



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราแบบหยอดหลุม
ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ
(Development of an Automatic Dibbling Para-Rubber
Fertilizer Applicator)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราแบบหยอดหลุม
ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ
(Development of an Automatic Dibbling Para-Rubber
Fertilizer Applicator)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายศธา วาทกิจ

นายมงคล ครธาพันธ์

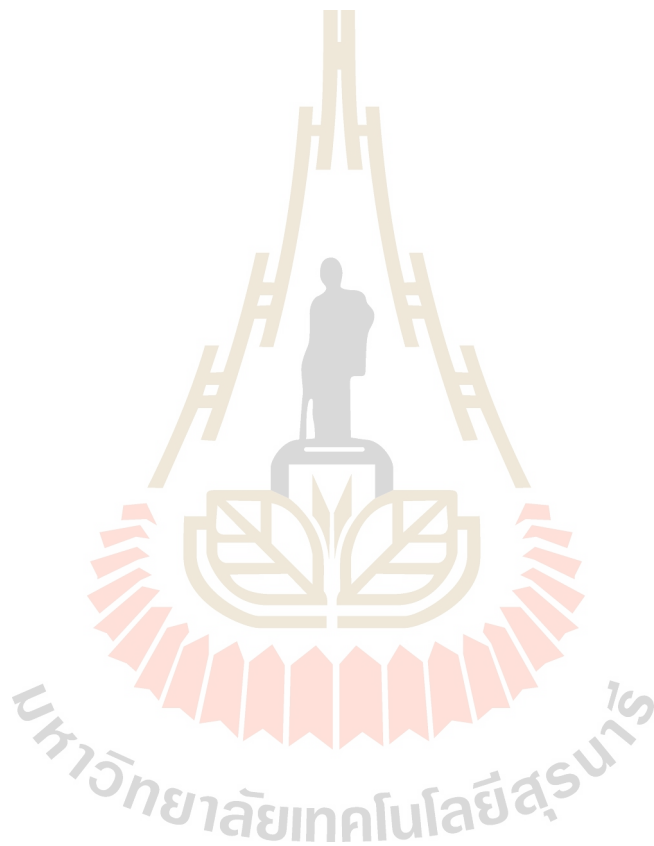
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายยงยุทธ เสียงดัง นายธีรวัฒน์ เจ๊ะเถื่อน นายฉัตริน เรืองจอหอ และนางสาว กมลชนน วงศ์สถาน ที่ช่วยทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูล



บทคัดย่อ

การใส่ปุ๋ยเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการปลูกยางพารา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราแบบหยอดหลุมให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ เครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือ ชุดเจาะหลุม ชุดหยอดปุ๋ย และชุดควบคุมอัตโนมัติ หัวเจาะมีรูปร่างแบบกรวยถูกขับเคลื่อนด้วยกลไกลูกเบี้ยว การเคลื่อนที่ของหัวเจาะเป็นแบบความเร่งคงที่ ชุดหยอดปุ๋ยทำหน้าที่กำหนดปริมาณปุ๋ยสำหรับการปล่อยลงหลุม ชุดควบคุมอัตโนมัติควบคุมความเร็วของลูกเบี้ยวของชุดเจาะหลุม และควบคุมการเปิดปิดของชุดหยอดปุ๋ย ระยะห่างระหว่างหลุมที่เจาะถูกกำหนดด้วยแผ่นจาน ชุดหยอดปุ๋ยสามารถปล่อยปุ๋ยต่อหลุมได้เฉลี่ย 6.64 g ผลการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะการทำงานในกระบะดินในช่วงความชื้นของดินระหว่าง 4-8 %w.b. พบว่า ขนาดหลุมและคุณภาพของการหยอดปุ๋ยมีค่ามากขึ้นเมื่อดินมีความชื้นสูงขึ้น แต่ระยะห่างระหว่างหลุมไม่มีอิทธิพลต่อขนาดหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ย ผลการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะการทำงานในแปลงยางพาราจำลองสอดคล้องกับผลการทดสอบในกระบะดิน จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อกำหนดความเร็วในการทำงานเท่ากับ 0.16 m/s เครื่องใส่ปุ๋ยมีความสามารถในการทำงานประสิทธิผลและประสิทธิภาพการทำงานเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.36 rai/h และ 73.6% ตามลำดับ ดังนั้นเครื่องใส่ปุ๋ยจะมีความสามารถในการทำงานเท่ากับ 23.9 kg/h ด้วยระดับคุณภาพของการหยอดปุ๋ยมากกว่า 97% อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบในแปลงยางพาราจริงที่มีสภาพดินอัดแน่น พบว่าคุณภาพการหยอดปุ๋ยลดลงเหลือ 73% ผลการทดสอบเหล่านี้ยืนยันได้ว่า เครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราแบบหยอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติมีศักยภาพที่จะนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อการประยุกต์ใช้ในสภาวะการใช้งานจริงได้

คำสำคัญ: เครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุม ยางพารา กลไกลูกเบี้ยว

Abstract

Fertilizing is an important process in para rubber plantation. The aim of this research was to develop an automatic dibbling fertilizer applicator for using in para rubber field. This fertilizer applicator consists of three units i.e., dibbling unit, fertilizing unit and control unit. The cone type dibble was driven with a cam mechanism. The displacement diagram of the dibble was a constant acceleration motion. The fertilizing unit specifies the amount of fertilizer per hole. The control unit regulates the cam's speed and the fertilizing. The distance between the dibbled holes was controlled by a metering disk. The fertilizing unit could quantify the amount of fertilizer with 6.64 grams per hole. The experimental tests were carried out in a soil bin with the moisture content range of 4-8 %w.b. The results showed that higher moisture content of soil resulted to increasing hole size and quality of fertilizing. Nevertheless, the hole distance did not influence hole size and quality of fertilizing. The experimental results from simulated para rubber field positively related to the results from soil bin. The results showed that when the speed of the fertilizer applicator was 0.16 m/s, the effective field capacity and the field efficiency were 0.36 rai/h and 73.6%, respectively. Therefore, the work capacity of the developed fertilizer applicator was equal to 23.9 kg/h with over 97% quality of fertilizing. However, the experimental results from para rubber field showed that the quality of fertilizing reduced to 73% due to the compacted soil condition. In conclusion, these results verified that the developed fertilizer applicator has the potential to be applied for practical use.

Keywords: dibbling fertilizer applicator, para rubber, cam mechanism

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พื้นที่ปลูกยางพารา	4
2.2 การใส่ปุ๋ยยางพารา	4
2.3 การออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร	6
2.3.1 ความคุ้มผสมในระบบสองมิติ	6
2.3.2 ทฤษฎีความเสียหาย	10
2.4 ค่าซื้อและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.5.1 การพัฒนาเครื่องเจาะหลุม	16
2.5.2 การพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ย	17
2.5.3 การพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุม	26
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.1.1 รถแทรกเตอร์เกษตร	28
3.1.2 กระบะดิน	30
3.1.3 PLC	32
3.1.4 พร็อกซิมิตี้เซนเซอร์	33

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	33
3.2.1 การออกแบบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ	33
3.2.2 การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ ในกระบะดิน	36
3.2.3 การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ ภาคสนาม	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	
4.1 ผลการออกแบบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ	43
4.1.1 ชุดเจาะหลุมแบบกลไกลูกเบี้ยว	43
4.1.2 ชุดหยอดปุ๋ย	48
4.1.3 ชุดควบคุมอัตโนมัติ	49
4.1.4 ชุดโครงสร้าง	50
4.2 ผลการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหยอดหลุมอัตโนมัติในกระบะดิน	51
4.2.1 ระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning	41
4.2.2 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดรอบการหมุน	43
4.2.3 การปรับแก้การ drift ของเซนเซอร์วัดทิศทางการเคลื่อนที่	44
4.2.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning	45
4.3 ผลการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ ภาคสนาม	55
4.3.1 ผลการทดสอบในแปลงเกษตร	55
4.3.2 ผลการทดสอบในแปลงอย่างพารา	61
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
การเผยแพร่ผลงานวิจัย	66
เอกสารอ้างอิง	67
ประวัติหัวหน้าโครงการ	69

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Yanmar รุ่น EF-494T	29
ตารางที่ 3.2 สมรรถนะของระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์ Yanmar รุ่น EF-494T	30
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลจำเพาะของ PLC ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FX3S-30MT/DS	32
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความสมดุลและพลังงานจลน์ของลูกเบี้ยว	45
ตารางที่ 4.2 ขนาดของหลุมเมื่อใช้หัวเจาะขนาด 50 mm	47
ตารางที่ 4.3 ขนาดของหลุมเมื่อใช้หัวเจาะขนาด 60 mm	48
ตารางที่ 4.4 ปริมาณปุ๋ยที่หยอดในแต่ละหลุม	49
ตารางที่ 4.5 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 4 %(wb)	51
ตารางที่ 4.6 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 6 %(wb)	52
ตารางที่ 4.7 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 8 %(wb)	52
ตารางที่ 4.8 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 4 %(wb)	53
ตารางที่ 4.9 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 6 %(wb)	53
ตารางที่ 4.10 ปริมาตรหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ย	53
ตารางที่ 4.11 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 6 %(wb)	57
ตารางที่ 4.12 การสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์ขณะจุดลากเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมอัตโนมัติ	60
ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราในแปลงยางพาราจำลอง	61
ตารางที่ 4.14 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 8 %(wb)	63

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องใส่ปุ๋ยเคมีแบบหว่านสำหรับรถแทรกเตอร์	5
รูปที่ 2.2 ระบบของความเค็ม (ก) ความเค็มบนชั้นส่วนเล็กทั่ว ๆ ไป (ข) ความเค็มบนระนาบ xy	7
รูปที่ 2.3 (ก) ความเค็มบนระนาบ (ข) แรงภายนอกบนระนาบ (ค) ทิศทางของระนาบ	7
รูปที่ 2.4 (ก) วงกลมของมอร์สำหรับความเค็มในระนาบ (ข) วงกลมของมอร์ที่สมบูรณ์	9
รูปที่ 2.5 ความเค็มกระทำบนท่อนโลหะทรงกระบอก (ก) ความเค้นดัดและความเค้นเฉือน (ข) ความเค้นดึงและความเค้นเฉือน (ค) ความเค้นในระบบ 2 มิติ	10
รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบขอบเขตของความเค้นระหว่างทฤษฎีความเสียหายต่างๆ	13
รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบความแม่นยำของทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียวกับ ผลการทดสอบวัสดุเหนียวต่างๆ	13
รูปที่ 2.8 เครื่องเจาะดินสำหรับปลูกต้นไม้ขนาดเล็ก	16
รูปที่ 2.9 เครื่องปลูกและใส่ปุ๋ยต้นไม้ด้วยมือ	17
รูปที่ 2.10 เครื่องโรยปุ๋ยอย่างพาราตันแบบ	17
รูปที่ 2.11 เครื่องใส่ปุ๋ยสำหรับรถแทรกเตอร์ของภาคเอกชน	18
รูปที่ 2.12 เครื่องโรยปุ๋ยอย่างพารา	18
รูปที่ 2.13 เครื่องปล่อยปุ๋ย	19
รูปที่ 2.14 เครื่องใส่ปุ๋ยแบบ 4 แถว	19
รูปที่ 2.15 เครื่องพ่นปุ๋ยไนโตรเจน	20
รูปที่ 2.16 เครื่องปล่อยปุ๋ยแอมโมเนีย	20
รูปที่ 2.17 เครื่องใส่ปุ๋ยรากพืชแบบพกพา	21
รูปที่ 2.18 ฝาปิดพรวนสำหรับใส่ปุ๋ยชนิดเหลว	21
รูปที่ 2.19 เครื่องเพาะเมล็ดและให้ปุ๋ยชนิดเหลวขนาดเล็ก	22
รูปที่ 2.20 อุปกรณ์สำหรับปล่อยปุ๋ยชนิดเหลว	22
รูปที่ 2.21 เครื่องปล่อยปุ๋ยชนิดเหลว	23
รูปที่ 2.22 เครื่องปล่อยปุ๋ยที่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีแก๊สเซียน	23
รูปที่ 2.23 เครื่องพ่นปุ๋ย	24
รูปที่ 2.24 เครื่องกระจายปุ๋ยแบบสองแถว	25
รูปที่ 2.25 เครื่องพ่นปุ๋ยแบบพับและกางออก	25
รูปที่ 2.26 อุปกรณ์สำหรับปล่อยปุ๋ยแบบเจาะหลุม	26
รูปที่ 2.27 เครื่องเจาะหยอดเมล็ดพืชและปุ๋ย	26

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.28 เครื่องหยอดปุ๋ยแบบเจาะหลุมสำหรับต้นไม้ขนาดเล็ก	27
รูปที่ 2.29 เครื่องปล่อยปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับปลูกผักกาดหอม	27
รูปที่ 3.1 รถแทรกเตอร์ชนิดขับเคลื่อนแบบ 4WD ขนาด 49 hp	28
รูปที่ 3.2 ระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์ Yanmar รุ่น EF-494T	29
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบเครื่องยนต์กับอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก	30
รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของชุดทดลองกระบะดินสำหรับการทดสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงทางการเกษตร	31
รูปที่ 3.5 กระบะดิน	31
รูปที่ 3.6 PLC สำหรับเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพารา	32
รูปที่ 3.7 พร็อกซีมิตี้เซนเซอร์ยี่ห้อ Omron (ก) รุ่น E2E2-X10MC1 (ข) รุ่น E2E-X5ME1	33
รูปที่ 3.8 แบบจำลองเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหยอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ	34
รูปที่ 3.9 แบบจำลองชุดเจาะหลุมและชุดหยอดปุ๋ยของเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหยอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ	35
รูปที่ 3.10 แบบจำลองการต่อพ่วงเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพารากับรถแทรกเตอร์	35
รูปที่ 3.11 Procedure of the dibbling fertilizer applicator	37
รูปที่ 3.12 สภาพแปลงทดสอบ	38
รูปที่ 3.13 ดัชนีความแข็งดินในแปลงทดสอบ	38
รูปที่ 3.14 การติดตั้งเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมกับรถแทรกเตอร์	39
รูปที่ 3.15 การเตรียมอุปกรณ์และแปลงทดสอบ	39
รูปที่ 3.16 รูปแบบการใส่ปุ๋ยในแปลงทดสอบ	40
รูปที่ 3.17 การเตรียมแปลงทดสอบสำหรับการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ย	40
รูปที่ 3.18 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยในแปลงทดสอบ	41
รูปที่ 3.19 สภาพแปลงอย่างพาราของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	41
รูปที่ 3.20 ดัชนีความแข็งดินในแปลงอย่างพารา	42
รูปที่ 3.21 การทดสอบในแปลงอย่างพาราของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	42
รูปที่ 4.1 หัวเจาะหลุมของเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพารา	43
รูปที่ 4.2 ไดอะแกรมการกระจัดของหัวเจาะหลุม	44
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของลูกเบี้ยว (ก) ความเค้น (ข) ความเครียด (ค) การยุบตัว	46
รูปที่ 4.4 กลไกลูกเบี้ยวของชุดเจาะหลุม	47
รูปที่ 4.5 ชุดหยอดปุ๋ยของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมอัตโนมัติ	48

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 Schematic diagram of control unit	49
รูปที่ 4.7 ชุดโครงสร้างของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพารา	50
รูปที่ 4.8 งานกำหนดระยะห่างระหว่างหลุม	51
รูปที่ 4.9 ปริมาตรหลุมที่เจาะด้วยเครื่องใส่ปุ๋ยอัตโนมัติที่ระดับความชื้นต่างๆ	54
รูปที่ 4.10 คุณภาพการหยอดปุ๋ยด้วยเครื่องใส่ปุ๋ยอัตโนมัติที่ระดับความชื้นต่างๆ	55
รูปที่ 4.11 การปล่อยปุ๋ยลงหลุม	56
รูปที่ 4.12 การกลบหลุมหลังการปล่อยปุ๋ย	56
รูปที่ 4.13 การวัดแรงดึงในแนวระดับของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราในแปลงทดสอบ	57
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราในสภาวะการทดสอบในกระบะดินและแปลงเกษตร (ก) ปริมาตรหลุม และ (ข) คุณภาพของการหยอดปุ๋ย	58
รูปที่ 4.15 แรงดึงในแนวระดับขณะมีภาระ	59
รูปที่ 4.16 แรงดึงในแนวระดับขณะไม่มีภาระ	59
รูปที่ 4.17 การทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องใส่ปุ๋ยในแปลงยางพาราจำลอง	60
รูปที่ 4.18 การปล่อยปุ๋ยลงหลุมขณะปฏิบัติงานในแปลงยางพารา	62
รูปที่ 4.19 การกลบหลุมหลังการปล่อยปุ๋ยขณะปฏิบัติงานในแปลงยางพารา	62
รูปที่ 4.20 สภาพแปลงยางพาราหลังทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพารา	63
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบการหยอดปุ๋ยในแปลงยางพารา แปลงเกษตร และกระบะดิน	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารากระจายอยู่ทั่วประเทศ ทั้งในพื้นที่ปลูกยางเดิมทางภาคใต้ และพื้นที่ปลูกยางใหม่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคเหนือ สวนยางเหล่านี้จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยเพื่อให้ต้นยางเจริญเติบโตสามารถเปิดกรีดได้เร็วและให้ผลผลิตสูง การใส่ปุ๋ยจะทำให้ยางพาราให้ผลผลิตสูงขึ้นร้อยละ 19 เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใส่ปุ๋ย (นุชนารถ, 2543) ยางพาราต้องการปริมาณธาตุอาหารแปรผันตามอายุของต้นยาง ชนิดของดิน และแหล่งปลูก ธาตุอาหารที่ยางพาราต้องการมากได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งส่วนใหญ่ได้จากปุ๋ยเคมี พื้นที่ที่ใช้ปลูกยางส่วนใหญ่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ และธาตุอาหารบางส่วนถูกนำออกจากดินในรูปของน้ำยาง โดยน้ำยาง 1 ตัน จะสูญเสียธาตุไนโตรเจน 20 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส 5 กิโลกรัม โพแทสเซียม 25 กิโลกรัม และแมกนีเซียม 5 กิโลกรัม รวมทั้งธาตุอาหารอื่น ๆ เช่น แคลเซียม เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง หากไม่มีการใส่ปุ๋ยเพื่อชดเชยธาตุอาหารที่สูญเสียไปจากดิน จะทำให้ดินขาดความสมดุลของธาตุอาหาร

ในปี 2546 มีการประเมินว่าเฉพาะธาตุอาหารหลัก คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่ถูกนำออกไปในรูปของน้ำยาง มีปริมาณ 143,000 ตันของน้ำยาง หรือหากคิดเป็นปุ๋ยผสมสูตร 20-11-30 ($N-P_2O_5-K_2O$) จะได้ปริมาณปุ๋ยประมาณ 286,000 ตัน แต่จากรายงานของ FAO ปี 2544 ระบุว่าประเทศไทยใช้ปุ๋ยประมาณ 11.2 กิโลกรัมธาตุอาหาร (N-P-K) ต่อไร่ต่อปี ซึ่งต่ำกว่าอัตราแนะนำของทางราชการที่แนะนำให้ใช้ในอัตรา 42.4 กิโลกรัมธาตุอาหารต่อไร่ต่อปี คิดเป็นปริมาณปุ๋ยที่ใช้เพียงร้อยละ 26 ของอัตราแนะนำ ดังนั้นหากพิจารณาปุ๋ยที่สูญเสียไปกับน้ำยาง ในปี 2546 จำนวน 286,000 ตัน แต่มีการใส่ปุ๋ยร้อยละ 26 จะทำให้ดินขาดสมดุล N ถึง 211,640 ตัน ดังนั้นหากต้องการพัฒนาประเทศไทยให้มีศักยภาพการผลิตและส่งออกยางเป็นอันดับ 1 ของโลกอย่างยั่งยืนแล้ว การใส่ปุ๋ยให้มีประสิทธิภาพสูงสุดมีความจำเป็นอย่างมาก (สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร, 2549)

วิธีการใส่ปุ๋ยเคมีแก่ต้นยางพาราที่เกษตรกรนิยม คือ การหว่านปุ๋ย และการฝังกลบ วิธีการใส่ปุ๋ยทั้งสองวิธีสามารถใช้แรงงานคนหรือเครื่องจักรกลเกษตร เมื่อเปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยทั้งสองวิธีแล้ว จะเห็นว่าวิธีการหว่านปุ๋ยจะใช้แรงงานและเวลาในการใส่ปุ๋ยน้อยกว่าวิธีฝังกลบ แต่ต้องใส่ปุ๋ยในปริมาณที่มากกว่า เพราะปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยส่วนหนึ่งจะระเหิดหากดินมีความชื้นน้อย เนื่องจากเม็ดปุ๋ยที่หว่านจะสัมผัสกับอากาศ ลม และแสงแดด ทำให้ธาตุอาหารของปุ๋ยลดลง นอกจากนี้ปุ๋ยอาจจะละลายไปกับน้ำฝนได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยต่ำ วิธีการใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบเป็นการใส่

ปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการหว่าน แต่ก็มีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า และการเปิดร่องอาจมีโอกาสนที่จจะตัดรากต้นยางได้สูงมาก เนื่องจากในการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสมต้องใช้ความลึกของร่องประมาณ 5-10 เซนติเมตรเท่านั้น ซึ่งก่อให้เกิดความยุ่งยากสำหรับเกษตรกรในการเปิดร่อง

มงคล (2552) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องโรยปุ๋ยอย่างพาราสำหรับรถไถเดินตาม ให้เหมาะกับการใช้งานของเกษตรกรสวนยางรายย่อย ซึ่งใช้รถไถเดินตามเป็นต้นกำลังลากจูง และใช้ผู้ปฏิบัติงานเพียงคนเดียว การโรยปุ๋ยใช้หลักการเปิดร่องและกลบร่องโดยจานไถขนาดเล็กสองจาน แต่อย่างไรก็ตามเครื่องโรยปุ๋ยอย่างพารานี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น ไม่สามารถใช้งานในพื้นที่ปลูกยางพาราที่เป็นดินลูกรังหรือดินเหนียวได้ ตัวเปิดร่องมักจะตัดรากยางพาราตลอดเวลาที่ทำการโรยปุ๋ย และความยาวของรถไถเดินตามเมื่อต่อพ่วงกับเครื่องโรยปุ๋ยอย่างพาราแล้วมีความยาวมาก ทำให้การเลี้ยวบริเวณหัวงานทำได้ยาก เกิดความเมื่อยล้าในการทำงาน และไม่สามารถใส่ปุ๋ยให้กับต้นยางขนาดเล็กได้ เนื่องจากรากต้นยางเล็กสั้น ซึ่งเครื่องโรยปุ๋ยนี้จะให้ปุ๋ยเป็นแถวบริเวณกลางแปลงเท่านั้น

ปัจจุบันรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กกำลังได้รับความนิยมจากเกษตรกร เพราะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่ารถไถเดินตาม ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยอย่างพาราของเกษตรกร โดยการพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหยอดหลุมสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก ให้สามารถใช้ได้กับต้นยางพาราทุกขนาด โดยการป้อนข้อมูลสำหรับต้นยางพาราขนาดต่างๆ ให้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ระบบควบคุมอัตโนมัติจะสั่งการให้ปุ๋ยเอง โดยที่ผู้ขับรถแทรกเตอร์จะทำหน้าที่เพียงกดปุ่มเริ่มใส่ปุ๋ยและหยุดใส่ปุ๋ยเมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว และคอยยกและวางเครื่องใส่ปุ๋ยบริเวณหัวแปลงพร้อมทั้งตรวจสอบปริมาณปุ๋ยในถังปุ๋ยเท่านั้น สามารถดำเนินการกับดินทุกชนิดและลดปัญหาการตัดรากยางพารา อันจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยอย่างพาราและลดต้นทุนของเกษตรกรได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหยอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ ให้สามารถกำหนดปริมาณปุ๋ยที่จะให้ในแต่ละครั้ง และสามารถกำหนดระยะห่างการให้ปุ๋ยที่แตกต่างได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราให้เหมาะกับการใช้งานของเกษตรกรที่ส่วนใหญ่ครอบครองรถแทรกเตอร์ซึ่งมีกำลังประมาณ 45 แรงม้า ในพื้นที่ปลูกยางพาราที่มีพื้นที่ค่อนข้างเรียบ มีความลาดเอียงไม่มาก และรถแทรกเตอร์สามารถปฏิบัติงานได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1) ด้านวิชาการและวิจัย ทำให้ทราบองค์ความรู้สมัยใหม่ในการพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรสำหรับยางพาราให้เหมาะสมกับการทำสวนยางพาราของประเทศ ผลการวิจัยสามารถนำไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการได้ นอกจากนี้นักศึกษาทั้งในระดับปริญญาตรีและระดับบัณฑิตศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรที่เข้ามาช่วยในโครงการวิจัยนี้ จะได้รับความรู้ในการวิจัยและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งจะเป็นการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ต่อไป

2) ด้านเศรษฐกิจ การใส่ปุ๋ยยางพาราโดยใช้เครื่องใส่ปุ๋ยจะทำให้ประสิทธิภาพในการใส่ปุ๋ยเพิ่มขึ้น เกษตรกรสามารถลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มผลผลิตต่อพื้นที่ได้ ทำให้รายได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรทั้งรายย่อยและรายใหญ่ตามท้องถิ่นต่างๆ ทั่วประเทศ สามารถรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตจากโครงการนี้ซึ่งจะเผยแพร่ออกไปสู่ผู้สนใจต่างๆ

3) ด้านบริการวิชาการ นักวิจัยในหน่วยงานต่างๆ เช่น กรมวิชาการเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร บริษัทเอกชน และมหาวิทยาลัยต่างๆ สามารถนำฟังก์ชันการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพารานี้ไปพัฒนาต่อยอดได้

บทที่ 2

ปฐกษัตริกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นที่ปลูกยางพารา

พื้นที่ปลูกยางทั้งหมดของโลกปี 2553 มีประมาณ 72.21 ล้านไร่ ร้อยละ 76.4 เป็นพื้นที่ปลูกที่อยู่ในประเทศกลุ่มอาเซียน สภาพสวนยางส่วนใหญ่เป็นสวนยางขนาดเล็ก ใช้แรงงานในครัวเรือนเป็นหลัก อินโดนีเซียเป็นประเทศที่มีพื้นที่ปลูกยางมากที่สุดจำนวน 21.53 ล้านไร่ รองลงมาไทย 18.76 ล้านไร่ และมาเลเซีย 6.38 ล้านไร่ ที่เหลือเป็นพื้นที่ปลูกยางของประเทศอื่น ๆ

ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางในปี 2553 ทั้งสิ้น 18,761,231 ไร่ เพิ่มขึ้นจากปี 2550 ซึ่งมีพื้นที่ 15,362 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 22 โดยภาคใต้มีพื้นที่ปลูกยางมากที่สุด 11,906,882 ไร่ รองลงมา คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3,477,303 ไร่ ภาคตะวันออกรวมภาคกลาง 2,509,644 ไร่ และภาคเหนือ 867,402 ไร่ รวมทั้งสิ้น 65 จังหวัด จังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกยางมากที่สุด คือ จังหวัดสุราษฎร์ธานี 1,921,698 ไร่ พื้นที่ปลูกยางทั้งหมดของประเทศ เป็นพื้นที่ที่ย่างอายุมากกว่า 6 ปี จำนวน 12,765,636 ไร่ โดยคิดร้อยละ 76 อยู่ในภาคใต้

การเตรียมพื้นที่ปลูกยางพาราควรปรับพื้นที่ให้มีความเหมาะสมต่อการปฏิบัติงาน แนวการปลูกควรอยู่ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก และห่างจากแนวเขตสวนไม่น้อยกว่า 1.5 เมตร การวางแนวปลูกในพื้นที่ลาดชันควรทำเป็นขั้นบันได ระยะปลูกยางพาราจะกำหนดสัดส่วนของระยะต้นและระยะแถวเป็น 3x6 หรือ 3x7 เมตร ซึ่งจะสามารถปลูกต้นยางพาราได้ประมาณ 80 ต้นต่อไร่ การปลูกต้นยางพาราควรปลูกในช่วงต้นฤดูฝน โดยใช้ขนาดของหลุม 50x50x50 cm

การไถพรวนดินในแปลงยางพาราเพื่อกำจัดวัชพืชหรือใส่ปุ๋ยมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของต้นยางพารา (นุชนารถ, 2527) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของการไถพรวนในแปลงยางพาราต่อการเจริญเติบโตของยางพารา โดยเปรียบเทียบกับการปลูกพืชคลุมตระกูลถั่ว จากการวิจัยพบว่า การไถพรวนในระดับลึกมีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นยางอย่างมาก ส่วนการไถพรวนในระดับตื้นประมาณ 10 cm และไม่เกิน 15 cm จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นยางน้อย

2.2 การใส่ปุ๋ยยางพารา

ดินในพื้นที่ปลูกยางพาราส่วนใหญ่จะมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ จึงจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยเพื่อบำรุงต้นยางพาราอย่างถูกต้องและเหมาะสม เพื่อให้เพียงพอต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของต้นยางพารา ปุ๋ยสำหรับยางพาราที่ถูกระบุแนะนำ คือ ปุ๋ยสูตร 20-8-20 (เขตปลูกยางเดิม) หรือ 20-10-12

(เขตปลูกยางใหม่) สำหรับต้นยางพาราก่อนเปิดกรีด และปุ๋ยสูตร 30-5-18 สำหรับต้นยางพาราหลังเปิดกรีด

การยางแห่งประเทศไทยได้แนะนำอัตราการใส่ปุ๋ยสำหรับต้นยางพารา โดยอัตราการใส่ปุ๋ยยางพาราก่อนเปิดกรีดขึ้นอยู่กับอายุของต้นยางพารา ส่วนอัตราการใส่ปุ๋ยสำหรับต้นยางพาราหลังเปิดกรีดเท่ากับ 500 กรัมต่อต้น ปีละ 2 ครั้ง โดยใส่ต้นและปลายฤดูฝน

การใส่ปุ๋ยยางพาราสามารถทำได้โดยวิธีการหว่านและการฝังกลบ พื้นที่ปลูกยางพาราที่มีสภาพเป็นพื้นราบนิยมใส่ปุ๋ยด้วยการหว่านหรือการฝังกลบแบบเป็นแถว ส่วนพื้นที่ปลูกยางพาราที่มีสภาพพื้นที่ลาดชันนิยมใส่ปุ๋ยด้วยการฝังกลบแบบเป็นหลุม การใส่ปุ๋ยโดยใช้แรงงานคนสามารถปฏิบัติงานได้ทุกสภาพพื้นที่ แต่การใส่ปุ๋ยด้วยเครื่องใส่ปุ๋ยยังมีข้อจำกัดใช้ได้เฉพาะพื้นที่ค่อนข้างราบ การใส่ปุ๋ยยางพาราหลังเปิดกรีดในพื้นที่ราบควรใส่ปุ๋ยบริเวณกึ่งกลางระหว่างแถว

สำหรับการใส่ปุ๋ยยางพาราด้วยการหว่าน เกษตรกรนิยมใช้เครื่องหว่านปุ๋ยเคมีที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด ซึ่งมีทั้งแบบแรงเหวี่ยงและแบบลมเป่า โดยอาศัยกำลังจากเพลลาอำนาจกำลังของรถแทรกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องใส่ปุ๋ยเคมีแบบหว่านสำหรับรถแทรกเตอร์

จากเอกสารแนะนำการใช้ปุ๋ยยางพาราของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร แสดงให้เห็นว่าวิธีการใส่ปุ๋ยมีผลต่อการสูญเสียของปุ๋ยทั้งในรูปของการชะล้างและการระเหิด ดังนั้นจึงแนะนำให้ใส่โดยวิธีฝังกลบ หรือขุดหลุมลึกประมาณ 5 ถึง 10 cm จำนวน 2 หลุมต่อต้น จากผิวดิน เมื่อใส่ปุ๋ยแล้วเกลี่ยดินกลบ (นุชนารถ, 2550)

2.3 การออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร

2.3.1 ความเค้นผสมในระบบสองมิติ

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไปมีรูปทรงเป็น 3 มิติ ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนก็เป็นแบบ 3 มิติ ด้วย เนื่องจากรูปร่างของชิ้นส่วนจะมีความยาวด้านหนึ่งน้อยกว่าอีกสองด้านมาก และความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางด้านนั้นก็มักจะมีขนาดน้อยกว่าในอีกสองทิศทางด้วย ดังนั้นจึงสามารถสมมติให้ปัญหาทางวิศวกรรมส่วนใหญ่เป็นระบบความเค้นแบบ 2 มิติ ได้ รูปที่ 2.2 แสดงสภาวะของความเค้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนชิ้นส่วนเครื่องจักรกลซึ่งสามารถสรุปจาก 3 มิติ เหลือ 2 มิติ ได้ σ_x, σ_y คือ ความเค้นตั้งฉากซึ่งมีค่าเป็นบวก τ_{xy}, τ_{yx} คือ ความเค้นเฉือนซึ่งมีค่าเป็นบวกเช่นกัน เมื่อชิ้นส่วนนี้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้น $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ (พยุงศักดิ์, 2552)

ในการออกแบบเครื่องจักรกล จะใช้ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนนั้น ๆ เนื่องจากค่าความเค้นตั้งฉาก σ_x, σ_y และค่าความเค้นเฉือน τ_{xy}, τ_{yx} ยังไม่ใช่ค่าความเค้นสูงสุดบนชิ้นส่วน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องหาความเค้นสูงสุดบนชิ้นส่วน โดยค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถแสดงให้อยู่ในเทอมของค่าความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนได้ แต่ไม่สามารถหาได้โดยวิธีการบวกความเค้นเหล่านั้นกันโดยตรง

พิจารณาความเค้นบนระนาบ 2 มิติ บนชิ้นส่วนเล็ก ๆ รูปสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.2(ข) ถ้าตัดชิ้นส่วนนี้ด้วยระนาบเอียงทำมุม θ กับแกนตั้ง จะมีความเค้นตั้ง σ_n ตั้งฉากกับหน้าตัดและความเค้นเฉือน τ_n ขนานกับหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก) แรงภายนอกที่กระทำต่อชิ้นส่วนนี้สามารถหาได้จากผลคูณระหว่างความเค้นกับพื้นที่หน้าตัดของแต่ละด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ข)

เมื่อสมดุลแรงบนชิ้นส่วนนี้ตามหลักกลศาสตร์ ทำให้สามารถหาค่า ความเค้น σ_n และ τ_n ในเทอมของ ความเค้นตั้งฉาก σ_x, σ_y และความเค้นเฉือน τ_{xy} ได้ตามสมการ

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (2.1)$$

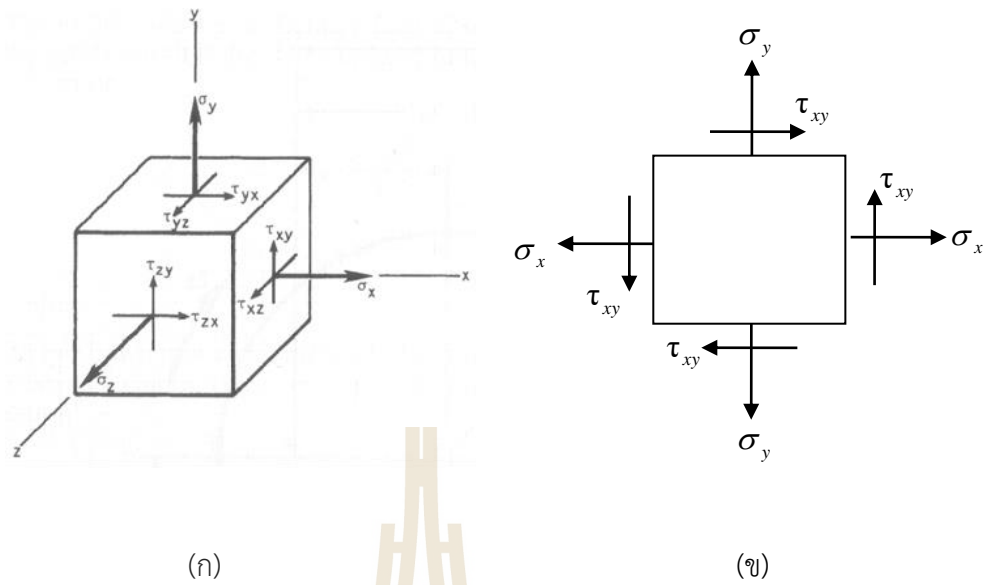
$$\tau_n = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (2.2)$$

(ก) ความเค้นหลัก

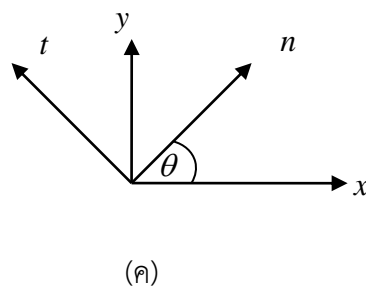
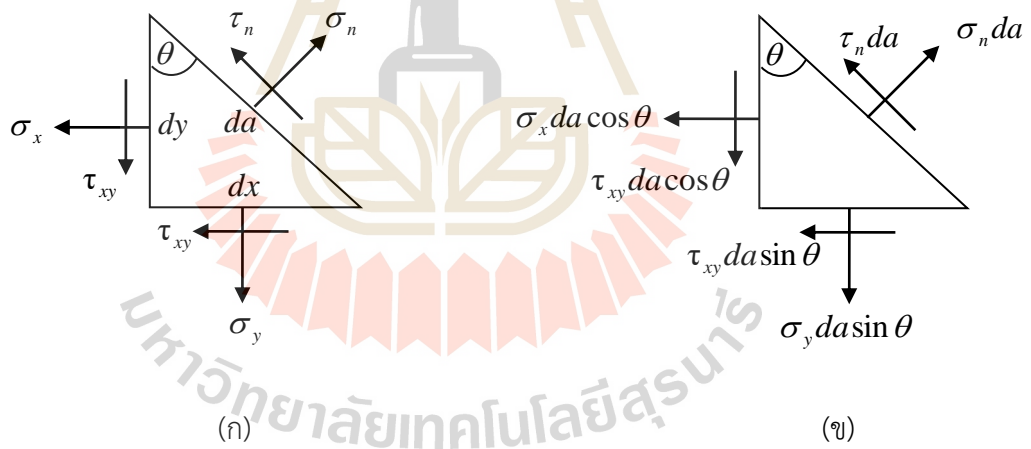
ความเค้นหลัก (Principal Stress) สามารถหาได้จากการดิฟเฟอเรนเชียล (Differentiate) σ_n เทียบกับ θ และกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ในสมการที่ 2.1 จะได้ สมการความเค้นหลัก

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.3)$$

โดยที่ σ_1, σ_2 คือ ความเค้นหลัก (Principal Stress) และในกรณีนี้ค่าความเค้นหลักค่าที่สาม σ_3 มีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.2 ระบบของความเค้น (ก) ความเค้นบนชิ้นส่วนเล็กทั่ว ๆ ไป (ข) ความเค้นบนระนาบ xy (Shigley, J.E., Mischke, C.R. and Brown, T.H., 2004)



รูปที่ 2.3 (ก) ความเค้นบนระนาบ (ข) แรงภายนอกบนระนาบ (ค) ทิศทางของระนาบ

(ข) ความเค้นเฉือนสูงสุดและต่ำสุด

ความเค้นเฉือนสูงสุดและต่ำสุด (Maximum and Minimum Shear Stresses) สามารถหาได้จากการดิฟเฟอเรนเชียล (Differentiate) τ_n เทียบกับ θ และกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ในสมการที่ 2.2 จะได้ สมการความเค้นเฉือน

$$\tau_1, \tau_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.4)$$

โดยที่ τ_1, τ_2 คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดและต่ำสุด ตามลำดับ

(ค) การหาความเค้นหลักและความเค้นเฉือนสูงสุดด้วยวงกลมของมอร์

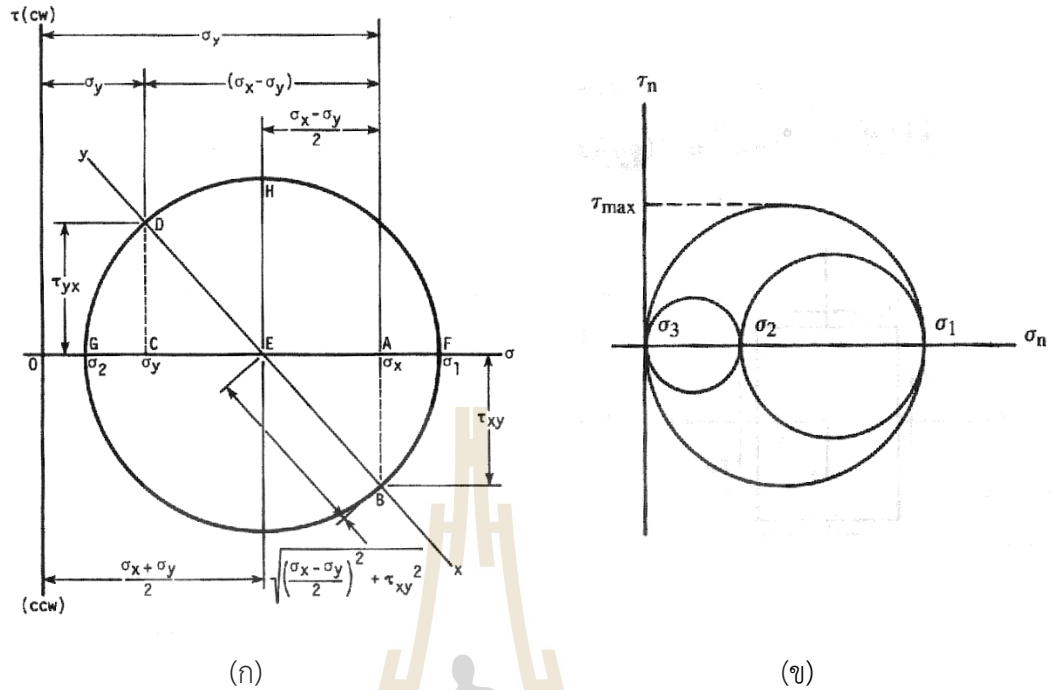
การหาค่าความเค้นหลักและความเค้นเฉือนสูงสุดสามารถหาได้โดยการเขียน วงกลมของมอร์ (Mohr's Circle) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นต่าง ๆ ทำให้รู้ค่าและทิศทางของความเค้นที่จุดต่าง ๆ ได้ รูปที่ 2.4 เป็นการสร้างวงกลมของมอร์ด้วยการเขียนระบบพิกัด σ_n, τ_n โดยให้แกนระนาบเป็น σ_n และแกนตั้งเป็น τ_n ในระบบพิกัดนี้จะกำหนด ความเค้นดึง (Tensile Stress) ให้อยู่ทางขวาของจุด O และความเค้นกด (Compressive Stress) อยู่ทางซ้าย ความเค้นเฉือนตามเข็มนาฬิกาให้เขียนขึ้นตามแกนตั้ง ความเค้นเฉือนทวนเข็มนาฬิกาให้เขียนลงตามแกนตั้ง

สถานะของความเค้นในรูปที่ 2.3(ก) สามารถนำมาแสดงด้วยวงกลมของมอร์ ได้ดังรูป 2.4 ค่า σ_x, σ_y เขียนแทนด้วยระยะ OA และ OC ตามลำดับ และ จุด E เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างจุด A และ C ค่า τ_{xy}, τ_{yx} เขียนแทนด้วยระยะ AB และ CD ตามลำดับ ระยะ ED คือ รัศมีของวงกลมของมอร์ ความเค้นหลัก σ_1 และ σ_2 จะเกิดขึ้นที่จุด F และ G ตามลำดับ ความเค้นเฉือนในระนาบสูงสุดและต่ำสุด เกิดขึ้นที่จุด H และ I ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า σ_1 และ σ_2 เป็นบวกทั้งคู่ และ σ_1 มากกว่า σ_2 เนื่องจากความเค้นหลัก σ_3 มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นค่าความเค้นเฉือนสูงสุด τ_{max} สามารถหาได้จากวงกลมของมอร์ที่สมบูรณ์ในรูปที่ 2.4(ข) ซึ่งเป็นรัศมีของวงกลมวงใหญ่ที่สุด

