รายงานชุดโครงการวิจัย

วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน แบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย

Research and Development of a NPK Fertilizer Applicator for Sugarcane with Site-Specific Fertilizer Recommendations

หัวหน้าชุดโครงการวิจัย

นางสาวขนิษฐ์ หว่านณรงค์

Ms. Khanit Wannaronk

ปี พ.ศ. 2560

รายงานชุดโครงการวิจัย

วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน แบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย

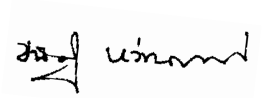
Research and Development of a NPK Fertilizer Applicator for Sugarcane with Site-Specific Fertilizer Recommendations

หัวหน้าชุดโครงการวิจัย
นางสาวขนิษฐ์ หว่านณรงค์
Ms. Khanit Wannaronk

ปี พ.ศ. 2560

คำปรารภ

โครงการวิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย ดำเนินงานในปีงบประมาณ 2560 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย ช่วยให้เกษตรกรสามารถใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินได้แตกต่างกันได้ถึง 144 สูตร ตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร ช่วยลดเวลาและแรงงานในขั้นตอนการผสมปุ๋ยข้างนอก อีกทั้งเพิ่มความแม่นยำของอัตราหยอดโดยใช้สมองกลควบคุมมอเตอร์ขับลูกหยอด ทำให้เกิดการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพิ่มผลผลิต และลดการสูญเสียทรัพยากรได้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยที่สำเร็จลุล่วงจะมีผู้นำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งคณะผู้วิจัยมีความยินดีอย่างยิ่งที่จะถ่ายทอดเทคโนโลยี และองค์ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ให้แก่ผู้สนใจ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่คณะผู้วิจัยตั้งเป้าหมายไว้



(นางสาวขนิษฐ์ หว่านณรงค์)
หัวหน้าโครงการวิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ย
ตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย
20 มกราคม 2561

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ... 5
ผู้วิจัย 6
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ 7
บทนำ.. 8

โครงการวิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน แบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย 10

บทสรุปและข้อเสนอแนะ... 35
บรรณานุกรม... 36
ภาคผนวก... 38

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้เริ่มดำเนินการจนบรรลุวัตถุประสงค์ได้โดยได้รับการสนับสนุนจาก ผู้อำนวยการ ข้าราชการ ลูกจ้างประจำ และพนักงานราชการ ของสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม และศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรเพชรบุรี สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 5 ที่ให้ความอนุเคราะห์ประสานงานหาแปลงทดสอบของเกษตรกร และได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีกับ คุณสันติภาพ ศรีสุขจร ผู้จัดการ หจก. ศรีกำแพงแสนมอเตอร์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยอีกทั้งยังช่วยประสานงานในการจัดหาแปลงทดสอบ ขอขอบคุณ คุณอ้อยใจ ณัฐพูลวัฒน์ เกษตรกรผู้ปลูกอ้อย ต.หนองตากยา อ. ท่าม่วง จ. กาญจนบุรี ที่ได้อนุเคราะห์แปลงทดสอบ นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนในด้านต่างๆแต่มิได้เอ่ยนามไว้ ซึ่งล้วนแต่มีส่วนส่งเสริมให้โครงการวิจัยนี้ดำเนินงานจนเป็นผลสำเร็จ ซึ่งคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

ขนิษฐ์ หว่านณรงค์	อัคคพล เสนาณรงค์	เวียง อากรชี
Khanit Wannaronk	Akkapol Senanarong	Weang Arekornchee
สราวุฒิ ปานทน	ธนพงศ์ แสนจุ้ม	วีระ สุขประเสริฐ
Sarawut Panthon	Thanapong Sanchum	Weera Sukprasert
อุทัย ธานี	อาธร พรบุญ	
Uthai Thanee	Artonn Pornbun	

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่ทำงาน, ไร่/ปี
i	=	อัตราดอกเบี้ย, เปอร์เซ็นต์
N	=	อายุการใช้งาน, ปี
P	=	ราคาซื้อของเครื่องจักร, บาท
S	=	ราคาซากของเครื่องจักร, บาท

บทนำ

ปัจจุบันภาคการเกษตรมีการใช้ปุ๋ยเคมีเป็นจำนวนมาก มีปริมาณการนำเข้าปุ๋ยเคมีในปี 2559 ประมาณ 4.88 ล้านตัน มูลค่า 49,301 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) เกษตรกรส่วนใหญ่จะพิจารณาใช้ปุ๋ยตามปัจจัยด้านราคาปุ๋ยเคมี ราคาผลผลิต พื้นที่เพาะปลูก ปริมาณผลผลิต (พรรณพิมล, 2558) ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงปริมาณธาตุอาหารที่มีอยู่ดั้งเดิมในดิน จึงทำให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยในอัตราและสูตรเหมือนกันทั่วทั้งแปลง ซึ่งอาจไม่ตรงต่อความต้องการของพืช

กรมวิชาการเกษตร มีองค์ความรู้เรื่องการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินมานาน โดยในปี 2548 ได้ออกคำแนะนำการใช้ปุ๋ยสำหรับพืชเศรษฐกิจ เช่น ข้าว พืชไร่ ไม้ผล พืชผัก ปาล์มน้ำมัน ยางพารา โดยคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อยมี อ้อยปลูก และอ้อยตอ ใส่ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 มี OM 3 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ จากคำแนะนำดังกล่าวทำให้มีการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกัน 108 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 7-87 กิโลกรัม/ไร่ (กรมวิชาการเกษตร, 2548) และในปี 2560 ได้ปรับปรุงคำแนะนำใหม่โดยสถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน ร่วมกับ กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร โดยคำแนะนำการใส่ปุ๋ยอ้อยตามค่าวิเคราะห์ดิน ประกอบด้วย อ้อยปลูก และอ้อยตอ pH 2 ระดับ N 4 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ แต่จากคำแนะนำดังกล่าวทำให้มีการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกันมากถึง 144 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 3-142 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งจะเผยแพร่ให้เกษตรกรปฏิบัติตามได้ยาก เนื่องจากมีความยุ่งยากในการชั่งและผสมปุ๋ย อีกทั้งเครื่องหยอดปุ๋ยที่จำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบัน จะใส่ปุ๋ยได้ปริมาณเดียว หรือเปลี่ยนอัตราหยอดได้เล็กน้อยโดยการซื้อเฟืองโซ่มาเปลี่ยน

ตั้งแต่ปี 2557 สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม ได้พัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยสำหรับปุ๋ยผสมสำหรับอ้อย ที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราหยอดได้กว้าง โดยใช้ชุดเฟืองโซ่จักรยานที่สามารถเปลี่ยนอัตราหยอดได้ใกล้เคียงกับคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน แต่การใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินโดยใช้เครื่องใส่ปุ๋ยนี้ ต้องผสมปุ๋ยข้างนอกและต้องผสมให้เข้ากัน โดยต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ และไม่ผสมและทิ้งไว้นานจนเกิดความชื้นทำให้ปุ๋ยจับตัวเป็นก้อน (caking) ซึ่งทำให้ต้องต้องเสียเวลาและค่าแรงงานในการผสมปุ๋ยเพิ่ม อีกทั้งการนำปุ๋ยที่ผสมแล้วใส่เครื่องหยอดปุ๋ยอาจเกิดการแยกชั้นของปุ๋ยได้ เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนของรถแทรกเตอร์ขณะทำงาน ต่อมาจึงพัฒนา เป็นเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแยกปุ๋ยหลักทั้ง 3 ชนิด ใส่ในแต่ละถังแยกกัน เพื่อลดปัญหาปุ๋ยจับตัวเป็นก้อนและการแยกชั้นของปุ๋ย แต่ระบบกลไกการหยอดยังเป็นแบบใช้เฟืองโซ่จักรยานอยู่ ซึ่งทำได้แค่ใส่ปุ๋ยให้ใกล้เคียงกับอัตราหยอดตามคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน แต่ไม่สามารถใส่ปุ๋ยได้แม่นยำ เนื่องจากมีอัตราทดคงที่ มีความคลาดเคลื่อนจากอัตราการใส่จริงราว 10%

เมื่อไปใช้ในแปลงขนาดใหญ่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในปริมาณการใส่ปุ๋ยมากขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองปุ๋ยเกินความจำเป็น

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินติดพ่วงรถแทรกเตอร์แบบแยกถังปุ๋ย โดยแยกปุ๋ยหลักทั้ง 3 ชนิด ใส่ในแต่ละถังแยกกัน เพื่อลดปัญหาปุ๋ยจับตัวเป็นก้อนและการแยกชั้นของปุ๋ยช่วยลดต้นทุนในการผสมปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินข้างนอก และพัฒนาระบบการกำหนดความแม่นยำของอัตราหยอดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวสามารถใช้กับเครื่องหยอดปุ๋ยที่ต้องการความแม่นยำได้ทุกชนิด เครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย จะมีส่วนสนับสนุนให้เกษตรกรหันมาใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินมากขึ้น ลดขั้นตอนและต้นทุนการผสมปุ๋ย จ่ายปุ๋ยได้แม่นยำทำให้เกิดการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และลดการสูญเสียทรัพยากรได้ **ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายเกษตร 4.0 ที่พัฒนาการเกษตรแบบดั้งเดิม (Traditional Farming) ไปสู่การเกษตรสมัยใหม่ ที่เน้นการบริหารจัดการและเทคโนโลยี (Smart Farming) หรือการทำเกษตรแบบแม่นยำสูง (Precision Farming)**

วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย

Research and Development of a NPK Fertilizer Applicator for Sugarcane with Site-Specific Fertilizer Recommendations

ขนิษฐ์ หว่านณรงค์
Khanit Wannaronk

อัคคพล เสนาณรงค์
Akkapol Senanarong

เวียง อากรชี
Weang Arekornchee

สราวุฒิ ปานทน
Sarawut Panthon

ธนพงค์ แสนจุ้ม
Thanapong Sanchum

วีระ สุขประเสริฐ
Weera Sukprasert

อุทัย ธานี
Uthai Thanee

อาธร พรบุญ
Artonn Pornbun

คำสำคัญ: เครื่องใส่ปุ๋ย ใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน อ้อย รถแทรกเตอร์

