) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของดิน

ขนาดโดเมน (domain size) ของการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม ANSYS Fluent เป็นแบบ 3 มิติ ไถดินดานชนิดขาโค้งนี้มีความยาว (L) 0.58 เมตร ความกว้างหรือหนา (W) 0.03 เมตร และความลึกในการไถ (H) 0.40 เมตร เป็นการไหลในช่องทางเปิด (open channel) ให้มีขนาด 10 เท่าของความกว้างของไถดินดาน (10W) มีขนาด 8 เท่าของความยาวของไถดินดาน (8L) และมีขนาด 4 เท่าของความลึกในการไถ (4H) ดังแสดงในรูปที่ 3.28





รูปที่ 3.28 ขนาดโดเมนและเงื่อนไขขอบเขต โดย A คือ ขอบเขตทางเข้า B คือ ขอบเขตทางออก และ C คือ พื้นผิวอิสระ

ส่วนการสร้างเมช (meshing) ที่ใช้สำหรับแบบจำลองสถานการณ์ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองที่มีความละเอียดมาก (fine) ในการทดสอบเลือกใช้กริดแบบรูปทรงสี่หน้า (tetrahedron) เป็นเมชแบบไร้โครงสร้าง (unstructured) เนื่องจากข้อจำกัดด้านความซับซ้อนของปริมาตรความละเอียด จะได้จำนวนเมช ต่อไป

### 3.2.6 การวิเคราะห์แรงต้านของดินสำหรับไถดินดานต้นแบบ

จากการที่ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานมาแล้ว งานวิจัยในครั้งนี้ ได้ศึกษาหาแรงต้านของดินผ่านไถดินดานชนิดขาโค้ง ซึ่งได้ใช้ข้อมูลในหัวข้อ 3.2.2 และ 3.2.4 เป็นข้อมูลร่วมในการวิเคราะห์แรงต้านของดินด้วย การเคลื่อนของดินที่ไหลผ่านไถดินดานที่หยุดนิ่ง จะมีแรงต้านที่เกิดขึ้นคือ แรงต้านจากความเสียดทาน (friction drag force) และแรงต้านจากความดัน (pressure drag force) การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent จะได้แรงต้านทั้ง 2 แรงที่กระทำกับไถดินดาน และนำข้อมูลของแรงต้านที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว หาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_d$ ) ที่เกิดขึ้น (White, 2003) ดังสมการ 3.17

$$C_d = \frac{\text{Drag}}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3.17)$$

- โดยที่  $Drag$  คือ แรงต้านของดิน, N  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของดิน,  $kg/m^3$   
 $U$  คือ ความเร็วของดินที่ไหลผ่านไถดินดานที่หยุดนี้, m/s  
 $A$  คือ พื้นที่ผิวของไถดินดานที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของดิน,  $m^2$

### 3.2.7 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของไถดินดานต้นแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของไถดินดานชนิดขาโค้ง แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS Static Structure ตามสัดส่วนจริง 2) การกำหนดเงื่อนไข สมบัติวัสดุของไถดินดาน และแรงกระทำบนไถดินดานต้นแบบตามลักษณะการทำงาน และ 3) การวิเคราะห์ความเค้นและการโก่งตัวของไถดินดานต้นแบบ

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตย์ (Static Structural Analysis) ถูกนำมากำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของไถดินดานต้นแบบ และสมบัติวัสดุถูกกำหนดดังตารางที่ 3.1 ทฤษฎีความเสียหายอนมิส (Von Mises Failure Theory) ถูกนำมาวิเคราะห์ความแข็งแรงของไถดินดานต้นแบบ

ตารางที่ 3.1 Material Property for Finite Element Analysis

Property	SS400
Yong's modulus (GPa)	200
Shear modulus (GPa)	73
Yield stress (MPa)	235
Tensile strength (MPa)	400
Poisson ratio	0.26
Density ( $Mg.m^{-3}$ )	7.86

### 3.2.8 การทดลองไถดินดานต้นแบบที่ระดับความลึกการไถต่างกัน

#### ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- 1) เตรียมแปลงสำหรับการทดลองตามที่วางแผนไว้
- 2) ติดเครื่องยন্ত্রรถแทรกเตอร์ปรับความเร็วรอบไปที่ 1,500 รอบต่อนาที และตั้งรอบเครื่องยন্ত্রเท่ากันทุกการทดลอง ขับเคลื่อน 4 ล้อ ตำแหน่งเกียร์ที่ใช้คือ L1 และ L2 พร้อมติดตั้งไถดินดานชนิดขาโค้งต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์เพื่อเตรียมทดลอง

3) ทำการทดลองในแปลงที่ระดับความลึกในการไถ 3 ระดับ คือ 0-20, 0-40 และ 0-60 เซนติเมตร เมื่อทดลองเสร็จจึงทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

#### การหาลักษณะของดินในแปลงก่อนการทดสอบ

ก่อนดำเนินการทดสอบจะต้องทำการเก็บบันทึกค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของดินในแปลงเกษตร ดังนี้

##### 1) Soil moisture content

Soil moisture content คือ ปริมาณความชื้นในดินฐานแห้ง (% Dry weight basis) โดยนำถุงซิปเพื่อเตรียมใส่ดินในแปลงการทดสอบ แปลงละ 5 จุด ทำการเก็บตัวอย่างดินจากการทดสอบการไถดิน จากนั้นจึงนำตัวอย่างดินมาชั่งเพื่อหาน้ำหนักก่อนการอบ และนำตัวอย่างดินไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 95-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด จึงนำตัวอย่างดินออกมาชั่งเพื่อหาน้ำหนักหลังอบ แล้วจึงนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหาค่าปริมาณความชื้นในดิน จากสมการ 3.18

$$\text{ปริมาณความชื้น} \quad W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (3.18)$$

เมื่อ	W	คือ ปริมาณความชื้นของดินแห้ง (%db)
	$W_w$	คือ น้ำหนักของน้ำ
	$W_s$	คือ น้ำหนักของเม็ดดิน
	$M_w$	คือ มวลของน้ำ
	$M_s$	คือ มวลของเม็ดดิน

##### 2) ความต้านทานการแทงทะลุของดิน (Cone index)

ใช้ Cone penetrometer กดดินโดยใช้หัวรูปกรวยขนาดพื้นที่ 2 ตารางเซนติเมตร ในการกด ทำการกดดินในจุดต่าง ๆ 5 จุด โดยทำการกดก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ ที่ระดับความลึกผิวดิน 5 10 15 20 25 30 35 และ 40 เซนติเมตร ตามลำดับ

##### 3) แรงเฉือนภายในดิน (Soil Strength Parameters)

ใช้ Shear annulus กดดินแล้วหมุน Shear annulus จนเนื้อดินขาดออกจากกัน ทำการกดดินที่ระดับผิวดิน โดยทำการกด ก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ

#### การเก็บข้อมูลในระหว่างการทดสอบ

##### 1) การลื่นไถล (Slip)

โดยการทำให้เครื่องหมายที่ล้อรถแทรกเตอร์และนับจำนวนรอบล้อของรถแทรกเตอร์ให้ได้จำนวน 3 รอบ นำจำนวนรอบล้อมาคูณกับเส้นรอบวงก็จะได้ระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ได้ในทางทฤษฎี และจะต้องทำการวัดระยะทางจริงที่ล้อเคลื่อนที่ได้โดยใช้เทปวัดความยาวในการวัดและใช้หลักทแยงในการทำให้เครื่องหมายจุดเริ่มนับล้อและหลังการนับล้อสิ้นสุดลง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ใน 1 แปลง อุปกรณ์คือ เทปวัดความยาว และเหล็กหมุด

## 2) หน้าที่ว่างในการทำงาน

หน้าที่ว่างในการทำงานของเครื่องมือ สามารถหาได้โดย วัดความกว้างของร่องไถขณะทำการไถ โดยสุ่มวัดทั้งหมด 10 ค่าใน 1 แปลง ใช้อุปกรณ์คือ เทปวัดความยาวในการวัด

## 3) ความลึกของร่องไถ

ความลึกของร่องไถ สามารถหาค่าได้โดย วัดความลึกของร่องไถขณะทำการไถ โดยสุ่มวัดทั้งหมด 10 ค่าใน 1 แปลง อุปกรณ์คือ เครื่องมือวัดความลึกร่องไถ

## 4) ความเร็วในการทำงาน

ความเร็วในการทำงานสามารถหาได้โดยการปัก Pole 2 หลัก มีระยะห่างกัน 10 เมตร ตำแหน่งการปักบริเวณกลางแปลง แล้วทำการจับเวลาในการทำงานขณะรถแทรกเตอร์วิ่งผ่าน Pole ที่ปักไว้ ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง ต่อ 1 แปลงการทดสอบ

## 5) ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

เริ่มจากการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงให้เต็มถังทุกครั้งก่อนทำการไถ และวัดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในแต่ละครั้งที่ทำงานเสร็จใน 1 แปลงการทดสอบ ด้วยบิกเกอร์พลาสติกทรงกระบอกแบบอ่านค่าได้ละเอียด แล้วบันทึกผล

## 6) การวัดแรงลากในแนวระดับ

1. บันทึกอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ
2. ให้เครื่องยนต์เดินกำลังเดินเบาเป็นเวลา 15 นาที
3. ต่อฟ่วงรถแทรกเตอร์กับอุปกรณ์วัดแรงลาก
4. ให้รถแทรกเตอร์ที่ไม่ได้ต่อฟ่วงอุปกรณ์ลากรถแทรกเตอร์ที่ต่อฟ่วงอุปกรณ์ไปบนพื้นที่ทดสอบ โดยใช้เกียร์ L1 และ L2 และปรับความรอบเครื่องยนต์ให้ได้ 1,500 รอบต่อนาที และบันทึกข้อมูล

## การเก็บข้อมูลหลังการทดสอบ

- 1) ความต้านทานการแทงทะลุของดิน (Cone index)

ใช้ Cone penetrometer กัดดินโดยใช้หัวรูปกรวยขนาดพื้นที่ 2 ตารางเซนติเมตร ในการกัด ทำการกัดดินในจุดต่างๆ 6 จุด โดยทำการกัดก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ ที่ระดับความลึกผิวดิน 5 10 15 20 25 30 35 และ 40 เซนติเมตร ตามลำดับ

## 2) แรงเฉือนภายในดิน (Soil Strength Parameters)

ใช้ Shear annulus กัดดินแล้วหมุน Shear annulus จนเนื้อดินขาดออกจากกัน ทำการกัดดินที่ระดับผิวดิน โดยทำการกัดก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ

3) พื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil Disturbance) สำหรับการแตกตัวของดินจะบันทึกค่าความยาวของการแตกตัวและขนาดของพื้นที่การแตกตัวของดิน ซึ่งการแตกตัวของดินหลังไถ จะใช้ Soil Profile Meter วัดก่อนไถดินออก เพื่อดูพื้นที่ที่ถูกยกตัวขึ้น แล้วทำการไถดินออกและใช้ Soil Profile Meter วัดพื้นที่การแตกตัวของดิน

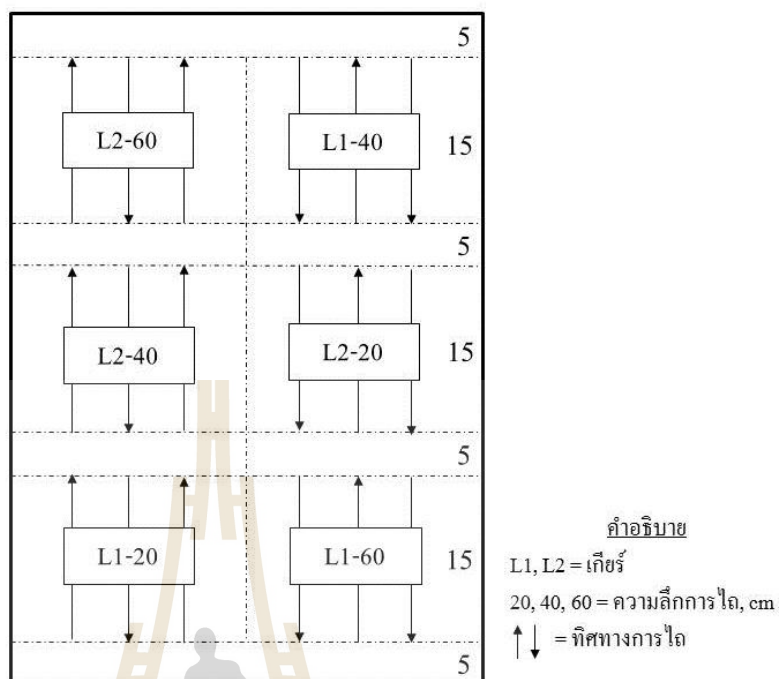
## การวิเคราะห์ข้อมูล

- 1) กำหนดหาแรงลากในแนวระดับ
- 2) กำหนดหาความเร็วของรถแทรกเตอร์
- 3) กำหนดหาค่ากำลังจุดลากของรถแทรกเตอร์ (Drawbar Power) จากค่าแรงลากในแนวระดับ (Draft Force)
- 4) กำหนดหาพื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil Disturbance)
- 5) กำหนดหาอัตราการใช้ดิน (Slip) แรงลากในแนวระดับต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific Draft) และกำลังต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific power)

## ลักษณะและรูปแบบของแปลงทดลอง

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนหน่วยทดลอง} &= \text{ปัจจัย} \times \text{ทริตเมนต์} \times \text{จำนวนซ้ำ} \\
 &= \text{ระดับเกียร์ที่ใช้ทดลอง} \times \text{ความลึกการไถ} \times 3 \\
 &= 2 \times 3 \times 3 \\
 &= 18 \text{ หน่วยการทดลอง}
 \end{aligned}$$

20



รูปที่ 3.29 แผนผังการทดลอง

### 3.2.9 การทดสอบประเมินสมรรถนะไถดินแดนต้นแบบในภาคสนาม

การทดสอบสมรรถนะและพื้นที่การแตกตัวของไถดินแดนประกอบด้วยรายละเอียด ดังนี้

- 1) ความสามารถในการทำงานเชิงพื้นที่ (Effective Field Capacity)
- 2) ประสิทธิภาพในการทำงานเชิงเวลา (Field Efficiency)
- 3) อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)
- 4) แรงลากในแนวระดับที่ใช้ในการทำงานของไถดินแดน (Draft Force)
- 5) เปอร์เซ็นต์การลื่นไถลของล้อรถแทรกเตอร์ (Slip)
- 6) พื้นที่การแตกตัว (Soil Disturbance)

#### ค่าชี้ผลของการทดสอบ

ค่าชี้ผลของการทดสอบเพื่อใช้ในการวัดค่าผลของการทดสอบไถดินแดนต้นแบบในภาคสนามประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

- 1) ความสามารถในการทำงานจริง (Effective Field Capacity)

$$C_a = \frac{A}{T_t} \quad (3.19)$$

เมื่อ  $C_a$  = ความสามารถในการทำงานจริง (ไร่/ชั่วโมง)  
 $A$  = พื้นที่การทำงาน (ไร่)  
 $T_t$  = เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด (ชั่วโมง)

#### 2) ประสิทธิภาพในการทำงาน (Field Efficiency)

$$E_f = \frac{T_e}{T_t} \times 100 \quad (3.20)$$

เมื่อ  $E_f$  = ประสิทธิภาพการทำงาน (ร้อยละ)  
 $T_e$  = เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง (ชั่วโมง)  
 $T_t$  = เวลาที่เครื่องจักรใช้ในการปฏิบัติงานทั้งหมด รวมทั้งเวลาที่สูญเสีย เนื่องจากการเลี้ยวรถ การหยุดรถ การปรับตั้งเครื่องจักร (ชั่วโมง)

#### 3) การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

$$\text{การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง} = \frac{\text{ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมด}}{\text{พื้นที่การทำงานจริง}} \quad (3.21)$$

เมื่อ การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร/ไร่)

#### 4) การลื่นไถล (Slip)

$$\text{การลื่นไถล} = \frac{\text{ระยะเคลื่อนที่เมื่อไม่มีภาระ} - \text{ระยะเคลื่อนที่เมื่อมีภาระ}}{\text{ระยะเคลื่อนที่เมื่อไม่มีภาระ}} \quad (3.22)$$

เมื่อ การลื่นไถล (%)

### 3.2.10 การเปรียบเทียบแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามกับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของไถดินดานต้นแบบ

การเปรียบเทียบแรงลากในแนวระดับที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม ใช้ข้อมูลจากหัวข้อ 3.2.8 ส่วนการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ใช้แบบจำลองตามหัวข้อ 3.2.5 และการวิเคราะห์แรงต้านของดินตามหัวข้อ 3.2.6 แสดงผลในแบบของรูป ตาราง และกราฟ

### 3.2.11 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ไถดินดานต้นแบบ

การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์การใช้ไถดินดาน โดยการวิเคราะห์ต้นทุนจุดคุ้มทุน (Break Even Point) และระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period, PBP) เป็นการคาดคะเนว่าระยะเวลาจากการเริ่มต้นลงทุนถึงเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิ (Net Benefits) ของการใช้ไถดินดานมีค่าเท่ากับการลงทุนและทำการคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุนต่อพื้นที่การทำงานต่อปีของการใช้ไถดินดานที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น

## 3.3 สถานที่ทำการทดสอบ

- 3.3.1 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 3.3.2 อาคารจักรกลเกษตร ฟาร์มมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 3.3.3 แปลงเกษตร ฟาร์มมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

บทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการศึกษารวมถึงการวิเคราะห์ผลทั้งหมด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้คือ ผลการศึกษารูปทรงของไถดินดาน ผลการศึกษาพารามิเตอร์วิสโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร ผลการทดสอบแรงลากจากในภาคสนามเทียบกับแรงต้านที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของไถดินดานที่มีข้ออยู่แล้ว ผลการออกแบบไถดินดานต้นแบบ ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานต้นแบบ ผลการวิเคราะห์แรงต้านของดินสำหรับไถดินดานต้นแบบ ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของไถดินดานต้นแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลการทดลองไถดินดานต้นแบบที่ระดับความลึกการไถต่างกัน ผลการทดสอบ ประเมินผล สมรรถนะไถดินดานในภาคสนาม ผลการเปรียบเทียบแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามกับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของไถดินดานต้นแบบ ผลการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ไถดินดานต้นแบบ โดยแบ่งผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการศึกษารูปทรงของไถดินดาน

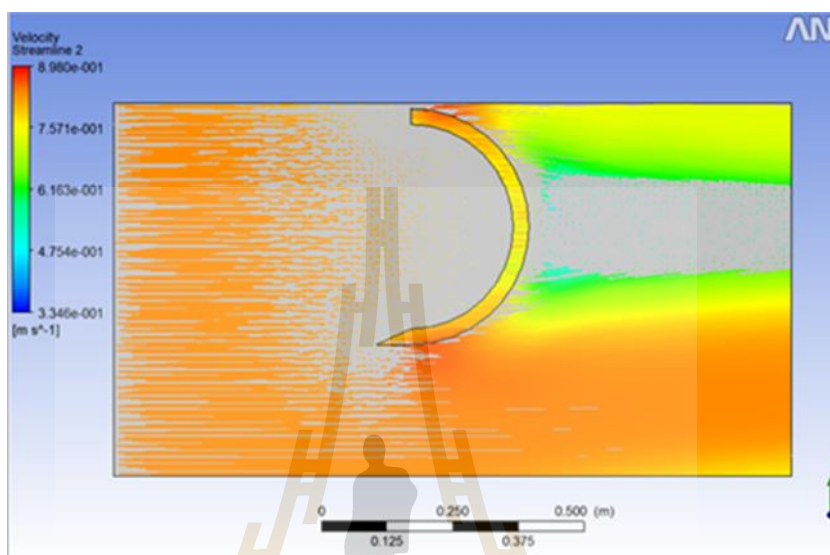
จากผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ค่าความเร็วของดินที่เคลื่อนที่ผ่านไถดินดานรูปทรงต่าง ๆ มีผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลความเร็วของดินที่ผ่านไถดินดานรูปทรงต่าง ๆ

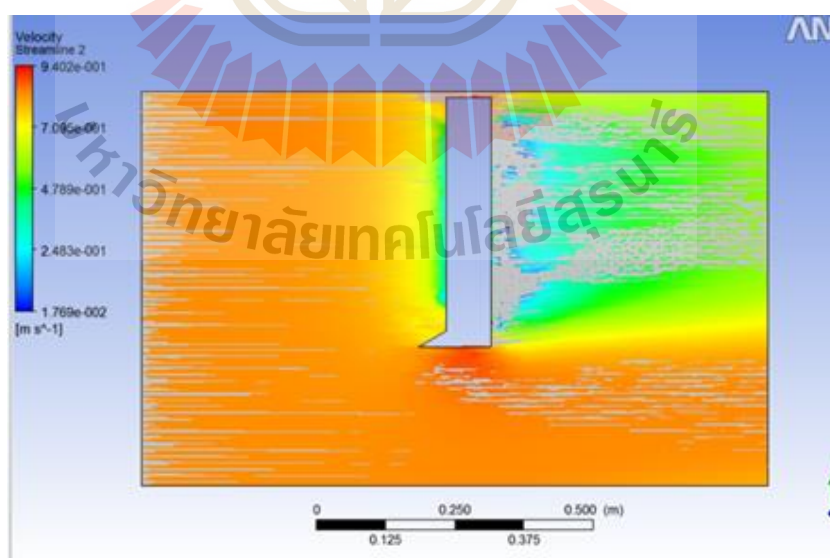
Shape	Velocity (m/s)		
	Contour	Streamline	Average
C	0.8958	0.8980	0.8969
L	0.9390	0.9402	0.9396
Sloping	0.9232	0.9232	0.9232

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ดินใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านไถดินดานรูปตัว C น้อยสุด รองลงคือ รูปขาเอียง และ รูปตัว L ตามลำดับ ส่วนผลของการวิเคราะห์แบบ Graphic 3D Analysis

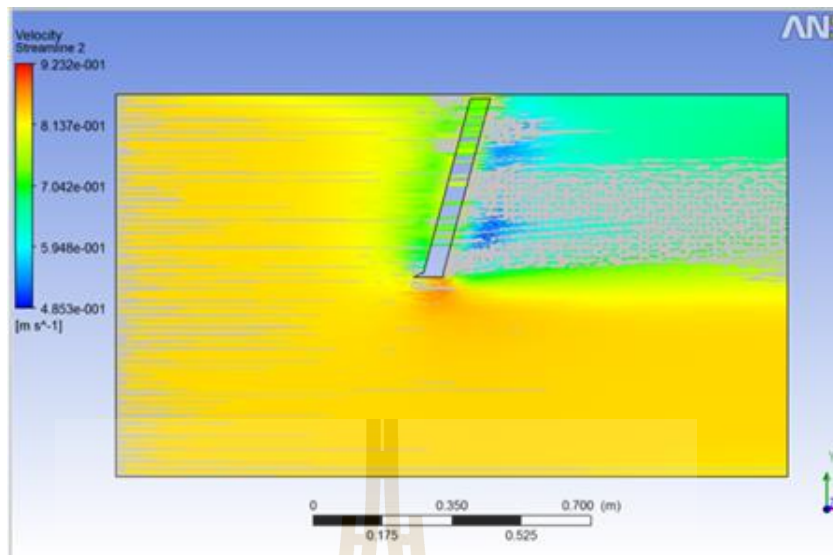
รูปแบบการแสดงผลเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลสามารถแสดงผลของค่าความเร็ว (velocity) ในที่นี้เป็นการแสดงรูปแบบเส้นทางการไหล (streamline) และเส้นระดับ (contour) ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6