(ง) ความเค้นผสมในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล

ความเค้นผสมที่พบได้บ่อยในการออกแบบเครื่องจักรกลถูกแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อพิจารณาที่ระนาบ n-n บนท่อนโลหะทรงกระบอกในรูปที่ 2.5(ก) พบว่ามีความเค้นดัดและความเค้นเฉือนกระทำบนชิ้นลูกบาศก์ A โดยความเค้นเหล่านี้เกิดจากโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิด ตามลำดับ ขณะที่ท่อนโลหะทรงกระบอกในรูปที่ 2.5(ข) จะมีความเค้นดึงและความเค้นเฉือนที่เกิดจากแรงดึงและโมเมนต์บิด ตามลำดับ ความเค้นบนระนาบสำหรับกรณีเหล่านี้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.5(ค) (ธัญญา, 2548)



รูปที่ 2.4 (ก) วงกลมของมอร์สำหรับความเค้นในระนาบ (Shigley et al., 2004)

(ข) วงกลมของมอร์ที่สมบูรณ์ (วริทธิ และชาญ, 2556)

ดังนั้น ความเค้นดึง σ_n ในระนาบเอียงทำมุม θ กับแกนตั้งในสมการที่ 2.1 จะมีค่าเป็น

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{2} + \frac{\sigma}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (2.5)$$

ส่วนความเค้นเฉือน τ_n ในสมการที่ 2.2 มีค่าเป็น

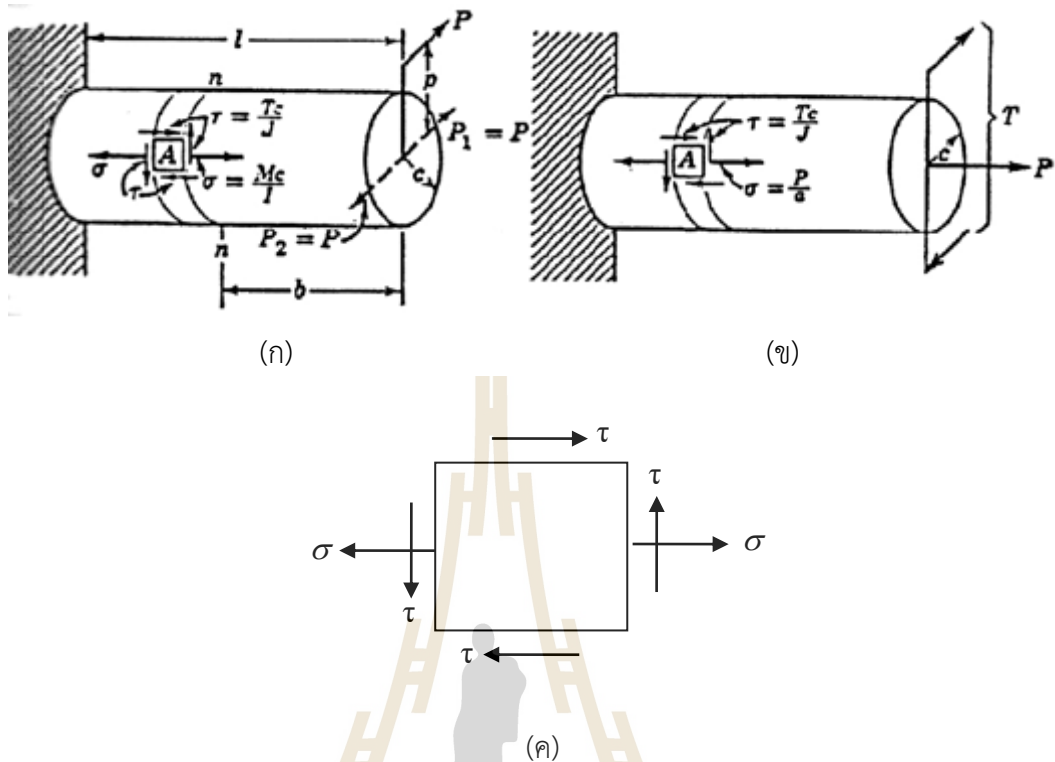
$$\tau_n = -\frac{\sigma}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (2.6)$$

ความเค้นหลักสามารถลดสมการเหลือเพียง

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า σ_1 และ σ_2 มีเครื่องหมายต่างกันอยู่เสมอ และเนื่องจากความเค้นหลัก σ_3 มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น ความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่า ดังนี้

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.5 ความเค้นกระทำบนท่อนโลหะทรงกระบอก (ก) ความเค้นดัดและความเค้นเฉือน
(ข) ความเค้นดึงและความเค้นเฉือน (ค) ความเค้นในระบบ 2 มิติ

2.3.2 ทฤษฎีความเสียหาย

เนื่องจากความเสียหายในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลส่วนใหญ่จะเกิดจากความเค้นผสมในชิ้นส่วน ดังนั้น ทฤษฎีความเสียหายจึงถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้วิเคราะห์และอธิบายความเสียหายของชิ้นส่วนเหล่านั้น ในปัจจุบันทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเปราะที่นิยมใช้คือ ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด (maximum normal stress theory) ทฤษฎีของคูลอมบ์-มอร์สำหรับวัสดุเปราะ (brittle Coulomb-Mohr theory) และทฤษฎีของมอร์ดัดแปลง (modified Mohr theory) ส่วนทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว คือ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (maximum shear stress theory) ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกตะฮีดรัล (octagonal shear stress theory) ทฤษฎีพลังงานการผิดรูป (distortion energy theory) และทฤษฎีของคูลอมบ์-มอร์สำหรับวัสดุเหนียว (ductile Coulomb-Mohr theory) (พยุงศักดิ์, 2552)

(ก) ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด

ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด เป็นทฤษฎีที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่เปราะ แต่ยังสามารถรับแรงเฉือนได้ดี เช่น เหล็กหล่อ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวจะไม่มีจุดครากจึงใช้ความต้านแรงดึงอัลติเมต (σ_u) เป็นหลัก ทฤษฎีนี้กล่าวว่า “วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นหลักสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความต้านแรงดึงของวัสดุนั้น” ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\sigma_{\max} = S_u \quad (2.9)$$

ทฤษฎีสามารถนำมาใช้กับวัสดุที่มีจุดครากได้ ในกรณีนี้จะใช้ ความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength) เป็นหลักก็ได้

(ข) ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า เกณฑ์ของเทรสกา (Tresca's criterion) เป็นทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียวที่นิยมใช้มาก เพราะใช้ได้ง่ายและปลอดภัย ทฤษฎีนี้กล่าวว่า “วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของวัสดุชนิดเดียวกันที่ได้จากการทดสอบแรงดึงเมื่อถึงจุดคราก”

ความต้านแรงเฉือนสูงสุดเมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจนถึงจุดครากมีค่าเท่ากับ $0.5S_y$ ซึ่งเกิดบนระนาบเอียงทำมุม 45° กับแนวแรงดึงขึ้นทดสอบ ดังนั้น สำหรับทฤษฎีนี้ความเสียหายจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อ

$$\tau_{\max} = S_{sy} = 0.5S_y \quad (2.10)$$

พิจารณาความเค้นในรูปที่ 2.12 ในกรณีทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสามารถกำหนดให้ความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าเป็น $\tau_{\max} = \frac{S_{sy}}{N}$ เมื่อแทนค่า τ_{\max} ลงในสมการที่ 2.8 แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการสำหรับการออกแบบชิ้นงาน

$$\frac{1}{N} = \left(\left(\frac{\tau}{S_{sy}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{S_y} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

โดยที่ $S_{sy} = 0.5S_y$

(ค) ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกคตะฮีดรัล

ในทางทฤษฎีพลาสติกซิตี (plasticity) มักจะเรียกชื่อทฤษฎีนี้ว่า ทฤษฎีของฟอนมิส (Von Mises หรือ Huber-Hencky Criterion) ทั้งนี้เพื่อเป็นเกียรติแก่บุคคลผู้คิดค้นทฤษฎีนี้ขึ้นมาใช้ (วริทธิ์ และชาญ, 2556)

ทฤษฎีนี้กล่าวว่า “วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนออกคตะฮีดรัลในวัสดุมีค่าเท่ากับ ความเค้นเฉือนออกคตะฮีดรัลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงขึ้นทดลองขณะถึงจุดคราก”

ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไปจะพิจารณาความเค้นใน 2 มิติ และใช้ค่าความปลอดภัย N เมื่อพิจารณาความเค้นในรูปที่ 2.12 ในกรณีทฤษฎีความเค้นออกคตะฮีดรัลสามารถหาสมการสำหรับการออกแบบชิ้นงานได้ดังนี้

$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{\tau}{S_{sy}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

โดยที่ $S_{sy} = \frac{S_y}{\sqrt{3}}$

ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกคตะฮีดรัลจะให้ผลการคำนวณเหมือนกับ ทฤษฎีพลังงานแปรรูป

(ง) การเปรียบเทียบขอบเขตและความแม่นยำของทฤษฎีความเสียหาย

รูปที่ 2.6 แสดงขอบเขตของความเค้นผสมที่ยอมให้มีได้ในชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ออกแบบโดยทฤษฎีความเสียหายแบบต่างๆ โดยให้ σ_1 เป็นแกนราบ และ σ_2 เป็นแกนตั้ง เมื่อเปรียบเทียบขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีความเสียหายทั้ง 3 ทฤษฎี พบว่า

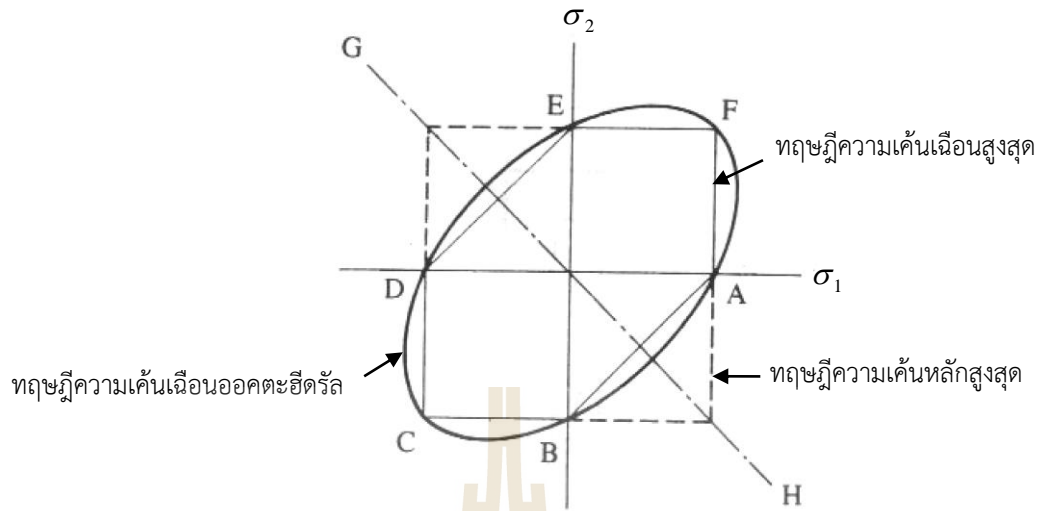
- ถ้าความเค้นภายในชิ้นงานอยู่ ณ บริเวณจุด A B C D E และ F แล้ว ทฤษฎีทั้งสามจะให้นิยามของชิ้นส่วนเท่ากัน

- ในควอดแรนท์ที่หนึ่งและที่สาม ความเค้นจากทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุดและทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากัน

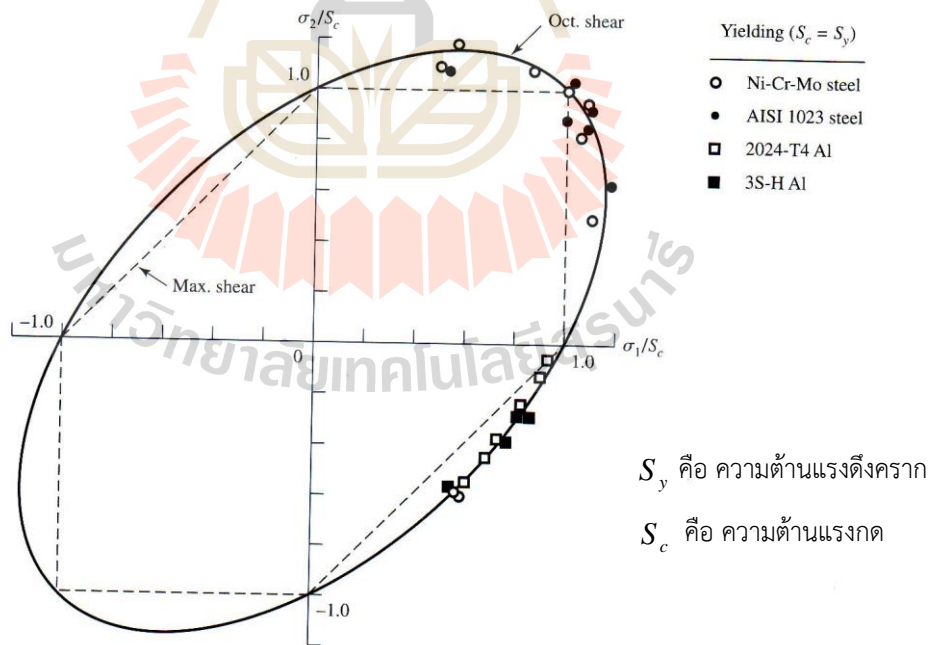
- เนื่องจากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดมีพื้นที่ครอบคลุมน้อยสุด ชิ้นงานที่ถูกคำนวณหาขนาดโดยทฤษฎีนี้ จะมีขนาดโตกว่าที่คำนวณจากทฤษฎีอีก 2 ทฤษฎี (ยกเว้นจุดรวมกัน)

เมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียวกับผลการทดสอบวัสดุเหนียวต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 พบว่า การคำนวณค่าความเค้นโดยใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกคตะฮีดรัลจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบวัสดุจริงมากกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด จากทฤษฎีความเสียหายทั้ง 3 ทฤษฎี สามารถสรุปแนวทางสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตรได้ดังนี้

- ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุดนิยมใช้สำหรับวัสดุเปราะ
- ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดนิยมใช้สำหรับวัสดุเหนียว เพื่อการออกแบบชิ้นส่วนทั่ว ๆ ไป
- ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกคตะฮีดรัลนิยมใช้สำหรับวัสดุเหนียว เพื่อการออกแบบชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบขอบเขตของความเค้นระหว่างทฤษฎีความเสียหายต่างๆ (วริทธิ์ และชาญ, 2548)



รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบความแม่นยำของทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียวกับผลการทดสอบวัสดุเหนียวต่างๆ (Budynas, R.G. and Nisbett, J.K., 2008)

2.4 ค่าชี้และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

(ก) ความหนาแน่นรวม (bulk density)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัตถุ (kg/m^3)

m คือ มวลรวมของวัตถุ (kg)

V คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ (m^3)

(ข) มุมกองของวัสดุ (angle of repose)

$$\tan^{-1} \phi = \frac{H}{(0.5D)}$$

เมื่อ ϕ คือ มุมกองของวัสดุขณะอยู่นิ่ง (static angle of repose)

H คือ ความสูงของกองวัสดุ (cm)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของฐาน (cm)

(ค) ความชื้น (moisture content)

$$\text{ความชื้น} \quad MC_w = \frac{M_{s1} - M_{s2}}{M_{s1}} \times 100$$

เมื่อ MC_w คือ ความชื้นของดินเปียก (%w.b.)

M_{s1} คือ มวลของดินก่อนอบแห้ง (g)

M_{s2} คือ มวลของดินหลังอบแห้ง (g)

(ง) ประสิทธิภาพการเจาะหลุมของหัวเจาะซึ่งประกอบด้วย

(ง.1) ประสิทธิภาพทางกว้าง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพทางกว้าง} = \frac{W_m}{W_t} \times 100$$

เมื่อ ประสิทธิภาพทางกว้าง (%)

W_m คือ ความกว้างของหลุมจริง (mm)

W_t คือ ความกว้างของหลุมทางทฤษฎี (mm)

(ง.2) ประสิทธิภาพทางยาว สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพทางยาว} = \frac{L_m}{L_t} \times 100$$

เมื่อ ประสิทธิภาพทางยาว (%)

L_m คือ ความยาวของหลุมจริง (mm)

L_t คือ ความยาวของหลุมทางทฤษฎี (mm)

(จ) ประสิทธิภาพรวมการเจาะหลุมของหัวเจาะ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ
 ประสิทธิภาพรวม = ประสิทธิภาพทางกว้าง × ประสิทธิภาพทางยาว × สภาพของหลุม

(ฉ) คุณภาพของการหยอดปุ๋ย

$$\text{คุณภาพของการหยอดปุ๋ย} = \frac{M_{f1} - M_{f2}}{M_{f1}} \times 100$$

เมื่อ คุณภาพการหยอดปุ๋ย (%)

M_{f1} คือ ปริมาณปุ๋ยทางทฤษฎี (g)

M_{f2} คือ ปริมาณปุ๋ยจริง (g)

(ช) ความสามารถในการทำงานประสิทธิผล (effective area capacity)

$$C_a = \frac{A}{T_t}$$

เมื่อ C_a คือ ความสามารถในการทำงานจริง (rai/h)

A คือ พื้นที่การทำงาน (rai)

T_t คือ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด (h)

(ซ) ประสิทธิภาพในการทำงาน (field efficiency)

$$E_f = \frac{T_e}{T_t} \times 100$$

เมื่อ E_f คือ ประสิทธิภาพการทำงาน (%)

T_e คือ เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง (h)

(ณ) การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (fuel consumption)

$$\text{การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง} = \frac{M_{fuel}}{T_t}$$

เมื่อ การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (L/h)

M_{fuel} คือ ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมด (L)

(ญ) ความต้องการแรงฉุดลาก (draft requirement)

$$\text{ความต้องการแรงฉุดลาก} = D_t - D_{nl}$$

เมื่อ ความต้องการแรงฉุดลาก (N)

D_t คือ แรงฉุดลากขณะมีภาระ (N)

D_{nl} คือ แรงฉุดลากขณะไม่มีภาระ (N)

(ฎ) การลื่นไถล (slip)

$$\text{การลื่นไถล} = \frac{S_{nl} - S_l}{S_{nl}}$$

เมื่อ การลื่นไถล (%)

S_{nl} คือ ระยะเคลื่อนที่เมื่อไม่มีภาระ (m)

S_l คือ ระยะเคลื่อนที่เมื่อมีภาระ (m)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

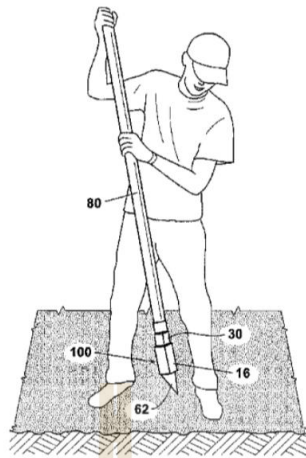
2.5.1 การพัฒนาเครื่องเจาะหลุม

ชัยวัฒน์ และพิชัย (2551) ได้พัฒนาเครื่องเจาะดินสำหรับปลูกต้นไม้ขนาดเล็ก เพื่อลดต้นทุนและความเมื่อยล้าระหว่างขุดดิน โดยเครื่องเจาะดินจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการส่งกำลังไปยังเฟืองทด แล้วส่งต่อไปยังเพลลาและหัวเจาะดินที่ติดอยู่ปลายเพลลา เพื่อปรับความเร็วรอบได้ตามต้องการ จากผลการทดสอบ พบว่า เครื่องเจาะหลุมได้หลุมที่มีความกว้าง 10 cm และความลึก 15 cm ซึ่งใช้เวลาเร็วกว่าการขุดดินด้วยเสียม 26.5 s สามารถเจาะหลุมและพรวนดินได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

Adrian et al. (2017) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องปลูกและใส่ปุ๋ยต้นไม้ด้วยมือ เครื่องมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกยาว โดยส่วนปลายที่หัวเจาะดินเป็นเหล็กเรียวยแหลม ทำงานโดยออกแรงกดหัวเจาะดินให้กระทบกับผิวดินและเกิดการหมุนกลิ้งของหัวเจาะดิน ใส่เมล็ดหรือปุ๋ยลงในปล่องที่อยู่ด้านในที่ถูกดันออกมาด้านนอก เมื่อลูกสูบที่อยู่บนหัวเจาะดินเกิดการคลายตัว ลูกสูบจะหมุนกลับในทิศตรงข้ามทำการปล่อยเมล็ดหรือปุ๋ย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



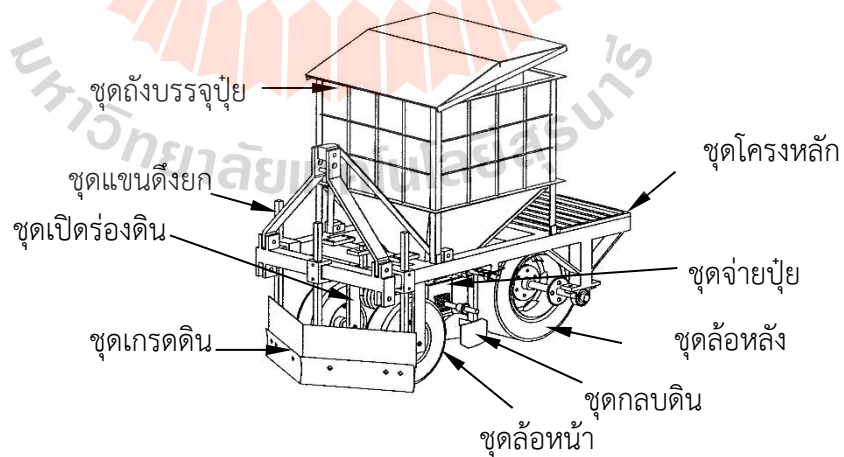
รูปที่ 2.8 เครื่องเจาะดินสำหรับปลูกต้นไม้ขนาดเล็ก



รูปที่ 2.9 เครื่องปลูกและใส่ปุ๋ยต้นไม้ด้วยมือ

2.5.2 การพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ย

มงคล และยงยุทธ (2547) พัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยต้นยางพาราต้นแบบที่มีลักษณะใช้ต่อพ่วงสามจุดกับรถแทรกเตอร์ ใช้ผู้ปฏิบัติงานคนเดียว การโรยปุ๋ยใช้หลักการของลูกกลิ้งเซาะร่อง ซึ่งสามารถจ่ายปุ๋ยได้ 36.5 kg/rai และมีความสามารถในการทำงานจริงเชิงพื้นที่ 13 rai/h ที่ความเร็วของรถแทรกเตอร์ 3 km/h ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่องโรยปุ๋ยยางพาราต้นแบบ