Keywords: Fertilizer applicator, Site-specific fertilizer recommendations, Sugarcane, Tractor

บทคัดย่อ

กรมวิชาการเกษตร ได้ออกคำแนะนำการใส่ปุ๋ยอ้อยตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยมีการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกันมากถึง 144 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 3-142 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งเผยแพร่ให้เกษตรกรปฏิบัติตามได้ยาก เนื่องจากมีความยุ่งยากในการชั่งและผสมปุ๋ย ดังนั้นสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม ได้พัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยติดรถแทรกเตอร์ขนาด 24 แรงม้า โดยผู้ใช้สามารถเลือกสวิตซ์ตามค่าตามผลวิเคราะห์ดิน เครื่องใส่ปุ๋ยจะคำนวณสูตรปุ๋ยและอัตราที่ต้องใช้ให้เองโดยอัตโนมัติ เนื่องจาก มีชุดสมองกลควบคุมลูกหยอดที่ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสเตปปิ้ง ซึ่งทำงานสัมพันธ์กับความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่วัดได้จากล้อที่ติดเซนเซอร์วัดความเร็ว และสัมพันธ์กับสมการความเร็วมอเตอร์กับอัตราการใส่ปุ๋ยที่สอบเทียบไว้ ใน จากการทดสอบในแปลงอ้อย พบว่า ความสามารถการทำงานเฉลี่ย 3.02 ไร่/ชั่วโมง ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 0.8 m/s ประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ย 93.06% ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.45 ลิตร/ไร่

Abstract

The Department of Agriculture (DOA) has issued the site-specific fertilizer recommendations for sugarcane with 144 formula. By applying the fertilizer rate of 3-142 kg/rai depending on soil fertility. Farmers can not follow this instruction, since the difficulty of weighting and mixing the fertilizers. Thus, the Agricultural Engineering Research Institute (AERI) has developed a NPK fertilizer applicator for sugarcane with site-specific fertilizer recommendations attached with a 4-wheel tractor (24 hp). User can selects switch according to value based on soil analysis, it will calculate fertilizer formula and rate automatically. The applicator system consists of a microcontroller for controlling the driving step motor of the fertilizer metering unit and a ground driven wheel integrated with a proximity sensor for the speed measurement. Initially, the applicator was calibrated in laboratory to derived a relationship among the step motor speed and the rate of fertilizer application. Testing were conducted in sugarcane field. Testing results found that average field capacity was 3.02 rai/h, at average travelling speed of tractor 0.80 m/s, average field efficiency was 93.06% and average fuel consumption was 0.45 lit/rai.

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการการใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นทุกปี โดยในช่วงปี 2552-2557 มีปริมาณการนำเข้าปุ๋ยเคมีปีละประมาณ 3.83-5.42 ล้านตัน มูลค่า 42,666-66,103 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) เกษตรกรส่วนใหญ่จะพิจารณาใช้ปุ๋ยตามปัจจัยด้านราคาปุ๋ยเคมี ราคาผลผลิต พื้นที่เพาะปลูก ปริมาณผลผลิต (พรรณพิมล, 2558) ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงปริมาณธาตุอาหารที่มีอยู่ดั้งเดิมในดิน จึงทำให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยในอัตราและสูตรเหมือนกันทั่วทั้งแปลง ซึ่งอาจไม่ตรงต่อความต้องการของพืช

กรมวิชาการเกษตร มีองค์ความรู้เรื่องการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินมานาน โดยในปี 2548 ได้ออกคำแนะนำการใช้ปุ๋ยสำหรับพืชเศรษฐกิจ เช่น ข้าว พืชไร่ ไม้ผล พืชผัก ปาล์มน้ำมัน ยางพารา โดยคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อยมี อ้อยปลูก และอ้อยตอ ใส่ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 มี OM 3 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ จากคำแนะนำดังกล่าวทำให้มีการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกัน 108 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 7-87 กิโลกรัม/ไร่ (กรมวิชาการเกษตร, 2548) และในปี 2560 ได้ปรับปรุงคำแนะนำใหม่โดยสถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน ร่วมกับ กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร โดยคำแนะนำการใส่ปุ๋ยอ้อยตามค่าวิเคราะห์ดิน ประกอบด้วย อ้อยปลูก และอ้อยตอ pH 2 ระดับ N 4 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ แต่จากคำแนะนำดังกล่าวทำให้มีการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกันมากถึง 144 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 3-142 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งจะเผยแพร่ให้เกษตรกรปฏิบัติตามได้ยาก เนื่องจากมีความยุ่งยากในการชั่งและผสมปุ๋ย อีกทั้งเครื่องหยอดปุ๋ยที่จำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบัน จะใส่ปุ๋ยได้ปริมาณเดียว หรือเปลี่ยนอัตราหยอดได้เล็กน้อยโดยการซื้อเฟืองโซ่มาเปลี่ยน

ตั้งแต่ปี 2557 สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม ได้พัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยสำหรับปุ๋ยผสมสำหรับอ้อย ที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราหยอดได้กว้าง โดยใช้ชุดเฟืองโซ่จักรยานที่สามารถเปลี่ยนอัตราหยอดได้ใกล้เคียงกับคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน แต่การใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินโดยใช้เครื่องใส่ปุ๋ยนี้ ต้องผสมปุ๋ยข้างนอกและต้องผสมให้เข้ากัน โดยต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ และไม่ผสมและทิ้งไว้นานจนเกิดความชื้นทำให้ปุ๋ยจับตัวเป็นก้อน (caking) ซึ่งทำให้ต้องต้องเสียเวลาและค่าแรงงานในการผสมปุ๋ยเพิ่ม อีกทั้งการนำปุ๋ยที่ผสมแล้วใส่เครื่องหยอดปุ๋ยอาจเกิดการแยกชั้นของปุ๋ยได้ เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนของรถแทรกเตอร์ขณะทำงาน ต่อมาจึงพัฒนา เป็นเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแยกปุ๋ยหลักทั้ง 3 ชนิด ใส่ในแต่ละถังแยกกัน เพื่อลดปัญหาปุ๋ยจับตัวเป็นก้อนและการแยกชั้นของปุ๋ย แต่ระบบกลไกการหยอดยังเป็นแบบใช้เฟืองโซ่จักรยานอยู่ ซึ่งทำได้แค่ใส่ปุ๋ยให้ใกล้เคียงกับอัตราหยอดตามคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน แต่ไม่สามารถใส่ปุ๋ยได้แม่นยำ เนื่องจากมีอัตราทดคงที่ มีความคลาดเคลื่อนจากอัตราการใส่จริงประมาณ 5-

10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไปใช้ในแปลงขนาดใหญ่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในปริมาณการใส่ปุ๋ยมากขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองปุ๋ยเกินความจำเป็น

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินติดพ่วงรถแทรกเตอร์แบบแยกถังปุ๋ย โดยแยกปุ๋ยหลักทั้ง 3 ชนิด ใส่ในแต่ละถังแยกกัน เพื่อลดปัญหาปุ๋ยจับตัวเป็นก้อนและการแยกชั้นของปุ๋ยช่วยลดต้นทุนในการผสมปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินข้างนอก และพัฒนาระบบการกำหนดความแม่นยำของอัตราหยอดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวสามารถใช้กับเครื่องหยอดปุ๋ยที่ต้องการความแม่นยำได้ทุกชนิด เครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย จะมีส่วนสนับสนุนให้เกษตรกรหันมาใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินมากขึ้น ลดขั้นตอนและต้นทุนการผสมปุ๋ย จ่ายปุ๋ยได้แม่นยำทำให้เกิดการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และลดการสูญเสียทรัพยากรได้ **ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายเกษตร 4.0 ที่พัฒนาการเกษตรแบบดั้งเดิม (Traditional Farming) ไปสู่การเกษตรสมัยใหม่ ที่เน้นการบริหารจัดการและเทคโนโลยี (Smart Farming) หรือการทำเกษตรแบบแม่นยำสูง (Precision Farming)**

การทบทวนวรรณกรรม

1. การใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อยของกรมวิชาการเกษตร

ในปี 2548 กรมวิชาการเกษตร ได้ออกคำแนะนำการใช้ปุ๋ยสำหรับพืชเศรษฐกิจ เช่น ข้าว พืชไร่ ไม้ผล พืชผัก ปาล์มน้ำมัน ยางพารา โดยคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อย (ตารางที่ 1) ประกอบด้วย อ้อยปลูก และอ้อยตอ ใส่ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 มี OM 3 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ จากคำแนะนำดังกล่าวทำให้มีการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกัน 108 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 7-87 กิโลกรัม/ไร่ โดยนำให้ใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 เมื่ออ้อยอายุ 1 เดือน ใช้ปุ๋ยหลักที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ (18-46-0) ปุ๋ยไนโตรเจน (46-0-0) และปุ๋ยโปแตสเซียม (0-0-60) โดยปุ๋ยไนโตรเจนแบ่งใส่สองครั้ง ครั้งที่ 2 เมื่ออ้อยอายุ 3 เดือน ใส่เฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน (46-0-0) อีกครึ่งที่เหลือ

ตารางที่ 1 ระดับธาตุอาหารที่ใส่ตามค่าวิเคราะห์ดิน (คำแนะนำเดิม)

ธาตุอาหาร	ค่าวิเคราะห์ดิน	ระดับ	อัตราปุ๋ยแนะนำ	
			อ้อยปลูก	อ้อยตอ
อินทรียวัตถุ (%)	น้อยกว่า 1	ต่ำ	18	24
	1-2	ปานกลาง	12	18
	มากกว่า 2	สูง	12	18
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มก./กก.)	น้อยกว่า 15	ต่ำ	6	12
	15-30	ปานกลาง	6	9
	มากกว่า 30	สูง	6	9
โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (มก./กก.)	น้อยกว่า 30	ต่ำ	12	24
	30-90	ปานกลาง	12	18
	มากกว่า 90	สูง	6	18