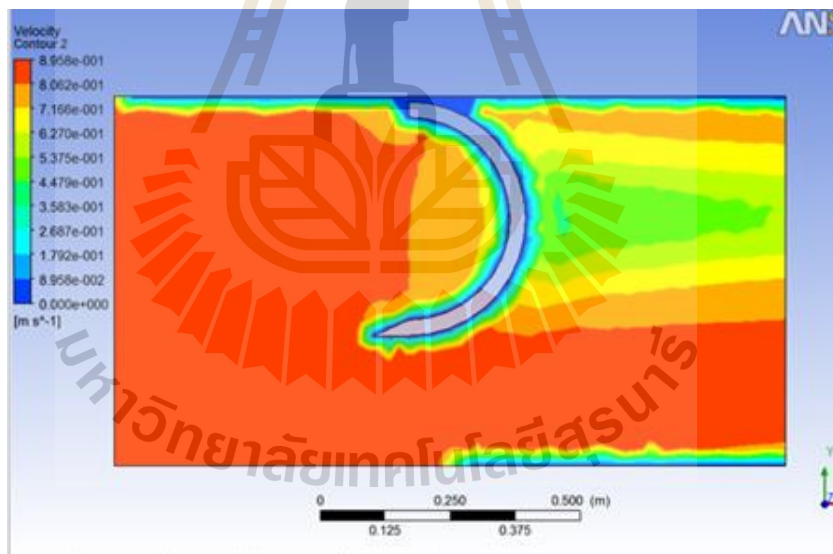
รูปที่ 4.1 Velocity streamline ของไถดินดานรูปขาตัว C



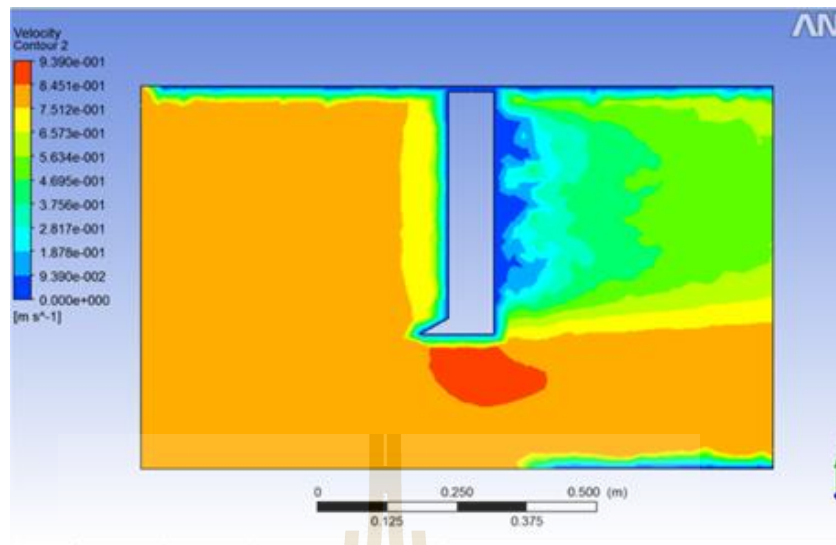
รูปที่ 4.2 Velocity streamline ของไถดินดานรูปขาตัว L



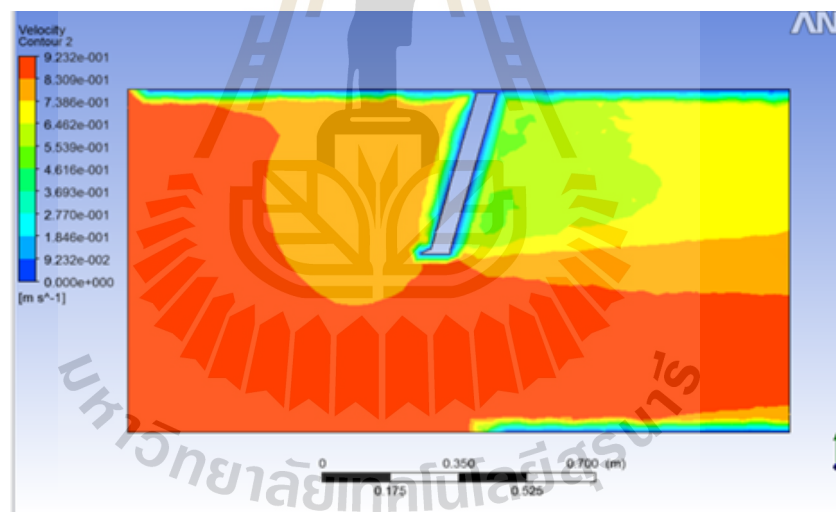
รูปที่ 4.3 Velocity streamline ของไถดินดานรูปขาเอียง



รูปที่ 4.4 Velocity contour ของไถดินดานรูปขาตัว C



รูปที่ 4.5 Velocity contour ของไถดินดานรูปขาตัว L



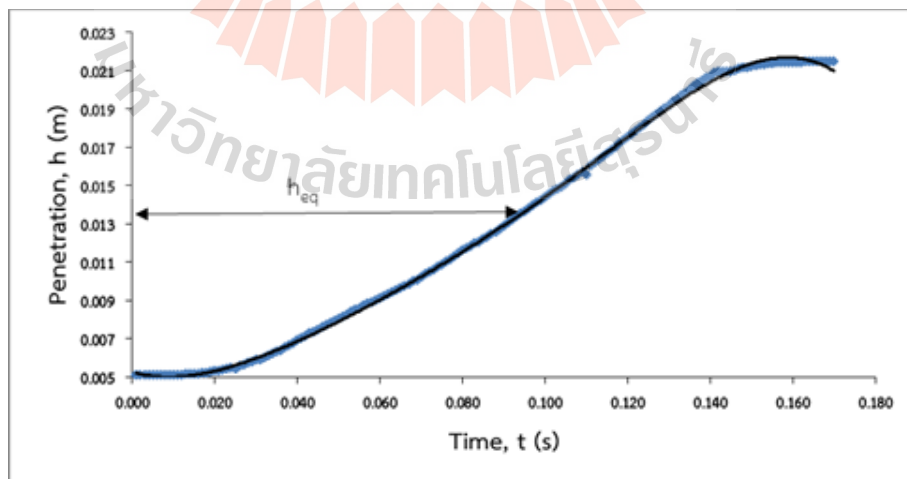
รูปที่ 4.6 Velocity contour ของไถดินดานรูปขาเอียง

จากรูปการจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานทั้ง 3 รูปแบบ จะมีค่าความเร็วสูงสุดที่บริเวณใต้ไถดินดาน โดยเฉพาะไถดินดานรูปขาตัว C มีความเร็วต่ำสุด จึงเลือกไถดินดานรูปขาตัว C เป็นขาไถดินดานที่นำไปใช้ออกแบบ เนื่องจากดินใช้เวลาเคลื่อนที่ผ่านขาไถดินดานได้ใกล้เคียงกับความเร็วของดินเริ่มต้น (0.8333 เมตรต่อวินาที) หรืออาจกล่าวได้ว่า ใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยกว่าขาไถแบบอื่น ๆ แสดงด้วย Streamline และ Contour สีแดง

## 4.2 ผลการศึกษาพารามิเตอร์วิโคพลาสติกของดินในแปลงเกษตร

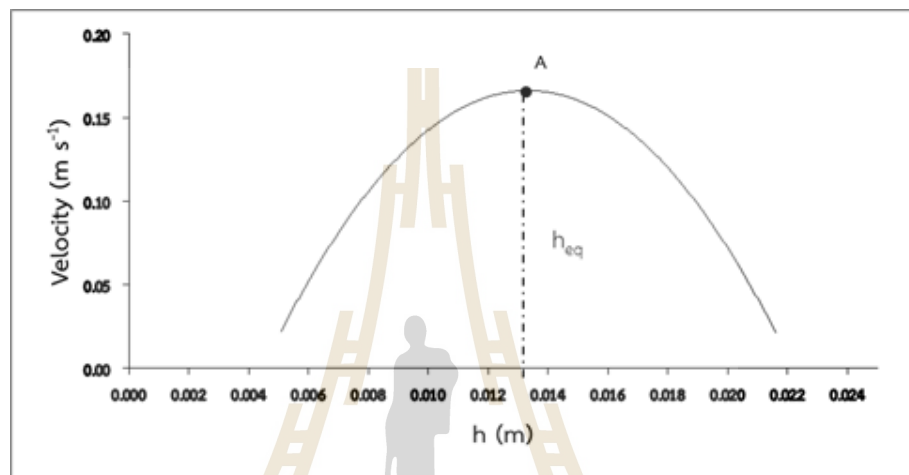
จากการศึกษารูปทรงของไถดินดานแบบต่าง ๆ แล้ว จำเป็นต้องศึกษาพารามิเตอร์วิโคพลาสติกของดิน เพื่อเป็นข้อมูลในการจำลองพฤติกรรมกรไถของดิน การหาแรงต้านของดิน และการออกแบบไถดินดาน เพราะเป็นเครื่องมือที่กระทำกับดิน จากการเก็บตัวอย่างดินในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการจำแนกดิน พบว่า ดินในแปลงเกษตรเป็นดินชนิดดินร่วนปนทราย (Sandy loam) เนื้อดินประกอบด้วยอนุภาคดินทราย (Sand) 63.84% อนุภาคดินตะกอน (Silt) 21.50% และอนุภาคดินเหนียว (Clay) 14.66% ซึ่งมีพิกัดพลาสติก (Plastic limit) เท่ากับ 9.50% และขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) เท่ากับ 24.10% ที่ระดับความลึกดิน 40 cm ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้งของดินเฉลี่ย เท่ากับ  $1.45 \text{ g/cm}^3$  ความชื้นของดิน เท่ากับ 13.62% (d.b) ความต้านทานการแทงทะลุดิน (Cone penetration resistance) เท่ากับ 2.0 MPa

ผลการทดลองวัดค่าระยะจมของกรวยในดินที่มีความชื้นต่างๆ กัน และน้ำหนักของกรวยต่างๆ กัน พบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของกรวยที่จมลงในดินเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในเคลื่อนที่ มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นแบบโพลีโนเมียล อันดับ 5 สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mahajan and Budhu (2008) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9995 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 0.0096 ซึ่งสมการแนวโน้มนี้ประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าจริงหรือค่าที่ได้จากการวัดด้วยทรานส์ดิวเซอร์ และหลังจากนั้น กรวยหยุคหนึ่งใช้เวลาใด ๆ ตาม ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของกรวยเทียบกับเวลา

ผลการหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรวยเทียบกับระยะจมของกรวย พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรวยมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความเร็วสูงสุด และลดลงตามระยะจมของกรวยที่เพิ่มขึ้น ได้กราฟเป็นเส้น โค้งแนวโน้มแบบพอลิโนเมียล และที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรวยสูงสุด พบว่า ระยะจมของกรวยเป็นระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ (dynamic equilibrium depth,  $h_{eq}$ ) ตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความเร็วของกรวย ณ ระยะจมต่าง ๆ

ผลการทดลองหาค่าความเค้นเฉือนของดิน พบว่า เมื่อความชื้นของดินเพิ่มสูงขึ้น ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่งเพิ่มขึ้น และระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อใช้น้ำหนักของกรวยที่แตกต่างกัน 3 ค่า ค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง และค่าความเค้นเฉือนที่ได้แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองตามตาราง 4.2, 4.3 และ 4.4 เมื่อนำค่าความเค้นเฉือนกับค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ พบว่า ความเค้นเฉือนของดินจะลดลงในลักษณะเป็นเส้น โค้งที่มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในขณะที่ค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mahajan and Budhu (2008) ได้กราฟตามรูปที่ 4.9 และได้สมการจากการทดลอง 3 สมการที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของกรวยต่าง ๆ กัน ดังสมการ 4.1, 4.2 และ 4.3

$$\tau_{119} = 71.97e^{-0.116hf} \quad (4.1)$$

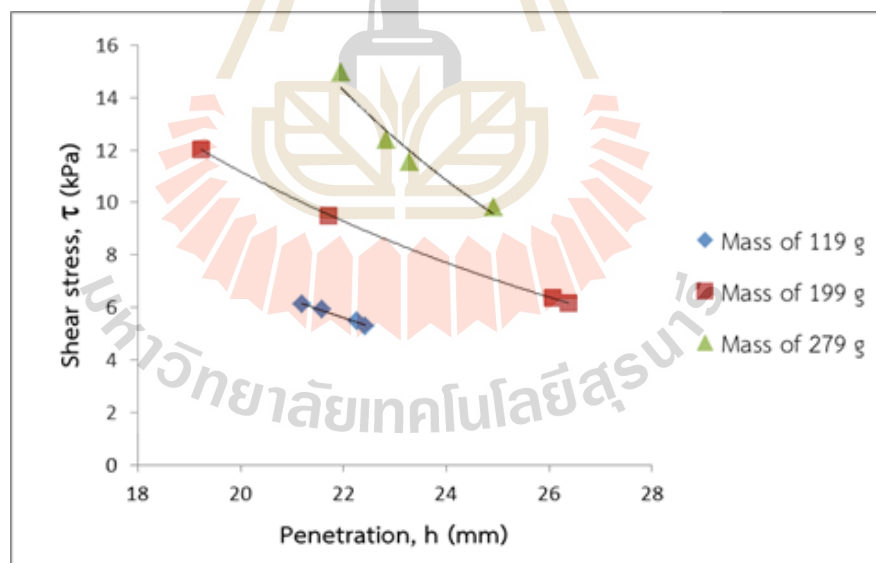
โดย  $\tau_{119}$  คือ ความเค้นเฉือนของดิน หน่วย kPa และ  $h_f$  คือ ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ที่มีน้ำหนักของกรวย 119 g หน่วย mm มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9848 และค่า RMSE เท่ากับ 0.0397

$$\tau_{199} = 72.019e^{-0.093hf} \quad (4.2)$$

โดย  $\tau_{199}$  คือ ความเค้นเฉือนของดิน หน่วย kPa และ  $h_f$  คือ ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ที่มีน้ำหนักของกรวย 199 g หน่วย mm มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9999 และค่า RMSE เท่ากับ 0.0316

$$\tau_{279} = 292.66e^{-0.137hf} \quad (4.3)$$

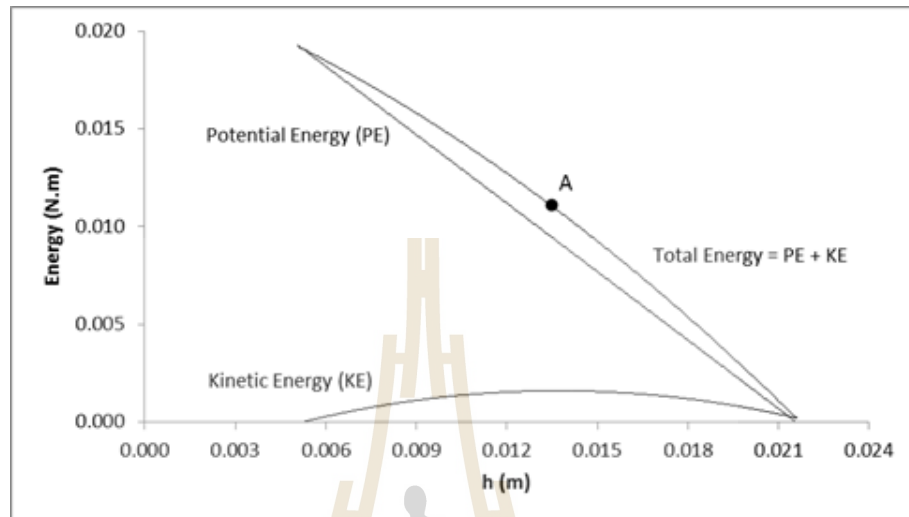
โดย  $\tau_{279}$  คือ ความเค้นเฉือนของดิน หน่วย kPa และ  $h_f$  คือ ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ที่มีน้ำหนักของกรวย 279 g หน่วย mm มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9561 และค่า RMSE เท่ากับ 0.4099



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะจมของกรวยที่น้ำหนักกรวยต่าง ๆ กัน

เมื่อหาค่าพลังงานศักย์และค่าพลังงานจลน์ พบว่า พลังงานศักย์มีค่าลดลงเมื่อระยะจมของกรวยเพิ่มขึ้นในลักษณะแบบเส้นตรง ส่วนพลังงานจลน์มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ตำแหน่งระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์และลดลงมาในลักษณะแบบเส้นโค้ง ทำให้พลังงานรวมที่ได้มี

เส้นกราฟตามรูปที่ 4.10 และที่ตำแหน่ง A ในรูปที่ 4.10 เป็นตำแหน่งพลังงานรวม ณ ระยะจมนของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์



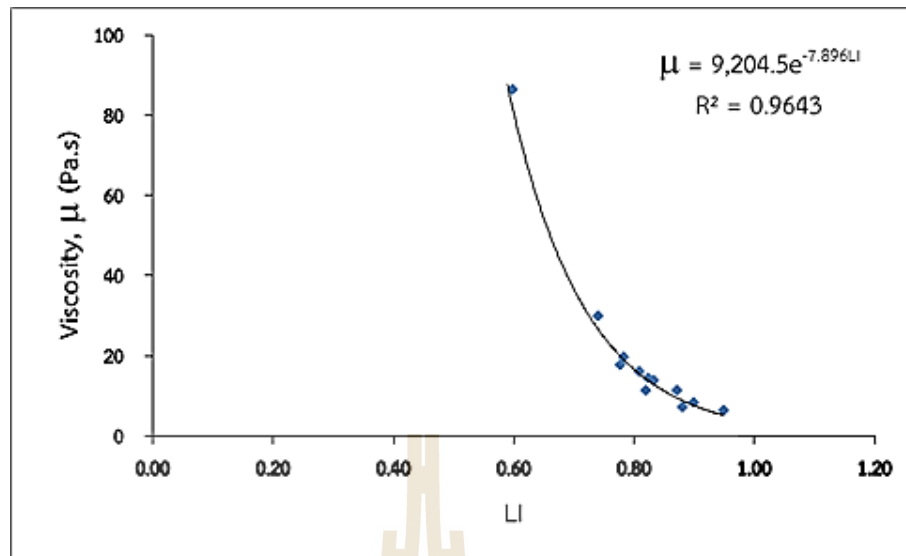
รูปที่ 4.10 พลังงานรวมที่ระยะจมนของกรวยต่าง ๆ กัน

ผลการทดลองหาค่าความหนืดเฉือนของดิน พบว่า เมื่อใช้น้ำหนักของกรวยที่แตกต่างกัน 3 ค่า ค่าความชื้นของดินที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 18.25% ถึง 23.35% (d.b) และค่าดัชนีสภาพเหลว (liquidity index) ที่ได้แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 เมื่อนำค่าความหนืดเฉือนกับค่าดัชนีสภาพความเหลว (liquidity index) มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ พบว่า ค่าความหนืดเฉือนของดินจะลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในขณะที่ค่าดัชนีสภาพความเหลว (liquidity index) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mahajan and Budhu (2008) ได้กราฟตามรูปที่ 4.11 และได้สมการจากการทดลอง ดังสมการ 4.4 และสมการ 4.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าความหนืดเฉือนที่ความชื้นของดินตามสภาพจริงได้ หรือใช้กับค่า LI น้อยกว่า 1 ได้เช่นกัน

$$\mu = 9,204.5e^{-7.896LI} \quad 4.4$$

โดย  $\mu$  คือ ความหนืดเฉือนของดิน หน่วย Pa s และ LI คือ ดัชนีสภาพความเหลว (Liquidity index) ไม่มีหน่วย มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9643 และค่า RMSE เท่ากับ 1.8662





รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเนื่องกับดัชนีสภาพเหลวของดินในแปลงเกษตร (ดินร่วนปนทราย)

ตารางที่ 4.2 Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 119 g)

Test	Water content (%)	$h_f$ (mm)	$h_{eq}$ (mm)	$\tau_y$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\dot{\gamma}$ ( $s^{-1}$ )	LI	$\mu$ (Pa s)
C1	21.65	21.59	13.25	5.01	5.91	3.13	0.83	13.44
C2	22.22	22.27	13.75	4.71	5.48	3.08	0.87	11.06
C3	21.54	21.19	13.00	5.20	6.13	3.16	0.82	13.93
C4	22.63	22.42	14.00	4.64	5.29	3.07	0.90	8.03

ตารางที่ 4.3 Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 199 g)

Test	Water content (%)	$h_f$ (mm)	$h_{eq}$ (mm)	$\tau_y$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\dot{\gamma}$ ( $s^{-1}$ )	LI	$\mu$ (Pa s)
80C1	21.30	21.70	13.50	8.29	9.51	3.12	0.81	15.70
80C2	23.35	26.37	16.75	5.61	6.18	2.83	0.95	5.94
80C3	20.86	19.24	12.00	10.55	12.04	3.32	0.78	17.49
80C4	22.37	26.07	16.50	5.74	6.37	2.85	0.88	6.91

ตารางที่ 4.4 Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 279 g)

Test	Water content (%)	$h_r$ (mm)	$h_{eq}$ (mm)	$\tau_y$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\dot{\gamma}$ ( $s^{-1}$ )	LI	$\mu$ (Pa s)
160C1	18.25	21.95	12.75	11.36	14.95	3.10	0.60	86.01
160C2	20.31	22.83	14.00	10.50	12.40	3.04	0.74	29.51
160C3	21.48	24.92	15.75	8.81	9.80	2.91	0.82	10.90
160C4	20.94	23.29	14.50	10.09	11.56	3.01	0.78	19.38