ภาคเอกชนได้มีการพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาด 40-105 แรงม้า โดยใช้หลักการพรวนดิน เปิดร่อง โรยปุ๋ย และกลบปุ๋ย เมื่อต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ขนาด 60 แรงม้า ปฏิบัติงานในสภาพดินปกติ เครื่องใส่ปุ๋ยสามารถทำงานได้ประมาณ 1,700 ต้นต่อชั่วโมง ด้วยความเร็ว 4.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.11



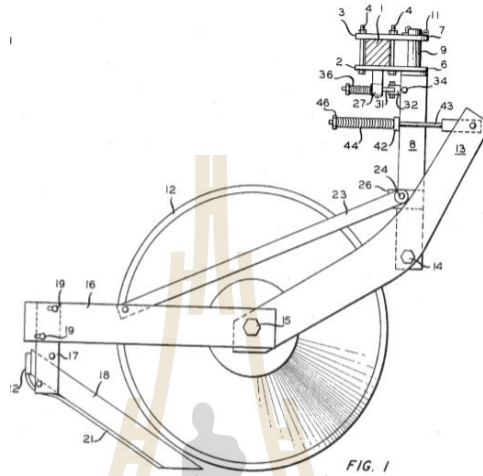
รูปที่ 2.11 เครื่องใส่ปุ๋ยสำหรับรถแทรกเตอร์ของภาคเอกชน

มงคล (2552) พัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราชิ้นใหม่ให้เหมาะกับเกษตรกรสวนยางรายย่อยซึ่งใช้รถไถเดินตามเป็นต้นกำลังลากจูงและใช้ผู้ปฏิบัติงานคนเดียว การโรยปุ๋ยใช้หลักการเปิดร่องและกลบร่องโดยจานไถขนาดเล็กสองจาน ซึ่งสามารถจ่ายปุ๋ยได้ 16.3 กิโลกรัมต่อระยะทางที่เครื่องเคลื่อนที่ได้ 100 เมตร และมีความสามารถในการทำงานจริงเชิงพื้นที่ 14.3 ไร่ต่อชั่วโมง ที่ความเร็วของรถไถเดินตาม 1.5 เมตรต่อวินาทีดังแสดงในรูปที่ 2.12



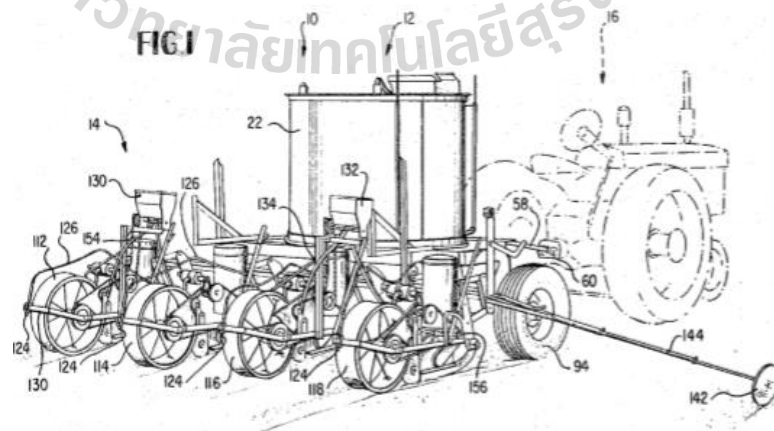
รูปที่ 2.12 เครื่องโรยปุ๋ยอย่างพารา

Moran (1967) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องปล่อยปุ๋ย ประกอบด้วยมีดไถพรวนดินซึ่งอยู่ด้านหน้าสุดทำหน้าที่เปิดร่องดิน เชื่อมติดกับหลอดสำหรับลำเลียงปุ๋ยชนิดเหลวซึ่งอยู่ด้านหลังของมีดไถพรวนทำหน้าที่ปล่อยปุ๋ยลงร่องดินที่เปิดอยู่ และชุดบดดินสำหรับปิดร่องดินซึ่งยึดติดกับโครงและมีดไถพรวน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



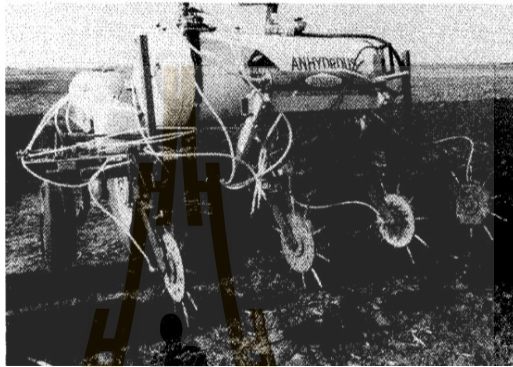
รูปที่ 2.13 เครื่องปล่อยปุ๋ย

Funk (1967) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องใส่ปุ๋ยแบบ 4 แถว ประกอบไปด้วยล้อที่มีแกน นิวมเมติกและล้อเลื่อนแบบโรเลตแบบหมุนได้บนเพลา มีดไถพรวนดินซึ่งอยู่ด้านหน้าสุดทำหน้าที่เปิดร่องดิน ถังบรรจุปุ๋ยขนาดใหญ่เชื่อมกับท่อลำเลียงปุ๋ยที่อยู่ทางด้านหน้าล้อบดล้อเพื่อลำเลียงและปล่อยปุ๋ยลงสู่ร่องดินที่เปิด ตัวบดดินที่อยู่ด้านหลังถังบรรจุทำหน้าที่บดดินเพื่อปิดร่องดินหลังใส่ปุ๋ยเสร็จแล้ว นอกจากนี้ยังมีงานที่ยื่นออกไปด้านข้างเพื่อเป็นตัวแบ่งแถวอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.14



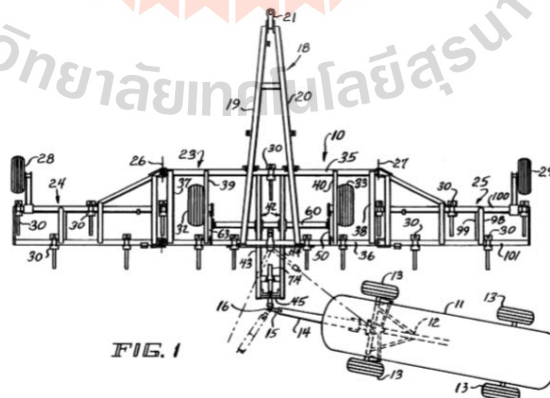
รูปที่ 2.14 เครื่องใส่ปุ๋ยแบบ 4 แถว

Baker et al (1989) ได้พัฒนาเครื่องพ่นปุ๋ยไนโตรเจน โดยพัฒนาระบบการกลั่นและการทดสอบสามารถฉีดพ่นปุ๋ยในแนวแถวกว้างประมาณ 10 cm. (4 in) ได้ผิวดินมีระยะห่างระหว่างจุดต่อจุด 20 cm. (8 in) ใช้ล้อเลื่อนหนึ่งแถวต่อแถวเพาะปลูกโดยมีระยะห่างระหว่างล้อกับล้อเฉลี่ย 76 cm. (30 in) ข้อดีของเครื่องพ่นปุ๋ยมีความต้องการพลังงานต่ำ ลดเวลาในการทำงานและตำแหน่งสำหรับการให้ปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



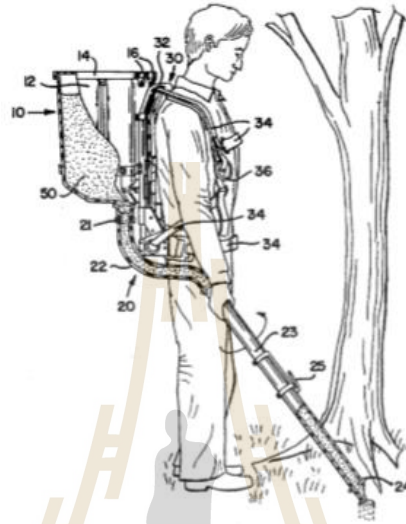
รูปที่ 2.15 เครื่องพ่นปุ๋ยไนโตรเจน

Gaylen and William (1994) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องปล่อยปุ๋ยแอมโมเนีย โดยมีการเว้นระยะห่างระหว่างชุดใบมีด รวมถึงโครงยึดถึงบรรจุซึ่งอยู่ด้านหลังของโครงเครื่อง ด้านล่างของโครงเครื่องประกอบไปด้วยล้อเลื่อน และท่อลำเลียงสำหรับปล่อยปุ๋ยลงพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.16



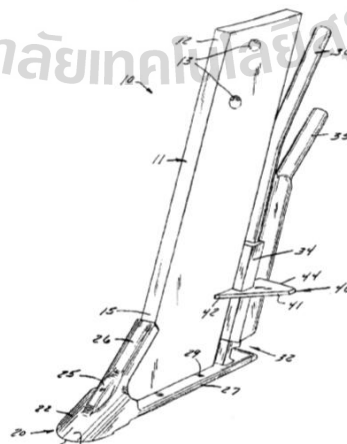
รูปที่ 2.16 เครื่องปล่อยปุ๋ยแอมโมเนีย

Donald (1996) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องใส่ปุ๋ยรากพืชแบบพกพา โดยอาศัยหลักการของแรงโน้มถ่วงและการวางตำแหน่งของท่อ เพื่อควบคุมการไหลของปุ๋ย ซึ่งประกอบด้วยถังใส่ปุ๋ยแบบพกพาที่อยู่ด้านหลังของผู้ใช้งาน และT-stakeที่ติดอยู่ปลายท่อสำหรับล็อกตำแหน่งให้เม็ดปุ๋ยได้ตกลงยังตำแหน่งนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17



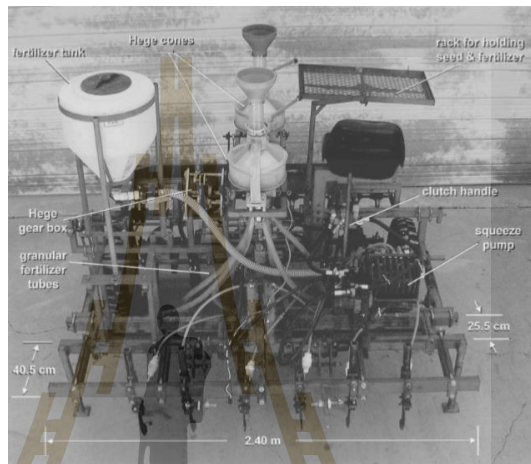
รูปที่ 2.17 เครื่องใส่ปุ๋ยรากพืชแบบพกพา

William (2002) ได้ออกแบบและสร้างผลพรวนสำหรับใส่ปุ๋ยชนิดเหลว โดยใบมีดซึ่งเป็นชิ้นส่วนฐานเชื่อมต่อกับขอบผลไถเพื่อทำเป็นร่องดินเมื่อเคลื่อนที่ผ่านพื้นดิน ซึ่งผลไถถูกออกแบบให้มีลักษณะโค้งมนเพื่อให้ไถดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนด้านหลังของผลไถจะมีหลอดลำเลียงสำหรับปล่อยปุ๋ยชนิดเหลว เพื่อให้ปุ๋ยชนิดเหลวถูกปล่อยลงสู่ร่องดินที่เปิดอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผลไถพรวนสำหรับใส่ปุ๋ยชนิดเหลว

Richard et al (2003) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องเพาะเมล็ดและให้ปุ๋ยชนิดเหลวขนาดเล็ก ประกอบไปด้วยเครื่องมือสำหรับดึงชุดมีดเปิดร่องใส่ปุ๋ย ป้อนสำหรับปล่อยปุ๋ยชนิดเหลว ชั้นวางกรวย สำหรับใส่ปุ๋ยเม็ดหรือเมล็ดพืช ชุดเกียร์คลัช และชุดมีดไถพรวน โดยเครื่องเพาะเมล็ดที่บรรจุเมล็ด ขนาด 794 kg ใช้กำลังรถแทรกเตอร์ขนาด 41 kW ใน 1h สามารถเพาะเมล็ดและให้ปุ๋ย 60 แปลง (ยาว 7-10 m) ในสถานะที่ไม่มีการไถพรวนพร้อมกับใบมีดที่ติดตั้งอยู่ที่แถบเครื่องมือด้านหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 เครื่องเพาะเมล็ดและให้ปุ๋ยชนิดเหลวขนาดเล็ก

James (2005) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับปล่อยปุ๋ยชนิดเหลว โดยประกอบด้วย ถังบรรจุปุ๋ยที่ยึดติดกับโครงยึด ด้านล่างของถังบรรจุปุ๋ยจะมีท่อลำเลียงปุ๋ยแบบสองทางเพื่อแยก จำนวนท่อและตำแหน่งการปล่อยปุ๋ย ดังรูปที่ 2.20

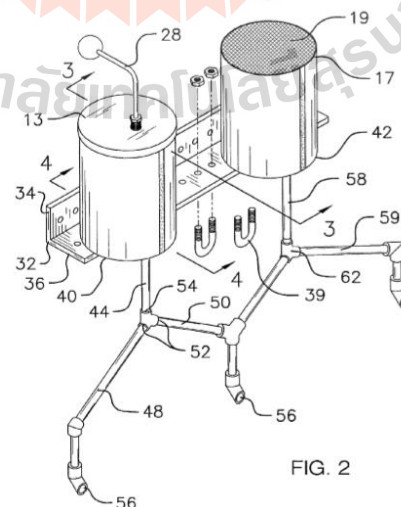
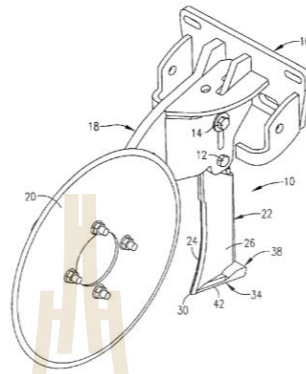


FIG. 2

รูปที่ 2.20 อุปกรณ์สำหรับปล่อยปุ๋ยชนิดเหลว

Jerome (2005) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องปล่อยปุ๋ยชนิดเหลว เมื่อเคลื่อนที่ผ่านพื้นดิน งานมีดทำหน้าที่เปิดร่องดิน ส่วนด้านหลังขาตั้งตรงจะมีช่องลำเลียงปุ๋ยและปล่อยปุ๋ยออกตรงฐานของขาตั้งสองทาง เพื่อให้ปุ๋ยชนิดเหลวถูกปล่อยลงสู่ร่องดินที่เปิดอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



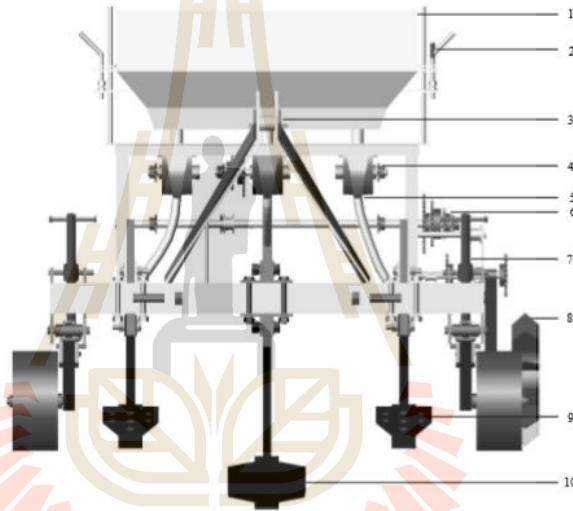
รูปที่ 2.21 เครื่องปล่อยปุ๋ยชนิดเหลว

Jin et al (2010) ได้ออกแบบการประมวลผลด้วยวิธีเกาส์เซียนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องปล่อยปุ๋ย โดยใช้วิธีเกาส์เซียนในการจำแนกอัตราการใส่ปุ๋ยแล้วประมวลผล จากนั้นเพิ่มประสิทธิภาพแบบ Meta model เพื่อปรับพารามิเตอร์และดัชนีที่ดีที่สุด แล้วนำสมการทำนายไปควบคุมการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยให้ปล่อยปุ๋ยได้สม่ำเสมอและมีความแม่นยำ จากการทดสอบในภาคสนามพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากสมการทำนายโดยวิธีเกาส์เซียนกับสัมประสิทธิ์การปล่อยปุ๋ยมีความคลาดเคลื่อน 0.014-0.089 ดังแสดงในรูปที่ 2.22



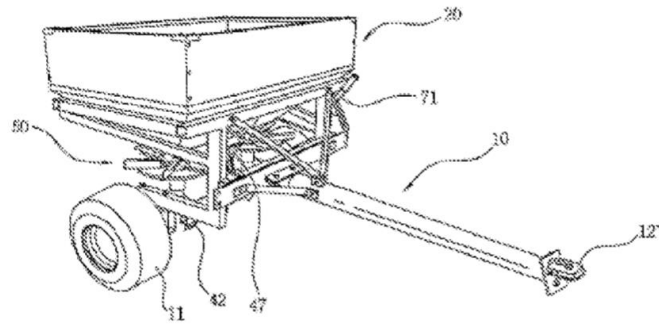
รูปที่ 2.22 เครื่องปล่อยปุ๋ยที่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีเกาส์เซียน

Mandal and Thakur (2010) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องพ่นปุ๋ย โดยประกอบไปด้วย ถังบรรจุปุ๋ยขนาด 100 kg ชุดควบคุมการปล่อยปุ๋ยที่ติดอยู่ด้านข้างของถังบรรจุปุ๋ย ชุดควบคุมความลึก ซึ่งเครื่องนี้ตั้งระดับการปล่อยปุ๋ยได้ถึงความลึกดิน 500 mm เหล็กแกนหลักและเหล็กปีกที่มีท่อลำเลียงปุ๋ยสามารถปรับได้สูงถึง 250 mm ซึ่งจะช่วยให้พ่นปุ๋ยได้ที่ระดับความลึกที่แตกต่างกันตามลักษณะของดิน จากการทดสอบในแปลง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอมากกว่า 90% สำหรับอัตราการพ่นปุ๋ย 250, 500, 750 และ 1,000 kg/rai และตรวจสอบประสิทธิภาพการผลิตของแปลงอ้อย พบว่า ผลผลิตเพิ่มขึ้น 16.2%, 16.4% และ 35.4% เมื่อเทียบกับการไถพรวนแบบดั้งเดิมด้วยการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.23



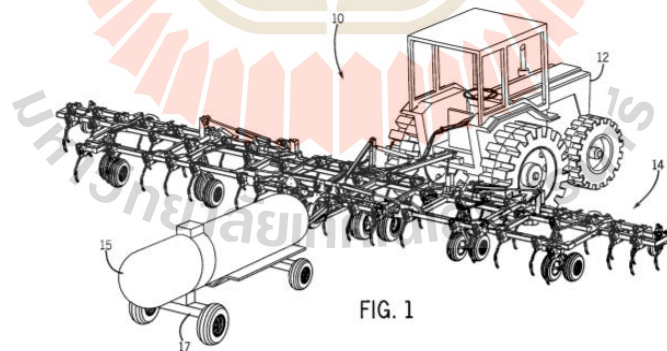
รูปที่ 2.23 เครื่องพ่นปุ๋ย

Kim and Do (2012) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกระจายปุ๋ยแบบสองแถว ซึ่งลากจูงด้วยยานพาหนะ วัวหรือม้าได้ เนื่องจากด้านล่างของเครื่องประกอบด้วยล้อซ้ายและขวาสองล้อในการเคลื่อนที่ของตัวเครื่อง ส่วนด้านบนของเครื่องมีถังใส่ปุ๋ยสองถังติดกัน โดยปากปล่อยบรรจุปุ๋ยด้านล่างจะมีจานและใบพัดควบคุมปริมาณและการกระจายของปุ๋ยลงพื้นดิน ซึ่งถูกควบคุมด้วยชุดเกียร์คลัชที่ยึดติดกับเพลาล้อซ้ายและขวา ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 เครื่องกระจายปุ๋ยแบบสองแถว

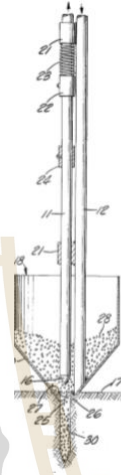
Dean et al (2014) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องพ่นปุ๋ยแบบพับและกางออก เหมาะสำหรับทำงานในพื้นที่กว้างหรือพื้นที่ขนาดใหญ่ มีโครงยึดและส่วนปีกคู่ติดกับปลายโครงยึดซึ่งสามารถพับและกางออกได้ ในตัวปีกแต่ละข้างจะประกอบด้วยล้อสำหรับขับเคลื่อน ใบมีดเพื่อเปิดร่องดินและท่อลำเลียงสำหรับปล่อยปุ๋ยลงในร่องดิน ส่วนด้านหลังของโครงจะมีถังใหญ่สำหรับบรรจุปุ๋ยชนิดเหลว-แก๊ส ซึ่งเครื่องนี้จะส่งกำลังด้วยระบบไฮดรอลิกเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 เครื่องพ่นปุ๋ยแบบพับและกางออก

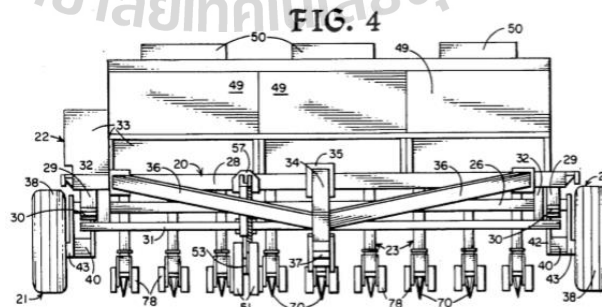
2.5.3 การพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุม

Krarup (1970) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับปล่อยปุ๋ยแบบเจาะหลุม ซึ่งติดตั้งถังที่ปลายด้านล่างสำหรับบรรจุปุ๋ยพร้อมกับแท่งเจาะขนาดเล็กสำหรับเจาะดินทำโพรง เมื่อแท่งเจาะหดกลับปุ๋ยก็จะตกลงในโพรงดินที่เจาะ ดังแสดงในรูปที่ 2.26



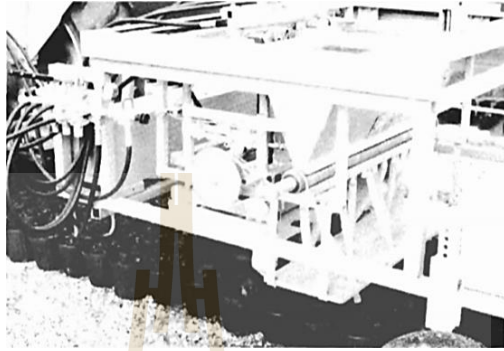
รูปที่ 2.26 อุปกรณ์สำหรับปล่อยปุ๋ยแบบเจาะหลุม