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร, 2548

ในปี 2560 กรมวิชาการเกษตร โดยสถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน และ กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร ได้ร่วมกันจัดทำคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อย (ตารางที่ 2) โดยมี อ้อยปลูก และอ้อยตอ pH 2 ระดับ N 4 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ จากคำแนะนำดังกล่าวมีการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกันได้มากถึง 144 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 3 - 142 กิโลกรัม/ไร่ ดังตารางที่ 2 โดยแนะนำให้ใส่ปุ๋ยอ้อยครั้งที่ 1 ใช้ปุ๋ยหลักที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ (16-16-8) จนหมด ครั้งที่ 2 ใส่ ปุ๋ยไนโตรเจน (46-0-0) และปุ๋ยโปแตสเซียม (0-0-60) ที่เหลือ และถ้าผลการวิเคราะห์ดินมี pH มากกว่า 7.3 ให้ใช้ปุ๋ย N สูตร 21-0-0 แทน

ตารางที่ 2 ระดับธาตุอาหารที่ใส่ตามค่าวิเคราะห์ดิน (คำแนะนำใหม่)

ธาตุอาหาร	**ค่าวิเคราะห์ดิน**	**ระดับ**	**อัตราปุ๋ยแนะนำ**	
			อ้อยปลูก	**อ้อยตอ**
อินทรียวัตถุ (%)	น้อยกว่า 0.75	ต่ำ	27	27
	0.75-1.50	ปานกลาง	15	18
	1.50-2.25	สูง	12	15
	มากกว่า 2.25	สูงมาก	6	9
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มก./กก.)	น้อยกว่า 7	ต่ำ	9	9
	7-30	ปานกลาง	6	6
	มากกว่า 30	สูง	3	3
โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (มก./กก.)	น้อยกว่า 60	ต่ำ	18	18
	60-90	ปานกลาง	12	12
	มากกว่า 90	สูง	6	6

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร, 2560

2. เครื่องใส่ปุ๋ยอ้อย

เครื่องหยอดปุ๋ยในไร่อ้อยที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เป็นเครื่องโรยปุ๋ยเป็นแถว (Band Fertilizer Applicator) จะต้องมีตัวเปิดร่องและท่อนำปุ๋ย มักใช้ร่วมหรือติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมืออื่น เช่น ใช้กับเครื่องปลูกหรือเครื่องมือเตรียมดิน (รูปที่ 1) เครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยในประเทศ มีทั้งแบบแถวเดียวและสองแถว เครื่องฝังปุ๋ยแบบแถวเดียวสามารถฝังปุ๋ยได้ตรงกลางระหว่างแถวปลูกโดยใช้กับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กวิ่งเข้าไปในระหว่างแถวอ้อย ส่วนเครื่องฝังปุ๋ยแบบสองแถว จะใช้ต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ขนาดใหญ่ใช้วิ่งคร่อมร่องอ้อยสามารถฝังปุ๋ยได้ใกล้กับรากของอ้อยมากกว่า

รูปที่ 1 เครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบสองแถวที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
ที่มา: วิชัย และคณะ (2556)

สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม ได้พัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยผสมสำหรับอ้อยแบบ 2 แถว ติดพ่วงรถแทรกเตอร์ขนาด 60 แรงม้า ขึ้นไป (รูปที่ 2) เพื่อใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยเกษตรกรต้องผสมปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินและคลุกเคล้าให้เข้ากันก่อนจึงนำมาใส่ในเครื่องนี้ สามารถเลือกเปลี่ยนอัตราหยอดได้ครอบคลุม ตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร 10-87 กิโลกรัม/ไร่ มีส่วนประกอบหลักคือ ถังใส่ปุ๋ย 2 ถัง ชุดกำหนดอัตราปุ๋ยแบบเฟืองจักรยานซึ่ง ใบมีดตัดใบอ้อยแบบกงจักร ท่อนำปุ๋ย ขาไถเปิดร่องดิน และล้อควบคุมการปล่อยปุ๋ย จากการทดสอบในแปลงอ้อยของเกษตรกร พบว่า เครื่องต้นแบบมีความสามารถการทำงานเฉลี่ย 5.30 ไร่/ชั่วโมง ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 1.23 เมตร/วินาที ประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ย 65.88% ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 1.70 ลิตร/ไร่ (ขนิษฐ์ และคณะ, 2558)

อย่างไรก็ตามการใส่ปุ๋ยโดยใช้เครื่องหยอดปุ๋ยนี้ ต้องผสมปุ๋ยข้างนอกและต้องผสมให้เข้ากัน โดยต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ ไม่ทำปฏิกิริยากันจนเป็นเหตุให้คุณภาพของปุ๋ยผสมต่ำลง และไม่ผสมและทิ้งไว้นานจนเกิดความชื้นทำให้ปุ๋ยจับตัวเป็นก้อน (caking) ซึ่งทำให้ต้องเสียเวลาและค่าแรงงานในการผสมปุ๋ยเพิ่ม และทำเกิดความยุ่งยากในการใส่ปุ๋ย

รูปที่ 2 เครื่องหยอดปุ๋ยผสมสำหรับอ้อยแบบ 2 แถว

ในปี 2559 สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม ได้พัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยแบบผสมแม่ปุ๋ยภายในตัวเอง สำหรับอ้อยแบบ 2 แถว ติดพ่วงรถแทรกเตอร์ขนาด 60 แรงม้าขึ้นไป (รูปที่ 3) เพื่อเลือกเปลี่ยนอัตราการหยอดปุ๋ยได้กว้าง โดยไม่ต้องคำนวณและผสมปุ๋ยไว้ก่อนล่วงหน้า ลดปัญหาปุ๋ยจับตัวเป็นก้อนและการแยกชั้นของปุ๋ยเมื่อต้องผสมทิ้งไว้นาน เครื่องหยอดปุ๋ยแบบผสมแม่ปุ๋ยภายในตัวเอง มีส่วนประกอบหลักคือ ถังใส่ปุ๋ย 3 ถัง สำหรับใส่ปุ๋ยหลัก 3 ชนิด ชุดกำหนดอัตราปุ๋ยแบบเฟืองจักรยาน สามารถปรับอัตราหยอดได้ตั้งแต่ 10-40 กิโลกรัม/ไร่ ตามคำแนะนำการใส่ปุ๋ยหลักตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อย ท่อนำปุ๋ย ขาไถเปิดร่องดิน ใบมีดตัดใบอ้อย และล้อควบคุมการปล่อยปุ๋ย จากการทดสอบในแปลงอ้อยที่มีระยะปลูก 1.8 เมตร พบว่า มีความสามารถการทำงานเฉลี่ย 7.19 ไร่/ชั่วโมง ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 1.02 เมตร/วินาที ประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ย 87.23% ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.67 ลิตร/ไร่ ความคลาดเคลื่อนของอัตราการหยอดปุ๋ยจากค่าที่ตั้งไว้เท่ากับ 2.70%

รูปที่ 3 เครื่องหยอดปุ๋ยแบบผสมแม่ปุ๋ยภายในตัวเองสำหรับอ้อยแบบ 2 แถว

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2553) ได้พัฒนาและสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อเกษตรกรรมความแม่นยำสูง 2 ตัว คือหุ่นยนต์ปฐพีกับหุ่นยนต์วารี โดยหุ่นยนต์ปฐพีใช้สำหรับขุดเจาะสำรวจหน้าดิน เก็บตัวอย่างความอุดมสมบูรณ์ของดิน ตามตำแหน่งพิกัดที่ได้จากจีพีเอส ส่วนหุ่นยนต์วารี มีหน้าที่ให้ปุ๋ย ให้น้ำและแก้สภาพความเป็นกรด-ด่างของดิน แก้ไขความเค็มของดินเนื่องจากการใส่ปุ๋ยที่มากเกินไป จะเห็นว่าต้นแบบหุ่นยนต์วารีเป็นแบบใส่ปุ๋ยน้ำ แต่มีแนวคิดในการผสมปุ๋ย 3 ธาตุ ตามค่าที่อ่านได้ในแผนที่ในขณะที่รถแทรกเตอร์ทำงาน

Ehtesham and Mohammad (2012) ได้พัฒนาและทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยเม็ดแบบปรับอัตราหยอดอัตโนมัติตามแผนที่อัตราการใช้ปุ๋ย โดยทดสอบกับปุ๋ย 2 ชนิด คือ 46-0-0 และ 0-45-0 ใส่ปุ๋ยในอัตรา 75, 125 และ 175 กิโลกรัม/เฮกแตร์ ด้วยความเร็วรถแทรกเตอร์ 3, 6 และ 9 กิโลเมตร/ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วรถแทรกเตอร์และอัตราการใส่ปุ๋ยมีผลต่อความแม่นยำในการใส่ปุ๋ย ขณะที่ชนิดของปุ๋ยไม่มีผลต่อความแม่นยำในการใส่ปุ๋ย ความแม่นยำในการใส่ปุ๋ยจะลดลงเมื่อความเร็วรถแทรกเตอร์และอัตราการใส่ปุ๋ยเพิ่มมากขึ้น

สายรุ้ง และวสุ (2558) ได้พัฒนาและทดสอบระบบการหยอดสารเคมีในปริมาณน้อยเช่น 1-2 กิโลกรัม/ไร่ เพื่อกำจัดศัตรูพืช โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบ โดยระบบจะทราบความเร็วในการเคลื่อนที่จากอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Encorder) ที่ติดตั้งบนล้อควบคุม แล้วจึงคำนวณหาค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมกับชุดหัวหยอด และส่งสัญญาณควบคุมไปยังสเต็ปมอเตอร์ (Step motor) เพื่อขับลูกหยอดให้หมุนเพื่อจ่ายสารเคมีในอัตราหยอดที่ต้องการ การทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าสามารถทำการหยอดสารเคมีตามอัตราการหยอดที่กำหนด (R^2=0.99) และเมื่อนำชุดหัวหยอดติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถหยอดสารเคมีได้ตามอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่กำหนดโดนไม่มีอิทธิพลจากความเร็วรอบที่แตกต่างกัน (R^2=0.91) โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยของอัตราการหยอด 2.7%