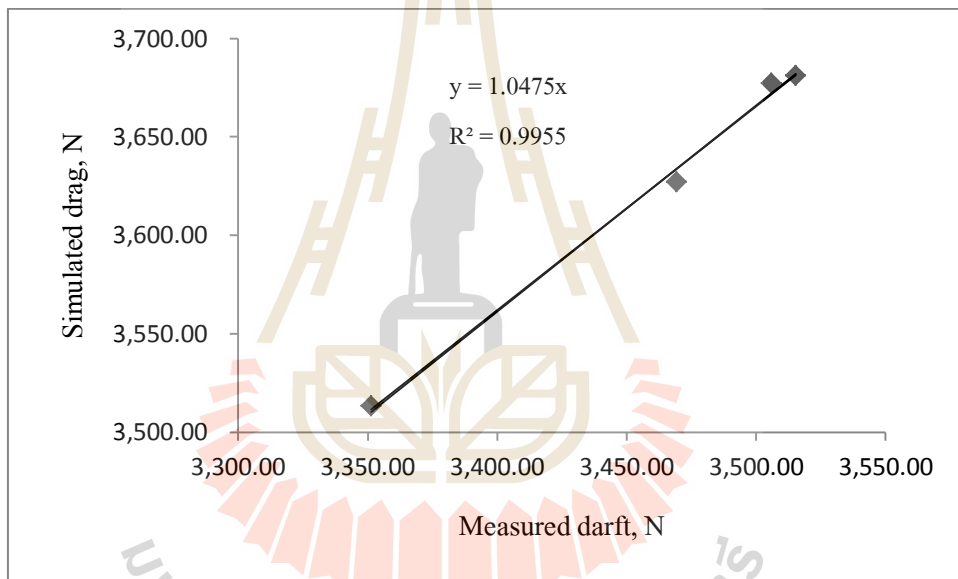
จากการศึกษาวิธีการทะลุทะลวงของกรวยสามารถใช้หาค่าความเค้นเฉือนของดินและค่าความหนืดเฉือนของดินในแปลงเกษตรได้ โดยเฉพาะดินที่มีทรายปน โดยค่าความเค้นเฉือนของดินมีแนวโน้มลดลงตามระยะการจมของกรวยที่เพิ่มขึ้น และแปรผันตามน้ำหนักของกรวย ส่วนความหนืดเฉือนของดินจะลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเทียบกับค่าดัชนีสภาพความเหลวที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ค่าความเค้นเฉือนของดินในแปลงเกษตรจึงขึ้นอยู่กับน้ำหนักของกรวย และระยะจมของกรวยที่มีผลมาจากความชื้นของดิน ส่วนค่าความหนืดเฉือนของดินขึ้นอยู่กับความชื้นของดิน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าความหนืดเฉือนที่ความชื้นของดินตามสภาพจริงได้ และใช้ได้กับค่าดัชนีสภาพความเหลว (LI) น้อยกว่า 1 เช่นกัน

#### 4.3 ผลการทดสอบแรงลากจากในภาคสนามเทียบกับแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์ของไถดินดานที่มีไช้อยู่แล้ว

จากการทดสอบแรงลากของไถดินดานที่มีไช้อยู่แล้วในภาคสนามใช้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาที ที่ระดับเกียร์ L3 ทดสอบจำนวน 4 ครั้ง เทียบกับแรงต้านของดินที่ได้จากแบบจำลองของการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ข้อมูลในหัวข้อ 3.2.3 ในการจำลอง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 ส่วนแรงต้านของดินจากการจำลองมากกว่าแรงลากจากการทดสอบในภาคสนาม 4.75 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9955 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 0.1643 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ 4.75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสมการแนวโน้มนี้ประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.5 ผลแรงลากในภาคสนามเทียบกับแรงต้านจากการจำลองของไถดินคานที่มีโซ่อยู่แล้ว

ครั้งที่	ความเร็วในการเคลื่อนที่ (km/h)	แรงลากจากการวัดในภาคสนาม (N)	แรงต้านจากการจำลอง (N)	Error %
1	3.56	3,251.30	3,513.16	8.05
2	3.73	3,515.25	3,681.18	4.72
3	3.72	3,505.83	3,677.26	4.89
4	3.67	3,399.17	3,627.01	6.70

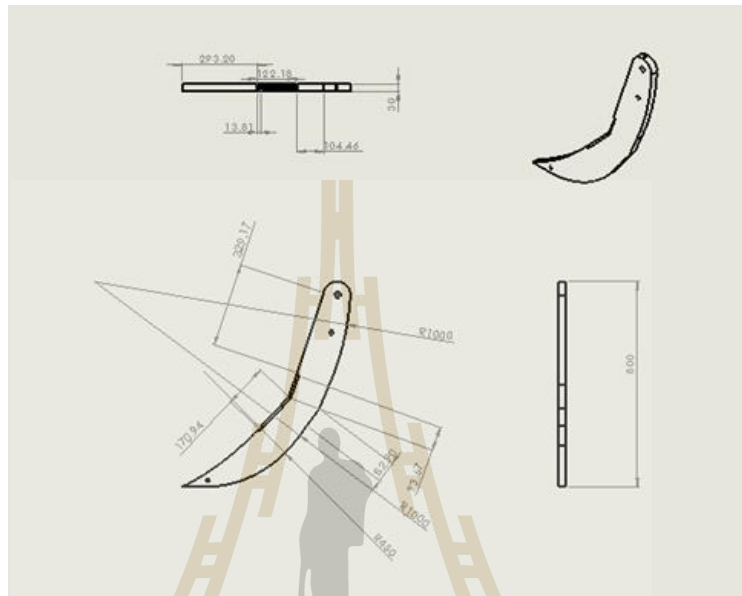


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงลากจากการวัดในภาคสนามกับค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์ของไถดินคานที่มีโซ่อยู่แล้ว

#### 4.4 ผลการออกแบบไถดินคานต้นแบบ

จากผลการวิเคราะห์แรงต้านของดินสำหรับไถดินคานทั้ง 3 รูปแบบ พบว่า ไถดินคานชนิดขาโค้งแบบที่ 3 มีแรงต้านของดินน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.6 จากนั้นนำไถดินคานแบบที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.13 และภาคผนวก ค ไปดำเนินการสร้างที่โรงกลึงเอกชน โดยการสร้างไถดินคานต้นแบบที่ขาไถดินคานมีมุมคม (Chamfer) ตรงขอบด้านหน้าของขาไถดินคานและหักมุมตรงกลางแทนความโค้งเปรียบเสมือนหัวของเรือเพื่อแหวกคลื่นในทะเล โดยทำจากเหล็กหนา 30 มิลลิเมตร ความ

ยาวของไถตั้งแต่หุกระ โจนึงถึงปลาย 80 เซนติเมตร มุมไถหรือมุมจิกดินที่ 30 องศา จะได้ไถดินดาน ต้นแบบ แสดงดังในรูปที่ 4.14 หลังจากนั้น นำมาทดสอบในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี



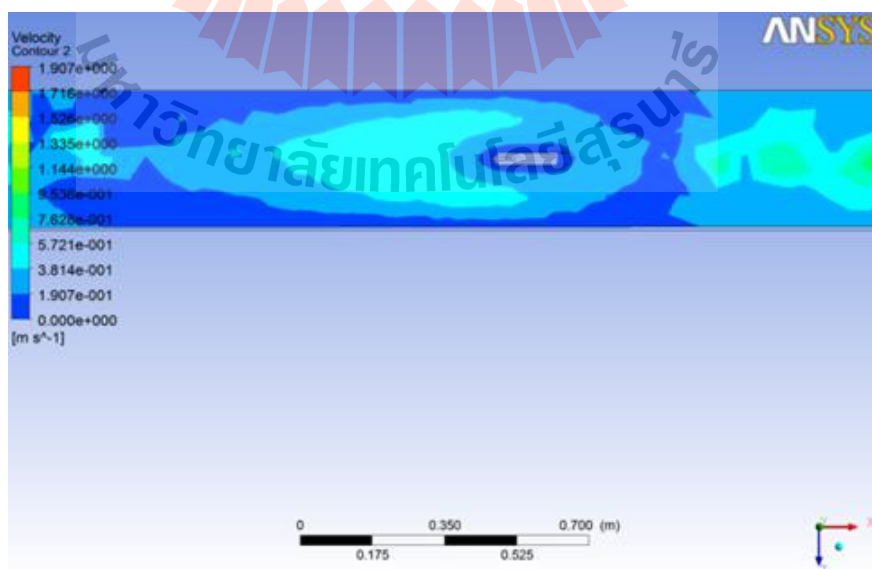
รูปที่ 4.13 แบบไถดินดานต้นแบบ



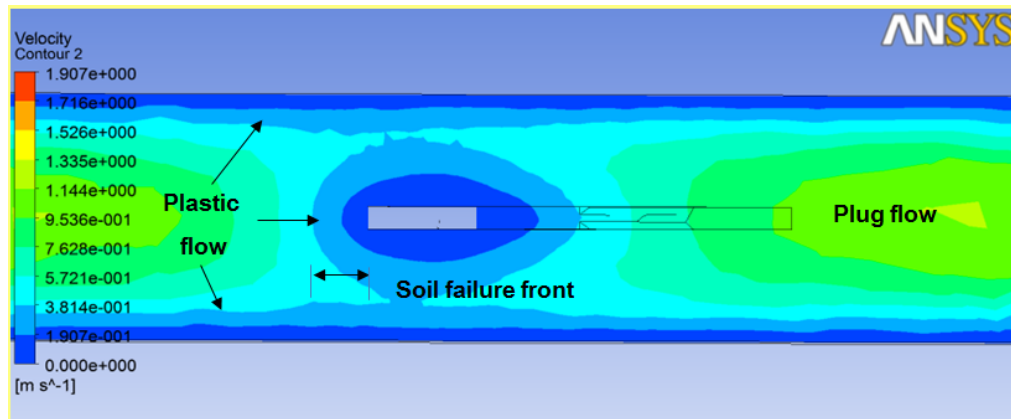
รูปที่ 4.14 ไถดินดานต้นแบบที่สร้างเสร็จแล้ว

#### 4.5 ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานต้นแบบ

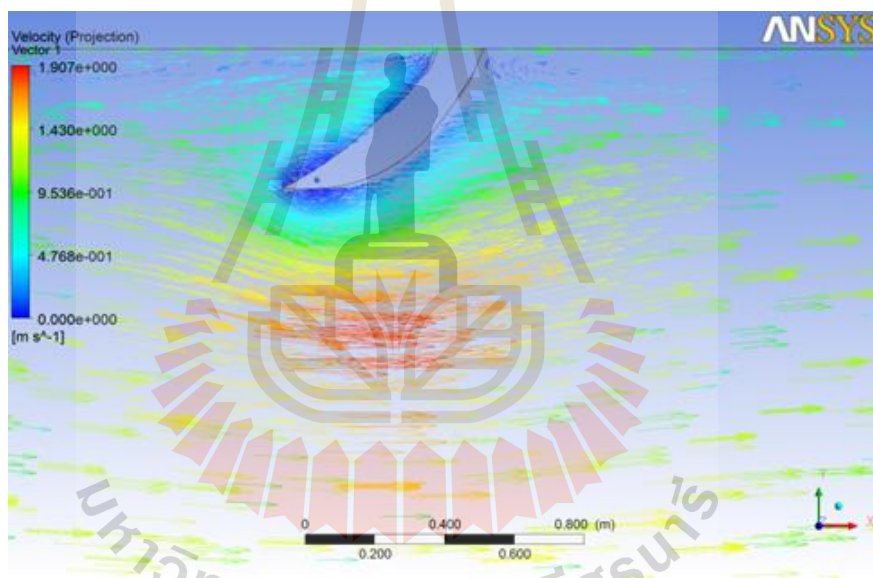
จากการออกแบบไถดินดานชนิดขาโค้งทั้ง 3 รูปแบบ ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือ โปรแกรม ANSYS Fluent ที่แสดงผลด้วยกราฟฟิก ผลการจำลอง พบว่า เมื่อมองจากด้านบนของแบบจำลองที่เป็นพื้นที่ผิวอิสระ (free surface) ดินจะเคลื่อนที่ไหลผ่านรอบ ๆ ขาไถดินดาน เส้นระดับ (contour) สีน้ำเงินคือ ความเร็วที่ต่ำสุด เนื่องจากเกิดการปะทะของดินที่บริเวณรอบ ๆ ขาไถดินดาน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และทำให้เกิดจุดหยุดนิ่ง (stagnation point) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยเส้นระดับ (contour) สีฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณปลายขาไถดินดาน มีพฤติกรรมการไหลแบบการไหลพลาสติก (plastic flow) มีการวิบัติของดินไปทางด้านหน้าขาไถดินดาน ส่วนเส้นระดับสีเขียว จะมีพฤติกรรมการไหลแบบอัดตัว (plug flow) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ส่วนพฤติกรรมการแตกตัวของดิน จะมีลักษณะการแตกตัวออกไปด้านข้างขาไถดินดานเหมือนรูปตัว U ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินหลังจากถูกไถดินดานกระทำหรือตัดดิน ทำให้โครงสร้างและความหนาแน่นของดินเปลี่ยนแปลง เกิดช่องว่างเล็กภายในดิน หรือเรียกว่าปริมาตรของการตัดดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขของการวิบัติดินตามความเร็วที่เกิดขึ้นจริงสามารถพิจารณาได้ว่า ความเร็วที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ดินเคลื่อนที่ในโดเมนการไหลเดียวกันและไหลผ่านไถดินดานที่หยุดนิ่ง ดังนั้น การวิบัติของดินเกิดจากผลของความเร็วในการเคลื่อนที่ไปตามระยะทางที่ห่างออกจากด้านบนของขาไถดินดาน คือช่วงระยะวิบัติ F ดังแสดงในรูปที่ 4.20



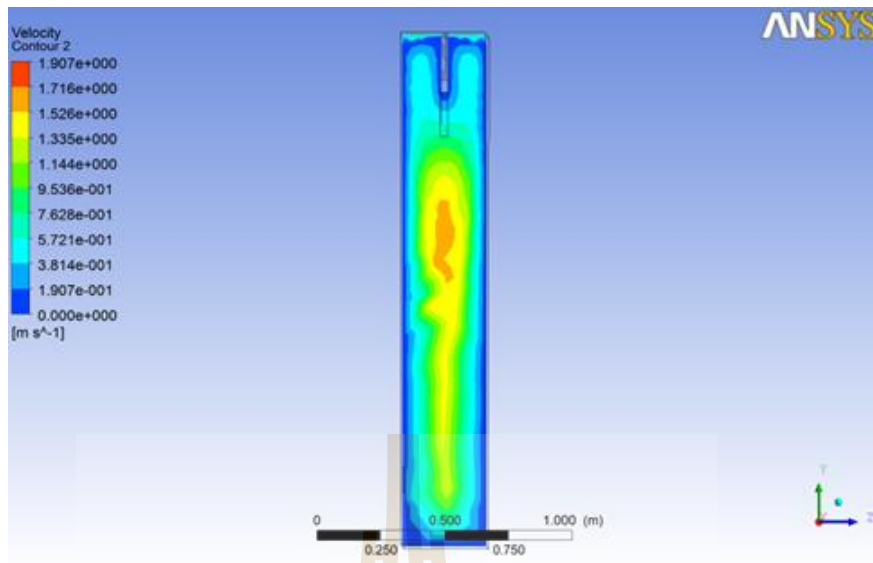
รูปที่ 4.15 การไหลของดินบริเวณส่วนบนไถดินดานที่พื้นที่ผิวอิสระ (top view)



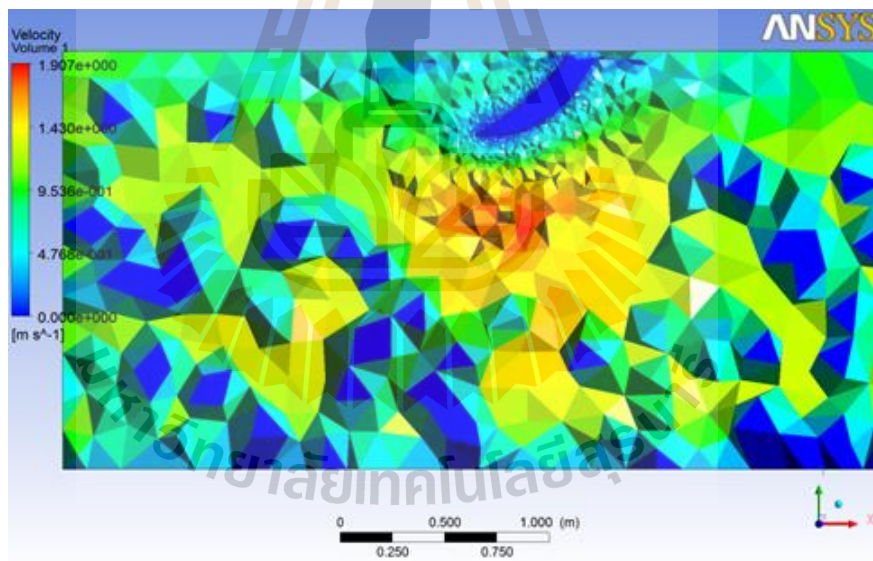
รูปที่ 4.16 การไหลของดินบริเวณปลายไถดินคาน



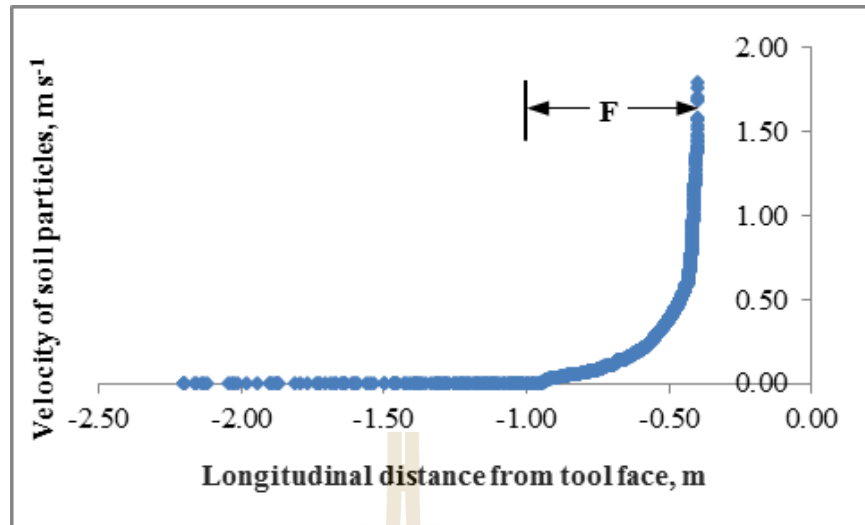
รูปที่ 4.17 เวกเตอร์ความเร็วของดินที่ไหลผ่านไถดินคาน



รูปที่ 4.18 การแตกตัวของดินเมื่อถูกไถดินดานกระทำ



รูปที่ 4.19 การแตกตัวของดินเชิงปริมาตร



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของดินกับระยะการวิบัติของดินด้านหน้าไถดินดาน

#### 4.6 ผลการวิเคราะห์แรงต้านของดินสำหรับไถดินดานต้นแบบ

จากการจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานต้นแบบ สามารถวิเคราะห์แรงต้านของดินของทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ผลการวิเคราะห์ พบว่า แรงต้านของดินที่เกิดจากการไหลแบบราบเรียบ เกิดจากผลรวมของแรงต้าน 2 ชนิด คือ แรงต้านที่เกิดจากความดันและแรงต้านที่เกิดจากความหนืด (แรงต้านเฉือน) โดยค่าแรงต้านของดินของไถดินดานทั้ง 3 รูปแบบ แสดงดังตารางที่ 4.6

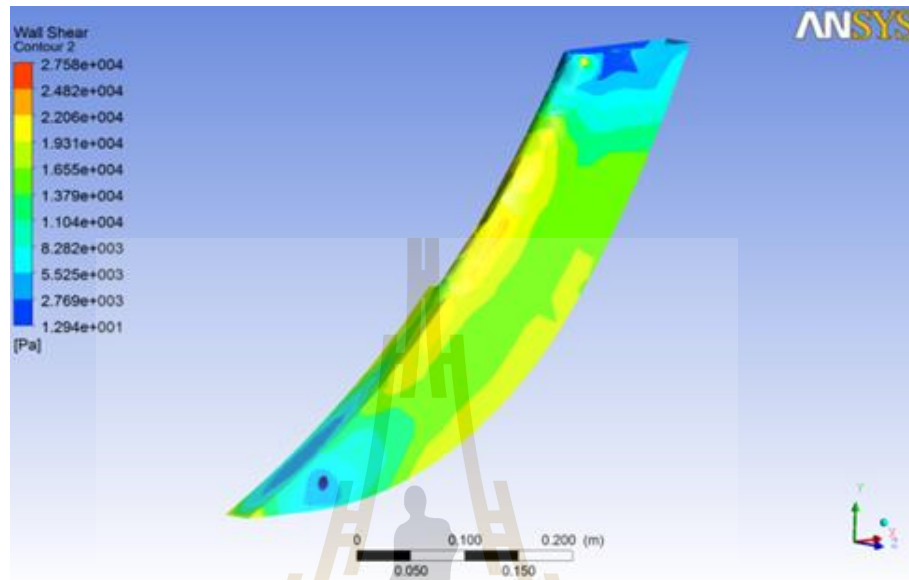
ตารางที่ 4.6 ผลจากการจำลองแรงต้านของดินผ่านไถดินดานต้นแบบทั้ง 3 รูปแบบ

Type	Drag force (N)			$C_d$
	Pressure	Viscous	Total	
1	987.51	2,242.80	3,230.31	356.88
2	1,022.10	2,398.56	3,420.66	377.91
3	972.83	2,096.48	3,069.31	339.09

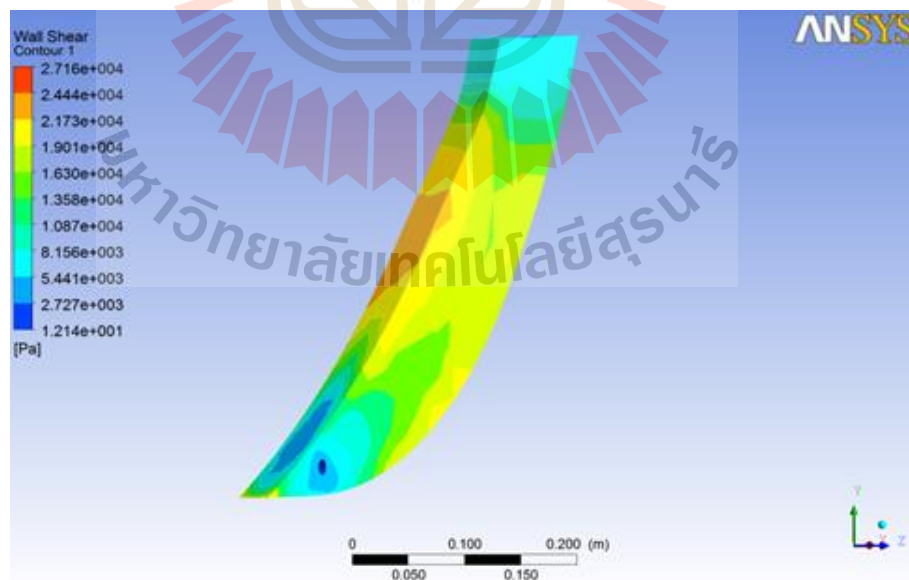
จากตารางที่ 4.6 พบว่า แรงต้านของดินที่กระทำกับไถดินดานบนพื้นฐานการวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบจะเกิดแรงต้านของดินที่กระทำกับผิวของไถดินดานมากที่สุด คือแบบที่ 2 รองลงมาแบบที่ 1 และ 3 ตามลำดับ และคิดเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านของดินเท่ากับ 377.91, 356.88