Anderson (1986) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องเจาะหยอดเมล็ดพืชและปุ๋ย ซึ่งควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยล้อที่อยู่ด้านล่างทำหน้าที่การเคลื่อนที่เครื่อง และหัวเจาะหลุมสำหรับเปิดช่องว่างในดินเพื่อรองรับปุ๋ยที่หล่นลงมาจากถังบรรจุ ส่วนโครงด้านบนประกอบด้วยกลไกควบคุมการทำงาน และถังสำหรับบรรจุปุ๋ย ดังแสดงในรูปที่ 2.27



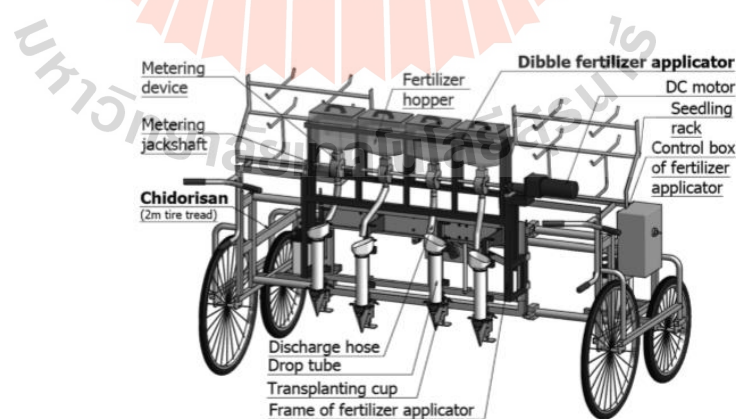
รูปที่ 2.27 เครื่องเจาะหยอดเมล็ดพืชและปุ๋ย

Parish et al (1988) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องหยอดปุ๋ยแบบเจาะหลุมสำหรับต้นไม้นขนาดเล็ก ขับเคลื่อนโดยอาศัยรถแทรกเตอร์ โดยในการทำงาน 1 ครั้ง สามารถเจาะหลุมและหยอดปุ๋ยได้ 12 หลุม ด้วยการควบคุมของระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 เครื่องหยอดปุ๋ยแบบเจาะหลุมสำหรับต้นไม้นขนาดเล็ก

Nang et al (2014) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องปล่อยปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับปลูกผักกาดหอม ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยมอเตอร์ ประกอบไปด้วยถังบรรจุปุ๋ยและหัวเจาะหลุม 4 แถวที่ติดตั้งอยู่ในรถเข็นสี่ล้อ และชุดควบคุมการปล่อยปุ๋ย เมื่อผู้ใช้กดปุ่มเริ่มการทำงาน ต้นผักกาดหอมจะถูกปล่อยพร้อมกับการเจาะหลุม จากนั้นปุ๋ยจะลงมายังถ้วยด้านล่างและลงไปยังหลุมที่เจาะ ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 เครื่องปล่อยปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับปลูกผักกาดหอม

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 รถแทรกเตอร์เกษตร

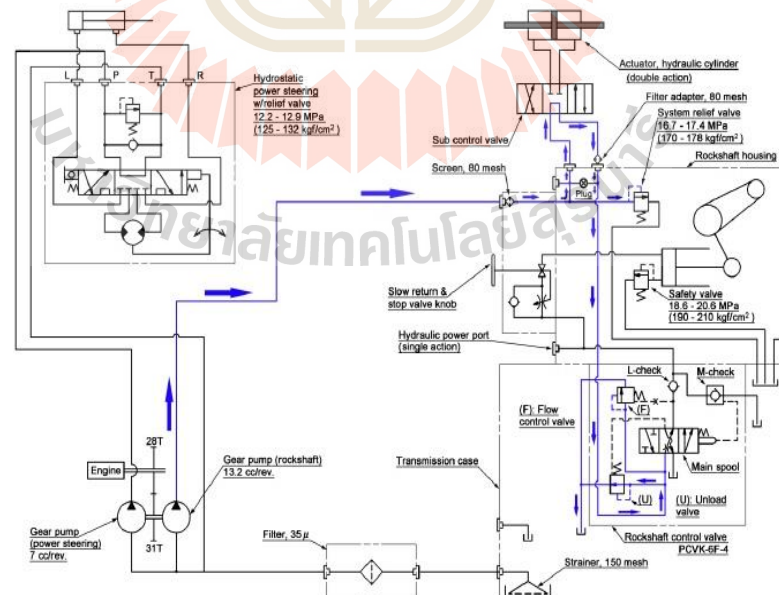
รถแทรกเตอร์เกษตรชนิดขับเคลื่อนแบบ 4WD ขนาด 49 hp (category I) ยี่ห้อ Yanmar รุ่น EF-494T ถูกนำมาใช้เป็นต้นกำลังสำหรับการทดสอบสมรรถนะของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพารา ทั้งในกระบะดินและแปลงเกษตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดทางวิศวกรรมดังแสดงในตารางที่ 3.1 ระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Yanmar รุ่น EF-494T ถูกออกแบบมาใช้สำหรับระบบต่อพ่วงสามจุด ระบบบังคับเลี้ยว และอุปกรณ์ภายนอกของรถได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ปัมป์ไฮดรอลิกเป็นแบบฟันเฟือง (gear pump) สามารถสร้างแรงดันได้ 16.7–17.4 MPa (170–178 kg/cm³) และอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก 32.2 L/min ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,700 rpm ตารางที่ 3.2 แสดงผลการวัดสมรรถนะของระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์รุ่นนี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ในกรณีไม่มีโหลด เมื่อกำหนดความเร็วรอบเครื่องยนต์ไว้ที่ 1,500 rpm ระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์สามารถสร้างอัตราการไหลของน้ำมันได้ 18 L/min



รูปที่ 3.1 รถแทรกเตอร์ชนิดขับเคลื่อนแบบ 4WD ขนาด 49 hp

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Yanmar รุ่น EF-494T

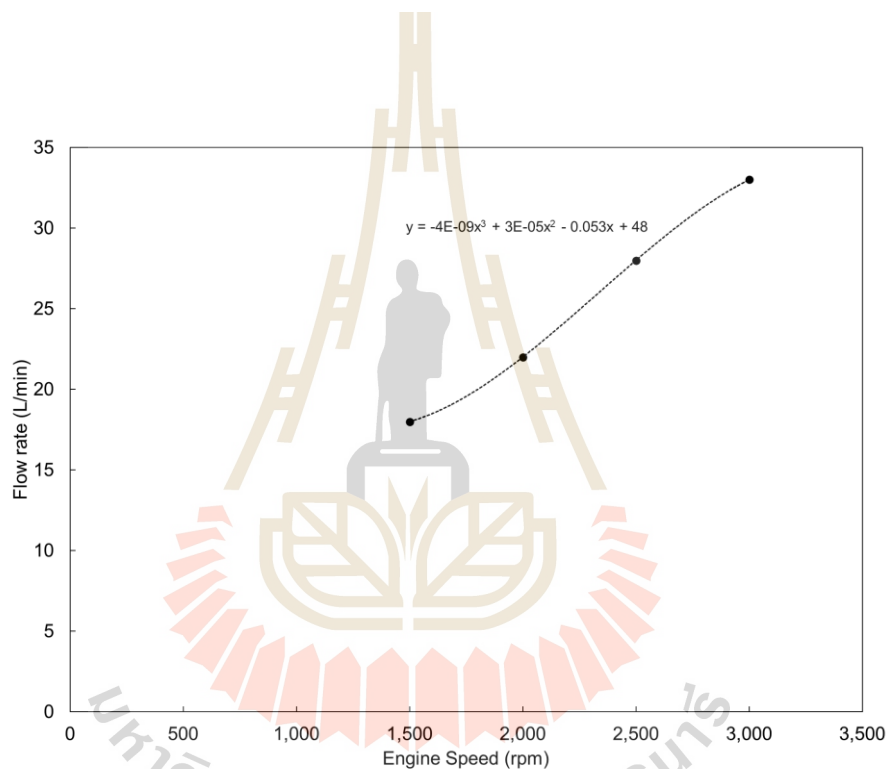
ข้อมูลจำเพาะ	รายละเอียด
เครื่องยนต์	ดีเซล, ระบายความร้อนด้วยน้ำ
แรงม้าสูงสุด (hp) ที่ 2,800 rpm	49
ชนิดเกียร์	Collar shift
จำนวนเกียร์	9 เดินหน้า 9 ถอยหลัง
ขนาดยาง	หน้า 8-16 หลัง 13.6-26
พวงมาลัย	Hydrostatic
ขนาดเพลลาอำนาจกำลัง (in)	SAE 1-3/8" (6 ร่องฟัน)
ความเร็วเพลลาอำนาจกำลัง (rpm)	568/769
อัตราการไหลปั๊มไฮดรอลิก (L/min)	32
ระบบคุมแขนยกอุปกรณ์ 3 จุด	แบบควบคุมตำแหน่ง มาตรฐาน SAE เบอร์ 1
น้ำหนักเฉพาะตัวรถแทรกเตอร์ (kg)	1,540
ยาว x กว้าง x ความยาวฐานล้อ x สูง (mm)	3,230 x 1,605 x 1,830 x 2,355
ความสูงใต้ท้องรถจากพื้น (mm)	375



รูปที่ 3.2 ระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์ Yanmar รุ่น EF-494T

ตารางที่ 3.2 สมรรถนะของระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์ Yanmar รุ่น EF-494T

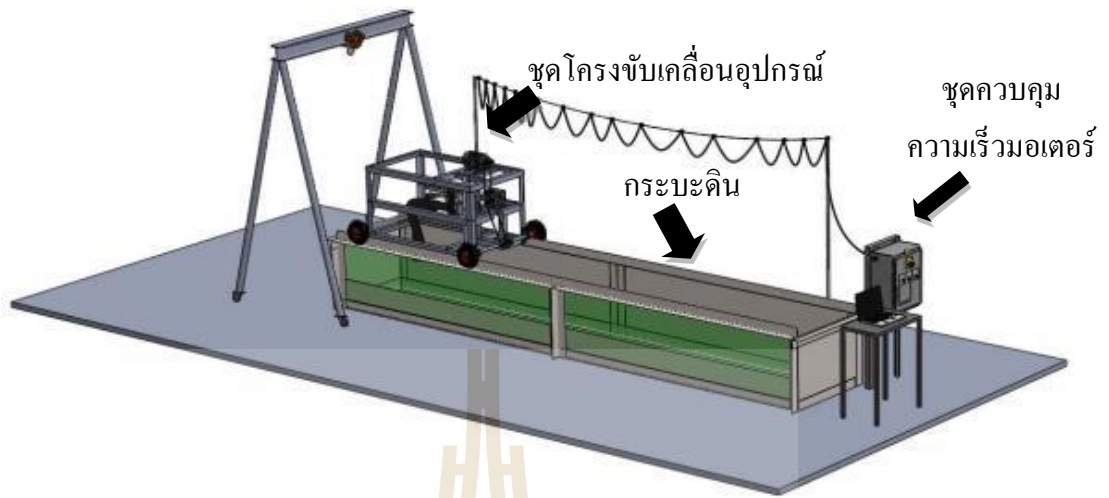
Engine speed (rpm)	Flow rate (L/min)
1,500	18
2,000	22
2,500	28
3,000	33



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบเครื่องยนต์กับอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก

3.1.2 กระบะดิน

กระบะดินเป็นอุปกรณ์ที่บรรจุดินสำหรับการทดสอบเครื่องจักรกลเกษตรและอุปกรณ์ทางการเกษตร กระบะดินในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา มีขนาดขนาดกว้าง 1.3 m ยาว 6.0 m และสูง 0.6 m รูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงลักษณะและส่วนประกอบที่สำคัญของกระบะดินสำหรับการทดสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงทางการเกษตร ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ กระบะดิน (soil bin) และชุดโครงขับเคลื่อนอุปกรณ์ (equipment carriage)



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของชุดทดลองกระบะดินสำหรับการทดสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงทางการเกษตร



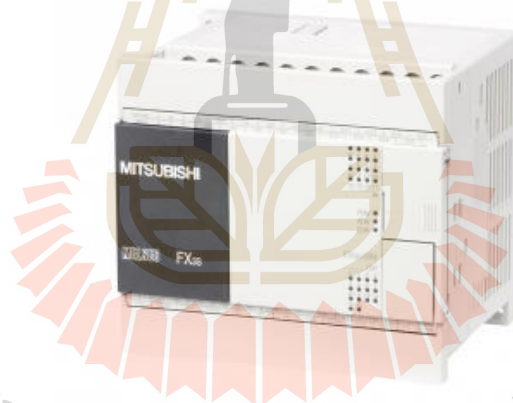
รูปที่ 3.5 กระบะดิน

กระบะดินจะเป็นส่วนที่บรรจุดินซึ่งใช้ในการทดสอบกับอุปกรณ์หรือเครื่องมือประเภทต่างๆ ทำให้ผู้ใช้สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ อาทิเช่น ความชื้น ความแข็ง ชนิดของดิน ฯลฯ ซึ่งมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องมือได้อย่างถูกต้อง ส่วนบนของกระบะดินจะมีลักษณะเป็นรางสำหรับให้ล้อยางของชุดโครงขับเคลื่อนอุปกรณ์วิ่งไปตามทิศทางที่กำหนด

ชุดโครงขับเคลื่อนอุปกรณ์ ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการฉุดลากอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่คล้ายกับอุปกรณ์กำลังปฏิบัติงานในแปลงทดสอบจริง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวต้นกำลัง ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ บนชุดโครงขับเคลื่อนจะมีจุดต่อพ่วงสำหรับการต่อพ่วงเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบเช่นเดียวกับการต่อพ่วงจริงกับจุดต่อพ่วงของรถแทรกเตอร์หรือรถไถเดินตาม

3.1.3 PLC

PLC ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FX3S-30MT/DS ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการเจาะหลุมและปล่อยปุ๋ยลงหลุม โดยมีรายละเอียดทางวิศวกรรมดังแสดงในตารางที่ 3.3



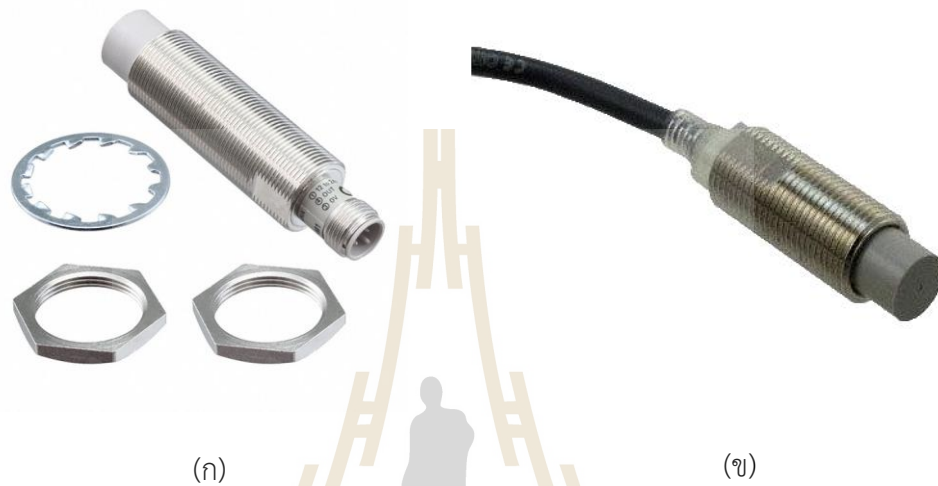
รูปที่ 3.6 PLC สำหรับเครื่องใส่ปุ๋ยยางพารา

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลจำเพาะของ PLC ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FX3S-30MT/DS

ข้อมูลจำเพาะ	รายละเอียด
แรงดันไฟฟ้า (V)	24, DC
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน (W)	8.5
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)	20
ช่วงอุณหภูมิในการทำงาน (°C)	0-55
ช่วงความชื้นในการทำงาน (%)	5-95

3.1.4 ฟร็อกซิมิตีเซ็นเซอร์

ฟร็อกซิมิตีเซ็นเซอร์แบบเหนียวยี่ห้อ Omron รุ่น E2E2-X10MC1 และรุ่น E2E-X5ME1 นำถูกนำมาใช้เพื่อวัดตำแหน่งของลูกเบี้ยว และควบคุมการเจาะหลุมของเครื่องใส่ปุ๋ย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 สัญญาณจากเซ็นเซอร์จะถูกตรวจจับด้วย PLC



รูปที่ 3.7 ฟร็อกซิมิตีเซ็นเซอร์ยี่ห้อ Omron (ก) รุ่น E2E2-X10MC1 (ข) รุ่น E2E-X5ME1

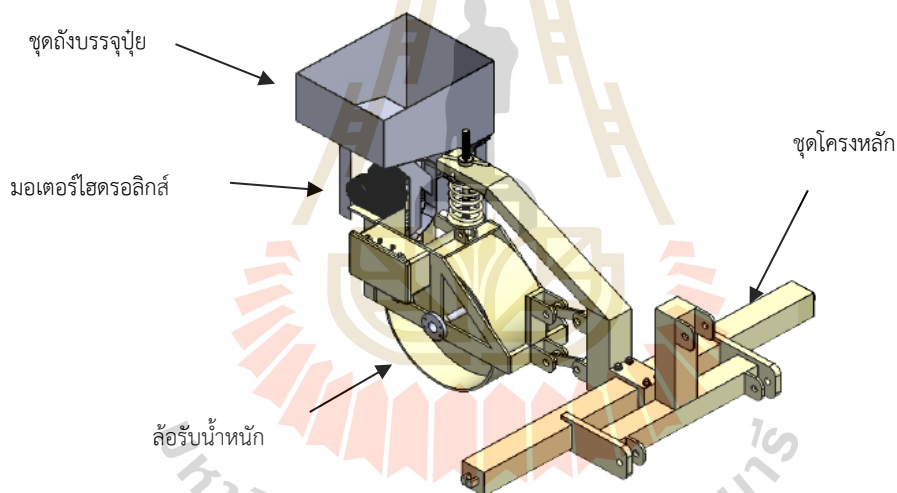
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การออกแบบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ

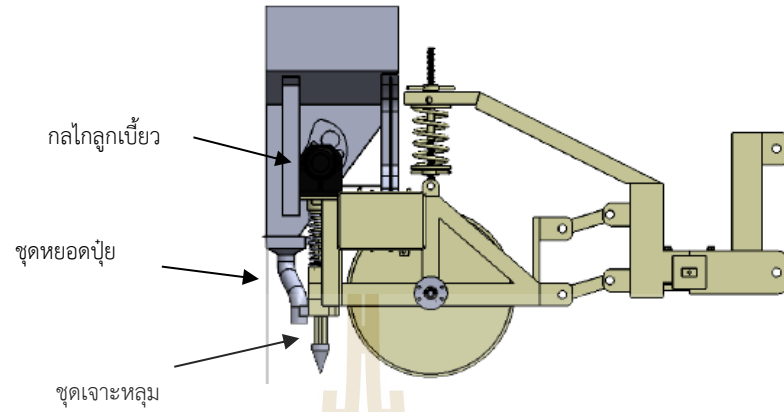
เครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ชุดเจาะหลุม ชุดหยอดปุ๋ย และชุดควบคุมอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 หัวเจาะทำจากเหล็กปลายแหลมรูปกรวยซึ่งจะถูกขับด้วยมอเตอร์ไฮดรอลิกส์และกลไกลูกเบี้ยวเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้ด้วยความเร็วสูง หัวเจาะจะเจาะหลุมให้มีความลึกประมาณ 7-10 เซนติเมตร ในการเจาะหลุมจะไม่ทำลายหรือตัดรากต้นยางพารา (ไม่ใช่การขุดหลุม) โดยมีระยะห่างระหว่างหลุมประมาณ 0.5 เมตร (สามารถปรับเปลี่ยนได้) ชุดหยอดปุ๋ยจะประกอบด้วยถังใส่ปุ๋ย ชุดกำหนดปริมาณปุ๋ย และชุดกลบหลุม ชุดกำหนดปริมาณปุ๋ยจะทำหน้าที่กำหนดปริมาณปุ๋ยในการปล่อยลงหลุมแต่ละครั้ง (สามารถปรับปริมาณปุ๋ยได้) โดยจะหยอดปุ๋ยให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และระยะการเจาะหลุม ชุดกลบหลุมจะเคลื่อนที่ตามหัวเจาะหลุมเพื่อดันดินกลบหลุม ชุดควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งจะประกอบด้วย วาล์วควบคุมทิศทาง เซ็นเซอร์ รีเลย์สวิตช์ ไทม์เมอร์ แบตเตอรี่

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของชุดเจาะหลุมและชุดหยอดปุ๋ยให้สอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9

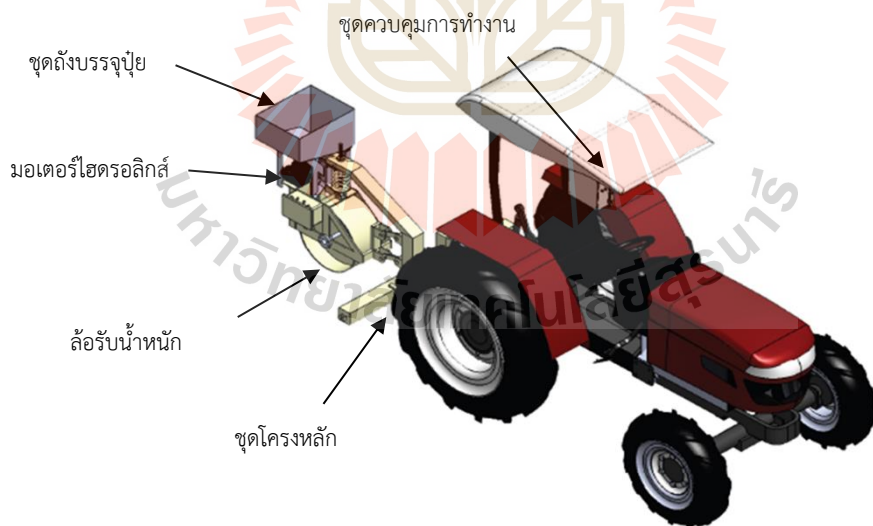
เครื่องใส่ปุ๋ยจะถูกออกแบบให้ต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กด้วยการต่อพ่วงแบบสามจุด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และกำหนดให้อุปกรณ์หลักทำงานสัมพันธ์กันโดยรับกำลังมาจากระบบไฮดรอลิกส์ของรถแทรกเตอร์ และไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยมีลักษณะการทำงานดังนี้ เมื่อเกษตรกรให้เครื่องทำงานชุดเจาะหลุมจะถูกสั่งการให้ทำงานตามระยะที่ผู้ใช้งานกำหนดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งสั่งการให้ชุดหยอดปุ๋ยปล่อยปุ๋ยในปริมาณที่ต้องการ เมื่อรถแทรกเตอร์เลี้ยวบริเวณหัวแปลง จะต้องยกแขนพ่วงขึ้นจากพื้นเพื่อตัดการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ย และเมื่อวางแขนพ่วงลงในแปลงต่อไปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็จะสั่งการให้ทำงานต่อจนกว่าจะกดปุ่มหยุดการทำงาน คอมพิวเตอร์ก็จะถูกปิดเครื่อง