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

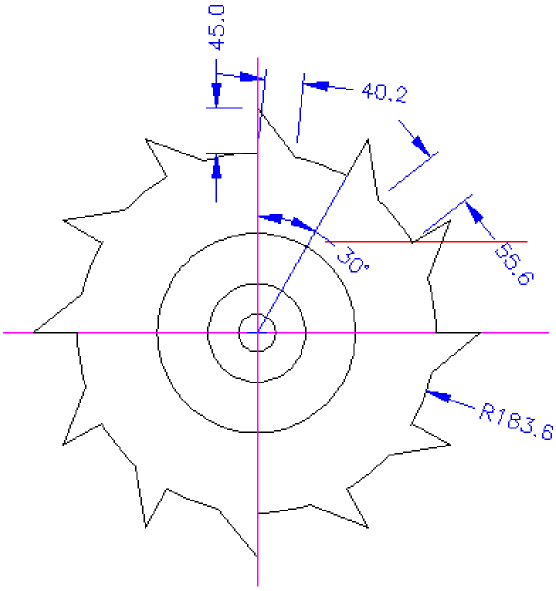
1. การออกแบบ

ได้ออกแบบเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย ซึ่งส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่

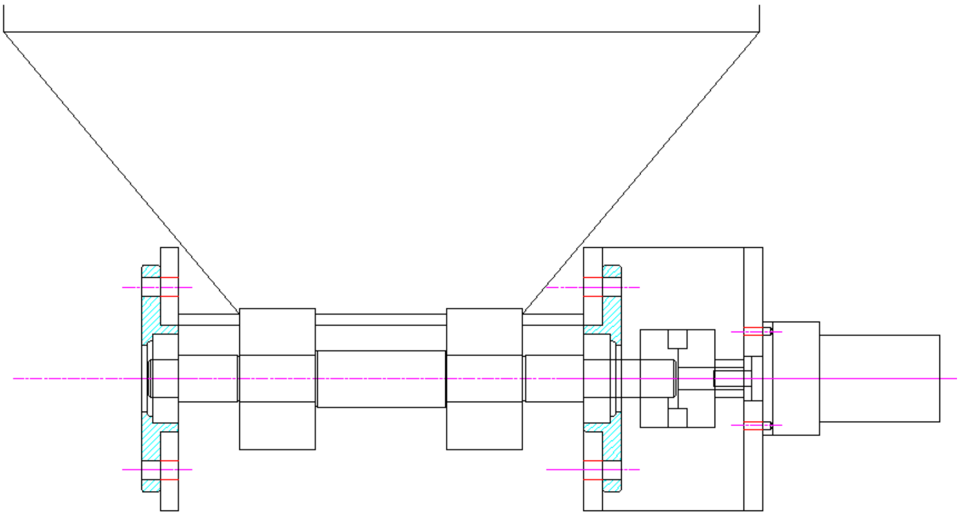
1.1 เครื่องใส่ปุ๋ยอ้อย

ออกแบบเครื่องใส่ปุ๋ยให้มีถังปุ๋ย 3 ถัง สำหรับใส่ปุ๋ยหลัก 3 ชนิด ได้แก่ DAP (18-46-0), KCl (0-0-60) และ $(NH_4)_2SO_4$ (46-0-0) ออกแบบเป็นแบบแถวเดียวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก เนื่องจากเกษตรกรรายย่อยส่วนใหญ่นิยมใช้แบบแถวเดียวมากกว่าแบบ 2 แถว ต้นแบบประกอบด้วย ถังปุ๋ย 3 ถัง ความจุถังละ 40 กิโลกรัม ใบตัดอ้อยแบบซี่ตัดขนาด 18 นิ้ว (รูปที่ 4) ขาไถเปิดร่องดิน ชุดลูกหยอดแบบร่องเฉียง และชุดขับลูกหยอด การทำงานเมื่อรถแทรกเตอร์ทำงานจะมีใบตัดอ้อยแบบซี่ตัดใบอ้อยให้ขาด จากนั้นมีขาไถเปิดร่องดิน (Chisel plows) ไถเปิดร่องลึกประมาณ 15-20 เซนติเมตร ขณะเดียวกันปุ๋ยจากทั้ง 3 ถังจะไหลมารวมกันที่ขาไถเปิดร่องดิน และถูกฝังลงดิน

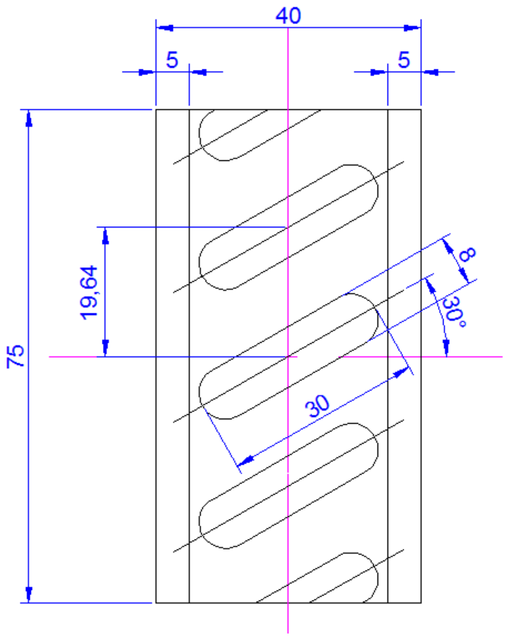
ออกแบบชุดขับเพลาลูกหยอด โดยมีมอเตอร์ขับในแต่ละถังปุ๋ย (รูปที่ 5) แต่ละถังมีลูกหยอด 2 อัน ทำจากซุปเปอร์ลีนเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ออกแบบเป็นแบบร่องเฉียง (รูปที่ 6) เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างลูกหยอดและผนังของถังใส่ปุ๋ย อีกทั้งเพื่อให้ปุ๋ยลงได้สม่ำเสมอมากกว่าการใช้ลูกหยอดแบบเกลียวลำเลียง ออกแบบลูกหยอดให้สามารถใส่ปุ๋ยได้ประมาณ 20-40 กรัมต่อรอบ เพื่อให้ใช้รอบหมุนของมอเตอร์ไม่เกิน 100 รอบต่อนาที สอดคล้องกับงานของ Wu et al. (2004) ที่แนะนำให้ใช้ความเร็วรอบของเพลาลูกหยอดควรอยู่ในช่วง 33 – 91 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของอัตราการให้ปุ๋ยน้อยกว่า 7% ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสเตปปิ้ง (86BYGH114, China) 12 โวลต์ ขนาด 8.5 นิวตัน-เมตร ขับในแต่ละถังปุ๋ย ล้อควบคุมความเร็วเป็นล้อยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ติดตั้งด้านท้ายเครื่องและติดสปริงเพื่อช่วยให้ล้อติดกับพื้นดินอย่างต่อเนื่อง ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดรอบแบบ Proximity switch ที่แกนของล้อเพื่อรับสัญญาณพัลส์ ส่งให้บอร์ดประมวลผลเพื่อคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ รูปที่ 7 แสดงเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแถวเดียวติดพ่วงรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก



รูปที่ 4 ใบตัดอ้อยแบบซี่



รูปที่ 5 ชุดหยอดปุ๋ย



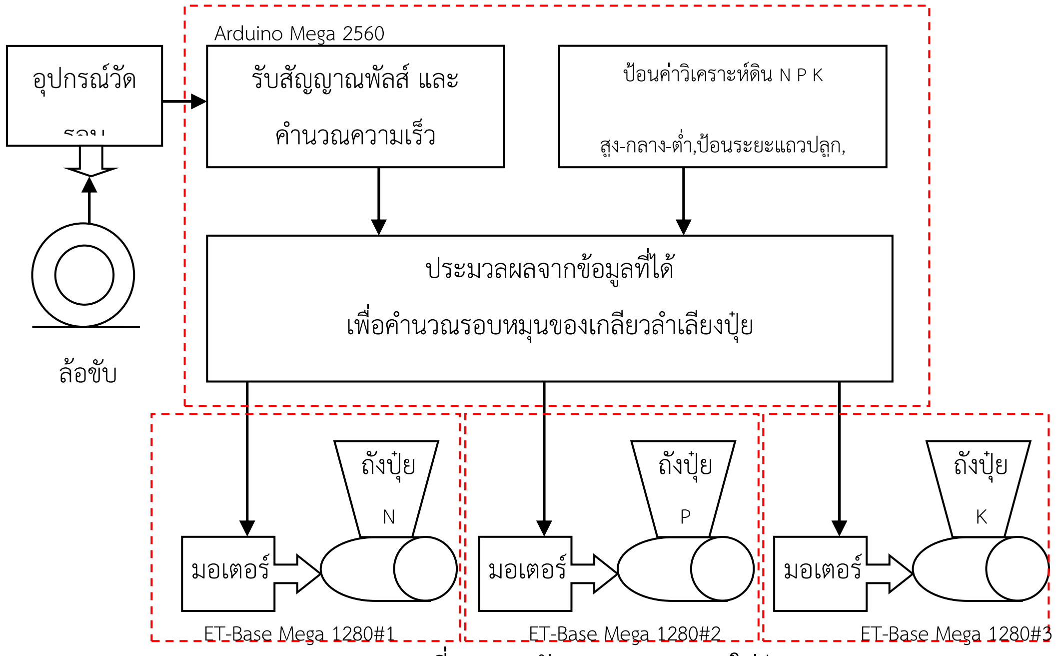
รูปที่ 6 ลูกหยอดแบบร่องเฉียง

รูปที่ 7 เครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแถวเดียวติดพ่วงรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