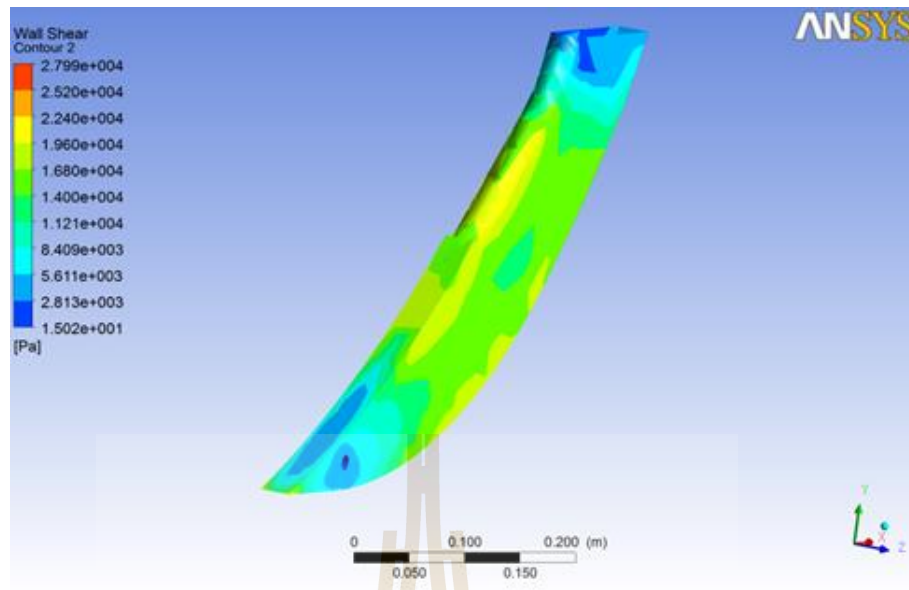
และ 339.09 ตามลำดับ สอดคล้องกับแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการตัดดินของ McKyes และ Ali (McKyes, 1985)



รูปที่ 4.21 เส้นระดับของความเค้นเฉือนบนพื้นผิวไถดินคันแบบที่ 1

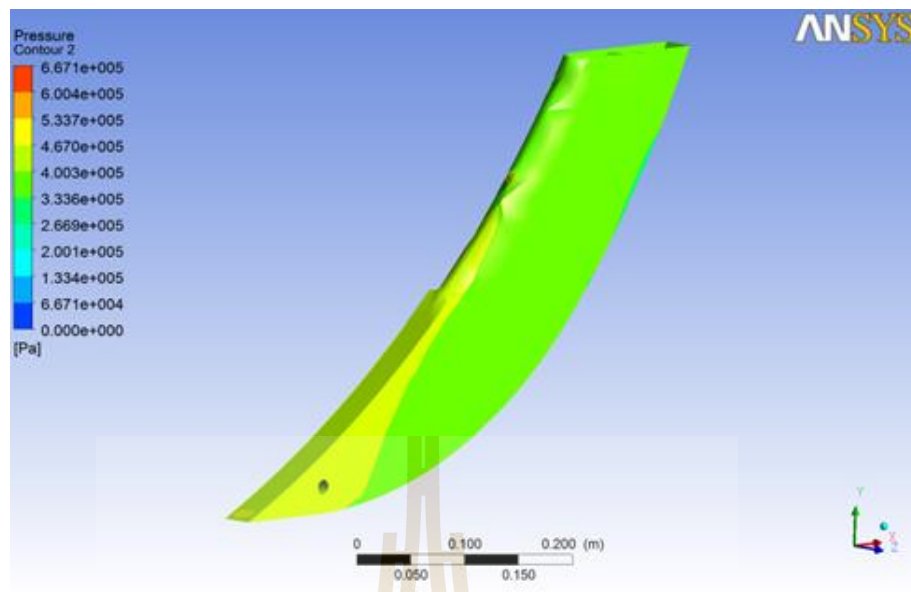


รูปที่ 4.22 เส้นระดับของความเค้นเฉือนบนพื้นผิวไถดินคันแบบที่ 2

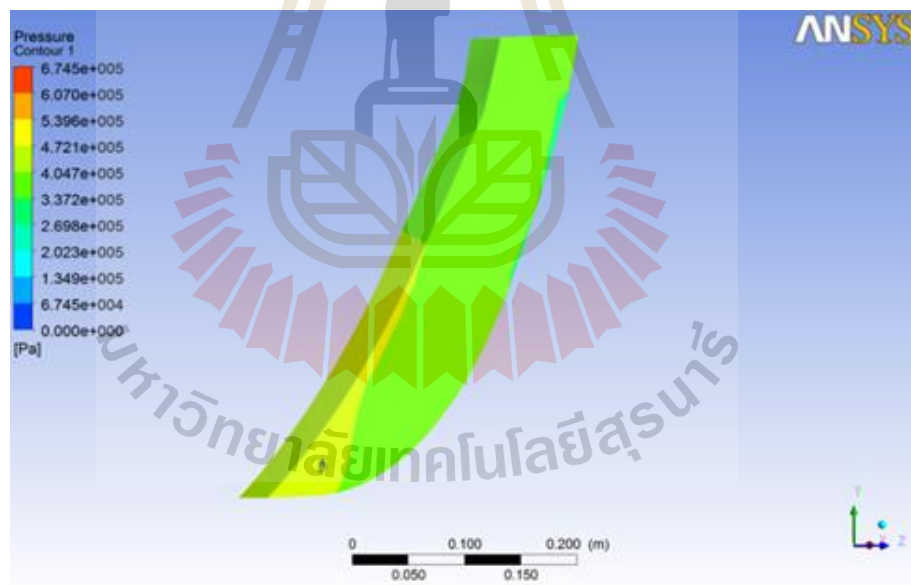


รูปที่ 4.23 เส้นระดับของความเค้นเฉือนบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 3

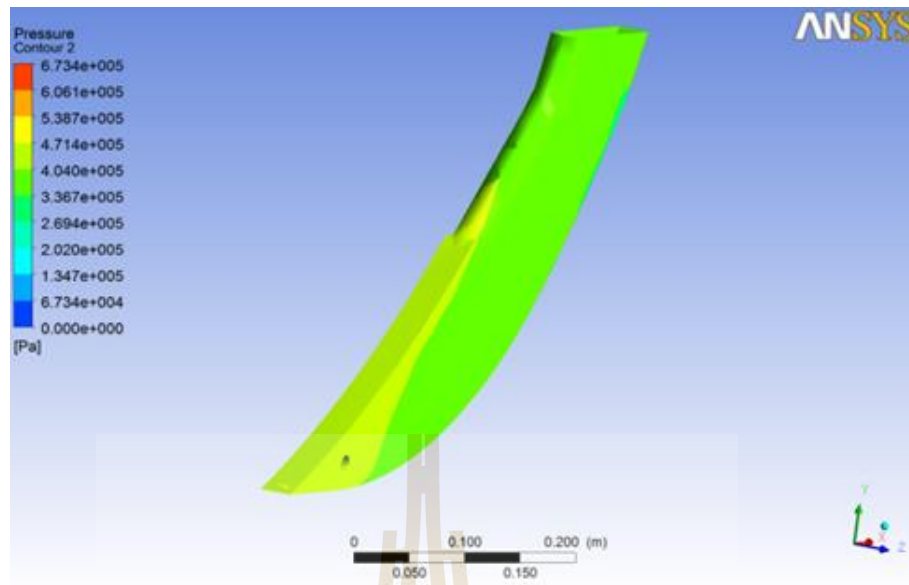
จากรูปที่ 4.21, 4.22 และ 4.23 แสดงเส้นระดับ (contour) ของแรงเฉือนที่กระทำกับผิวของไถดินดาน โดยบริเวณเส้นระดับสีแดง คือบริเวณที่เกิดแรงเฉือนมากที่สุด ส่วนเส้นระดับสีฟ้า คือบริเวณที่เกิดแรงเฉือนน้อยสุด บริเวณขอบด้านหน้าของขาไถดินดาน จะเกิดแรงเฉือนมาก เนื่องจากได้รับการปะทะจากดินโดยตรง ทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างดินกับผิวขาไถดินดานมาก ในขณะที่บริเวณขอบด้านหลังของขาไถดินดาน เกิดแรงเฉือนมากเช่นกัน เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของการไหล ทำให้เกิดการไหลแบบราบเรียบ จึงเกิดแรงเฉือนมากด้วย นอกจากนี้ พบว่าเส้นระดับของแรงเฉือนจากแบบที่ 2 มีค่ามากกว่าแบบอื่น ๆ เนื่องจากผิวด้านหน้าขาไถดินดานมีพื้นผิวที่สัมผัสกับดินมากกว่าแบบอื่น ๆ ส่งผลทำให้แรงต้านเฉือนจากแบบที่ 2 มีค่ามากกว่าแรงต้านเฉือนของแบบจำลองอื่น ๆ (แสดงในตารางที่ 4.6)



รูปที่ 4.24 เส้นระดับของแรงดันที่กระทำบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 1



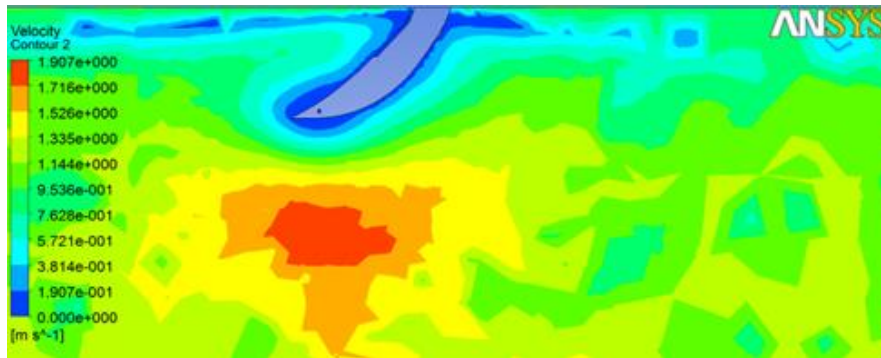
รูปที่ 4.25 เส้นระดับของแรงดันที่กระทำบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 2



รูปที่ 4.26 เส้นระดับของแรงดันที่กระทำบนพื้นผิวไถดินดานแบบที่ 3

จากรูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 แสดงเส้นระดับของความดันที่เกิดขึ้นที่ผิวของขาไถดินดาน โดยบริเวณที่มีความดันมากที่สุด คือบริเวณด้านหน้าของปลายขาไถดินดาน เนื่องจากเป็นจุดที่ดินไหลมาปะทะทำให้เกิดจุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) ขึ้น แสดงด้วยเส้นระดับสีน้ำเงิน (ดังแสดงในรูปที่ 4.27) ความดันบริเวณนี้มีค่ามากที่สุด บริเวณส่วนกลางขาไถดินดาน และบริเวณส่วนบนขาไถดินดาน มีความดันลดลงตามลำดับ เนื่องจากเป็นส่วนที่ปะทะกับดินที่ไหลเข้ามา ทำให้ดินบริเวณนั้นมีความเร็วลดลง ทำให้ความดันมาก เส้นระดับบริเวณนั้นจึงเป็นสีเหลือง ส่วนบริเวณด้านหลังขาไถดินดานมีความดันน้อย เนื่องจากด้านหลังขาไถดินดานเกิดการไหลแบบราบเรียบ จึงทำให้ความดันน้อย เส้นระดับจึงเป็นสีเขียวหรือใกล้เคียงสีฟ้า ด้วยเหตุผลนี้ ทำให้ผลต่างความดันบริเวณด้านหน้าและด้านหลังขาไถดินดานมีค่ามาก จึงกลายเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของขาไถดินดาน

จากผลการหาแรงต้านของดิน การจำลองความเค้นเฉือนและแรงดันที่กระทำกับไถดินดาน พบว่า ไถดินดานต้นแบบที่ 3 มีความเหมาะสมที่สุด จึงได้นำไถดินดานแบบที่ 3 มาแสดงผลความเร็วของดินที่ไหลผ่านไถดินดานในรูปแบบกราฟฟิก ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 และนำไปใช้ในการออกแบบ และสร้างขาไถดินดานต้นแบบในหัวข้อ 4.4



รูปที่ 4.27 เส้นระดับของความเร็วของดินที่ผ่านไถดินดานแบบที่ 3



รูปที่ 4.28 เส้นทางการไหลของความเร็วของดินที่ไหลผ่านไถดินดานแบบที่ 3

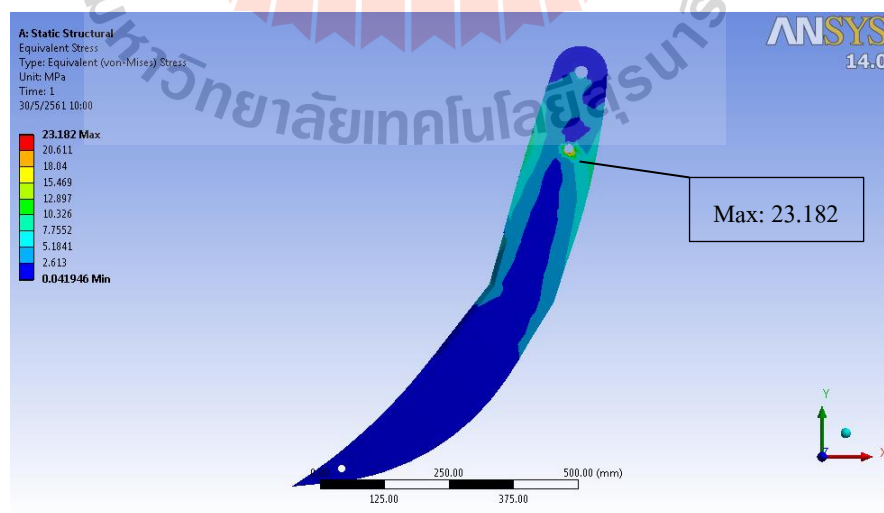
จากรูปที่ 4.28 แสดงเส้นทางการไหล (streamline) ของดินจากการจำลองการไหลผ่านไถดินดานแบบที่ 3 พบว่า ความเร็วของดินบริเวณที่ไหลผ่านด้านใต้ขาไถดินดาน มีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากบริเวณด้านใต้ขาไถดินดาน การไหลถูกบีบให้มีหน้าตัดการไหลน้อยลงเมื่อเทียบกับโดเมนของการจำลองการไหล ความเร็วจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อถึงบริเวณด้านหน้าขาไถดินดาน หน้าตัดการไหลเทียบกับกรอบโดเมนที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งรูปทรงของไถดินดานเป็นขาโค้ง ทำให้ความเร็วในการไหลลดลง ส่งผลทำให้ความดันบริเวณด้านหน้าขาไถดินดานลดลง สาเหตุดังกล่าวมีผลทำให้ความดันของดินบริเวณด้านหน้าขาไถดินดานมีค่าน้อยกว่าบริเวณอื่น ซึ่งทำให้แรงต้านของไถดินดานมีค่าลดลงด้วย

จากการจำลองการหาแรงต้านของดินสำหรับไถดินดานชนิดขาโค้งด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบ พบว่า ผลการจำลองทั้ง 3 แบบ ความเร็วของดินที่เคลื่อนปะทะบริเวณตรงกลางขาไถดินดาน มีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้

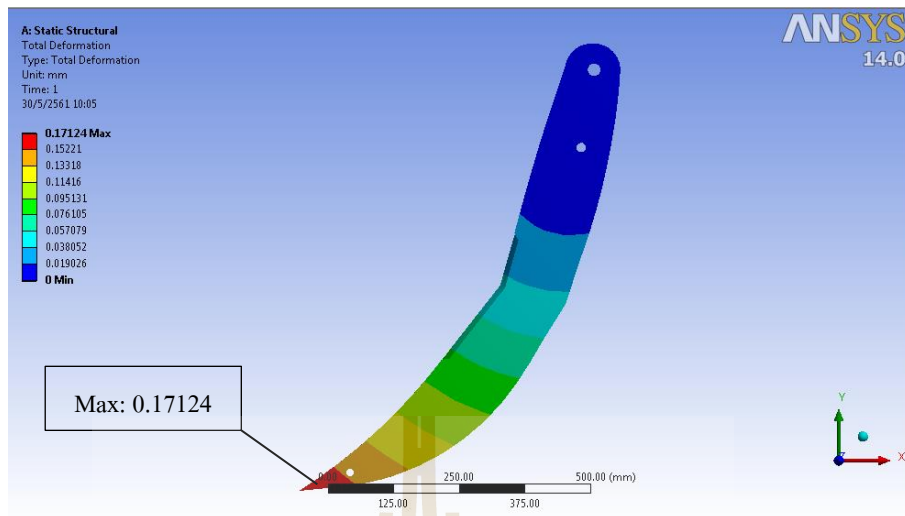
บริเวณนั้นเกิดแรงเฉือนมาก ส่วนสัมประสิทธิ์แรงต้านของดิน บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบของแบบที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 356.88, 377.91 และ 339.09 ตามลำดับ ซึ่งการวิเคราะห์บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบทั้ง 3 แบบของไถดินดานชนิดขาโค้งนี้ ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านน้อยสุด คือแบบที่ 3

#### 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงไถดินดานต้นแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการจำลองพฤติกรรมการไหลและการหาแรงต้านของดินผ่านไถดินดานแล้ว พบว่า ไถดินดานแบบที่ 3 มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากผลการหาแรงต้านของดินมีค่าน้อยที่สุด จึงได้นำมาวิเคราะห์ความแข็งแรงไถดินดานด้วยโปรแกรม ANSYS Static Structural ผลการวิเคราะห์ความเค้นแสดงให้เห็นว่า บริเวณที่แสดงผลสีแดงเป็นบริเวณที่มีการกระจายตัวของความเค้นที่สูงที่สุด สีส้ม สีเหลือง สีเขียว และสีฟ้าคือ บริเวณที่มีค่าการกระจายตัวความเค้นลดลง ตามลำดับ ส่วนสีน้ำเงินคือ บริเวณที่มีการกระจายตัวของความเค้นต่ำสุด ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณรูเจาะสำหรับใส่ล้อตบนิรภัยที่ 2 มีค่าเท่ากับ 23.182 เมกะปาสคาล ค่าความปลอดภัยต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 3.7184 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวแสดงให้เห็นว่า บริเวณสีแดงแสดงค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นสูงสุด สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีฟ้า และสีน้ำเงิน มีค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นลดลงตามลำดับ การโก่งตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นอยู่บริเวณปลายขาไถดินดานมีค่าเท่ากับ 0.17124 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arjun and Chhaphkane (2017) ที่ศึกษาการเสียรูปและโก่งตัวของขาไถดินดานด้วยโปรแกรม ANSYS ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 ค่าการกระจายตัวของความเค้นแบบ Von-Mises



รูปที่ 4.30 ค่าการกระจายตัวของการโก่งตัวของไถดินดานต้นแบบ

#### 4.8 ผลการทดลองไถดินดานต้นแบบที่ระดับความลึกการไถต่างกัน

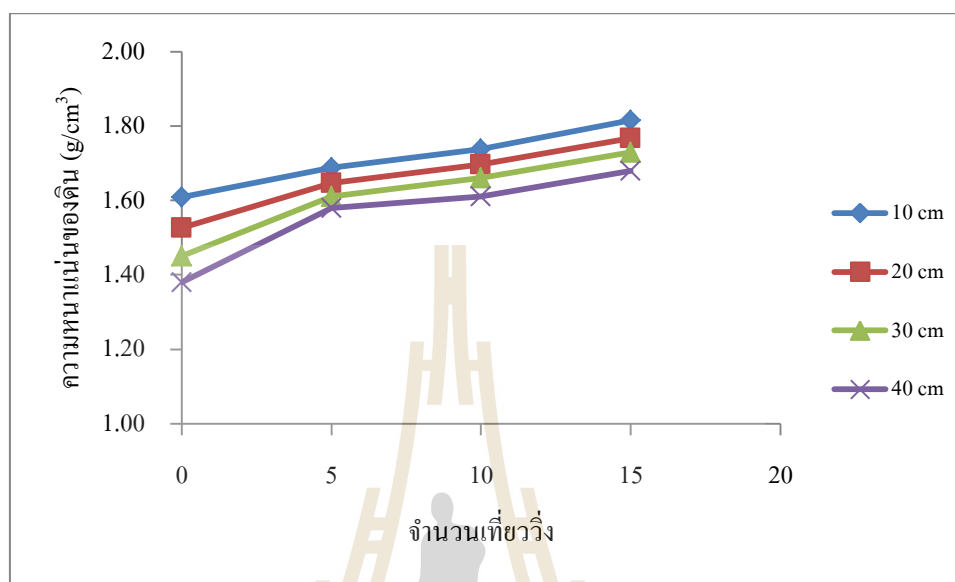
##### 4.8.1 สภาพดินในแปลงทดลอง

พื้นที่ทำการทดลองคือ แปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ผลการจำแนกดินพบว่า ดินในแปลงเกษตรเป็นดินชนิดดินร่วนปนทราย (Sandy Loam) ประกอบด้วยอนุภาคดินทราย (Sand) 63.84 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคดินตะกอน (Silt) 21.50 เปอร์เซ็นต์ และอนุภาคดินเหนียว (Clay) 14.66 เปอร์เซ็นต์ มีพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) 9.50 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) 24.10 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีสภาพพลาสติก 14.60 เปอร์เซ็นต์

##### 4.8.2 การบดอัดในแปลงทดลอง

ในการศึกษาผลของการอัดแน่นของดิน การเตรียมความหนาแน่นของดินในแปลง โดยทั่วไปทำได้โดยการบดอัดด้วยการวิ่งของรถแทรกเตอร์ในแปลง ซึ่งระดับความหนาแน่นของดินขึ้นอยู่กับจำนวนเที่ยววิ่งซ้ำของรถแทรกเตอร์ (ประเทือง และธัญญา, 2547) การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาความสัมพันธ์ของจำนวนเที่ยววิ่งและความหนาแน่นที่เกิดจากการบดอัด ในการทดลองครั้งนี้ใช้รถแทรกเตอร์ Massey Ferguson รุ่น 4245 น้ำหนักเฉพาะตัวรถแทรกเตอร์ 3,386 กิโลกรัม ความดันลมยาง 1.27 กิโลปาสกาล ทำการวิ่งบดอัดดินในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี พร้อมกับเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปวัดค่าความหนาแน่นรวมของดินโดยการทดลองกระทำในช่วงบ่าย เพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่อาจเกิดขึ้นก่อนการวิ่งบดอัดจริงในวันต่อมา ความชื้นของดินที่บดอัดมีค่าเฉลี่ย 14.32 เปอร์เซ็นต์ ความสัมพันธ์ของจำนวน

เที่ยววิ่งและความหนาแน่นของดินที่ระดับความลึก 10, 20, 30 และ 40 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.31