รูปที่ 3.8 แบบจำลองเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหยอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3.9 แบบจำลองชุดเจาะหลุมและชุดหยอดปุ๋ยของเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหยอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3.10 แบบจำลองการต่อพ่วงเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพารากับรถแทรกเตอร์

3.2.2 การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ

ในกระบะดิน

การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพารากระทำในกระบะดินขนาดกว้าง 1.3 m ยาว 6.0 m และสูง 0.6 m โดยการเจาะหลุมและใส่ปุ๋ยจำนวน 5 หลุม ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 ถูกนำมาใช้ในการทดสอบ โดยมีรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดเม็ดเฉลี่ยเท่ากับ 2.7 mm และความหนาแน่นรวม (bulk density) เท่ากับ 829.3 kg/m^3 และความหนาแน่นเนื้อ (apparent density) เท่ากับ $1,869.7 \text{ kg/m}^3$ มุมกองพื้นประมาณ 18° ดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ซึ่งมีลักษณะของเนื้อดินประกอบด้วย sand 74%, silt 12% และ clay 14% และเมื่อดินมีความชื้นเฉลี่ย 9 % (w.b.) ดินจะมีดัชนีความแข็งเฉลี่ยที่ระดับความลึก 0, 5, 10, 15 และ 20 cm เท่ากับ 506.7 ± 49.0 , 397.7 ± 57.2 , 305.1 ± 40.9 , 256.1 ± 32.7 และ $250.6 \pm 45.5 \text{ kPa}$ ตามลำดับ

เครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราถูกต่อพ่วงเข้ากับรถแทรกเตอร์เกษตร ชุดเจาะหลุมรับกำลังจากระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง เมื่อกำหนดตำแหน่งเกียร์ของรถแทรกเตอร์ที่ 1L และความเร็รรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 1,000 rpm จะทำให้รถแทรกเตอร์มีความเร็วในการเคลื่อนที่ประมาณ 0.16 m/s ดังนั้นความเร็วในการทดสอบจึงถูกกำหนดไว้เท่ากับความเร็วนี้

การทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพารา เริ่มจากการกำหนดปริมาณปุ๋ยที่จะใส่ในแต่ละหลุม จากนั้นเครื่องใส่ปุ๋ยจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมกับเจาะหลุมและปล่อยปุ๋ยลงในหลุม ต่อมาลูกเบี้ยวจะถูกลดความเร็วลง ระบบควบคุมตรวจสอบเป้าหมายของการทำงาน หากยังไม่ถึงเป้าหมายจะเริ่มการเคลื่อนที่เพื่อเจาะหลุมใหม่อีกครั้ง จนกว่าจะได้ถึงเป้าหมายที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.11

การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราถูกวางแผนเป็นแบบแฟคตอเรียลแบบสุ่มสมบูรณ์ (complete randomized factorial design) โดยวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (two-way ANOVA) เพื่อศึกษาผลของความชื้นดินและระยะห่างระหว่างหลุมต่อปริมาตรหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ย ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยถูกเปรียบเทียบโดยใช้วิธี turkey's honestly significant different (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ด้วยโปรแกรม minitab® 17

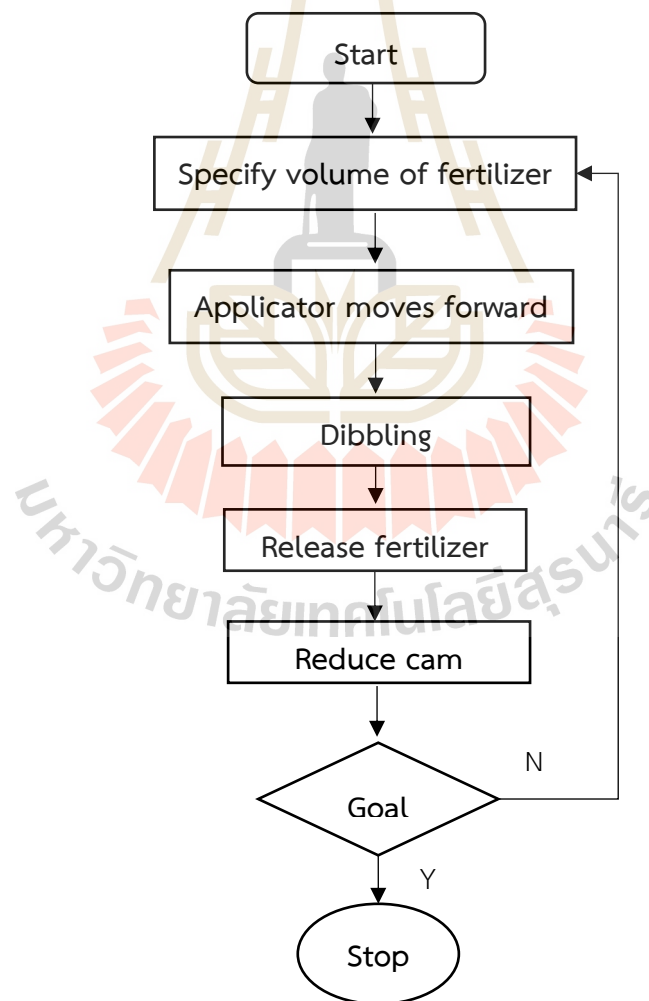
3.2.3 การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติภาคสนาม

(ก) การทดสอบในแปลงเกษตร

การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพารากระทำในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งดินมีสมบัติดังนี้ sand 79.84% silt 14.00% clay 2.16 % ประเภทเนื้อดินเป็นแบบ loamy sand มีดัชนีความแข็งดินดังแสดงในรูปที่ 3.13 การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยถูกกระทำ 2 แบบ คือ การทดสอบเพื่อหาขนาดหลุมและคุณภาพของการหยอดปุ๋ย และการทดสอบเพื่อ

หาสมรรถนะการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ย ในการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ย ตำแหน่งเกียร์ของรถแทรกเตอร์ ถูกกำหนดที่ 1L และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 1,000 rpm การทดสอบเพื่อหาขนาดหลุม และคุณภาพของการหยอดปุ๋ยของเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราในแปลงเกษตร ทำโดยกำหนดให้รถแทรกเตอร์จุดลากเครื่องใส่ปุ๋ยเป็นระยะทาง 10 m จากนั้นสู่วัดขนาดหลุมและปริมาณปุ๋ยที่อยู่นอกหลุมจำนวน 5 หลุม การทดสอบถูกกระทำซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ ดังแสดงรูปที่ 3.14 และ 3.15

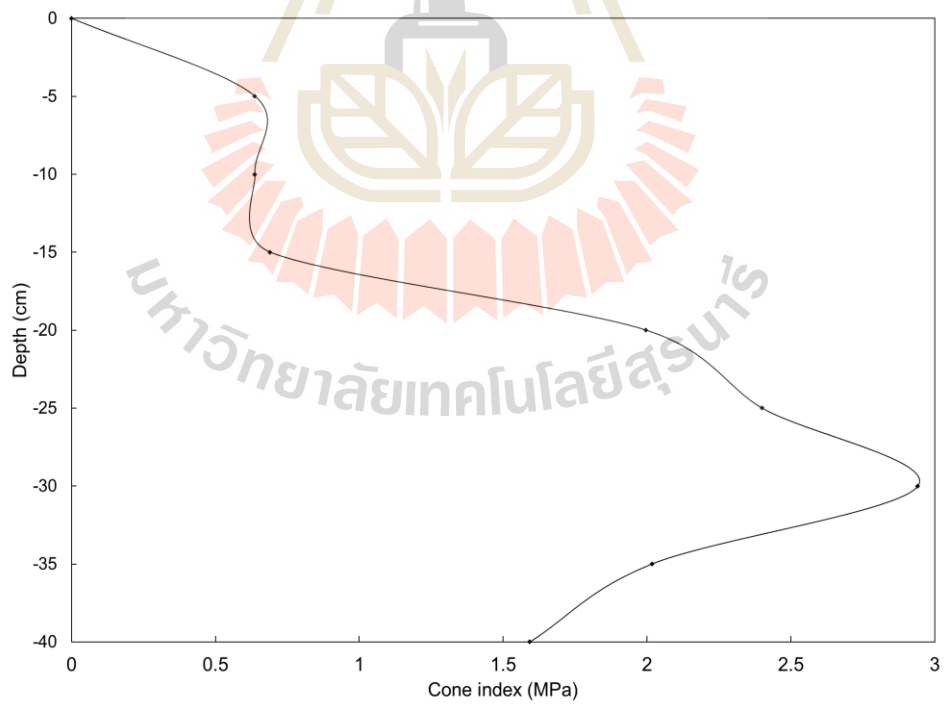
การทดสอบเพื่อหาสมรรถนะในการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราในแปลงเกษตรทำการจำลองการใส่ปุ๋ยต้นยางพาราจำนวน 3 แถว แถวละ 6 ต้น โดยมีระยะห่างระหว่างแถวและระยะห่างระหว่างต้นเท่ากับ 6 m และ 3 m ตามลำดับ เมื่อกำหนดความต้องการปุ๋ยของต้นยางพาราที่เปิดกรีดต่อต้นแล้วจำนวน 500 g ดังนั้นเครื่องใส่ปุ๋ยต้องเจาะหลุมจำนวน 76 หลุม รูปแบบการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยถึงถูกออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.16 ถึง 3.18



รูปที่ 3.11 Procedure of the dibbling fertilizer applicator



รูปที่ 3.12 สภาพแปลงทดสอบ



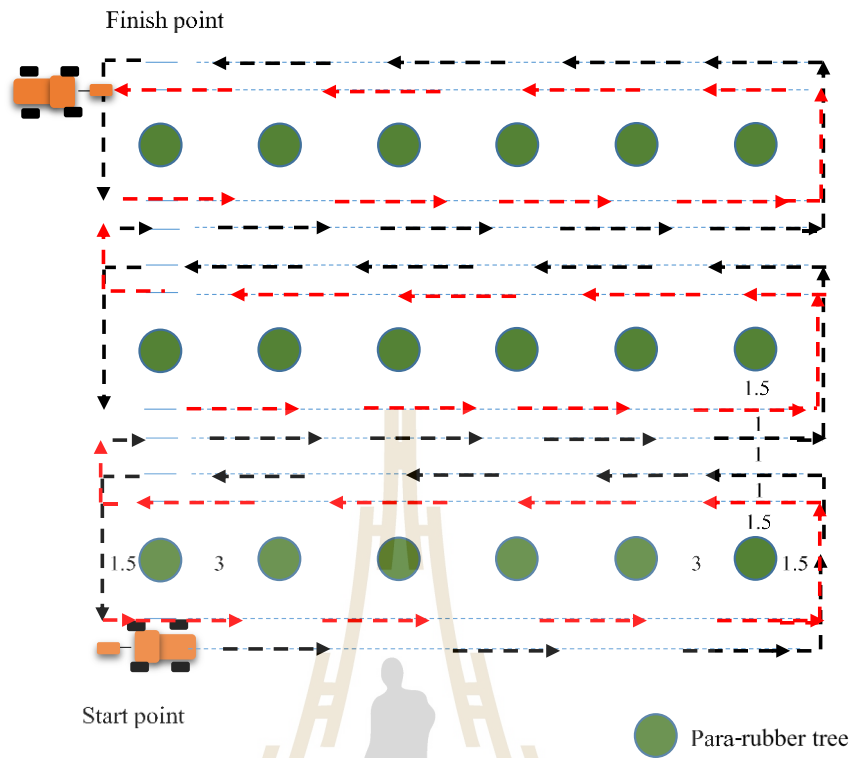
รูปที่ 3.13 ดัชนีความแข็งดินในแปลงทดสอบ



รูปที่ 3.14 การติดตั้งเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมกับรถแทรกเตอร์



รูปที่ 3.15 การเตรียมอุปกรณ์และแปลงทดสอบ



รูปที่ 3.16 รูปแบบการใส่ปุ๋ยในแปลงทดสอบ



รูปที่ 3.17 การเตรียมแปลงทดสอบสำหรับการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ย



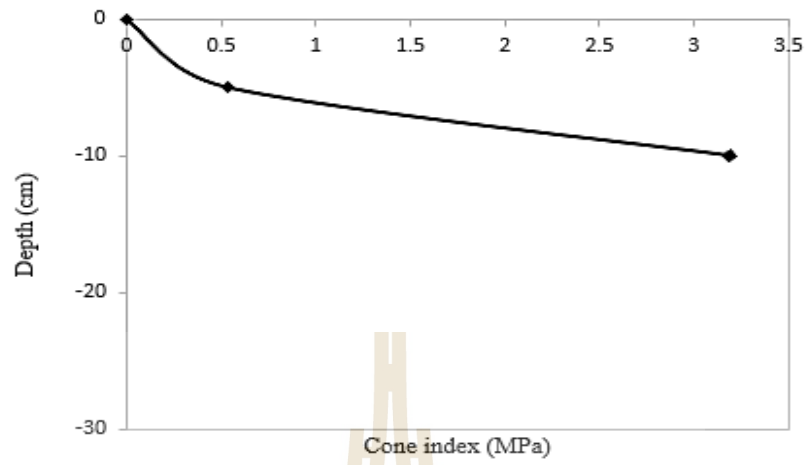
รูปที่ 3.18 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องไถปุ๋ยในแปลงทดสอบ

(ข) การทดสอบในแปลงยางพารา

การทดสอบเพื่อหาขนาดหลุมและคุณภาพของการหยอดปุ๋ยของเครื่องไถปุ๋ยยางพารากระทำอีกครั้งในแปลงยางพาราของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.19 เนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทราย (sandy loam) โดยมีดัชนีความแข็งของดินที่ระดับความลึก 10 cm เท่ากับ 3.18 MPa ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และมีความชื้น 8 % (w.b.) โดยกำหนดให้รถแทรกเตอร์ฉุดลากเครื่องไถปุ๋ยเป็นระยะทาง 10 m จากนั้นสุ่มวัดขนาดหลุมและปริมาณปุ๋ยที่อยู่นอกหลุมจำนวน 5 หลุม การทดสอบถูกกระทำซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ ดังแสดงรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.19 สภาพแปลงยางพาราของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.20 ดัชนีความแข็งดินในแปลงยางพารา



รูปที่ 3.21 การทดสอบในแปลงยางพาราของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

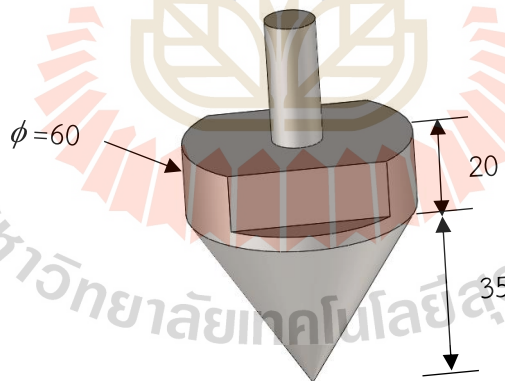
บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 ผลการออกแบบเครื่องใส่ปุ๋ยทางพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ

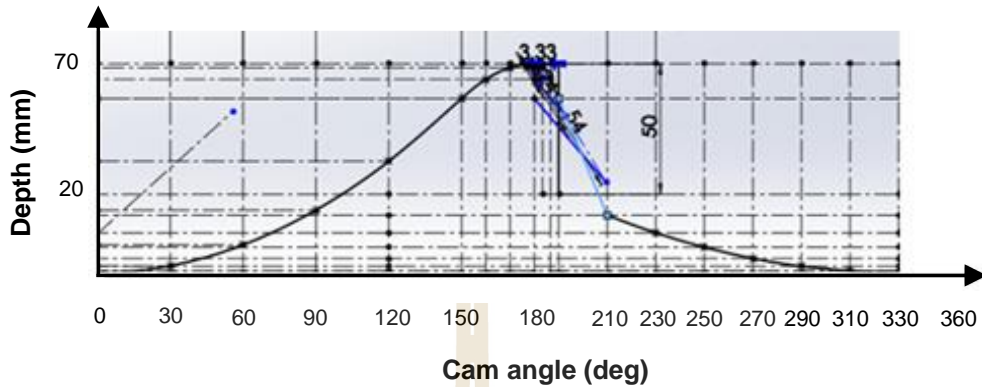
4.1.1 ชุดเจาะหลุมแบบกลไกลูกเบี้ยว

ชุดเจาะหลุมจะประกอบไปด้วย ลูกเบี้ยว หัวเจาะ สปริงขดรับแรงกด และชุดนำร่องหัวเจาะ วิธีการเจาะหลุมถูกออกแบบโดยให้อาศัยการทำงานของกลไกลูกเบี้ยวซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฮดรอลิก หัวเจาะมีลักษณะเป็นเหล็กปลายแหลมรูปกรวย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 หัวเจาะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ลงในแนวตั้งด้วยความเร่งคงที่และความหน่วงคงที่ และเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็วคงที่และความหน่วงคงที่ ตามลำดับ รูปร่างและขนาดของลูกเบี้ยว พร้อมทั้งระบบลูกเบี้ยวจะถูกออกแบบคำนวณหาขนาดที่ถูกต้อง และทำการตรวจสอบความปลอดภัยและความถูกต้องด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การเคลื่อนที่ของหัวเจาะถูกกำหนดให้เป็นดังนี้ ช่วง $0-180^\circ$ หัวเจาะเคลื่อนที่ลงด้วยความเร่งคงที่ ช่วง $180-210^\circ$ หัวเจาะถูกยกขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วง $210-330^\circ$ หัวเจาะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความหน่วงคงที่ ช่วง $330-360^\circ$ หัวเจาะหยุดนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



Unit in mm

รูปที่ 4.1 หัวเจาะหลุมของเครื่องใส่ปุ๋ยทางพารา



รูปที่ 4.2 ไดอะแกรมการกระจัดของหัวเจาะหลุม






การสร้างรูปร่างลูกเบี้ยวทำได้โดยอาศัยการกระจัดของตัวตาม โดยเมื่อกำหนดคาร์ซีมีพิตซ์ (pitch radius, R_p) ของลูกเบี้ยวเท่ากับ 89 mm และรัศมีของลูกกลิ้งเท่ากับ 38 mm ทำให้สามารถกำหนดค่านวณคาร์ซีมีฐาน (base radius, R_b) ของลูกเบี้ยวได้เท่ากับ 50 mm และจากการตรวจสอบการเกิดยอดแหลมของลูกเบี้ยวพบว่า รัศมีส่วนโค้ง (radius of curvature, R_c) ของลูกเบี้ยวมีค่าเท่ากับ 74.5 mm ซึ่งมีค่ามากกว่ารัศมีของลูกกลิ้ง ดังนั้นลูกเบี้ยวจะไม่เกิดยอดแหลม

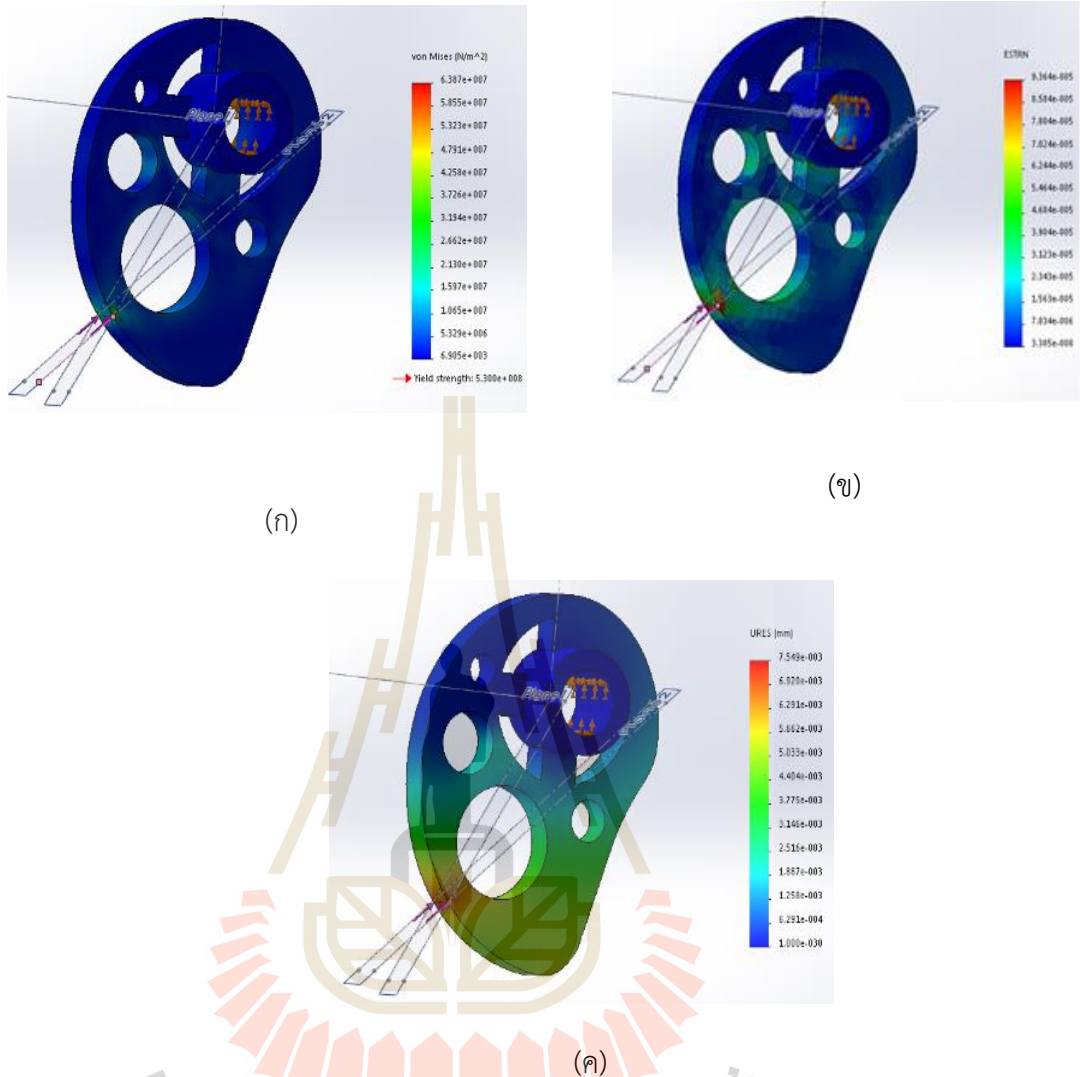
การหาความหนาของลูกเบี้ยวสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าความเค้นสัมผัส (contact stress, σ_c) ระหว่างลูกกลิ้งของตัวตามกับขอบของลูกเบี้ยว จากการคำนวณจะได้ค่าความเค้นสัมผัสเท่ากับ 401 MPa เมื่อเลือกใช้เหล็กกล้า AISI C1045 ทำลูกเบี้ยว ซึ่งมีค่าความเค้นที่จุดคราก $S_y = 530$ MPa และค่าความต้านทานทานผิว $S_e = 483$ MPa ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำลูกเบี้ยวสามารถทนต่อแรงกดที่ผิวได้ การคำนวณหาความหนาของลูกเบี้ยวโดยใช้สูตรแรงกดระหว่างลูกกลิ้งกับลูกเบี้ยว ซึ่งมีแรงกดสูงสุดเท่ากับ 2,099.73 N และความต้านทานทานผิวที่ลูกเบี้ยวรับได้เท่ากับ 483 MPa จะได้พื้นที่รับแรงกดคือ 4.35 mm² จากการทดสอบพบว่าความกว้างของพื้นที่สัมผัสกันมีค่าเท่ากับ 0.5 mm ดังนั้นสามารถคำนวณหาความหนาของลูกเบี้ยวได้คือ 8.694 mm แต่เพื่อความปลอดภัยจึงเลือกใช้ความหนา 20 mm ซึ่งเมื่อคิดค่าความปลอดภัยจะได้เท่ากับ 2.30