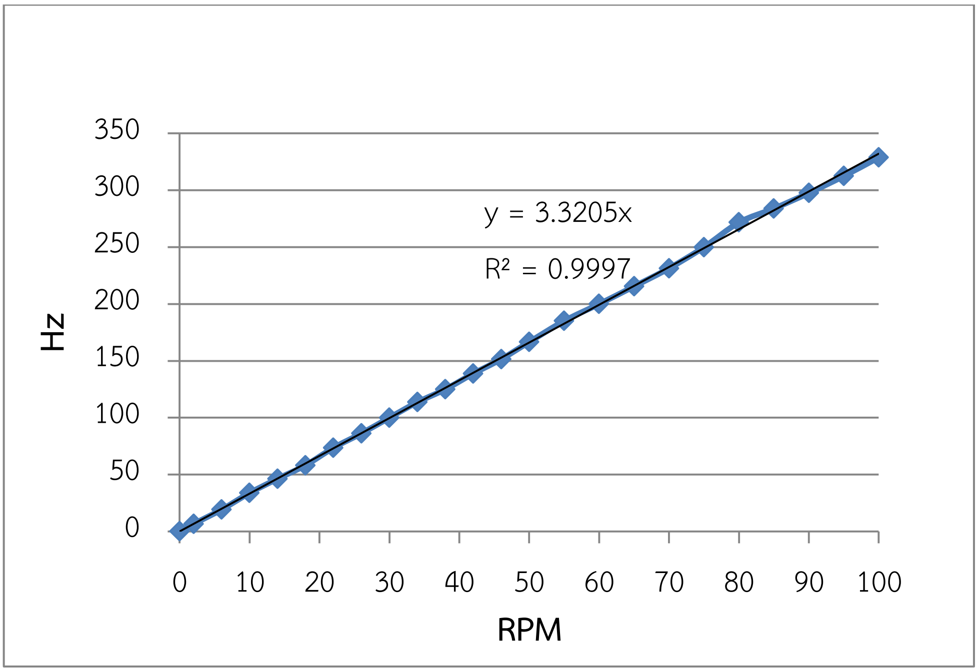
1.2 ระบบควบคุมและประมวลผล (Electronic control system) หลักการทำงาน เมื่อผู้ใช้งานทราบค่าผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารในดินแต่ละแปลงแล้ว จะทราบว่าในแปลงของตัวเองมีธาตุอาหาร OM P K แต่ละชนิด เป็นสูง กลาง หรือต่ำ โดยจะเลือกสวิตซ์ N P K ค่าที่ป้อนจะถูกนำมาประมวลผลร่วมกับข้อมูลที่ได้จากสมการการสอบเทียบปุ๋ย (Calibration) มาคำนวณและส่งคำสั่งไปควบคุมมอเตอร์ให้หมุนลูกหยอดให้สัมพันธ์กับความเร็วของรถแทรกเตอร์ในขณะนั้นๆ โดยตรวจสอบอัตราความเร็วของรถแทรกเตอร์จากล้อขับ (Ground wheel) ที่ติดอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Proximity switch) จะส่ง

สัญญาณไปยังชุดประมวลผล และสื่อสารไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ของถังปุ๋ย N P K แต่ละถัง ให้เป็นไปตามอัตราที่กำหนด และมีความสำพันธ์กับความเร็วรถแทรกเตอร์ (รูปที่ 8)

ใช้โปรแกรม Matlab Simulink 2016 เพื่อเขียนคำสั่งสมองกลควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์กล่องใหม่ ให้สามารถทำงานได้ตามคำแนะนำเดิม โดยสามารถเลือก อ้อยปลูก และอ้อยตอ ใส่ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มี OM 3 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ ใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกัน 108 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 7-87 กิโลกรัม/ไร่ ส่วนของ Hardware ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega 2560) จำนวน 1 ตัว เป็นไมโคร-คอนโทรลเลอร์หลัก ใช้สำหรับรับค่าสัญญาณพัลส์จาก proximity switch เพื่อคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ทุกวินาที และใช้รับค่าที่ป้อนได้แก่ อ้อยปลูก และอ้อยตอ N 3 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ เพื่อคำนวณอัตราการการจ่ายปุ๋ยต่อวินาที (g/s) ที่ความเร็วรถแทรกเตอร์ในขณะนั้นๆ แล้วจึงคำนวณความเร็วรอบที่ต้องการสำหรับสเต็ปมอเตอร์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบ ส่งข้อมูลจำนวนรอบที่ต้องใช้ในขณะนั้นให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์รอง (ET-Base Mega 1280) จำนวน 3 ตัว หลังจากรับค่าความเร็วรอบของสเต็ปมอเตอร์ (รูปที่ 8) ไมโครคอนโทรลเลอร์รองจะสร้างสัญญาณความถี่ (Hz) ที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ แล้วจึงส่งต่อให้กับบอร์ดวงจรขับมอเตอร์ (HY-DIV268N-5A Stepper driver) เพื่อขับสเต็ปมอเตอร์ให้หมุนให้ได้อัตราหยอดตามที่ตั้งไว้และสอดคล้องกับความเร็วการเคลื่อนที่ ไมโครคอนโทรลเลอร์รอง (ET-Base Mega 1280) เขียนด้วยโปรแกรมภาษาซี รับค่าความเร็วรอบของสเต็ปมอเตอร์ และสร้างสัญญาณความถี่ (Hz) ที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ (ภาคผนวก-ก) รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณความถี่ (Hz) กับรอบหมุนของมอเตอร์ rpm)



รูปที่ 8 แผนผังการควบคุมการใส่ปุ๋ย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของสัญญาณความถี่ (Hz) กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm)

2. **การทดสอบอัตราการใส่ปุ๋ยในห้องปฏิบัติการต้นแบบที่ 1**

ได้ทำการทดสอบเพื่อสอบเทียบอัตราการใส่ปุ๋ยที่ความเร็วรอบต่างๆ (รูปที่ 10) โดยทดสอบให้ครอบคลุมอัตราการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินที่แนะนำโดยกรมวิชาการเกษตร โดยปุ๋ยที่ใช้ทดสอบมีความหนาแน่น (bulk density) ดังนี้

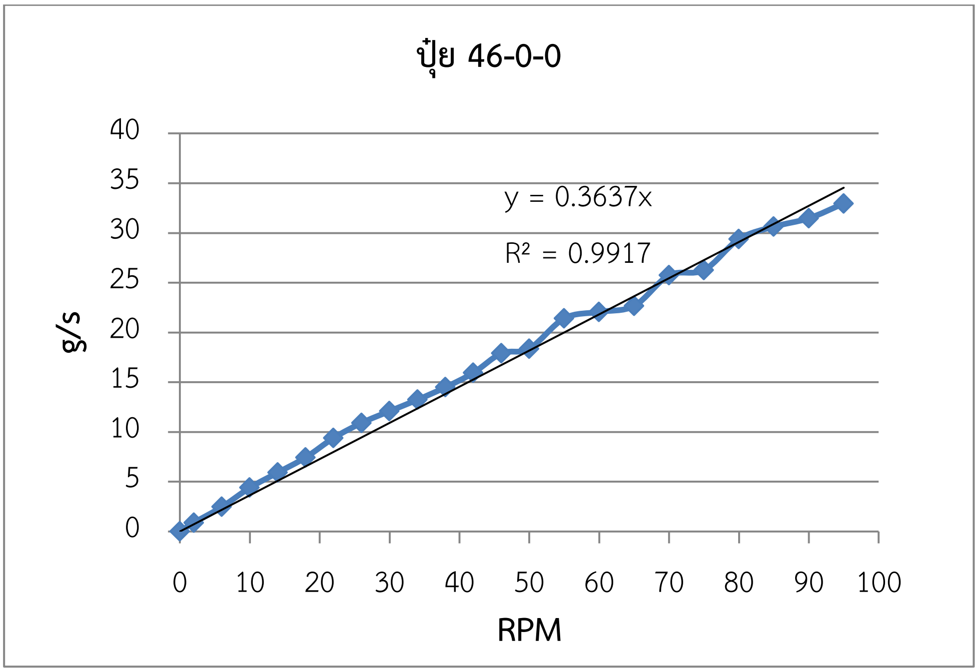
ปุ๋ย 46-0-0 ความหนาแน่นปุ๋ยเท่ากับ 0.7244 ตัน/ลูกบาศก์เมตร

ปุ๋ย 18-46-0 ความหนาแน่นปุ๋ยเท่ากับ 0.9426 ตัน/ลูกบาศก์เมตร

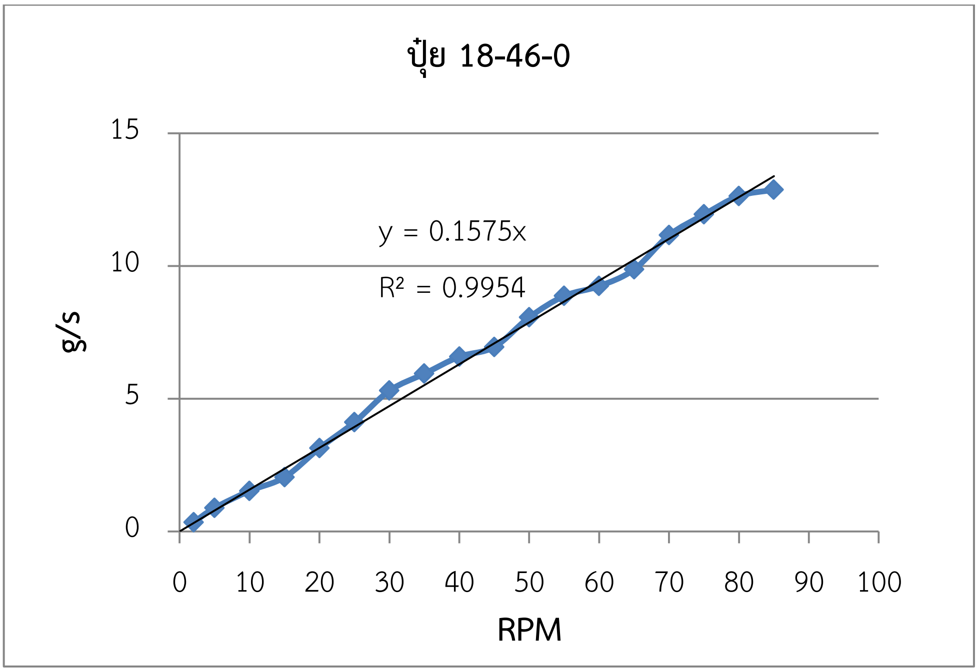
ปุ๋ย 0-0-60 ความหนาแน่นปุ๋ยเท่ากับ 1.0596 ตัน/ลูกบาศก์เมตร

จากการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย (g/s) ของปุ๋ยแต่ละชนิด กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm) ได้ดังรูปที่ 11 ถึง 13