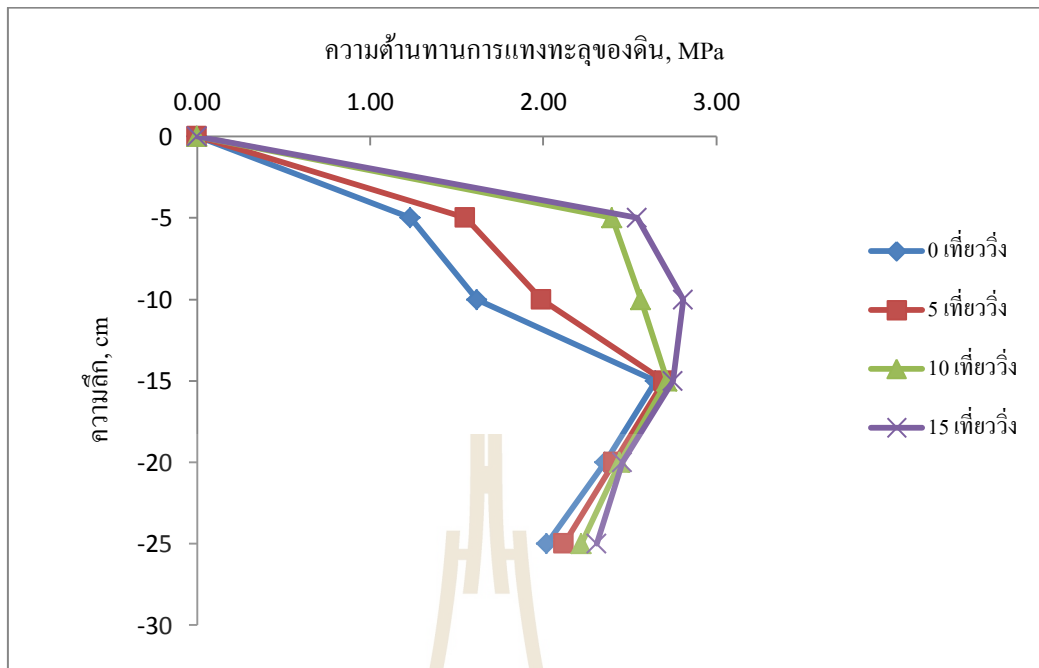


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยววิ่งและความหนาแน่นของดิน

จากรูปที่ 4.31 พบว่า ความหนาแน่นของดินจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนเที่ยววิ่งเพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงแต่จะเพิ่มมากในช่วงแรกและอัตราการเพิ่มจะลดลงในช่วงหลัง ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมที่พบโดยทั่วไปของการเกิดการอัดแน่นของดินได้ดีย่างระหว่างการปฏิบัติงานด้วยรถแทรกเตอร์ในแปลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และธัญญา นิชมาภา (2547) ที่ศึกษาผลกระทบของการอัดแน่นดินต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของอ้อย

เมื่อจำนวนเที่ยววิ่งมากขึ้น บริเวณที่เกิดการอัดแน่นสูงสุดของดินจะเข้าไปใกล้ผิวดินมากขึ้นด้วย เมื่อตรวจสอบดูค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ กันในแปลงทดลองด้วย Cone penetrometer ซึ่งสามารถอนุมานรูปแบบการอัดแน่นของดินได้ ผลการตรวจวัดได้รูปแบบค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน แสดงได้ดังรูปที่ 4.32





รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินกับความลึก

#### 4.8.3 แรงลากในแนวระดับ

การทดลองหาแรงลากในแนวระดับจากการไถ 6 ร่องไถ ร่องไถละ 3 การทดลอง ผลการทดลองในภาคสนาม พบว่า แรงลากในแนวระดับเฉลี่ยมากที่สุด 14.69 กิโลนิวตัน และแรงลากในระดับเฉลี่ยน้อยสุด 4.39 กิโลนิวตัน โดยที่แรงลากในแนวระดับ คือค่าแรงจุดลากที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าลึงจุดลาก แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองแรงลากในแนวระดับ

ร่องไถ	แรงลากในแนวระดับ (kN)		
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย
20L1	4.56	4.22	4.39
40L1	8.81	8.23	8.52
60L1	13.17	12.98	13.07
20L2	5.16	4.91	5.04
40L2	9.42	9.27	9.35
60L2	14.95	14.43	14.69

#### 4.8.4 กำลังจูงลาก

การหาค่ากำลังจูงลากเฉลี่ย (Drawbar Power) ของรถแทรกเตอร์ ใช้ข้อมูลจากแรงลากในแนวระดับเฉลี่ยแต่ละร่องไถและความเร็วของการเคลื่อนที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 กำลังจูงลากเฉลี่ย (Drawbar power)

ร่องไถ	ความเร็ว		แรงลากในแนวระดับเฉลี่ย kN	กำลังจูงลากเฉลี่ย kW
	km/h	m/s		
20L1	1.91	0.53	4.39	2.33
40L1	1.80	0.50	8.52	4.26
60L1	1.76	0.49	13.07	6.40
20L2	2.80	0.78	5.04	3.93
40L2	2.52	0.70	9.35	6.55
60L2	2.16	0.60	14.69	8.81

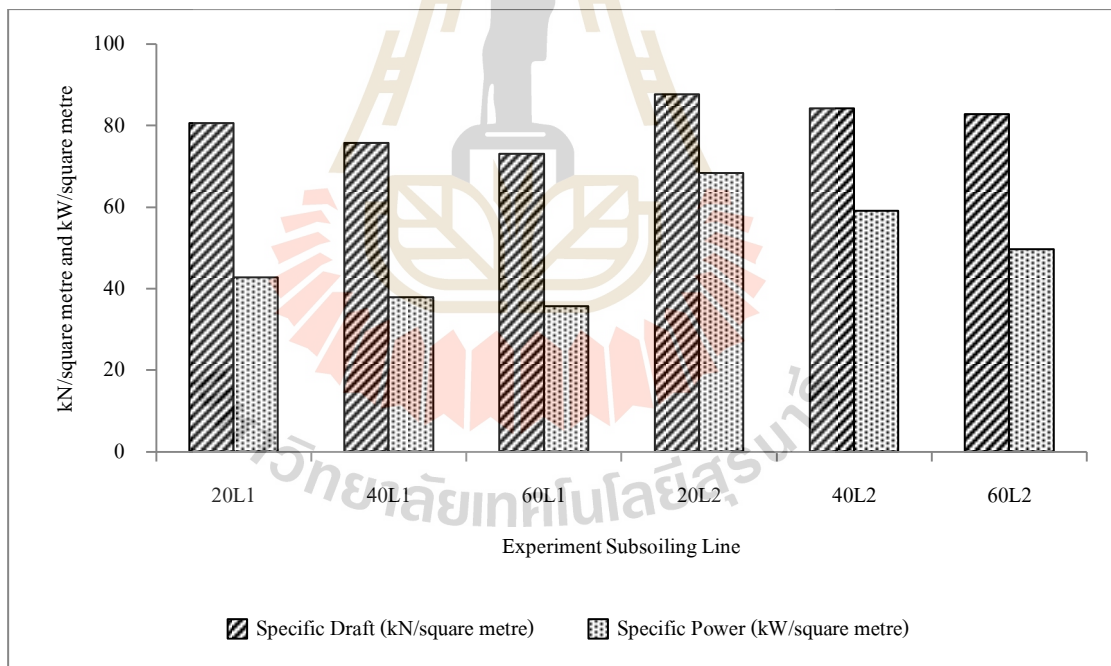
เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.8 พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลง เมื่อความลึกการไถเพิ่มขึ้น ส่วนแรงลากในแนวระดับเพิ่มขึ้นตามความลึกการไถเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่สัมผัสดินเพิ่มขึ้น ทำให้แรงต้านของดินเพิ่มขึ้น และส่งผลให้กำลังจูงลากเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับร่องไถที่มีกำลังจูงลากเฉลี่ยมากที่สุด คือ ร่องไถ 60L2 และร่องไถที่มีกำลังจูงลากเฉลี่ยน้อยสุด คือ ร่องไถ 20L1 มีค่าเท่ากับ 8.81 และ 2.33 กิโลวัตต์ ตามลำดับ

#### 4.8.5 พื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil Disturbance)

การหาพื้นที่การแตกตัวเฉลี่ยหลังจากการไถดินดาน ผลการทดลองภาคสนามพบว่า ร่องไถ 60L1 มีพื้นที่การแตกตัวของดินเฉลี่ยมากที่สุด 0.1790 ตารางเมตร และร่องไถ 20L1 มีพื้นที่การแตกตัวของดินเฉลี่ยน้อยสุด 0.0545 ตารางเมตร เนื่องจากพื้นที่การแตกตัวของดินเพิ่มขึ้นตามความลึกการไถและความกว้างของไถดินดาน สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Priyanka and Kundan (2016) และ Kumar and Thakur (2007) ค่าแรงลากในแนวระดับเฉลี่ยและค่ากำลังจูงลากเฉลี่ย นำไปหาค่าแรงลากในแนวระดับต่อพื้นที่การแตกตัว (Specific Draft) และค่ากำลังจูงลากต่อพื้นที่การแตกตัว (Specific Power) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.33

ตารางที่ 4.9 พื้นที่การแตกตัวเฉลี่ย แรงลากในแนวระดับต่อพื้นที่การแตกตัว และกำลังนุดลากต่อพื้นที่การแตกตัว

ร่องไถ	พื้นที่การแตกตัวเฉลี่ย $m^2$	แรงลากในแนวระดับต่อพื้นที่การแตกตัว $kN/m^2$	กำลังนุดลากต่อพื้นที่การแตกตัว $kW/m^2$
20L1	0.0545	80.55	42.75
40L1	0.1125	75.73	37.87
60L1	0.1790	73.02	35.75
20L2	0.0575	87.65	68.35
40L2	0.1110	84.23	59.01
60L2	0.1775	82.76	49.63



รูปที่ 4.33 ค่า Specific Draft และ Specific Power

#### 4.8.6 การลื่นไถล

การทดลองหาการลื่นไถล (Slip) ของล้อรถแทรกเตอร์แต่ละร่องไถ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณาจากตาราง จะเห็นได้ว่าการลื่นไถลของล้อรถแทรกเตอร์ที่ร่องไถ 60L1 จะมีค่าสูงสุด คือ 6.58 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ ร่องไถ 60L2 ร่องไถ 40L1 ร่องไถ 40L2 ร่องไถ 20L1 และร่องไถ 20L2 โดยมีค่าการลื่นไถลคือ 4.42, 4.12, 2.67, 1.03 และ 0.51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากร่องไถ 60L1 มีความลึกร่องไถมากที่สุดและใช้ระดับเกียร์ต่ำสุด การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จึงมีความเร็วต่ำสุด ทำให้เกิดแรงต้านทานที่ล้อสูง การลื่นไถลจึงสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.10 การลื่นไถลของล้อรถแทรกเตอร์

ร่องไถ	การลื่นไถลของล้อรถแทรกเตอร์ (%)
20L1	1.03
40L1	4.12
60L1	6.58
20L2	0.51
40L2	2.67
60L2	4.42

#### 4.8.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการทดลองของไถดินดานที่ระดับเกียร์และความลึกการไถต่างกัน

การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความแตกต่างของแรงลากในแนวระดับที่ได้จากการทดลองไถดินดานที่ระดับเกียร์ L1 และ L2 และระดับความลึกการไถ 20 40 และ 60 เซนติเมตร ในระหว่างการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลต่างๆ และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของแรงลากในแนวระดับและกำลังขุดลากของไถดินดานที่ระดับเกียร์และความลึกการไถต่างกัน

ร่องไถ	แรงลากในแนวระดับเฉลี่ย	กำลังขุดลากเฉลี่ย
	kN	kW
20L1	4.39±0.15 <sup>a</sup>	2.33±0.08 <sup>a</sup>
40L1	8.52±0.26 <sup>b</sup>	4.26±0.13 <sup>b</sup>
60L1	13.07±0.09 <sup>c</sup>	6.40±0.04 <sup>c</sup>
20L2	5.04±0.15 <sup>a</sup>	3.93±0.11 <sup>a</sup>
40L2	9.35±0.05 <sup>b</sup>	6.55±0.03 <sup>b</sup>
60L2	14.69±0.22 <sup>c</sup>	8.81±0.13 <sup>c</sup>

a-c Different letters in the same column indicate significant differences (p<0.05)

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.11 พบว่า ค่าแรงลากในแนวระดับเฉลี่ย และค่ากำลังขุดลากเฉลี่ย ในร่องไถ 20L1 กับร่องไถ 20L2, ร่องไถ 40L1 กับร่องไถ 40L2 และร่องไถ 60L1 กับร่องไถ 60L2 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับเกียร์ต่างกัน ไม่มีผลต่อแรงลากในแนวระดับและกำลังขุดลาก ส่วนระดับความลึกการไถต่างกันมีผลต่อแรงลากในแนวระดับและกำลังขุดลาก

#### 4.9 ผลการทดสอบประเมินสมรรถนะไถดินดานในภาคสนาม

การทดสอบไถดินดานต้นแบบในภาคสนาม แปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พื้นที่ทดสอบ 0.28 ไร่ ต้นกำลังรถแทรกเตอร์ ขนาด 85 แรงม้า เลือกใช้ระดับเกียร์ L2 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาที เนื่องจากเป็นความเร็วที่แนะนำให้ใช้สำหรับไถดินดาน (ตฤณสิทธิ์ ไกรสินบุรศักดิ์ และชัยยกร จันทร์สุวรรณ, 2560 และ รัชญา นิยมภา และชัยรัตน์ รามแดง, 2539) และเลือกระดับความลึกการไถ 40 เซนติเมตร เนื่องจากในไร่อ้อยจะพบชั้นดินดานไถพรวนในระดับความลึก 30-40 เซนติเมตร (ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และรัชญา นิยมภา, 2547) ผลการทดสอบประเมินสมรรถนะไถดินดานต้นแบบในภาคสนาม แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบประเมินสมรรถนะไถดินดานในภาคสนาม

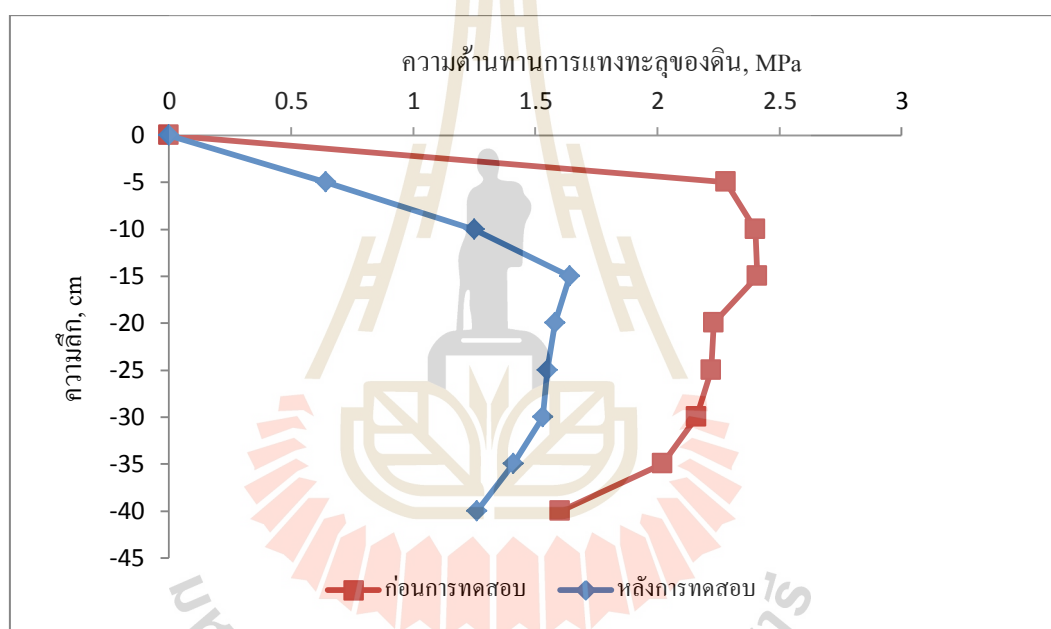
รายการ	ข้อมูลการทำงาน
1. พื้นที่ทดสอบ (ไร่)	0.28
2. สมบัติของดิน	
2.1 ชนิดของดิน	ดินร่วนปนทราย
2.2 ความชื้นของดิน (%d.b)	15.02
2.3 ค่าการแทงทะลุของดิน ก่อนทดสอบ (MPa)	
ผิวดิน	0
5 cm	2.28
10 cm	2.40
15 cm	2.41
20 cm	2.23
25 cm	2.22
30 cm	2.16
35 cm	2.02
40 cm	1.60
2.4 ค่าแรงเนียนของดิน ก่อนทดสอบ (kPa)	
ผิวดิน	55
20 cm	74
40 cm	75
60 cm	76
2.5 ค่าการแทงทะลุของดิน หลังทดสอบ (MPa)	
ผิวดิน	0
5 cm	0.64

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบประเมินสมรรถนะและคุณภาพการไถในภาคสนาม (ต่อ)

รายการ	ข้อมูลการทำงาน
2.5 ค่าการแทงทะลุของดิน หลังทดสอบ (MPa)	
10 cm	1.25
15 cm	1.64
20 cm	1.58
25 cm	1.55
30 cm	1.53
35 cm	1.41
40 cm	1.26
2.6 ค่าแรงเฉือนของดิน หลังทดสอบ (kPa)	
ผิวดิน	25
20 cm	38
40 cm	40
60 cm	42
3. หน้ากว้างในการทำงาน (เมตร)	1.67
4. ความเร็วในการเคลื่อนที่ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)	2.95
5. การสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์ (เปอร์เซ็นต์)	1.58
6. เวลาที่ทำงานจริง (นาฬิกา)	5.88
7. เวลาที่สูญเสียอื่น ๆ (นาฬิกา)	-
8. เวลาที่ปรับแต่งเครื่องมือ (นาฬิกา)	-
9. เวลาที่ใช้กลับรถ (นาฬิกา)	3.19
10. เวลาสูญเสียรวม (นาฬิกา)	3.19
11. เวลาทำงานรวมทั้งหมด (นาฬิกา)	9.07
12. ความสามารถในการทำงาน (ไร่ต่อชั่วโมง)	1.85
13. ความสามารถในการทำงานเชิงทฤษฎี (ไร่ต่อชั่วโมง)	3.08
14. ประสิทธิภาพการทำงาน (ร้อยละ)	64.83
15. การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตรต่อไร่)	2.82
16. แรงลากในแนวระดับ (นิวตัน)	9,350
17. พื้นที่การแตกตัวเฉลี่ย (ตารางเมตร)	0.111

ผลการทดสอบในภาคสนาม พบว่า สมรรถนะไถดินดานต้นแบบมีความสามารถในการทำงาน 1.85 ไร่ต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการทำงาน ร้อยละ 64.83 การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 2.82 ลิตรต่อไร่ และพื้นที่การแตกตัวเฉลี่ย 0.111 ตารางเมตร

ผลของความต้านทานการแทงทะลุของดินเมื่อทำการทดสอบสมรรถนะไถดินดานในภาคสนาม พบว่า ก่อนการทดสอบ ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 2 เมกะปาสคาล และหลังการทดสอบ ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 2 เมกะปาสคาล เนื่องจากมีการไถดินดานในบริเวณที่มีการอัดแน่นของดิน ทำให้เกิดช่องว่างภายในดิน ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจึงลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินกับความลึกก่อนและหลังการทดสอบไถดินดาน

#### 4.10 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามกับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของไถดินดานต้นแบบ

การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาแรงต้านของดิน (Drag force) นำข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลในภาคสนามมาใช้เป็นข้อมูลในการจำลองสถานการณ์ เพื่อนำผลที่จำลองได้มาเปรียบเทียบกับแรงลากในแนวระดับที่วัดค่าได้จากการทดสอบในภาคสนาม ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จาก



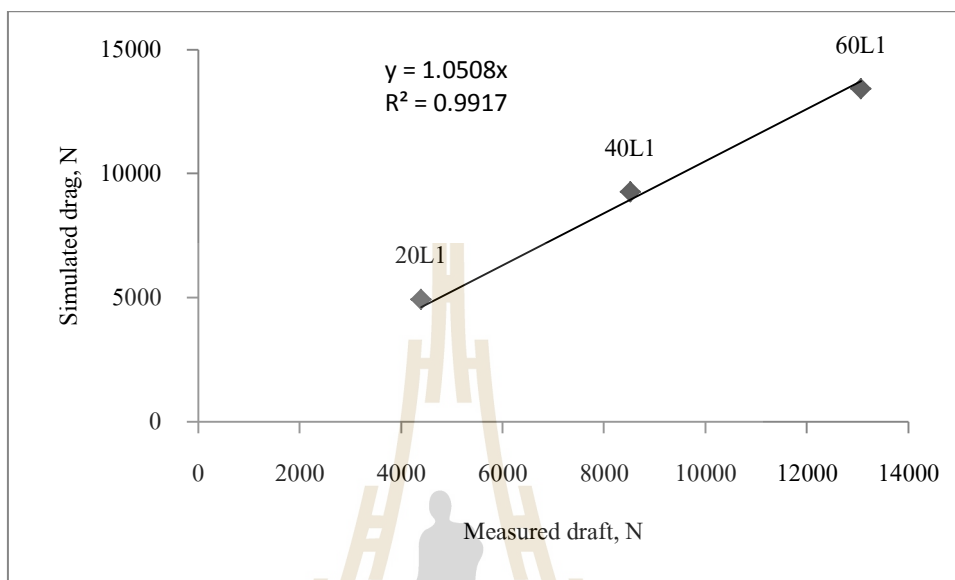
หัวข้อ 4.8 ได้แก่ ความชื้นของดิน ความหนาแน่นรวมของดิน ความเร็วในการเคลื่อนที่ และความลึกการไถ โดยนำค่าความชื้นของดินที่วัดได้มาใช้หาค่าความหนืดเฉือนของดินที่ได้จากสมการ 4.4 ส่วนความเค้นเฉือนของดินได้จากการวัดจริงให้ภาคสนามที่ความลึกการไถต่างกัน ใช้แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.5 เป็นแบบจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานและทำนายค่าแรงต้านของดิน ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง CFD สำหรับไถดินดาน

รายการ		ข้อมูลการ ทำงาน
1.	ความหนาแน่นรวมของดิน (kg/m <sup>3</sup> )	1,820
2.	ความชื้นของดินเฉลี่ย (%db)	15.02
3.	ความหนืดเฉือนของดิน (Pa s)	465.34
4.	ความเค้นเฉือนของดิน ที่ความลึก (kPa)	
	20 cm	74
	40 cm	75
	60 cm	76

ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามที่ใช้เกียร์ L1 และความลึกการไถต่างกัน พบว่า แรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์เทียบกับแรงลากในแนวระดับจากการวัดค่าจริงในภาคสนามมีค่าเพิ่มขึ้น ในลักษณะเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ McKyes and Desir (1984) และ Al-Janobi and Al-Suhaibani (1998) แรงลากจากแบบจำลองมากกว่าการวัดค่าจริงในภาคสนาม 5.08 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9917 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 0.5706 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 7.93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสมการแนวโน้มนี้นี้ประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ส่วนการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงลากในแนวระดับจากการวัดจริงในภาคสนามและค่าแรงต้านทานของดินจากการจำลองสถานการณ์ พบว่า ค่าที่ได้จากการวัดจริงในภาคสนาม และค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีความสัมพันธ์กันทางสถิติที่ระดับความ

เชื่อมัน 95 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และผลการเปรียบเทียบค่าแรงลากในแนวระดับจากการวัดจริงในภาคสนามกับค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.37



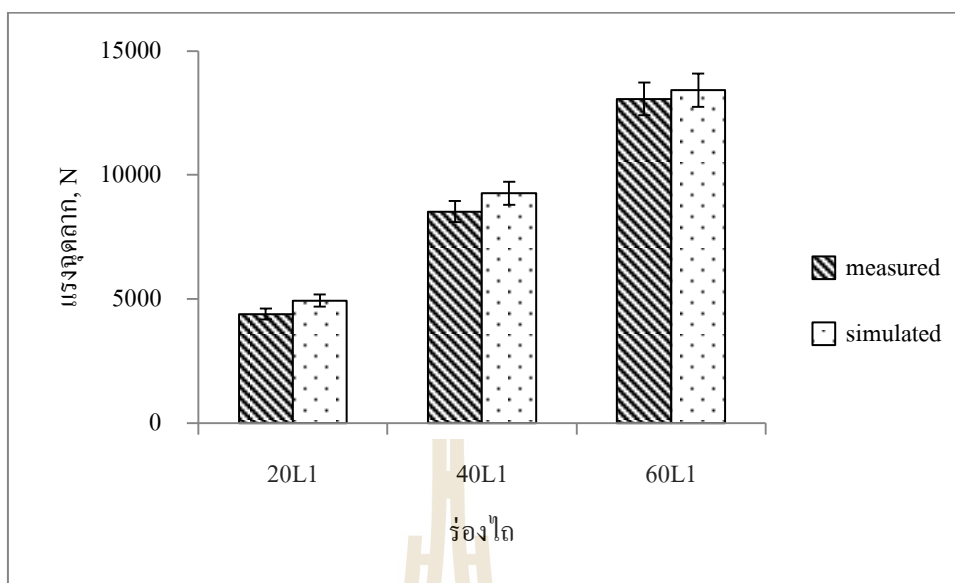
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์กับแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามของไถดินดันต้นแบบที่ใช้เกียร์ L1 และความลึกการไถต่างกัน

#### Correlations

		Measured	Simulated
Measured	Pearson Correlation	1	.999*
	Sig. (2-tailed)		.026
	N	3	3
Simulated	Pearson Correlation	.999*	1
	Sig. (2-tailed)	.026	
	N	3	3

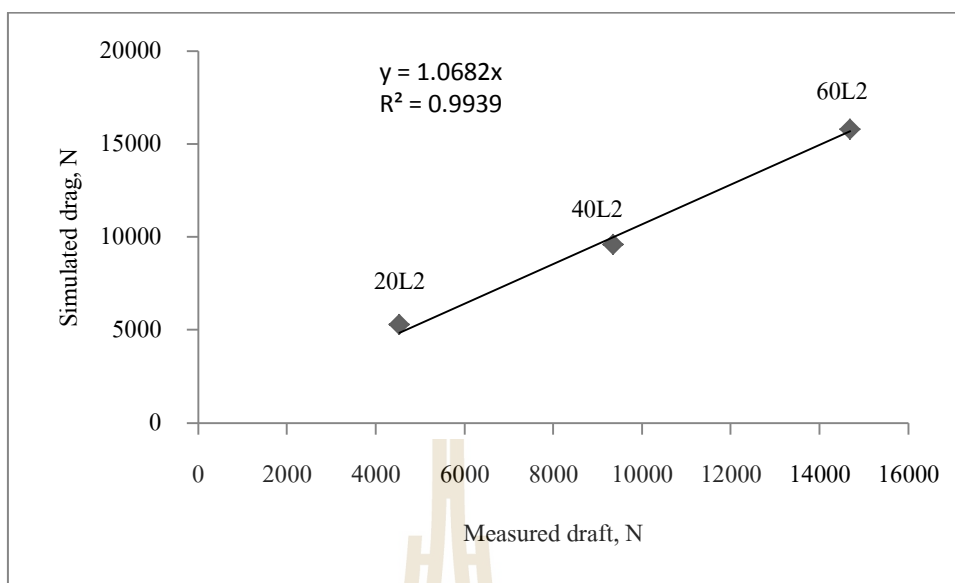
\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวัดจริงกับการจำลองสถานการณ์ของการหาแรงจุดลากที่เกียร์ L1



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์กับค่าแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามของไถดินคันต้นแบบที่ใช้เกียร์ L1 และความลึกการไถต่างกัน

ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามที่ใช้เกียร์ L2 และความลึกการไถต่างกัน พบว่า แรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์เทียบกับแรงลากในแนวระดับจากการวัดค่าจริงในภาคสนามมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ McKyes and Desir (1984) ที่ศึกษาการทำนายและการวัดค่าในภาคสนามของอุปกรณ์ไถดิน และ Al-Janobi and Al-Suhaibani (1998) แรงลากจากแบบจำลองมากกว่าการวัดค่าจริงในภาคสนาม 6.82 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9939 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 0.7847 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 8.88 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสมการแนวโน้มนี้ประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ส่วนการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงลากในแนวระดับจากการวัดจริงในภาคสนามและค่าแรงต้านทานของดินจากการจำลองสถานการณ์ พบว่า ค่าที่ได้จากการวัดจริงในภาคสนามและค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีความสัมพันธ์กันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 และผลการเปรียบเทียบค่าแรงลากในแนวระดับจากการวัดจริงในภาคสนามกับค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.40

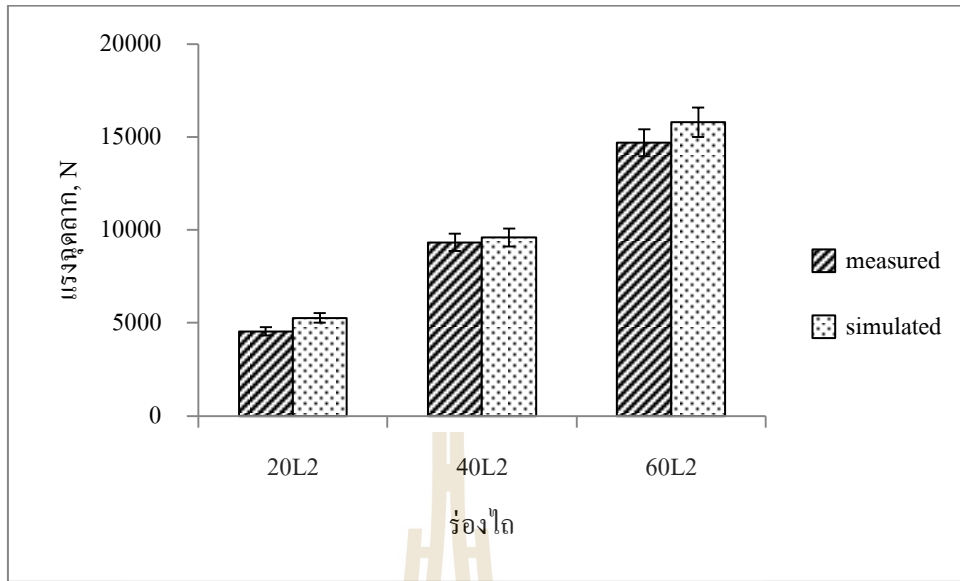


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์กับแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามของไถดินดันต้นแบบที่ใช้เกียร์ L2 และความลึกการไถต่างกัน

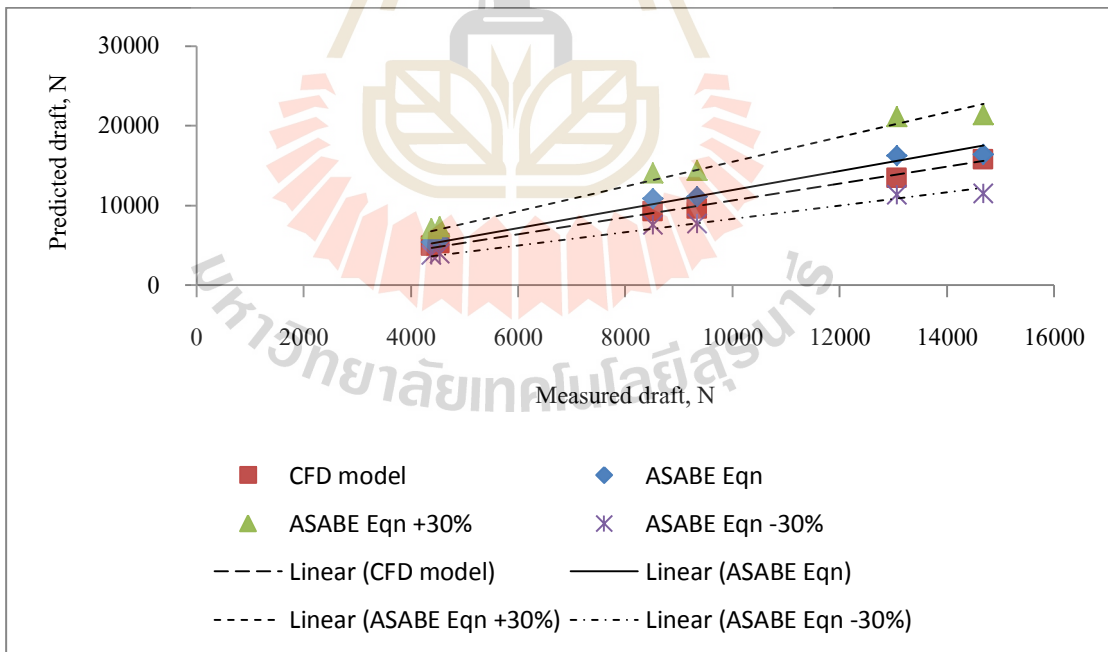
		Measured	Simulated
Measured	Pearson Correlation	1	.997*
	Sig. (2-tailed)		.046
	N	3	3
Simulated	Pearson Correlation	.997*	1
	Sig. (2-tailed)	.046	
	N	3	3

\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวัดจริงกับการจำลองสถานการณ์ของการหาแรงจูงคลากที่เกียร์ L2



รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบค่าแรงต้านของดินจากการจำลองสถานการณ์กับค่าแรงลากในแนวระดับจากการทดสอบในภาคสนามของไถดินคันต้นแบบที่ใช้เกียร์ L2 และความลึกการไถต่างกัน



รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบแรงที่วัดค่าได้จริงกับแรงที่ได้จากการทำนายของสมการ ASABE และแรงที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.41 พบว่า การทดลองหาค่าแรงจุดลากสำหรับไถดินดานที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่ และความลึกการไถแตกต่างกัน ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงจุดลากที่คาดการณ์ไว้ในรูปแบบการจำลองสถานการณ์ที่ใช้แบบจำลองสถานการณ์ (CFD model) และสมการ ASABE พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาแรงจุดลากของไถดินดานเป็นไปตามสมการทำนายของ ASABE ค่าแรงจุดลากที่ได้จากสมการทำนายของ ASABE ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าแรงจุดลากที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์ และไม่น้อยกว่าพิสัย -30 เปอร์เซ็นต์ ของสมการทำนายของ ASABE ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Roul et al. (2009) ที่ศึกษาการทำนายแรงจุดลากของอุปกรณ์ไถในดินร่วนเหนียวปนทรายโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม

ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ๆ ได้แก่ ตฤณสิทธิ์ ไกรสินบุรศักดิ์ และชัยยกร จันทร์สุวรรณ (2560) และ ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์ และคณะ (2560) ที่ได้มีการทดสอบสมรรถนะของไถดินดาน ได้แก่ ความสามารถในการทำงาน ประสิทธิภาพการทำงาน การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และแรงลาก แสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

สมรรถนะ		ตฤณสิทธิ์ (2560)	ยุทธนา (2560)	เกรียงไกร (2561)
ความสามารถในการทำงาน	(ไร่ต่อชั่วโมง)	1.04	2.42	1.85
ประสิทธิภาพการทำงาน	(ร้อยละ)	70	70	65
การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	(ลิตรต่อไร่)	3.12	3.56	2.82
แรงลาก	(นิวตัน)	16,970	14,160	9,350

## 4.11 ผลการประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการใช้ไถดินดานต้นแบบ

### 4.11.1 ผลการวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่าย

ไถดินดานที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมานี้ ผลการวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.15

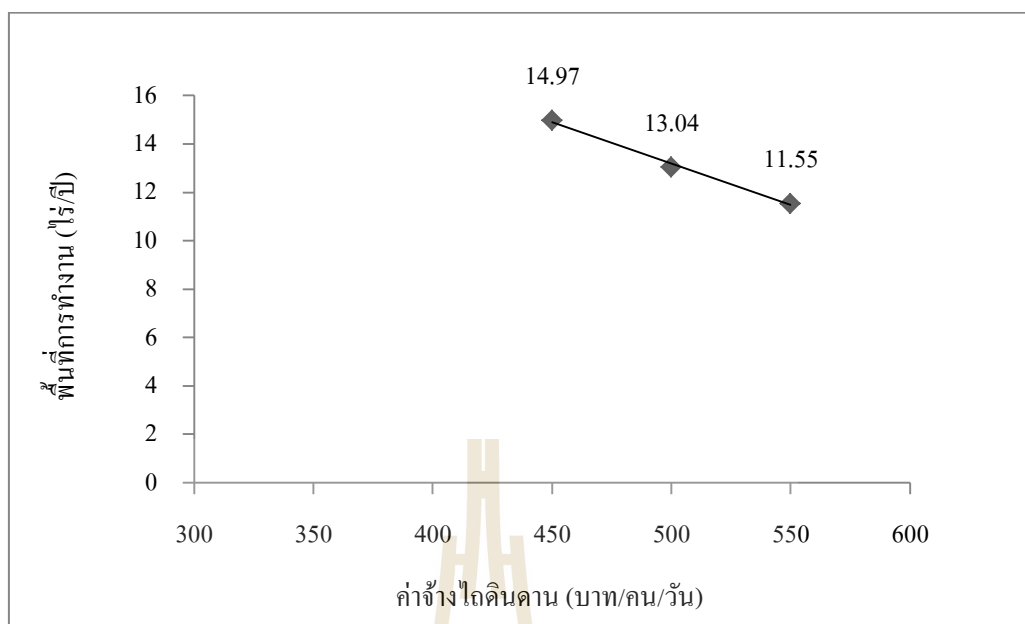
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างไถดินดานต้นแบบ

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1. วัสดุที่ทำไถดินดาน	
เหล็กโครงสร้างขาไถ	5,020
เหล็กโครงสร้างโครงไถ	9,000
น็อตนิรภัย	100
น็อตสลักยึด	165
รวมค่าวัสดุไถดินดาน	14,285
2. ค่าแรงประกอบ การสร้างและอื่น ๆ	5,715
3. รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างไถดินดาน	20,000

จากตารางที่ 4.15 พบว่า ค่าใช้จ่ายในการสร้างไถดินดานต้นแบบ ประกอบด้วย ค่าวัสดุในการสร้างตัวไถดินดาน 14,285 บาท และค่าแรงประกอบ การสร้างและอื่น ๆ 5,715 บาท โดยคิดจาก 40 เปอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ ค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมดในการสร้างไถดินดาน 20,000 บาท

### 4.11.2 ผลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการใช้ไถดินดาน

ผลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการใช้ไถดินดานต้นแบบ เนื่องจากพื้นที่การจ้างไถในแต่ละพื้นที่นั้น จะมีค่าจ้างที่ไม่เท่ากัน จุดคุ้มทุนของการใช้ไถดินดานที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมา พบว่า ที่พื้นที่การจ้างไถ 450 บาทต่อคนต่อวัน จุดคุ้มทุน 14.97 ไร่ต่อปี ที่พื้นที่การจ้างไถ 500 บาทต่อคนต่อวัน จุดคุ้มทุน 13.04 ไร่ต่อปี และ ที่พื้นที่การจ้างไถ 550 บาทต่อคนต่อวัน จุดคุ้มทุน 11.55 ไร่ต่อปี ที่พื้นที่การจ้างไถที่แพงขึ้นทำให้จุดคุ้มทุนของการใช้ไถดินดานสั้นลง และที่พื้นที่การจ้างไถที่ถูกลงทำให้จุดคุ้มทุนของการใช้ไถดินดานนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.42 และแสดงผลการคำนวณในภาคผนวก จ

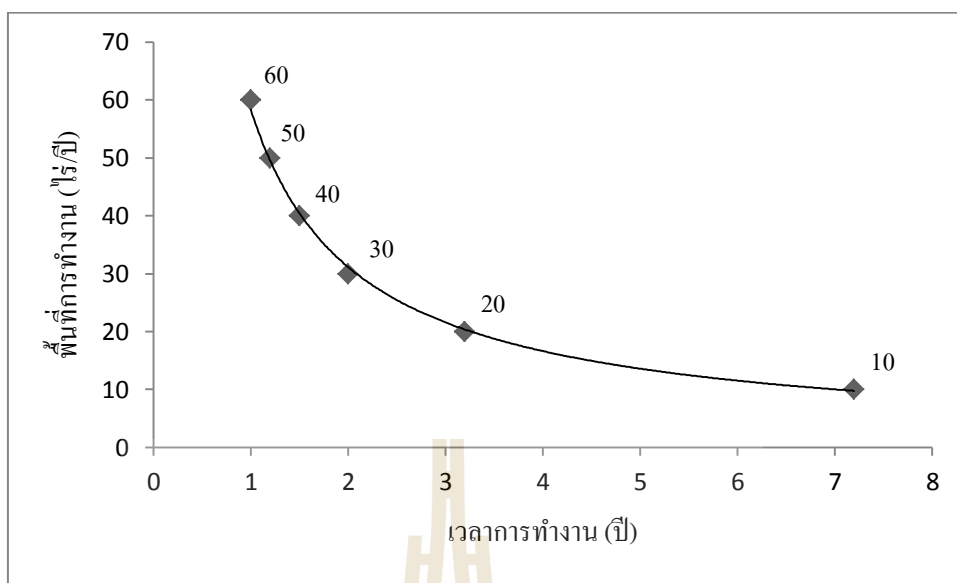


รูปที่ 4.42 แสดงจุดคุ้มทุนของการใช้ไถดินดาน

#### 4.11.3 ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของการใช้ไถดินดาน

ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของไถดินดานที่อัตราค่าบริการ 550 บาทต่อไร่ ดังรูปที่ 4.43 จะเห็นได้ว่า ที่พื้นที่การทำงาน 10 ไร่ ระยะเวลาคืนทุนในการใช้ไถดินดานที่ 7.2 ปี และที่พื้นที่การทำงาน 60 ไร่ ระยะเวลาคืนทุนในการใช้ไถดินดานที่ 1 ปี ระยะเวลาคืนทุนของไถดินดานนั้น ถ้าพื้นที่ของการทำงานของไถดินดานเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาคืนทุนที่ใช้ระยะเวลาน้อยลงตามลำดับ สำหรับการปลูกอ้อยใน 1 ปีนั้น เกษตรกรจะแบ่งการปลูกอ้อยเป็น 2 ช่วง คือ ต้นฝน (มีนาคม-พฤษภาคม) และปลายฝน (ตุลาคม-ธันวาคม) เป็นเวลาโดยรวม 180 วัน ดังนั้น ไถดินดานสามารถทำงานได้ 4,118.4 ไร่ต่อปี สามารถคืนทุนให้เกษตรกรผู้ใช้งานได้เป็นเวลาภายใน 1 ปี และแสดงผลการคำนวณในภาคผนวก จ





รูปที่ 4.43 ระยะเวลาคืนทุน ไถดินดานต่อพื้นที่การทำงาน

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1) วิธีการทะลุทะลวงของกรวยสามารถใช้หาค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนของดินในแปลงเกษตรได้ โดยเฉพาะดินที่มีทรายปน โดยค่าความเค้นเฉือนของดินมีแนวโน้มลดลงตามระยะการจมของกรวยที่เพิ่มขึ้น และแปรผันตามน้ำหนักของกรวย ส่วนความหนืดเฉือนของดินจะลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อเทียบกับค่าดัชนีสภาพความเหลวที่เพิ่มขึ้น สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาแรงต้านของดินจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับไถดินดานได้

2) การจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานโดยใช้แบบจำลอง พบว่า ความเร็วของดินบริเวณที่ไหลผ่านด้านได้ขาไถดินดานมีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากบริเวณด้านได้ขาไถดินดาน การไหลถูกบีบให้มีหน้าตัดการไหลลดลงเมื่อเทียบกับโดเมนของการจำลองการไหล ความเร็วจึงเพิ่มขึ้น และบริเวณด้านหน้าขาไถดินดาน หน้าตัดการไหลเทียบกับกรอบโดเมนที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งรูปทรงของไถดินดานเป็นชนิดขาโค้ง ทำให้ความเร็วในการไหลลดลง ส่งผลให้ความดันบริเวณด้านหน้าขาไถดินดานลดลง เนื่องจากความดันของดินบริเวณด้านหน้าขาไถดินดานมีค่าน้อยกว่าบริเวณอื่น ทำให้แรงต้านของไถดินดานมีค่าลดลง

3) ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง CFD พบว่า แรงต้านของดินที่เกิดขึ้นจากการจำลองสถานการณ์มีค่าใกล้เคียงกับแรงลากที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์และผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่และความลึกการไถเพิ่มขึ้น แรงที่กระทำกับไถดินดานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ได้จากภาคสนาม

4) ผลการออกแบบ สร้าง และพัฒนาไถดินดาน พบว่า แบบไถดินดานชนิดรูปตัว C หรือขาโค้งสามารถลดแรงลากในการไถหรือแรงต้านของดินได้ และมีความแข็งแรงของขาไถดินดานดีกว่าไถดินดานชนิดอื่น ๆ

5) ไถดินดานมีสมรรถนะในการทำงาน 1.85 ไร่ต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการทำงานร้อยละ 64.83 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 2.82 ลิตรต่อไร่ แรงลาก 9,350 นิวตัน เมื่อวิเคราะห์ด้าน

เศรษฐศาสตร์การใช้ที่ดิน พบว่า การใช้ที่ดินมีจุดคุ้มทุน 11.55 ไร่ต่อปี และระยะเวลาในการคืนทุนภายใน 1 ปี พื้นที่การทำงาน 60 ไร่

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะของปีกสำหรับติดที่ดินดิน เพื่อให้ดินมีการแตกตัวมากขึ้น

2) ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมกับดินชนิดอื่น ๆ เนื่องจากการอัดแน่นของดินหรือชั้นดินดานไถพรวนสามารถเกิดขึ้นได้กับดินทุกชนิด



## รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. (2548). เอกสารวิชาการ อ้อย. กรุงเทพฯ: กลุ่มวิจัยอนุรักษ์ดินและน้ำเพื่อ  
การเกษตร สำนักวิจัยพัฒนาการจัดการที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กฤษณะ เทียนมณี, เสรี วงศ์พิเชษฐ และขวัญตรี แสงประชาชนารักษ์. (2559). การศึกษา  
พารามิเตอร์แรงต้านของดินในพื้นที่ไร่ของจังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย. ใน การประชุม  
วิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (หน้า 436). นนทบุรี: สมาคม  
วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.
- เกรียงไกร ราชณะสุข, กัญญา โกสุมภ์ และสามารถ บุญอาจ. (2559). การจำลองพฤติกรรมการไหล  
ของดินผ่านไถดินดานด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ใน การประชุม  
วิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (หน้า 361-364). นนทบุรี:  
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.
- เกรียงไกร ราชณะสุข และสามารถ บุญอาจ. (2561). การศึกษาความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือน  
ของดินในแปลงเกษตรโดยใช้วิธีการทะลุทะลวงของกรวย. วารสารสมาคมวิศวกรรม  
เกษตรแห่งประเทศไทย. 24(2), 1-7.
- คณะกรรมการจัดทำปทานุกรมปฐพีวิทยา. (2541). ปทานุกรมปฐพีวิทยา. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชาคริต สุวรรณจำรัส. (2561). พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยวิธีปริมาตรจำกัด. นครปฐม:  
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ตฤณสิทธิ์ ไกรสินบุรศักดิ์ และชัยากร จันทร์สุวรรณ. (2560). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะ  
ของไถดินดานชนิดสันที่ขา 1 ขา. วารสารวิชาการเกษตร. 35(2), 176-196.
- ธัญญา นิยมภา. (2558). ดินในทางวิศวกรรมเกษตรและการประยุกต์เครื่องจักรกลเกษตรไถพรวน  
ดินใช้เพลอาำนวยกำลังขับ. เอกสารประกอบการสอน. นครปฐม:  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- ธัญญา นิยมภา และชัยรัตน์ รางแดง. (2539). รายงานการวิจัยและพัฒนาฉบับสมบูรณ์ ไถดินดาน  
ชนิดสัน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ  
เทคโนโลยีแห่งชาติ.

- ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และธัญญา นิยมภา. (2547). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ ผลกระทบของการอัดแน่นดินต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของอ้อย. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- มงคล กวางวโรภาส. (2530). เครื่องทุ่นแรงในฟาร์ม. กรุงเทพฯ: บริษัท ประชาชน จำกัด (แผนกการพิมพ์).
- ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์, พงษ์ศักดิ์ ต่ายก้อนทอง, อุษฎา สุขจันทร์ และอัศพล เสนาณรงค์. (2560). ไถระเบิดดินดานติดรถแทรกเตอร์ขนาดกลางสำหรับพื้นที่ปลูกอ้อย. วารสารวิชาการเกษตร. 35(1), 91-99.
- รัตนา ตั้งวงศ์กิจ, พูลประเสริฐ ปิยะอนันต์, บพิตร ตั้งวงศ์กิจ และฐิตินัย ชัยณรงค์. (2546). รายงานการวิจัย ปีที่ 1 การวิจัยและพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรในไร่อ้อย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ราวุฒิ น่วมปฐม. (2550). การพัฒนาอุปกรณ์ปรับปรุงการอัดแน่นของดินในไร่อ้อย. ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ถนังงาน. (2541). การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วินิต ชินสุวรรณ (2530). เครื่องจักรกลเกษตรและการจัดการเบื้องต้น. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล. (2557). การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล Computational Fluid Dynamics. วิศวกรรมลาดกระบัง. 31(4), 1-6.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2558). สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2558. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- สุเทพ แก้วนิย และสมชาย วงศ์วิเศษ. (2559). กลศาสตร์ของไหล เล่ม 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เสมอขวัญ ตันติกุล. (2550). เครื่องทุ่นแรงในฟาร์ม 1 ภาค เครื่องทุ่นแรงสำหรับเตรียมดินและปลูกพืช. กรุงเทพฯ: เดอะ โนว์ เลจเซ็นเตอร์.
- อนุตร จำลองกุล. (2551). ทฤษฎีของระบบดิน-เครื่องจักรกล. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- Al-Janobi, A.A. and Al-Suhaibani, S.A. (1998). Draft of primary tillage implements in sandy loam soil. **Applied Engineering in Agriculture**, 14(4), 343-348.
- Arjun Kadam and Chhapkhane N.K. (2017). Design and analysis of subsoiler. **International Journal of Modern Trends in Engineering and Science**, 4(1), 11-14.

- ASTM D4318-17. (2017). **The methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soil**. Annual book of American Standard Testing Methods. ASTM International Philadelphia, PA.
- Beris, A.N., Tsamopoulos, J.A., Armstrong, R.C., and Brown, R.A. (1985). Creeping motion of a sphere through a Bingham plastic. **Journal of Fluid Mechanics**, 158: 219–244.
- Bird, R.B., Yarusso, B.J., and Dai, G.C. (1983). The Rheology and Flow of Viscoplastic Materials. **Reviews in Chemical Engineering**, 1(1), 36-69.
- BS 1377-2. (1990). **Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2: classification test**. London: British Standards Institution (BSi).
- Casson, N. (1959). **Rheology of disperse systems in Mill, C.C. (Ed.)**. London: Pergamon Press.
- Chhabra, R.P. and Richardson, J.F. (2008). **Non-newtonian flow and applied rheology: engineering applications. (2<sup>nd</sup> ed.)**. Hungary: Butterworth-Heinemann.
- Desai, C.S. and Phan, H.V. (1980). Three dimensional finite element analysis including material and geometric nonlinearity. **Proc. TICOM Second International Conf. on Computational Methods in Nonlinear Mechanics**. 205-224.
- Fredrickson, A.G. (1964). **Principles and Applications of Rheology**. New Jersey: Prentice-Hall.
- Ghezzehei, T.A. and Or, D. (2001). Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. **Soil Science Society of America Journal**, 65: 624-637.
- Godwin, R.J. and Spoor, G. (1977). Soil failure with narrow tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 22(3): 213-228.
- Gupta, C.P. and Pandya, A.C. (1966). Rheological behavior of soil under static loading. **TRANSACTIONS of the ASAE**, 9(5): 718-728.
- Hettiaratchi, D.R.P. and Reece, A.R. (1967). Symmetrical three-dimensional soil failure. **Journal of Terramechanics**, 4(3): 45-67.
- Hunt, D. (1977). **Farm Power and Machinery Management**. Iowa: Iowa State University Press.
- Karmakar, S. and Kushwaha, R.L. (2005). Simulation of Soil Deformation around a Tillage Tool using Computational Fluid Dynamics. **Transactions of the ASAE**, 48(3): 923-932.

- Kaveh Mollazade, Ali Jafari, and Ebrahim Ebrahimi. (2010). Application of Dynamical Analysis to Choose Best Subsoiler's Shape using ANSYS. **New York Science Journal**, 3(3): 93-100.
- Keedwell, M.J. (1984). **Rheology and soil mechanics**. New York: ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHERS.
- Koumoto, T. and Houlsby, G.T. (2001). Theory and practice of the fall cone test. **Geotechnique**, 51(8): 701-712.
- Kumar Arun and Thakur, T.C. (2007). An experimental investigation into the performance of conventional and winged type subsoiler. **Journal of Agricultural Engineering**, 44(2): 8-13.
- Lipscomb, G.G. and Denn, M.M. (1984). Flow of bingham fluids in complex geometries. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 14: 337-346.
- Mahajan, S.P. and Budhu, M. (2008). Shear viscosity of clays to compute viscous resistance. **Proceedings of the Twelfth International Working Conference on International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)**. 1516-1523. 1-6 October 2008, Goa, India.
- McKyes, E. (1985). **Soil Cutting and Tillage**. New York: Elsevier Science Publishing Company, Inc.
- McKyes, E. and Ali, O.S. (1977). The cutting of soil by narrow blades. **Journal of Terramechanics**, 14(2): 43-58.
- McKyes, E. and Desir, F. (1984). Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils. **Soil & Tillage Research**, 4: 459-470.
- Patankar, S.V. (1980). **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York: Hemisphere Publishing.
- Priyanka Khole and Kundan Jain. (2016). **Conventional and winged subsoilers: Development of wing attachment to conventional subsoiler and its performance evaluation**. LAP LAMBERT Academic Publishing: Germany.
- Roul, A.K., Raheman, H., Pansare, M.S., and Machavaram, R. (2009). Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network. **Biosystems Engineering**, 104(4): 476-485.

Singh, T.P. (2017). **Farm Machinery**. India: PHI Learning Private Limited.

Stone, K.J.L. and Phan, K.D. (1995). Cone penetration test near the plastic limit. **Geotechnique**, 45(1): 155-158.

Vyalav, S.S. (1986). **Rheological Fundamentals of Soil Mechanics, translated from the Russian by Sapunov, O.K.** Amsterdam: Elsevier.

White, F.M. (2003). **Fluid Mechanics**. Fifth Edition, New York: McGraw-Hill, Inc.

Wood, D.M. and Worth, C.P. (1978). The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soil. **Ground Engng**, 11(3): 37.







ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.1 เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในระยะทาง 10 เมตร เมื่อมีภาระ

ร่องไถ	ครั้งที่ (s)			
	1	2	3	เฉลี่ย
20L1	19.19	18.77	18.71	18.89
40L1	20.02	19.47	19.70	19.73
60L1	19.77	20.13	20.17	20.02
20L2	12.48	12.94	12.72	12.71
40L2	14.64	14.00	13.93	14.19
60L2	16.39	16.07	16.83	16.43

ตารางผนวกที่ ก.2 เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในระยะทาง 10 เมตร เมื่อไม่มีภาระ

ระดับเกียร์	ครั้งที่ (s)			
	1	2	3	เฉลี่ย
L1	21.25	19.32	19.12	19.89
L2	12.87	12.67	13.27	12.93

ตารางผนวกที่ ก.3 การวัดค่าแรงลากไถในแนวระดับ เมื่อมีภาระ

ร่องไถ	ครั้งที่ (kg)			
	1	2	3	เฉลี่ย
20L1	520	554	530	535
40L1	988	928	937	951
60L1	1,431	1,412	1,420	1,421
20L2	693	675	667	678
40L2	1,127	1,112	1,116	1,118
60L2	1,638	1,691	1,647	1,659

ตารางผนวกที่ ก.4 การวัดค่าแรงลากไถในแนวระดับ เมื่อไม่มีภาระ

ระดับเกียร์	ครั้งที่ (kg)			
	1	2	3	เฉลี่ย
L1	89	89	89	89
L2	162	168	170	167

ตารางผนวกที่ ก.5 การวัดระยะทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ 3 รอบล้อ เมื่อมีภาระ

ร่องไถ	ครั้งที่ (m)			
	1	2	3	เฉลี่ย
20L1	14.47	14.50	14.43	14.47
40L1	14.13	14.19	14.20	14.17
60L1	14.07	13.96	13.77	13.93
20L2	14.48	14.51	14.57	14.52
40L2	14.54	14.26	14.13	14.31
60L2	14.22	14.08	14.12	14.14

ตารางผนวกที่ ก.6 การวัดระยะทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ 3 รอบล้อ เมื่อไม่มีภาระ

ระดับเกียร์	ครั้งที่ (m)			
	1	2	3	เฉลี่ย
L1	14.57	14.58	14.57	14.57
L2	14.58	14.56	14.57	14.57

ตารางผนวกที่ ก.7 ข้อมูลจำเพาะของรถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Massey Ferguson รุ่น 4245

ข้อมูลจำเพาะ	รายละเอียด
เครื่องยนต์	Perkins 1004.4TW, turbocharged diesel, 4-cylinder, liquid-cooled
แรงม้าสูงสุด (hp)	85
แรงม้าสูงสุดของ PTO (hp)	75
รอบสูงสุดเครื่องยนต์ (rpm)	2,200
ชนิดเกียร์	ซิงโครเมช
จำนวนเกียร์	8 เดินหน้า (H/L) 2 ถอยหลัง
ขนาดยาง	หน้า 7.5L – 15 หลัง 16.9 - 30
พวงมาลัย	พาวเวอร์ ไฮโดรลิก
เพลลาำนวยกำลัง	Category II
ความเร็วเพลลาำนวยกำลัง (rpm)	540 / 1,000
อัตราการไหลปั๊มไฮโดรลิก (L/min)	36.3
ระบบคุมแขนยกอุปกรณ์ 3 จุด	Category II
น้ำหนักยกที่ปลายแขนยก (kg)	1,968
น้ำหนักเฉพาะตัวรถแทรกเตอร์ (kg)	3,386
ยาว x กว้าง x ความยาวฐานล้อ x สูง (mm)	4,060 x 2,000 x 2,360 x 2,610
ความสูงใต้ท้องรถจากพื้น (mm)	350

ตารางผนวกที่ ก.8 การวัดค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินก่อนการทดสอบไถดินดาน

ความลึก (cm)	ครั้งที่ 1 (N)	ครั้งที่ 2 (N)	ครั้งที่ 3 (N)	ครั้งที่ 4 (N)	ครั้งที่ 5 (N)	ครั้งที่ 6 (N)	เฉลี่ย (N)	MPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	450	540	440	450	480	370	455	2.28
10	440	520	480	600	520	320	480	2.40
15	520	480	520	440	500	430	482	2.41
20	410	330	620	510	380	420	445	2.23
25	320	330	780	540	230	460	443	2.22
30	330	300	810	460	320	370	432	2.16
35	460	340	610	300	320	390	403	2.02
40	390	360	230	220	300	420	320	1.60

ตารางผนวกที่ ก.9 การวัดค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินหลังการทดสอบไถดินดาน

ความลึก (cm)	ครั้งที่ 1 (N)	ครั้งที่ 2 (N)	ครั้งที่ 3 (N)	ครั้งที่ 4 (N)	ครั้งที่ 5 (N)	ครั้งที่ 6 (N)	เฉลี่ย (N)	MPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	460	290	20	0	0	0	128	0.64
10	370	420	20	360	220	110	250	1.25
15	330	520	140	400	300	280	328	1.64
20	250	280	270	400	380	320	317	1.58
25	240	280	340	380	300	320	310	1.55
30	230	280	390	340	260	340	307	1.53
35	210	250	390	300	240	300	282	1.41
40	180	200	350	280	220	280	252	1.26

ตารางผนวกที่ ก.10 การวัดค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินก่อนการทดสอบไถดินดาน

ความลึก (cm)	ครั้งที่ 1 (kPa)	ครั้งที่ 2 (kPa)	ครั้งที่ 3 (kPa)	เฉลี่ย (kPa)
0	42	74	49	55
20	69	68	84	74
40	70	60	95	75
60	72	68	88	76

ตารางผนวกที่ ก.11 การวัดค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินหลังการทดสอบไถดินดาน

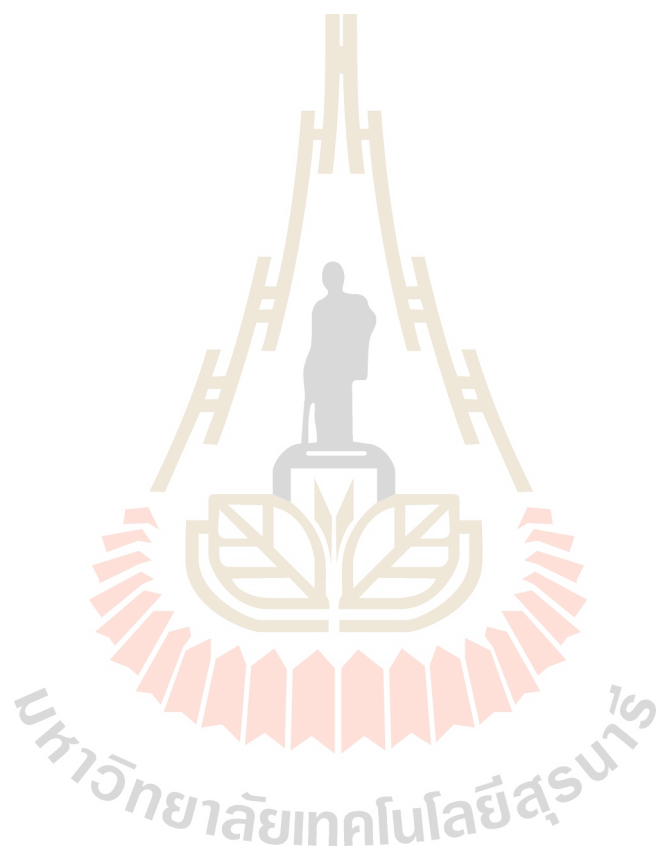
ความลึก (cm)	ครั้งที่ 1 (kPa)	ครั้งที่ 2 (kPa)	ครั้งที่ 3 (kPa)	เฉลี่ย (kPa)
0	53	17	6	25
20	44	37	33	38
40	38	35	46	40
60	41	38	47	42

ตารางผนวกที่ ก.12 การวัดค่าความชื้นของดิน ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร (ก่อนไถดินดาน)

ตัวอย่างที่	1	2	3	4	5	6
กระป๋องอบดินหมายเลข	7	8	9	10	11	12
น้ำหนักกระป๋อง + ดินชื้น (กรัม)	31.45	31.07	31.47	36.99	38.61	36.08
น้ำหนักกระป๋อง + ดินแห้ง (กรัม)	28.82	28.38	28.94	34.23	35.55	32.86
น้ำหนักของน้ำ (กรัม)	2.63	2.69	2.53	2.76	3.06	3.22
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	11.61	11.11	11.48	15.27	15.33	11.53
น้ำหนักของดินแห้ง (กรัม)	17.21	17.27	17.46	18.96	20.22	21.33
ปริมาณของน้ำในดิน (ร้อยละ)	15.28	15.58	14.49	14.56	15.13	15.10
ค่าความชื้นของดินเฉลี่ย (ร้อยละ)	15.02					

ตารางผนวกที่ ก.13 พารามิเตอร์ที่ใช้กับสมการ ASABE เพื่อทำนายแรงจุดลากของไถดินดาน

Tillage tool	Width/Units	Machine parameter			Soil parameter
		$A_1$	$B_1$	$C_1$	$F_2$
Subsoiler					
- narrow point	tool	226	0.0	1.8	0.70





ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ



### ข.1 การคำนวณการออกแบบขาไถดินดาน

การออกแบบขาไถดินดานที่ได้กำหนดไว้ได้มีการออกแบบขนาดของขาไถดินดานเพื่อ ความแข็งแรงของขาไถดินดาน โดยใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ที่นำเสนอโดย วริทธิ์ และชาญ (2541) มีรายละเอียดดังนี้

$$M = F \times L \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2)$$

$$\frac{1}{N} = \sqrt{\left(\frac{\tau}{\tau_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^2} \quad (3)$$

เมื่อ  $M$  = โมเมนต์ค้ำ (Nm)

$F$  = แรงที่กระทำต่อขาไถดินดาน (N)

$L$  = ระยะทางจากจุดหมุนถึงแนวที่แรงกระทำ (m)

$I$  = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ( $m^4$ )

$c$  = ระยะแกนสะเทิน (m)

$N$  = ค่าความปลอดภัย

$\sigma$  = ความเค้นหลัก ( $N/m^2$ )

$h$  = ความหนาของขาไถดินดาน (m)

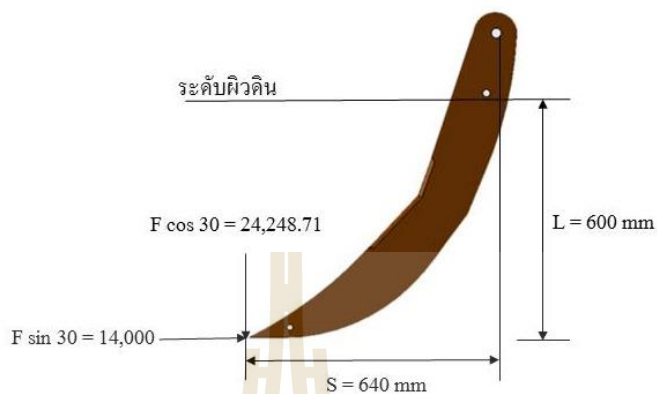
$b$  = ความยาวของขาไถดินดาน (m)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของขาไถดินดาน ( $m^2$ )

$\tau$  = ความเค้นเฉือน ( $N/m^2$ )

กำหนดให้ แรงที่กระทำต่อขาไถดินดานมีค่าเท่ากับแรงจุดลาก คือ 14,000 นิวตัน ตาม คำแนะนำของ ัญญา และชัยรัตน์ (2539) ความลึกการไถของขาไถ คือ 600 มิลลิเมตร ความยาวของ ขาไถ 140 มิลลิเมตร และให้มีค่าความปลอดภัย เท่ากับ 1 และเหล็กที่ใช้สร้างเป็นเหล็กเหนียวมี

ค่าความเค้นคราก 235 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร โดยใช้สมการที่ 1 2 และ 3 คำนวณหาความหนาของขาไถดินดานได้ดังนี้



รูปที่ ข.1 แรงที่กระทำต่อขาไถดินดาน

จากรูปที่ ข.1 แสดงวิธีคำนวณหาความหนาของขาไถดินดานได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 M &= (14,000 \times 600) + [(28,000 \cos 30) \times 640] \\
 &= 8,400,000 + 15,519,175.24 \\
 &= 23,919,175.24 \\
 \sigma &= \frac{Mc}{I} + \frac{F}{A} \\
 &= \frac{23,919,175.24 \times 60 \times 12}{h \times \left(\frac{140}{\cos 30}\right)^3} + \frac{F \cos 30}{\cos 30} \\
 &= \frac{4,076.49}{h} + \frac{150}{h} \\
 &= \frac{4,226.49}{h}
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{N} = \sqrt{\left(\frac{\tau}{\tau_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^2}$$

$$\frac{1}{1} = \frac{4,226.49}{h} \times \frac{1}{235}$$

$$h = 17.99 \quad mm$$

จากการคำนวณการสร้างขาไถดินดาน เลือกใช้ขนาดของเหล็กหนา 30 มิลลิเมตร ที่มีอยู่ตามท้องตลาด ครอบคลุมความหนาของขาไถดินดานที่คำนวณได้ในการสร้างขาไถดินดาน

## ข.2 การคำนวณค่าชี้ผลของการทดสอบไถดินดาน

### ข.2.1 ความสามารถในการทำงานจริง (Effective Field Capacity)

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } C_a &= \frac{A}{T_t} \\ &= \frac{0.28}{(9.07/60)} \\ &= 1.85 \quad \text{ไร่ต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความสามารถในการทำงานจริง 1.85 ไร่ต่อชั่วโมง