ความสมดุลและพลังงานจลน์ของลูกเบี้ยวถูกวิเคราะห์โดยใช้รูปร่างของลูกเบี้ยว 5 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากการตรวจสอบความสมดุลและพลังงานจลน์ของลูกเบี้ยวพบว่า รูปแบบของลูกเบี้ยวแบบที่ 5 มีความเหมาะสมกับการใช้งาน เพราะมีค่าพลังงานจลน์ต่ำที่สุด ซึ่งจะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด การวิเคราะห์ความแข็งแรงของลูกเบี้ยวด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ทำโดยการกำหนดแรงกระทำ $P_n = 1,594.06$ N กระทำที่ลูกเบี้ยวตรงตำแหน่งมุม 150° จากแนวดิ่ง รูปที่ 4.3

แสดงผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ รูป 4.3 (ก) แสดงค่าความเค้น Von mises ที่เกิดบนชิ้นงาน จะมีค่าสูงสุดบนบริเวณที่แรงกระทำคือ 63.87 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า yield strength คือ 530 MPa และค่าความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 8.3 ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหายขณะใช้งาน รูป 4.3 (ข) แสดงค่าความเครียด (strain) ที่เกิดบนชิ้นงาน จะมีค่าสูงสุดบนบริเวณที่แรงกระทำคือ 0.9364 $\mu\epsilon$ ซึ่งมีค่าน้อยมากจนไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน รูป 4.3 (ค) แสดงค่าการยุบตัว (displacement) ที่เกิดบนชิ้นงาน จะมีค่าสูงสุดบนบริเวณที่แรงกระทำคือ 7.549×10^{-3} mm ซึ่งมีค่าการยุบตัวของชิ้นงานน้อยมาก จนไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความสมดุลและพลังงานจลน์ของลูกเบี้ยว

แบบที่	รูปร่างลูกเบี้ยว	ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางมวลและจุดหมุน (mm)	แรงหนีศูนย์กลาง (N)	พลังงานจลน์ในการหยุดลูกเบี้ยว (J)
1		37.14	12.05	0.909
2		42.94	12.06	0.868
3		36.25	11.71	0.875
4		35.22	7.99	0.680
5		30.24	6.43	0.450

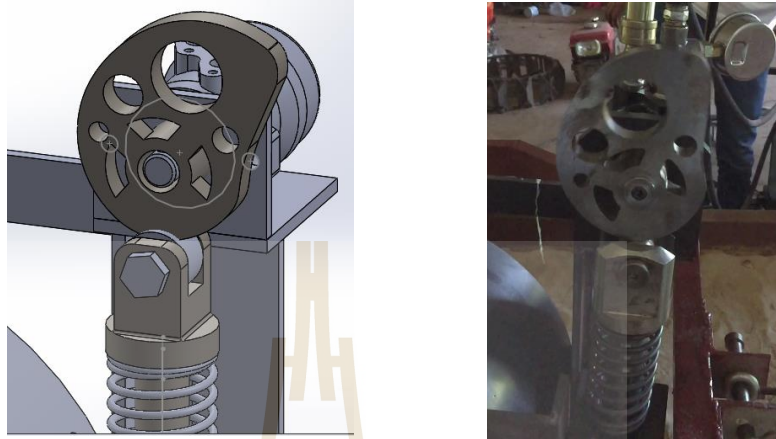


รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของลูกเบี้ยว (ก) ความเค้น (ข) ความเครียด (ค) การยุบตัว

ในการออกแบบสปริงจะกำหนดวัสดุทำสปริง คือ ASTM 230, ระยะยุบตัว 85 mm, แรงกดสปริง 500 N, $C = 10$, ระยะยุบเริ่มต้น 5 mm, แรงยึดเหนี่ยวหัวเจาะของเนื้อดินเฉลี่ย 157 N, แรงต้านจากดิน = 0.88 MPa ผลจากการคำนวณจะได้ ขนาดของลวดสปริง, $d = 8$ mm, ขนาดผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดสปริง, $D = 80$ mm, ค่าดัชนีสปริง, $k = 5.88$ N/mm, จำนวนขดสปริงทั้งหมด, $n_t = 17$ ขด, ความยาวอิสระของขดสปริง, $L_f = 250$ mm, ระยะพิตช์ของขด, $p = 15.6$ mm

สรุปผลการออกแบบกลไกลูกเบี้ยวเป็นดังนี้ รูปร่างของลูกเบี้ยวถูกสร้างตามการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ ลูกเบี้ยวถูกกลมมวลเพื่อลดการสั่นสะเทือน จุดศูนย์กลางมวลของลูกเบี้ยวอยู่ห่างจาก จุดศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ 30.2 mm เมื่อกำหนดให้ลูกเบี้ยวหยุดหมุนอย่างทันที ลูกเบี้ยวจะมี แรง

หนีศูนย์กลางเท่ากับ 6.43 N และพลังงานจลน์เท่ากับ 0.45 J จากการตรวจสอบความแข็งแรงของลูกเบียร์พบว่า ลูกเบียร์มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 8.3 กลไกลูกเบียร์ถูกแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กลไกลูกเบียร์ของชุดเจาะหลุม

จากการทดสอบเจาะหลุมโดยใช้หัวเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm พบว่า เมื่อดินถูกกำหนดความชื้นประมาณ 8-13 % (w.b.) จะได้ความกว้าง ความยาว และความลึกในการเจาะเฉลี่ย 38.5, 37.8 และ 55.7 mm ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยหลุมมีรูปร่างค่อนข้างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดหลุมค่อนข้างเล็กทำให้หยอดปุ๋ยค่อนข้างลำบาก หัวเจาะจึงถูกขยายให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเท่ากับ 60 mm และผลการทดสอบเจาะหลุมถูกแสดงในตารางที่ 4.3 จากการทดสอบพบว่าหัวเจาะแบบใหม่สามารถเจาะหลุมได้กว้าง ยาว และลึกขึ้นเฉลี่ย 63.5, 63.5 และ 53.0 mm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ขนาดของหลุมเมื่อใช้หัวเจาะขนาด 50 mm

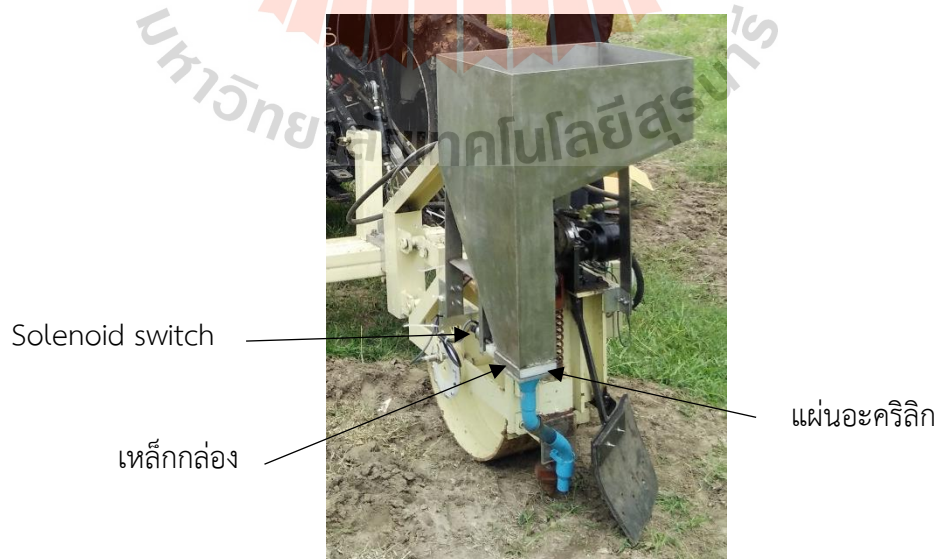
No.	Hole size			Volume of hole (cm ³)
	Width (mm)	Length (mm)	Depth (mm)	
1	41.1	41.3	60.6	26.9
2	42.6	42.0	53.0	24.8
3	31.7	30.1	41.5	10.4
Avg.	38.5	37.8	55.7	20.7

ตารางที่ 4.3 ขนาดของหลุมเมื่อใช้หัวเจาะขนาด 60 mm

No.	Hole size			Volume of hole (cm ³)
	Width (mm)	Length (mm)	Depth (mm)	
1	62.5	62.5	59.7	61.1
2	64.5	64.5	53.0	57.7
3	63.5	63.5	53.0	56.0
Avg.	63.5	63.5	53.0	58.3

4.1.2 ชุดหยอดปุ๋ย

ชุดหยอดปุ๋ยประกอบด้วยถังใส่ปุ๋ย ท่อยางลำเลียง และกลไกกำหนดปริมาณและปล่อยปุ๋ย กลไกนี้ประกอบด้วยเหล็กกล่องสี่เหลี่ยม แผ่นอะคริลิก และ solenoid switch เหล็กกล่องถูกติดตั้งไว้ใต้ถังปุ๋ย โดยถูกเจาะรูด้านบนเพื่อรับปุ๋ยจากถังและรูด้านล่างเพื่อปล่อยปุ๋ย ซึ่งรูทั้งสองจะอยู่เยื้องกัน 10 mm ในแนวตั้ง แผ่นอะคริลิกถูกเจาะตรงกลางให้เป็นช่องว่างสี่เหลี่ยมเพื่อเติมปุ๋ย และถูกติดตั้งไว้ในเหล็กกล่อง โดยสามารถเคลื่อนที่ไปมาในแนวระดับได้ ขณะเริ่มทำงานช่องว่างของแผ่นอะคริลิกจะอยู่ตรงกับรูด้านบนของเหล็กกล่อง ซึ่งจะทำให้มีปุ๋ยเติมอยู่เต็มช่องว่าง เมื่อได้รับสัญญาณให้ปล่อยปุ๋ย PLC จะเปิด solenoid switch เพื่อผลักแผ่นอะคริลิกให้เคลื่อนที่ในแนวระดับพาปุ๋ยปล่อยตรงรูด้านล่างของเหล็กกล่อง ปุ๋ยจะไหลผ่านท่อลงไปยังหลุม หลังจากนั้น PLC จะปิด switch แผ่นอะคริลิกจะถูกผลักกลับด้วยแรงดึงจากสปริง ทำให้ช่องว่างเคลื่อนมาตรงกับรูด้านบนของเหล็กกล่อง



รูปที่ 4.5 ชุดหยอดปุ๋ยของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมอัตโนมัติ

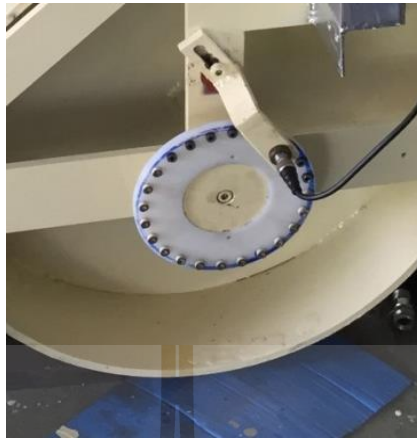
4.1.4 ชุดโครงสร้าง

โครงสร้างของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดโครงหลัก และชุดโครงรอง ชุดโครงหลักทำหน้าที่ต่อเชื่อมกับรถแทรกเตอร์และเชื่อมยึดโครงรองให้อยู่ในแนวระดับด้วยแขนต่อแบบ four bar linkage พร้อมทั้งรองรับแรงสะท้อนกลับจากการเจาะดินของชุดเจาะหลุมด้วยสปริงชดเชยแรงกด นอกจากนี้สปริงจะทำหน้าที่กักล้นรับน้ำหนักให้สัมพันธ์กับพื้นดินป้องกันการกระโดดของล้อขณะชุดเจาะทำงาน ชุดโครงรองจะยึดอุปกรณ์ทั้งหมดของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบหยอดหลุมอัตโนมัติ โดยล้อรองรับน้ำหนักจะสัมพันธ์กับพื้นตลอดเวลา ทำให้ทราบระยะทางในการเคลื่อนที่ และเป็นตัวกำหนดการทำงานของชุดเจาะหลุมโดยการส่งสัญญาณให้ชุดควบคุมสั่งเจาะหลุมตามที่โปรแกรมกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.7

การทดสอบหาระยะห่างระหว่างหลุมกระทำในกระบะดิน ในการทดสอบจะใช้จานอะคริลิกติดบริเวณล้อ และติดตั้งเซนเซอร์แบบพร็อกซิมีตีเพื่อตรวจจับหัวสกรูที่ติดบนจานอะคริลิก โดยจะส่งสัญญาณไปยัง PLC เพื่อทำการเจาะหลุม ดังแสดงรูปที่ 4.8 จานกำหนดระยะห่างระหว่างหลุมนี้ถูกแบ่งมุมออกเป็น 24 มุม มุมละ 15° ผลจากการทดสอบโดยใช้จานเหล็กกำหนดระยะห่างระหว่างหลุม และใช้หัวเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm พบว่า เมื่อตั้งตำแหน่งเซนเซอร์ที่มุม 45° และ 30° จะได้ระยะห่างระหว่างหลุมเฉลี่ยดังนี้ 20 cm และ 14 cm ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจานนี้สามารถกำหนดระยะห่างระหว่างหลุมได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 4.7 ชุดโครงสร้างของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพารา



รูปที่ 4.8 งานกำหนดระยะห่างระหว่างหลุม

4.2 ผลการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราแบบหยอดหลุมอัตโนมัติในกระบะดิน

ผลการทดสอบการใส่ปุ๋ยอย่างพาราที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.16 m/s มุมเซนเซอร์ที่ล้อย 45° ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.5-4.7 ส่วนตารางที่ 4.8 และ 4.9 แสดงผลการทดสอบการใส่ปุ๋ยที่มุมเซนเซอร์ที่ล้อย 30° ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณปุ๋ยนอกหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ย

ตารางที่ 4.5 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 4 %(wb)

Test No.	Hole size			Hole volume (cm ³)	Fertilizer placed outside the hole (g)	Quality of fertilizing (%)
	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)			
1	58.1	56.9	48.0	41.9	0.15	97.7
2	58.6	59.3	47.3	43.2	0.16	97.6
3	58.3	57.6	48.0	42.8	0.33	95.1
Avg.	58.3	57.9	47.8	42.6	0.21	96.8

หมายเหตุ ระยะห่างระหว่างหลุมเฉลี่ย 21.3 cm

ตารางที่ 4.6 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 6 %(wb)

Test No.	Hole size			Hole volume (cm ³)	Fertilizer placed outside the hole (g)	Quality of fertilizing (%)
	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)			
1	64.2	63.2	57.4	61.3	0.20	96.9
2	59.2	58.9	49.1	45.2	0.11	98.4
3	58.9	58.5	51.5	47.1	0.18	97.3
Avg.	60.8	60.2	52.7	51.2	0.16	97.5

หมายเหตุ ระยะห่างระหว่างหลุมเฉลี่ย 20.8 cm

ตารางที่ 4.7 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 8 %(wb)

Test No.	Hole size			Hole volume (cm ³)	Fertilizer placed outside the hole (g)	Quality of fertilizing (%)
	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)			
1	63.9	66.8	62.6	70.0	0.12	98.1
2	63.5	65.3	57.4	62.4	0.06	99.1
3	66.2	65.1	58.9	66.8	0.06	99.1
Avg.	64.5	65.7	59.6	66.4	0.08	98.8

หมายเหตุ ระยะห่างระหว่างหลุมเฉลี่ย 20.6 cm

ตารางที่ 4.8 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 4 %(wb)

Test No.	Hole size			Hole volume (cm ³)	Fertilizer placed outside the hole (g)	Quality of fertilizing (%)
	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)			
1	57.2	55.6	46.0	38.4	0.24	96.5
2	56.4	57.9	45.4	38.8	0.21	96.8
3	58.6	59.7	46.7	43.5	0.29	95.7
Avg.	57.4	57.7	46.0	40.2	0.25	96.3

หมายเหตุ ระยะห่างระหว่างหลุมเฉลี่ย 14.1 cm

ตารางที่ 4.9 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 8 %(wb)

Test No.	Hole size			Hole volume (cm ³)	Fertilizer placed outside the hole (g)	Quality of fertilizing (%)
	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)			
1	66.2	65.9	59.5	67.9	0.08	98.8
2	63.4	60.6	53.9	54.3	0.11	98.4
3	66.7	66.1	63.1	85.2	0.09	98.7
Avg.	65.4	64.2	58.8	69.1	0.09	98.6

หมายเหตุ ระยะห่างระหว่างหลุมเฉลี่ย 13.9 cm

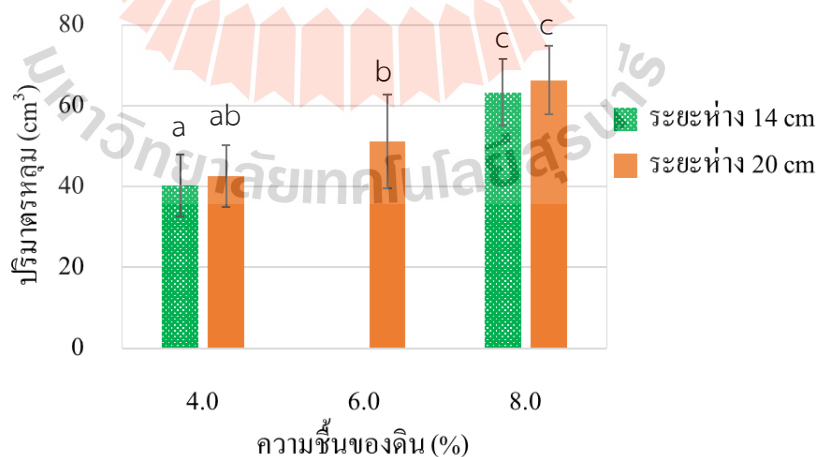
ตารางที่ 4.10 ปริมาตรหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ย

Hole distance (cm)	Moisture content (%(wb))	Hole volume (cm ³)	Quality of fertilizing (%)
20	4	42.6	96.8
	6	51.2	97.5
	8	66.4	98.8
14	4	40.2	96.3
	8	69.1	98.6

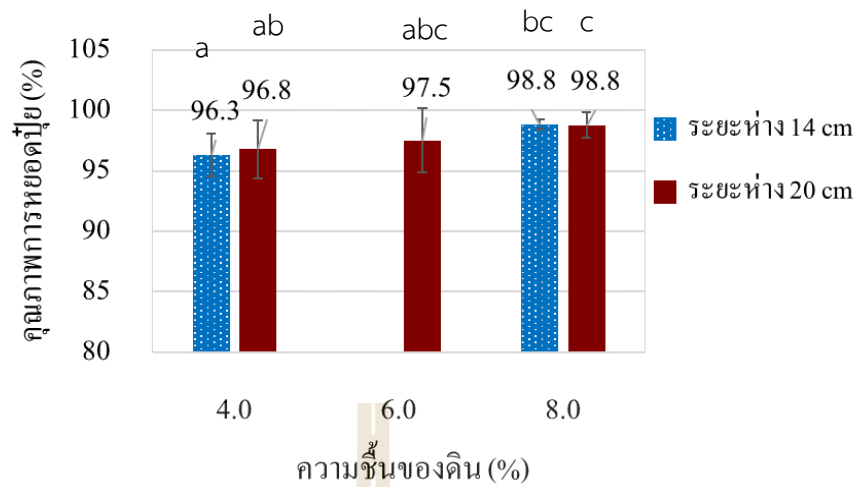
จากการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยในกระบะดินในห้องปฏิบัติการโดยใช้หัวเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm พบว่า เมื่อกำหนดความชื้นของดินที่ระดับความลึกประมาณ 10 cm เท่ากับ 4, 6 และ 8 % (wb) ทำให้สามารถเจาะหลุมที่มีระยะห่างระหว่างหลุมประมาณ 20 cm ได้ปริมาตรเท่ากับ 42.6, 51.2 และ 66.4 cm³ ตามลำดับ และส่วนที่ระยะห่างระหว่างหลุมประมาณ 14 cm เมื่อกำหนดความชื้นเท่ากับ 4 และ 8 % (wb) จะทำให้สามารถเจาะหลุมได้ปริมาตรเท่ากับ 40.2 และ 63.4 cm³ ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความชื้นมีอิทธิพลต่อขนาดของหลุม ส่วนระยะห่างระหว่างหลุมไม่มีอิทธิพลต่อขนาดของหลุม เพราะเมื่อความชื้นในมวลดินสูงขึ้นทำให้ความแข็งแรงของดินลดลง ซึ่งส่งผลให้ขนาดของหลุมเจาะใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าเครื่องใส่ปุ๋ยที่พัฒนามาจะเจาะหลุมได้ขนาดของหลุมที่เท่ากันในทุกๆ ระยะห่างระหว่างหลุม