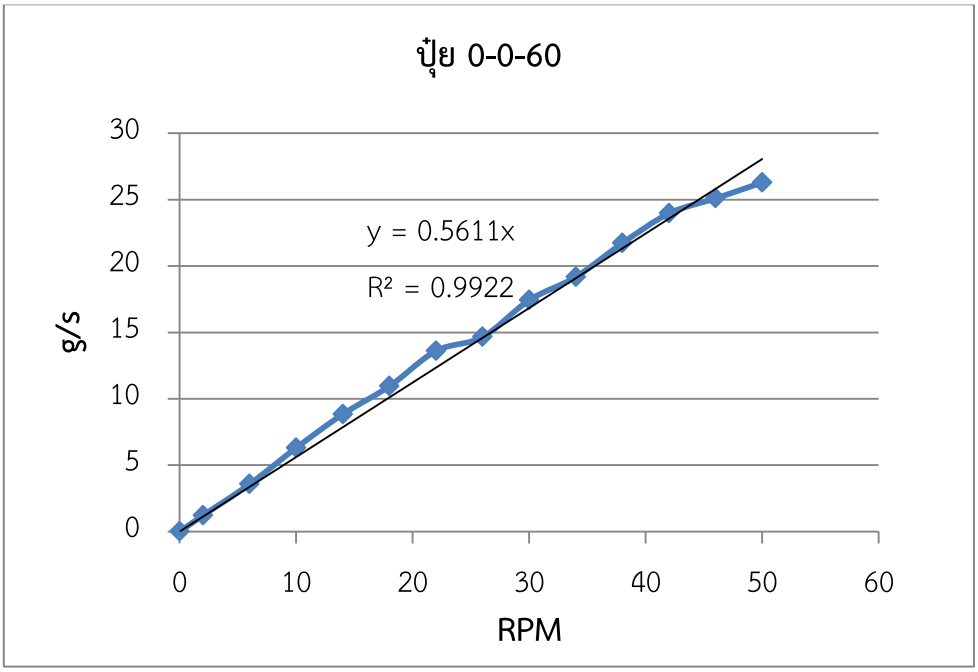
รูปที่ 10 สอบเทียบอัตราการใส่ปุ๋ย



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย 46-0-0 (g/s) กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย 18-46-0 (g/s) กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย 0-0-60 (g/s) กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm)

3. ผลการทดสอบความสามารถการทำงานภาคสนาม ต้นแบบที่ 1

ก่อนการทดสอบภาคนาม ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินในแปลงอ้อยตอของเกษตรกร ต. หนองตากยา อ. ท่าม่วง จ. กาญจนบุรี เพื่อวิเคราะห์ค่า OM P K ของดินหลังการตัดอ้อย สภาพแปลงมีความชื้น 14.0% (มาตรฐานแห้ง) ความหนาแน่นดินสภาพแห้ง 1.45 g/cm^3 ได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ดิน

	Required element rate (kg/rai)		
	OM	P_2O_5	K_2O
ค่าวิเคราะห์ดิน	0.84%	80 mg/kg	66 mg/kg
การแปรผล	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
สูตรปุ๋ยที่แนะนำ	24	6	18

ดำเนินการทดสอบในแปลงดังกล่าว เลือกสูตรปุ๋ยที่กล่องควบคุม OM-P-K เป็น ต่ำ-สูง-ปานกลาง สูตร 24-6-18 ตามผลวิเคราะห์ดิน การใส่ปุ๋ยในโปรแกรมจะแบ่งใส่ 2 ครั้ง ใส่ปุ๋ย NPK อย่างละครึ่ง ระยะห่างระหว่างแถวอ้อย 1.8 m ใช้รถแทรกเตอร์คูโบต้า รุ่น B2420 ขนาด 24 แรงม้า เป็นต้นกำลัง เลือกใช้เกียร์ 1 HI ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ราว 1400 rpm ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 1.03 m/s

จากการทดสอบการทำงานในแปลงพบว่า เครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดี ฝังปุ๋ยได้ลึกราว 10-15 cm ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบความสามารถการทำงาน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความสามารถการทำงาน

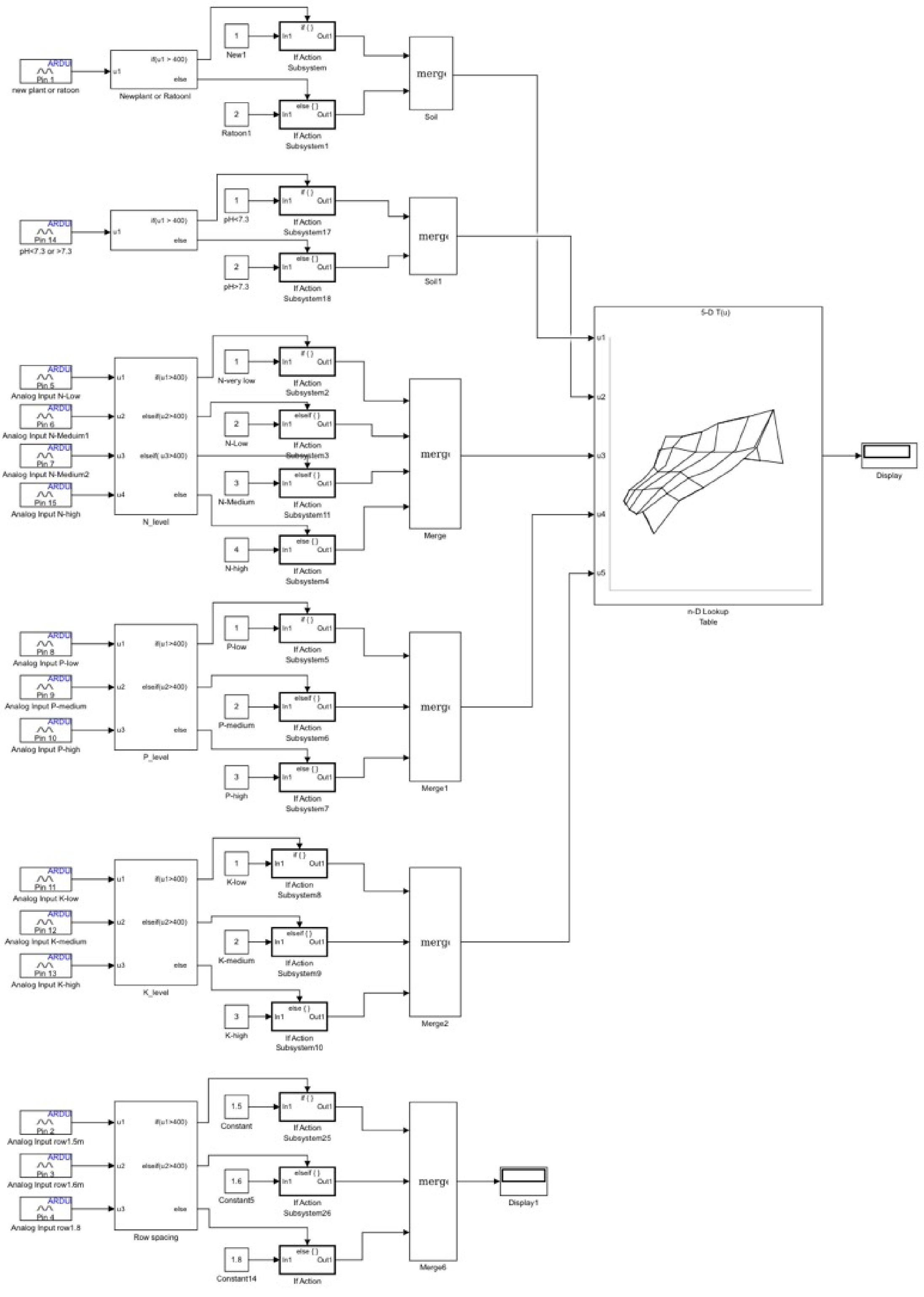
	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Avg.
Area (rai)	2.43	2.08	2.00	-
Field capacity (rai/h)	3.65	4.03	3.88	3.85
Field efficiency (%)	87.38	96.57	92.91	92.29

จากตาราง พบว่าความสามารถการทำงานเฉลี่ย 3.85 ไร่/ชั่วโมง ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 1.03 m/s ประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ย 92.29% ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.40 ลิตร/ไร่ ทั้งนี้ความสารถการทำงานที่ค่อนข้างสูง เพราะแปลงทดสอบเป็นแปลงที่ไม่มีวัชพืช และมีถนนสำหรับกลับหัวงานได้สะดวก ส่วนระบบควบคุมมอเตอร์ไม่พบปัญหาใดๆ รูปที่ 15 เป็นการทำงานของเครื่องต้นแบบที่ 1

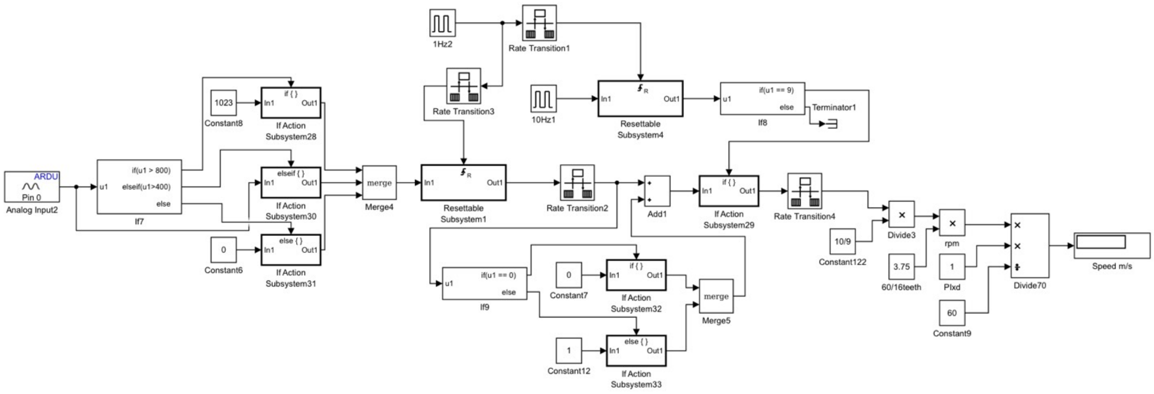
รูปที่ 14 การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบที่ 1