### ข.2.2 ประสิทธิภาพการทำงานเชิงเวลา (Field Efficiency)

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } E_f &= \frac{T_e}{T_t} \times 100 \\ &= \frac{5.88}{9.07} \times 100 \\ &= 64.83 \quad \text{เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการทำงานเชิงเวลา 64.83 เปอร์เซ็นต์ หรือ ร้อยละ 64.83

### ข.2.3 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } F_c &= \frac{O}{A} \\ &= \frac{0.79}{0.28} \\ &= 2.82 \quad \text{ลิตรต่อไร่} \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 2.82 ลิตรต่อไร่

ข.2.4 อัตราการลื่นไถลของรถแทรกเตอร์ (Slip)

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ Slip} &= \frac{\text{No load} - \text{Load}}{\text{No load}} \times 100 \\
 &= \frac{14.55 - 14.32}{14.55} \times 100 \\
 &= 1.58 \text{ เปอร์เซ็นต์}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการลื่นไถลของรถแทรกเตอร์ 1.58 เปอร์เซ็นต์ หรือ ร้อยละ 1.58

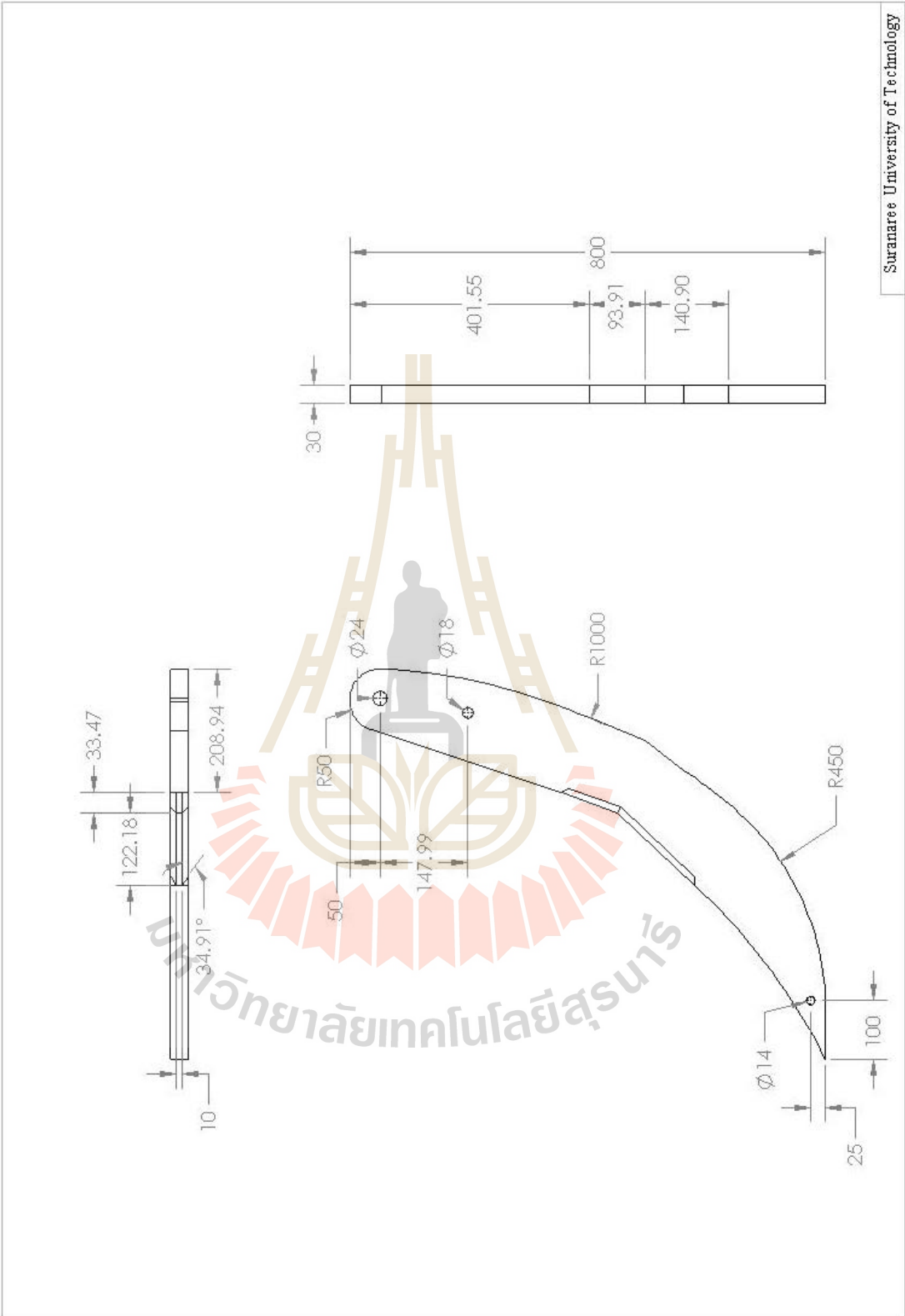




ภาคผนวก ค

แบบขาไถดินดาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





ภาคผนวก ง

รูปประกอบการทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ง.1 การทดสอบวัดแรงลากในแนวระดับ



รูปที่ ง.2 การทดสอบสมรรถนะไถดินดาน

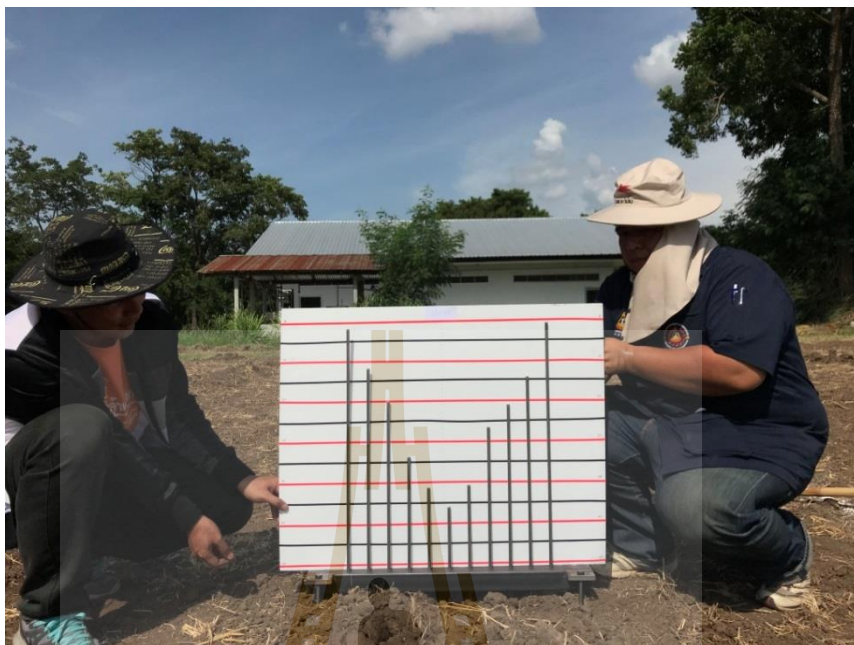




รูปที่ ง.3 แปลงทดสอบหลังจากไถดินจนเสร็จ



รูปที่ ง.4 การวัดการสิ้นไถของรถแทรกเตอร์



รูปที่ ง.5 การวัดการแตกตัวของดิน





ภาคผนวก จ

การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## จ.1 การคำนวณต้นทุน

การคำนวณจุดคุ้มทุนใช้หลักการของ Donnell Hunt (1977) เมื่อคิดค่าเสื่อมราคาเป็นแบบเส้นตรง (Straight-Line Method) ดังนี้

### จ.1.1 ต้นทุนการใช้เครื่อง

$$A_C = \left( \frac{F_C}{A} \right) + \left( \frac{1}{C_t} \right) [R + F + O + L] \quad (1)$$

$$F_C = D + I \quad (2)$$

$$D = \left( \frac{P - S}{N} \right) \quad (3)$$

$$I = \left[ \frac{P + S}{2} \right] \times \left( \frac{r}{100} \right) \quad (4)$$

เมื่อ	$D$	=	ค่าเสื่อมราคา	(บาท/ปี)
	$I$	=	ดอกเบี้ย	(บาท/ปี)
	$P$	=	ราคาแรกซื้อ	(บาท)
	$S$	=	มูลค่าซาก	(บาท)
	$N$	=	อายุการใช้งาน	(ปี)
	$r$	=	อัตราดอกเบี้ย	(เปอร์เซ็นต์/ปี)
	$A_C$	=	ต้นทุนการใช้เครื่อง	(บาท/ไร่)
	$F_C$	=	ต้นทุนคงที่	(บาท/ปี)
	$A$	=	พื้นที่ปลูกใน 1 ปี	(ไร่)
	$R$	=	ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา	(บาท/ชั่วโมง)
	$F$	=	ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	(บาท/ชั่วโมง)
	$O$	=	ค่าน้ำมันหล่อลื่น	(บาท/ชั่วโมง)
	$L$	=	ค่าแรงงาน	(บาท/ชั่วโมง)
	$C_t$	=	ความสามารถในการทำงานของไถดินดาน (ไร่/ชั่วโมง)	

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของไถดินดานใช้ข้อมูล ดังนี้

ราคาแรกซื้อ	(P)	=	25,000 บาท
อายุการใช้งาน	(N)	=	5 ปี
มูลค่าซาก	(S)	=	2,500 (คิด 10% ของราคาแรกซื้อ)

	อัตราดอกเบี้ย (r)	=	4% (อัตราดอกเบี้ยเงินฝาก ธกส.)
	ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา (R)	=	1.2% ของราคาแรกซื้อ / 100 ชั่วโมงการทำงาน
		=	(0.012 x 25,000)/100 บาท/ชั่วโมง
		=	3 บาท/ชั่วโมง
	ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (F)	=	5.22 ลิตร/ชั่วโมง
		=	5.22 ลิตร x 28.79 บาท/ลิตร
		=	150.28 บาท/ชั่วโมง
	ค่าน้ำมันหล่อลื่น (O)	=	15.03 บาท/ชั่วโมง
		=	(คิด 10% ของน้ำมันเชื้อเพลิง)
	ค่าแรงงาน (L)	=	1 คน/วัน
		=	(คิดค่าแรงขั้นต่ำ 320 บาท/วัน ของจังหวัดนครราชสีมา)
		=	(1 x 320) บาท / 8 ชั่วโมง
		=	40 บาท/ชั่วโมง
	ความสามารถในการทำงาน (C)	=	1.85 ไร่/ชั่วโมง
จากสมการ	D	=	$\frac{P-S}{N}$
		=	$\frac{25,000 - 2,500}{5}$
	D	=	4,500 บาท/ปี
จากสมการ	I	=	$\left[ \frac{P+S}{2} \right] \times \left[ \frac{r}{100} \right]$
	I	=	$\left[ \frac{25,000 + 2,500}{2} \right] \times \left[ \frac{4}{100} \right]$
	I	=	550 บาท/ปี

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad F_c &= D + I \\
 F_c &= 4,500 \text{ บาท/ปี} + 550 \text{ บาท/ปี} \\
 F_c &= 5,050 \text{ บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการที่ (1)

$$\begin{aligned}
 A_c &= \left( \frac{5,050}{A} \right) + \left( \frac{1}{1.85} \right) (3 + 150.28 + 15.03 + 40) \\
 A_c &= \left( \frac{5,050}{A} \right) + 112.60 \quad (5)
 \end{aligned}$$

### จ.1.2 ต้นทุนการจ้างไถดินดาน

จากผลสำรวจของผู้วิจัย พบว่า ค่าจ้างไถดินดาน 450 บาทต่อไร่ บางพื้นที่ 500 และ 550 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ซึ่งนำทั้ง 3 ค่า มาใช้ในการคำนวณหาจุดคุ้มทุน ต่อไป

### จ.2 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน

$$\begin{aligned}
 A_c &= \left( \frac{5,050}{A} \right) + 112.60 \\
 550 &= \left( \frac{5,050}{A} \right) + 112.60 \\
 A &= 11.55 \text{ ไร่/ปี}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น จุดคุ้มทุนของการใช้ไถดินดานมีค่าเท่ากับ 11.55 ไร่/ปี

### จ.3 การคำนวณระยะเวลาคืนทุนของการใช้ไถดินดาน

ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period, PBP) คือระยะเวลาจากการเริ่มต้นลงทุนถึงเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิ (Net Benefits) ของการใช้ไถดินดานมีค่าเท่ากับการลงทุน คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{จำนวนเงินลงทุน}}{\text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี}} \quad (1)$$

$$\text{ผลประโยชน์สุทธิ} = \text{ผลประโยชน์ (บาท/ปี)} - \text{ต้นทุนการใช้เครื่องมือ} \quad (2)$$

(ไม่รวมค่าเสื่อมราคา)

$$\text{ผลประโยชน์ที่ได้รับ} = \text{พื้นที่เพาะปลูก} \times \text{ค่าจ้างไถ (บาท/ไร่)} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ต้นทุนการใช้เครื่อง} &= \text{ดอกเบี้ย} + \text{ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา} + \text{ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง} \\
 &+ \text{ค่าน้ำมันหล่อลื่น} + \text{ค่าแรงงาน} \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าดอกเบี้ย} &= 25,000 \text{ บาท} \times 0.04 \text{ ต่อปี (อัตราดอกเบี้ยเงินฝาก ธกส. 4\%)} \\
 &= 1,000 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ค่าซ่อมแซมและ} &= (3 \text{ บาท/ชั่วโมง}) \times (1 \text{ ชั่วโมง} / 1.85 \text{ ไร่}) \\
 \text{บำรุงรักษา} &= 1.62 \text{ บาท/ไร่} \\
 \text{ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง} &= (2.82 \text{ ลิตร/ไร่}) \times (28.79 \text{ บาท/ลิตร}) \\
 &= 81.19 \text{ บาท/ไร่} \\
 \text{ค่าแรงงาน} &= (40 \text{ บาท/ชั่วโมง}) \times (1 \text{ ชั่วโมง} / 1.85 \text{ ไร่}) \\
 &= 21.62 \text{ บาท/ไร่}
 \end{aligned}$$

แทนค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ 4 = ได้ต้นทุนการใช้เครื่อง  
(ผลของการแทนค่าในสมการที่ 4 เปรียบเทียบพื้นที่การทำงานต่อปีแสดงในตารางผนวก จ.2)

แทนค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ 3 = ได้ผลประโยชน์ที่ได้รับ  
(ผลของการแทนค่าในสมการที่ 3 เปรียบเทียบพื้นที่การทำงานต่อปีแสดงในตารางผนวก จ.2)

แทนค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ 2 = ได้ผลประโยชน์สุทธิ  
(ผลของการแทนค่าในสมการที่ 2 เปรียบเทียบพื้นที่การทำงานต่อปีแสดงในตารางผนวก จ.2)

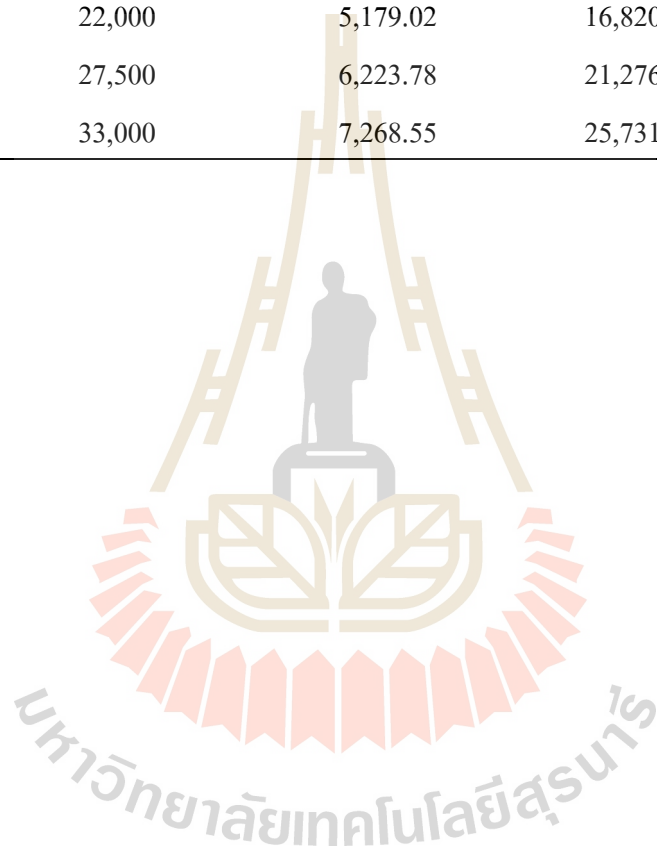
แทนค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ 1 = ได้ระยะเวลาการคืนทุน  
(ผลของการแทนค่าในสมการที่ 1 เปรียบเทียบพื้นที่การทำงานต่อปีแสดงในตารางผนวก จ.2)

ตารางผนวกที่ จ.1 ผลการคำนวณต้นทุนในการใช้ไถดินดาน

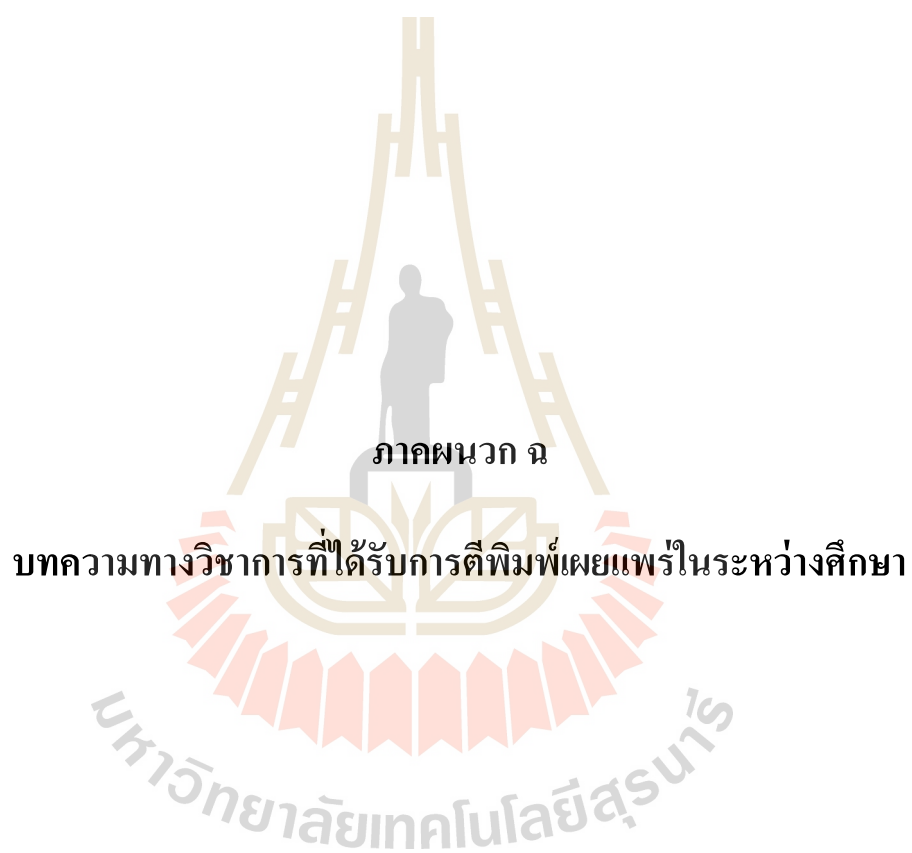
พื้นที่ (ไร่)	ดอกเบี้ย (บาท/ปี)	ซ่อมแซม (บาท/ปี)	น้ำมันเชื้อเพลิง (บาท/ปี)	ค่าแรงงาน (บาท/ปี)	รวมต้นทุน (บาท/ปี)
10	1,000	16.22	812.32	216.22	2,044.76
20	1,000	32.43	1,624.65	432.43	3,089.51
30	1,000	48.65	2,436.97	648.65	4,134.27
40	1,000	64.86	3,249.30	864.86	5,179.02
50	1,000	81.08	4,061.62	1,081.08	6,223.78
60	1,000	97.30	4,873.95	1,297.30	7,268.55

ตารางผนวกที่ จ.2 ผลการคำนวณระยะเวลาคืนทุนในการใช้ที่ดินคานต่อพื้นที่การทำงาน

พื้นที่ คืนทุน (ไร่)	ผลประโยชน์ ที่ได้รับ (บาท/ปี)	ต้นทุน (บาท/ปี)	ผลประโยชน์ สุทธิ (บาท/ปี)	ระยะเวลา (ปี)
10	5,500	2,044.76	3,455.24	7.2
20	11,000	3,089.51	7,910.49	3.2
30	16,500	4,134.27	12,365.73	2.0
40	22,000	5,179.02	16,820.98	1.5
50	27,500	6,223.78	21,276.22	1.2
60	33,000	7,268.55	25,731.45	1.0







ภาคนว ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

เกรียงไกร ราชณะสุข, กัญญา โกสุมภ์, สามารถ บุญอาจ. (2559). การจำลองพฤติกรรมการไหลของดินผ่านไถดินดานด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (หน้า 361-364). นนทบุรี:สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.

เกรียงไกร ราชณะสุข, สามารถ บุญอาจ. (2561). การศึกษาความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนของดินในแปลงเกษตรโดยใช้วิธีการทะลุทะลวงของกรวย. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ปีที่ 24(2), 1-7.

เกรียงไกร ราชณะสุข, สามารถ บุญอาจ. (2561). การหาแรงต้านของดินสำหรับไถดินดานชนิดขาโค้งด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19 (หน้า 265-269). ประจวบคีรีขันธ์:สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

Kriengkrai Rayanasuk, Samart Bun-art. "Simulation of Soil Failure around the Subsoiler Type Curved Leg using Computational Fluid Dynamics." ICBAE 2018 will be held during March 28-30, 2018, Okinawa, Japan.

## ประวัติผู้เขียน

นายเกรียงไกร รายนะสุข เกิดเมื่อวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดนครราชสีมา เป็นบุตรของ นายมานิตย์ รายนะสุข และนางสมควร รายนะสุข (ถึงแก่กรรม) เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2544 และเริ่มทำงานที่โรงงานน้ำตาลราชสีมา (อ่างเวียง) จังหวัดนครราชสีมา ในตำแหน่งหัวหน้าแผนกส่งเสริมอ้อย ฝ่ายจัดหาอ้อย

ปี พ.ศ. 2549 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2553 โดยในขณะศึกษาได้ทำงานในตำแหน่งหัวหน้าแผนกจักรกลเกษตร, หัวหน้าแผนกสารสนเทศภูมิศาสตร์ และหัวหน้าเขตส่งเสริม ฝ่ายจัดหาวัตถุดิบ โรงงานน้ำตาลบุรี จังหวัดนครราชสีมา

ปี พ.ศ. 2555 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร หลักสูตรวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนสภากษัตริย์ระดับบัณฑิตศึกษา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการในรายวิชาระดับปริญญาตรี ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร 1 (Agricultural Engineering Lab. I) และปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร 2 (Agricultural Engineering Lab. II)