รูปที่ 4.10 แสดงคุณภาพของการหยอดปุ๋ยของเครื่องใส่ปุ๋ยที่ระดับความชื้นของดินต่างๆ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อดินมีความแตกต่างของความชื้นน้อย คุณภาพของการหยอดปุ๋ย มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาช่วงระดับความชื้นที่กว้างขึ้นจะพบว่าคุณภาพของการหยอดปุ๋ยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ส่วนระยะห่างระหว่างหลุมไม่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการหยอดปุ๋ย

จากการทดสอบความสามารถในการปล่อยปุ๋ยของชุดหยอดปุ๋ยในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถปล่อยปุ๋ยได้เฉลี่ยครั้งละ 6.64 g และเมื่อกำหนดความเร็วในการทำงานเท่ากับ 0.16 m/s ดังนั้นเครื่องใส่ปุ๋ยจะมีความสามารถในการทำงานเท่ากับ 23.9 kg/h ด้วยระดับความถูกต้องมากกว่า 96%



รูปที่ 4.9 ปริมาตรหลุมที่เจาะด้วยเครื่องใส่ปุ๋ยอัตโนมัติที่ระดับความชื้นต่างๆ



รูปที่ 4.10 คุณภาพการหยอดปุ๋ยด้วยเครื่องใส่ปุ๋ยอัตโนมัติที่ระดับความชื้นต่างๆ

4.3 ผลการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราแบบหลอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติภาคสนาม

4.3.1 ผลการทดสอบในแปลงเกษตร

รูปที่ 4.11-4.13 แสดงการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมอัตโนมัติขณะปฏิบัติงานในแปลงเกษตร ผลการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมอัตโนมัติในแปลงเกษตรเพื่อหาขนาดของหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ยพบว่า เมื่อใช้หัวเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm เจาะดินที่ความชื้น 6%(wb) (ระดับความลึกประมาณ 10 cm) จะได้ปริมาตรหลุมที่ถูกเจาะและคุณภาพการหยอดปุ๋ยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.3 cm³ และ 97% โดยมีระยะห่างระหว่างหลุมประมาณ 15 cm ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบนี้ กับผลการทดสอบที่ทำในกระบะดินพบว่า ปริมาตรหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ยไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 นอกจากนี้แรงดึงในแนวระดับที่ใช้ฉุดลาก เครื่องใส่ปุ๋ยและการสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์มีค่าเท่ากับ 618 N และ 1.31% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 และตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.11 การปล่อยปุ๋ยลงหลุม



รูปที่ 4.12 การกลบหลุมหลังการปล่อยปุ๋ย

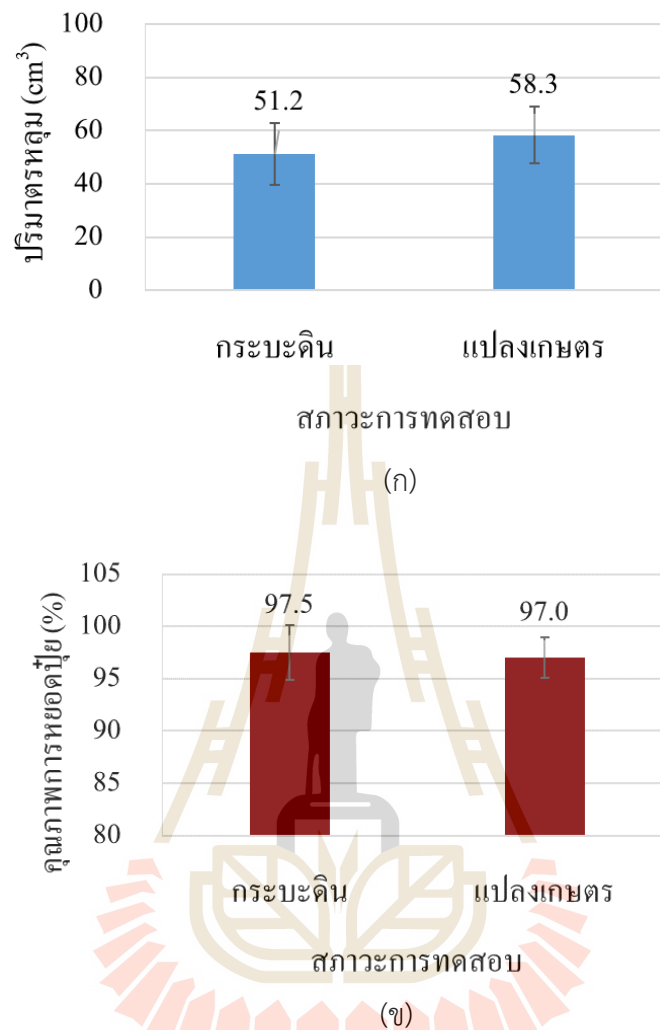


รูปที่ 4.13 การวัดแรงดึงในแนวระดับของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราในแปลงทดสอบ

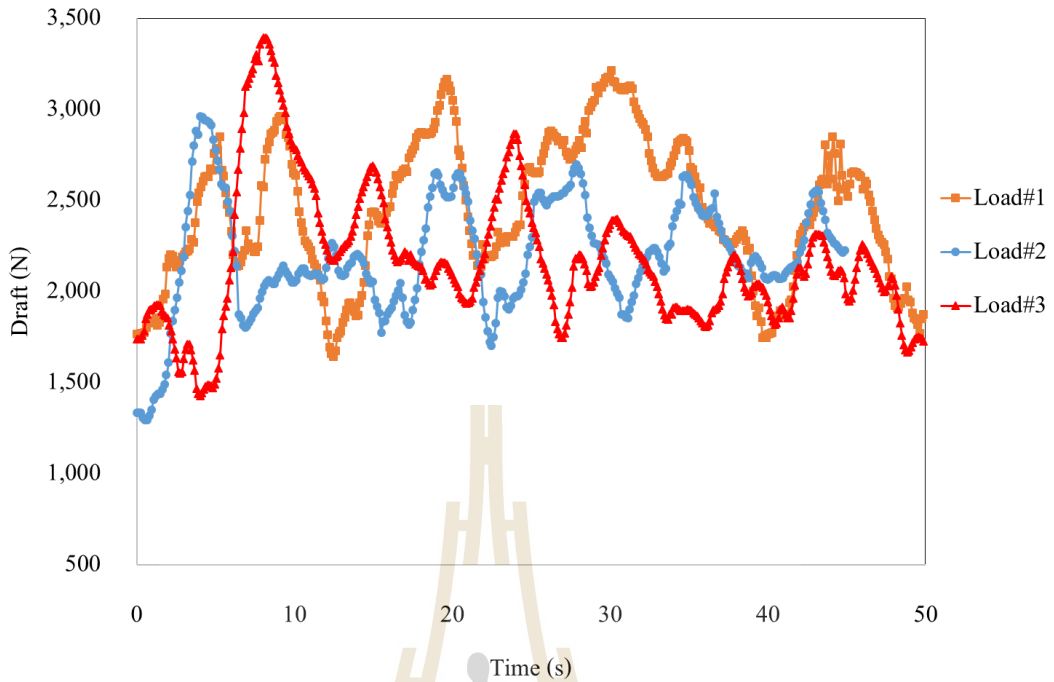
ตารางที่ 4.11 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 6 %(wb)

Test No.	Hole size			Hole volume (cm ³)	Fertilizer placed outside the hole (g)	Quality of fertilizing (%)
	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)			
1	66.4	67.4	51.4	60.5	0.15	97.8
2	62.4	63.8	46.2	48.5	0.25	96.3
3	67.7	68.3	54.3	65.9	0.20	97.0
Avg.	65.5	66.5	50.6	58.3	0.20	97.0

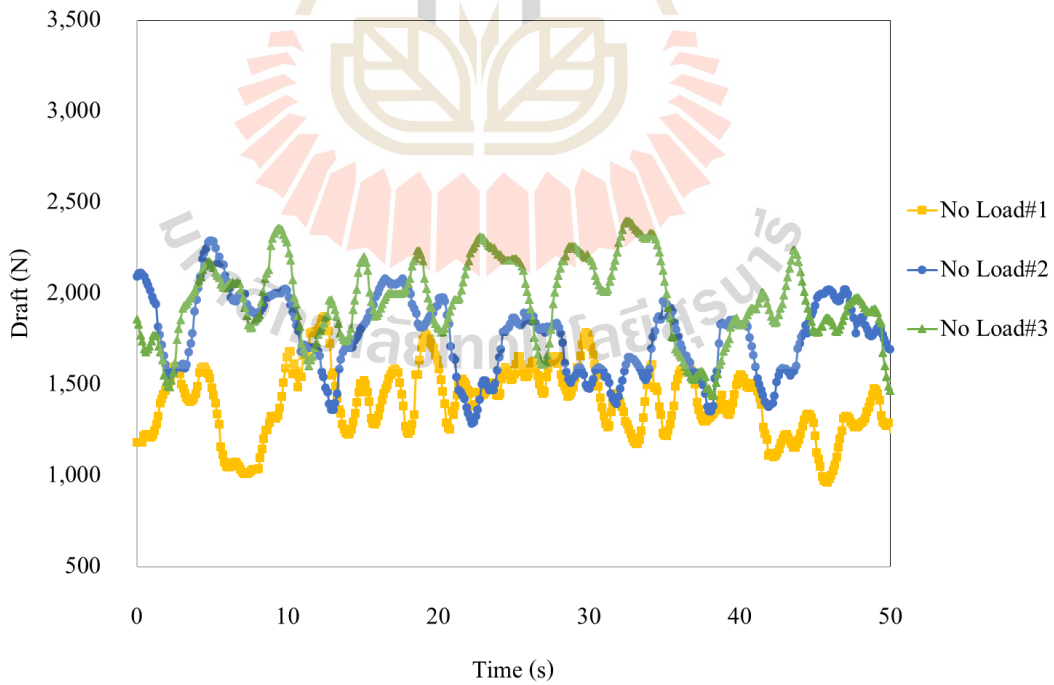
หมายเหตุ ระยะห่างระหว่างหลุมเฉลี่ย 15.0 cm



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยอย่างพาราในสภาวะการทดสอบใน กระบะดินและแปลงเกษตร (ก) ปริมาตรหลุม และ (ข) คุณภาพของการหยอดปุ๋ย



รูปที่ 4.15 แรงดึงในแนวระดับขณะมีภาระ



รูปที่ 4.16 แรงดึงในแนวระดับขณะไม่มีภาระ

ตารางที่ 4.12 การสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์ขณะฉุดลากเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมอัตโนมัติ

ครั้งที่	No Load (m)	Load (m)	Slip (%)
1	11.46	11.37	
2	11.50	11.29	
3	11.41	11.26	
Avg.	11.46	11.31	1.31

รูปที่ 4.17 แสดงการทดสอบหาสมรรถนะในการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบเจาะหลุมอัตโนมัติในแปลงยางพาราจำลอง ผลการทดสอบพบว่า เมื่อกำหนดตำแหน่งเกียร์ไว้ที่ 1L และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 1,000 rpm จะทำให้มีความเร็วในการทำงานเท่ากับ 0.16 m/s ความสามารถในการทำงานประสิทธิภาพจริงเท่ากับ 0.36 rai/h ประสิทธิภาพในการทำงานเท่ากับ 73.6% และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.37 L/h หรือ 1.03 L/rai ดังแสดงในตารางที่ 4.13 เมื่อพิจารณาความสามารถในการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยพบว่า ชุดหยอดปุ๋ยสามารถปล่อยปุ๋ยได้เฉลี่ยครั้งละ 6.64 g ดังนั้นเครื่องใส่ปุ๋ยจะมีความสามารถในการใส่ปุ๋ยเท่ากับ 23.9 kg/h ด้วยระดับความถูกต้องมากกว่า 97%



รูปที่ 4.17 การทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องใส่ปุ๋ยในแปลงยางพาราจำลอง

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราในแปลงยางพาราจำลอง

Fertilizing data	Unit	
Gear	-	1L
Engine speed	rpm	1,000
Area	m ²	324
Speed	km/h	0.58
Working time	s	1,508
Total elapsed time	s	2,048
Effective area capacity	rai/h	0.36
Field efficiency	%	73.6
Elapsed fuel	cm ³	210
Fuel consumption	L/h	0.37
Fuel consumption	L/rai	1.03

4.3.2 ผลการทดสอบในแปลงยางพารา

รูปที่ 4.18 - 4.20 แสดงการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพาราขณะปฏิบัติงานในแปลงยางพาราของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยเพื่อหาขนาดของหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ย เมื่อกำหนดตำแหน่งเกียร์ไว้ที่ 1L และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 1,000 rpm พบว่า เมื่อใช้หัวเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm และกำหนดระยะห่างระหว่างหลุมประมาณ 15 cm จะได้ปริมาตรหลุมที่ถูกเจาะและคุณภาพการหยอดปุ๋ยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.4 cm³ และ 73.1% ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.14 จากการวิเคราะห์การลดลงของคุณภาพการหยอดปุ๋ยในแปลงยางพาราเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงเกษตรและกระบะดินในห้องปฏิบัติการ มีสาเหตุหลักเนื่องมาจากความแข็งของผิวดินทำให้การเจาะหลุมมีความลึกน้อยกว่าปกติ ปากหลุมจึงมีขนาดความกว้างไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณปุ๋ยในการหยอดแต่ละครั้งได้หมด ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.18 การปล่อยปุ๋ยลงหลุมขณะปฏิบัติงานในแปลงยางพารา



รูปที่ 4.19 การกลบหลุมหลังการปล่อยปุ๋ยขณะปฏิบัติงานในแปลงยางพารา



รูปที่ 4.20 สภาพแปลงยางพาราหลังทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยยางพารา

ตารางที่ 4.14 ขนาดหลุมและคุณภาพการใส่ปุ๋ยที่ความชื้น 8 %(wb)

No.	Hole size			Hole volume (cm ³)	Fertilizer placed outside the hole (g)	Quality of fertilizing (%)
	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)			
1	37.6	39.3	28.5	11.0	1.60	75.9
2	37.9	36.1	27.2	9.8	1.93	71.0
3	38.9	35.9	28.0	10.3	1.84	72.3
Avg.	38.2	37.1	27.9	10.4	1.79	73.1



(ก) แปลงยางพารา

(ข) แปลงเกษตร

(ค) กระบะดิน

รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบการหยุดปุ๋ยในแปลงยางพารา แปลงเกษตร และกระบะดิน



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) เครื่องใส่ปุ๋ยแบบพาราแบบหยอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติประกอบด้วยชุดเจาะหลุม ชุดหยอดปุ๋ย และชุดควบคุมอัตโนมัติ
- 2) ชุดเจาะหลุมพัฒนาจากกลไกลูกเบี้ยวที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฮดรอลิกส์
- 3) ชุดหยอดปุ๋ยสามารถกำหนดปริมาณปุ๋ยที่ต้องการและมีคุณภาพการหยอดปุ๋ยมากกว่า 97%
- 4) ความชื้นของดินมีอิทธิพลต่อขนาดหลุม เมื่อดินมีความชื้นสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของหลุมที่เจาะได้ใหญ่ขึ้น
- 5) ความชื้นของดินมีอิทธิพลต่อคุณภาพการหยอดปุ๋ย เมื่อดินมีความแตกต่างของความชื้นน้อย คุณภาพของการหยอดปุ๋ยมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อดินมีความแตกต่างของความชื้นมากจะพบว่าคุณภาพของการหยอดปุ๋ยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
- 6) ระยะห่างระหว่างหลุมไม่มีอิทธิพลต่อขนาดหลุมและคุณภาพการหยอดปุ๋ย
- 7) ผลการทดสอบยืนยันได้ว่า เครื่องใส่ปุ๋ยแบบพาราแบบหยอดหลุมควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติมีศักยภาพที่จะนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อการประยุกต์ใช้ในสภาวะการใช้งานจริงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เนื่องจากเครื่องใส่ปุ๋ยนี้ยังมีความสามารถในการทำงานประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงขนาดของลูกเบี้ยวของชุดเจาะหลุมให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถเจาะหลุมได้เร็วขึ้น
- 2) การใช้งาน solenoid switch ของชุดหยอดปุ๋ยเป็นเวลา จะทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการติดขัดของกลไกในบางครั้ง ดังนั้นควรปรับเปลี่ยนกลไกอื่นมาทดแทน
- 3) ควรเพิ่มน้ำหนักของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบพาราให้มากขึ้น เพื่อให้สามารถทำงานในพื้นที่ที่มีสภาพดินแข็งได้ดีขึ้น

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

- มงคล คธาพันธ์, ฉัตริน เรืองจอหอ, กมลชนน วงศ์สถาน และพยุงค์กิติ์ จุลยุเสณ (2561). การเพิ่มสมรรถนะการทำงานเครื่องใส่ปุ๋ยแบบหยอดหลุมอัตโนมัติสำหรับพืชสวน. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19, ศูนย์ประชุมนานาชาติจุฬารณณ์ อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์, 26-27 เมษายน 2561 หน้า 334-337
- มงคล คธาพันธ์, ฉัตริน เรืองจอหอ, กมลชนน วงศ์สถาน และพยุงค์กิติ์ จุลยุเสณ, (2560). การพัฒนาชุดทดลองเครื่องใส่ปุ๋ยแบบหยอดหลุมอัตโนมัติสำหรับพืชสวน. รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4, โรงแรมวีวิช อ.เมือง จ.ขอนแก่น, 24-25 พฤศจิกายน 2560
- มงคล คธาพันธ์, พยุงค์กิติ์ จุลยุเสณ, จริญญาธิ์ สมพงษ์ และศธา วาทกิจ (2557). การออกแบบกลไกการเจาะหลุมเพื่อหยอดปุ๋ยในแปลงยางพารา. รายงานการประชุมวิชาการงานเกษตรแฟร์นนทรีอีสานครั้งที่ 2 “วิชาการก้าวหน้าภูมิปัญญาแห่งลุ่มน้ำโขง”, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จ.สกลนคร, 1 ธันวาคม 2557

เอกสารอ้างอิง

- ชัยวัฒน์ ทีฆวานิช และพิชัย จันทน์มณี. (2551). รายงานการวิจัย เรื่องการศึกษาและพัฒนาเครื่อง
เจาะดินสำหรับปลูกต้นไม้ขนาดเล็ก. โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- นุชนารถ กังพิสตาร (2527). การไถพรวนระหว่างแถวทาง, วารสารยางพารา 5(1): 28-35
- นุชนารถ กังพิสตาร (2550). ปุ๋ยเคมีกับการเพิ่มศักยภาพการผลิตยางพารา. ส่วนการผลิตยาง
สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.
- พญงค์ดี จุลยุเสณ (2552). การออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร, เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชา
วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา
- มงคล คธาพันธ์ และยงยุทธ์ เสียงดัง (2547). เครื่องโรยปุ๋ยยางพารา. แผนกวิชาช่างกลเกษตรและ
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา
- มงคล คธาพันธ์ (2552). การพัฒนาเครื่องโรยปุ๋ยยางพารา (2). วารสารวิจัย มข. 14(11): 1007-1024
- Adrian A. Koller, Randal K. Taylor and William R. Raun. (2017). Singulating hand planter
and fertilizer applicator. United States Patent.
- Dean A. Knobloch, Michael C. Hatton and Matthew R. Sudbrink. (2014). Fertilizer
applicator with in frame folding actuator for folding and outer frame member
relative to an inner frame member. United States Patent
- Donald A. Guzan. (1996). Dry granular fertilizer root feeder. United States Patent
- Edwin W. Anderson. (1986). Combined seed drill and fertilizer applicator. United
States Patent
- Gaylen Kromminga and William J. Dietrich. (1994). Agricultural fertilizer applicator
including self-leveling wagon hitch. United States Patent
- James W. Speer. (2005). Fertilizer dispensing device. United States Patent
- Jerome Robillard. (2005). Subsoil fertilizer applicator. United States Patent
- Jin Yuan, Cheng-Liang Liu, Yan-Min Li, Qingbing Zeng and Xuan F. Zha. (2010). Gaussian
processes bivariate control parameters optimization of variable-rate granular
fertilizer applicator. Computer and electronics in agriculture. Vol. 70:33-41.
- J. L. Baker, T. S. Colvin, S. J. Marley and ML Dawelbeit. (1989). A point-injector applicator
to improve fertilizer management. American society of agricultural engineers. 5(3)

- J. N. Moran. (1967). Apparatus for supplying fertilizer to the soil. United States Patent
- K. Krarup. (1970). Fertilizer applicator. United States Patent
- Nguyen, N.V., Yamane, S. and Mochizuki, Satoshi (2014). Automated Dibble Fertilizer Applicator for Lettuce Transplanter (Part 1), Concept, Development and Functional Test. Journal of JSAM 76(2): 195-202.
- Richard E. Engel, Thomas Fischer, John Miller and Grant Jackson. (2003). A small-plot seeder and fertilizer applicator. Agronomy journal Vol. 95
- R.L. Parish, P.P. Chaney, W.A. Meadows and D.L. Fuller. (1988). A dibble fertilizer applicator for containers in nursery beds. J. Environ. Hort. 6(2):63-66.
- Sandip Mandal and T. C. Thakur. (2010). Design and development of subsoiler-cum-differential rate fertilizer applicator. CIGR Journal Vol. 12(1)
- Wan Soo Kim and Jeollabuk-do. (2012). Powerless double-distribution pans fertilizer distributor. United States Patent Application Publication.
- W. E. Funk et al. (1967). Fertilizer applicator. United States Patent
- William J. Dietrich. (2002). Knife applicator for applying liquid fertilizer in the ground. United States Patent.



ประวัติหัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงค์ศักดิ์ จุลยเสน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาโท M.S. (Agricultural Science) และระดับปริญญาเอก Ph.D. (Agricultural
Science) จาก University of Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง
หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มี
ผลงานวิชาการและผลงานวิจัยด้านเครื่องจักรกลเกษตรและพลังงานทดแทน