4. การปรับปรุงระบบควบคุมและประมวลผลของต้นแบบที่ 2

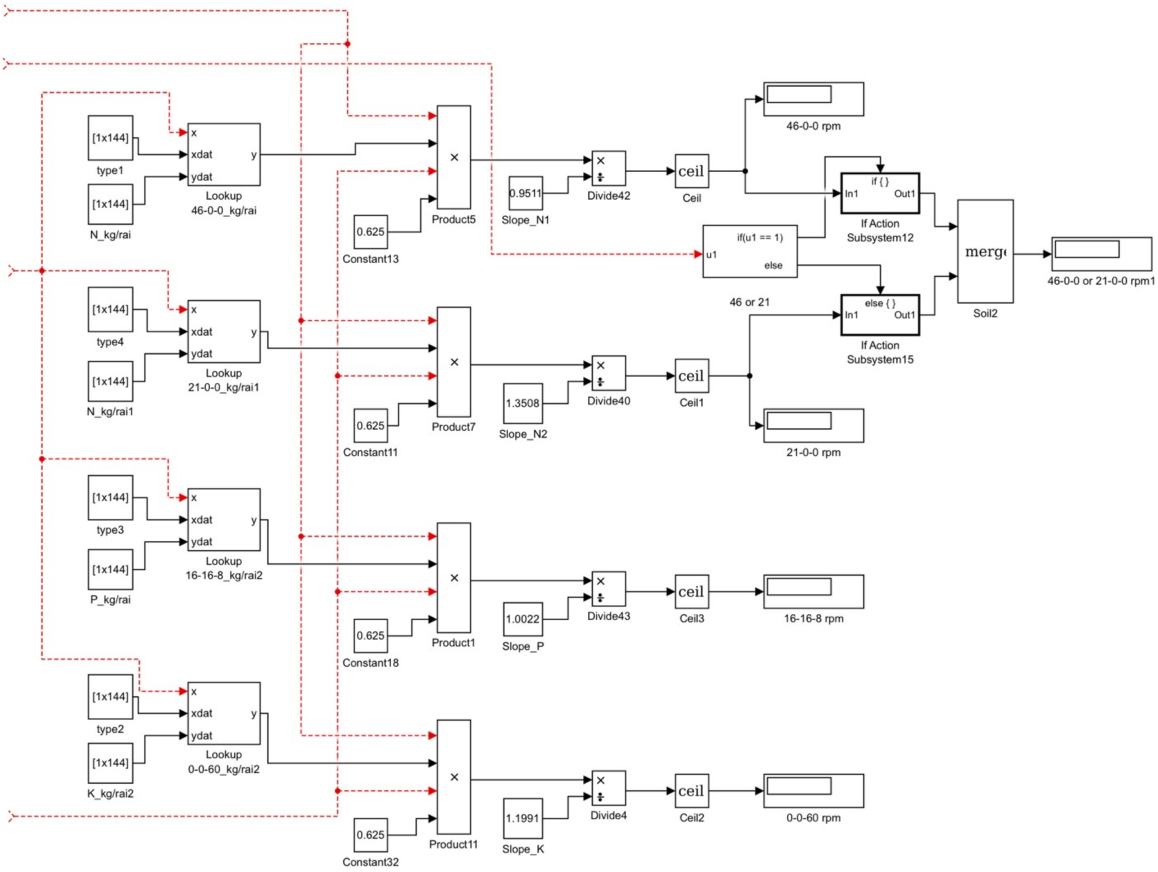
ในช่วงปลายปี 2560 กรมวิชาการเกษตร ได้ปรับปรุงคำแนะนำการให้ปุ๋ยสำหรับอ้อยฉบับล่าสุด ทางผู้วิจัยจึงได้แก้ไขโปรแกรม Matlab Simulink 2016 เพื่อเขียนคำสั่งสมองกลควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์กล่องใหม่ (รูปที่ 15-18) ให้สามารถทำงานได้ตามคำแนะนำใหม่ โดยสามารถเลือกอ้อยปลูก และอ้อยตอ pH 2 ระดับ N 4 ระดับ P 3 ระดับ และ K 3 ระดับ ใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกัน 144 สูตร และมีอัตราใส่กว้างตั้งแต่ 3-142 กิโลกรัม/ไร่ เนื่องจากคำแนะนำใหม่มีการใส่ปุ๋ยในอัตราที่มากขึ้น จึงได้ดำเนินการออกแบบลูกหยอดให้สามารถหยอดปุ๋ยได้ในอัตราที่ครอบคลุมตามคำแนะนำใหม่ (รูปที่ 19) รูปที่ 20 แสดงกล่องสมองกลควบคุมการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ย รูปที่ 21 แสดงการเชื่อมต่อสายไฟจากกล่องสมองกลควบคุมการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยไปยังมอเตอร์



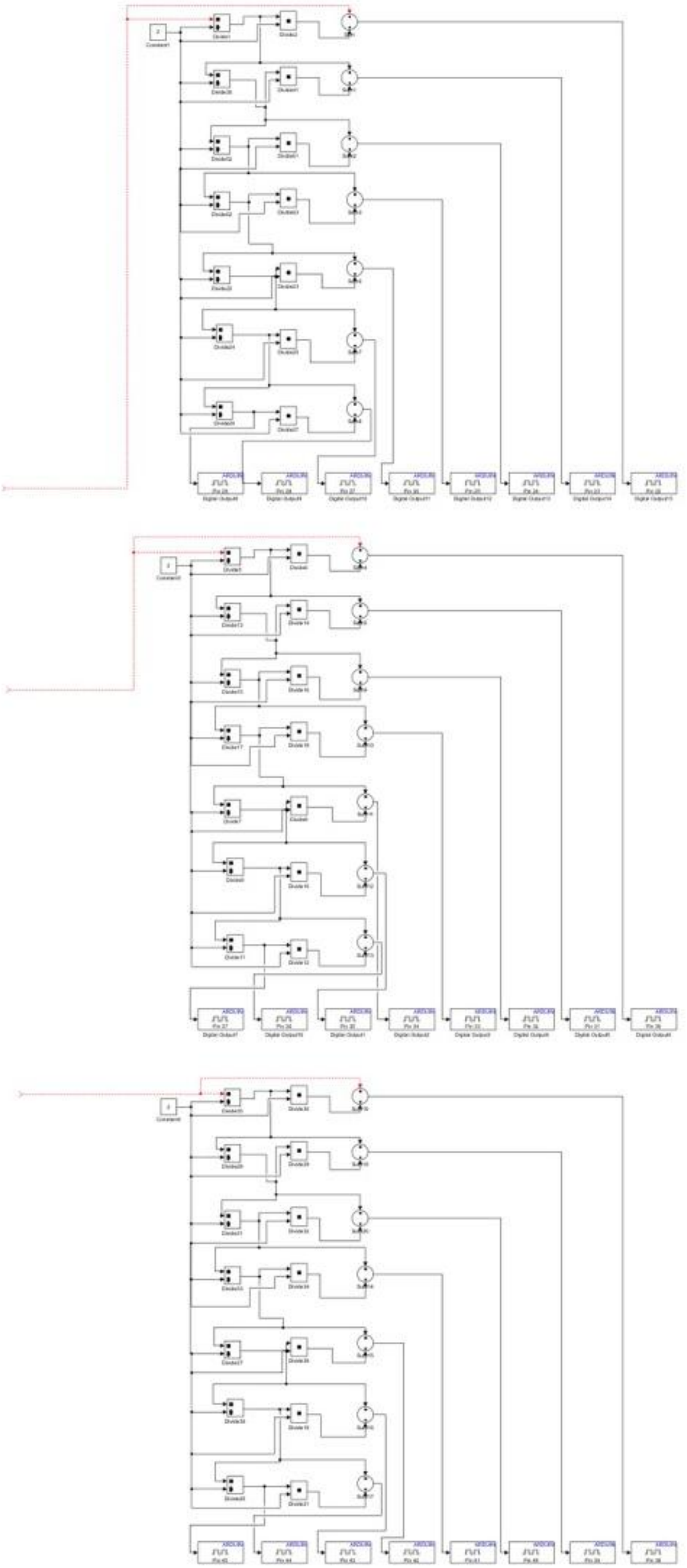
รูปที่ 15 Program Matlab Simulink (Input Part)



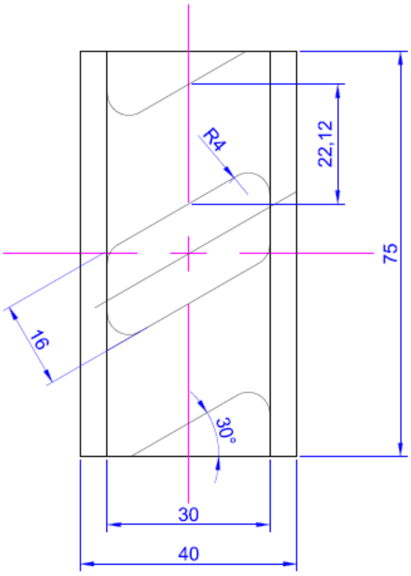
รูปที่ 16 Program Matlab Simulink (Tractor’s velocity Part)



รูปที่ 17 Program Matlab Simulink (Fertilizer calculation Part)

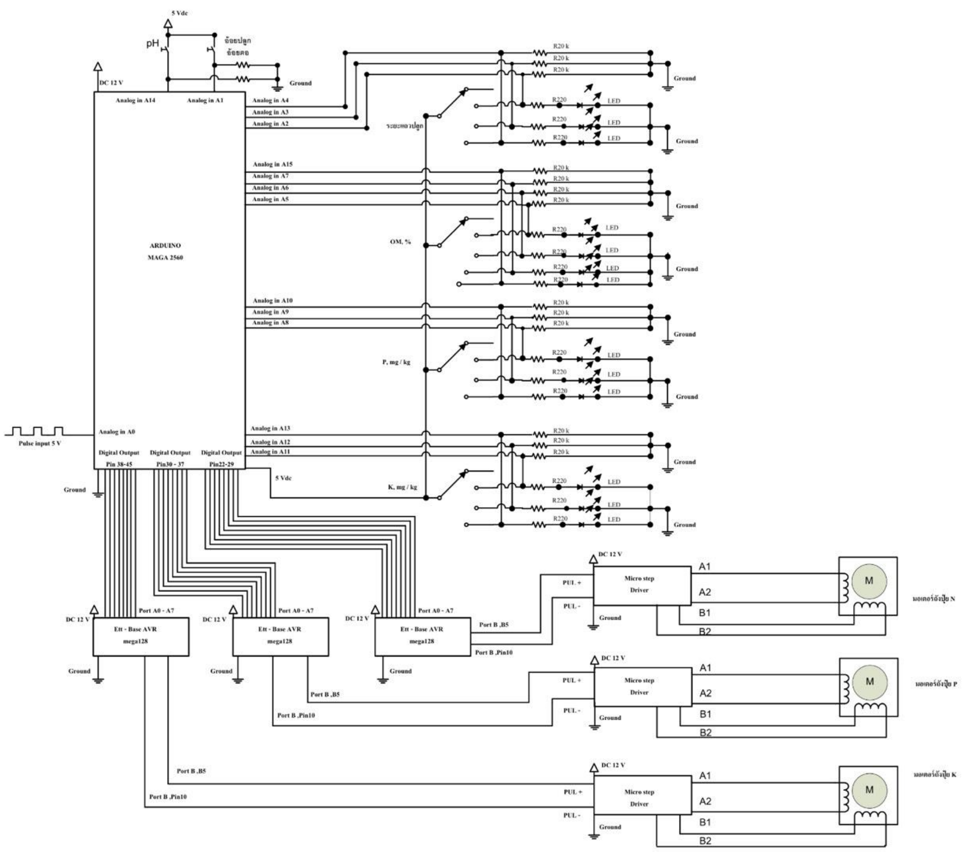


รูปที่ 18 Program Matlab Simulink (Decimal to binary)



รูปที่ 19 ลูกหยอดแบบร่องเฉียงแบบที่ 2

รูปที่ 20 กล่องสมองกลควบคุมการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ย



รูปที่ 21 การเชื่อมต่อสายไฟจากกล่องสมองกลควบคุมการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยไปยังมอเตอร์

5. ผลการทดสอบอัตราการใส่ปุ๋ยในห้องปฏิบัติการ ของต้นแบบที่ 2

ได้ทำการทดสอบเพื่อสอบเทียบอัตราการใส่ปุ๋ยที่ความเร็วรอบต่างๆ (รูปที่ 22) รายละเอียดข้อมูลการทดสอบดัง ภาคผนวก-ข โดยทดสอบให้ครอบคลุมอัตราการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินที่แนะนำใหม่ และมีการใช้ปุ๋ยหลักสูตร 21-0-0 เพิ่มขึ้นมาปุ๋ยที่ใช้ทดสอบมีความหนาแน่น (bulk density) ดังนี้

ปุ๋ย 46-0-0 ความหนาแน่นปุ๋ยเท่ากับ 0.7886 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

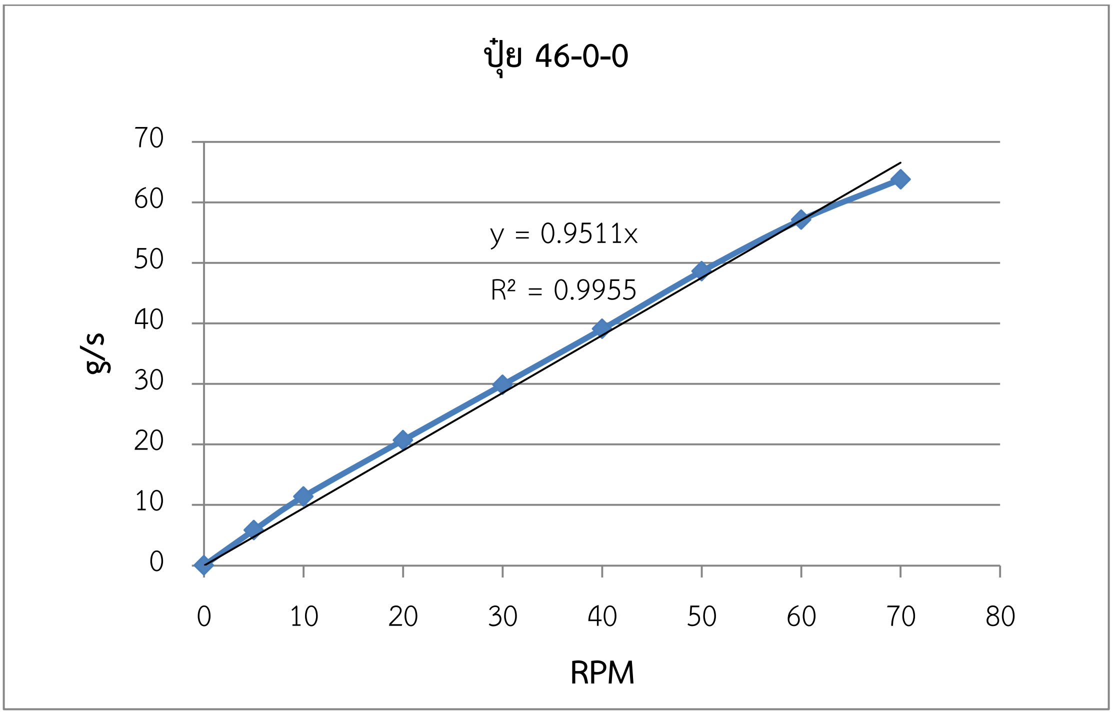
ปุ๋ย 21-0-0 ความหนาแน่นปุ๋ยเท่ากับ 1.1229 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ปุ๋ย 16-16-8 ความหนาแน่นปุ๋ยเท่ากับ 0.9454 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

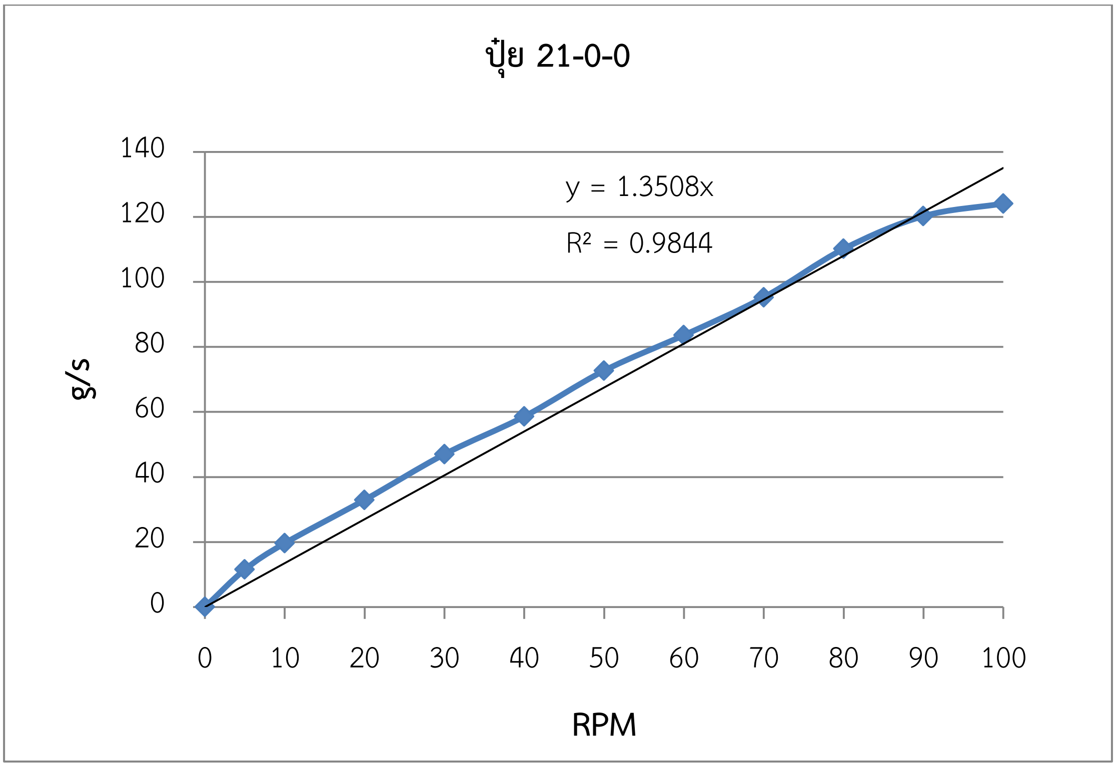
ปุ๋ย 0-0-60 ความหนาแน่นปุ๋ยเท่ากับ 1.0832 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย (g/s) ของปุ๋ยแต่ละชนิด กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm) ได้ดังรูปที่ 23 ถึง 26

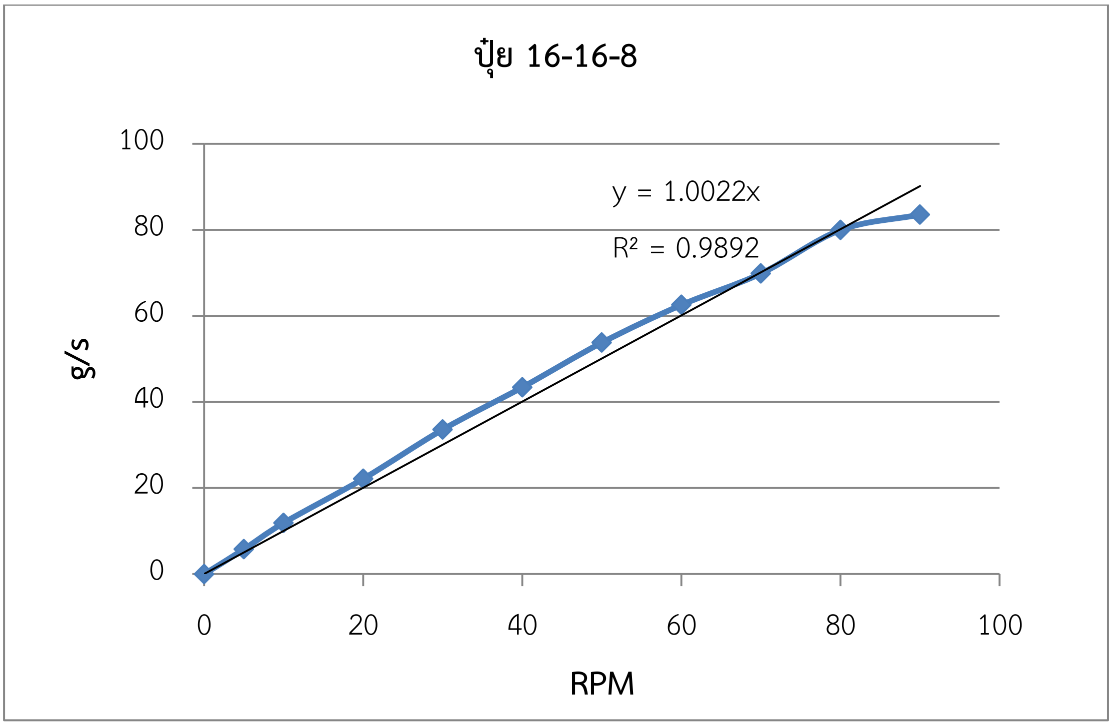
รูปที่ 22 สอบเทียบอัตราการใส่ปุ๋ย



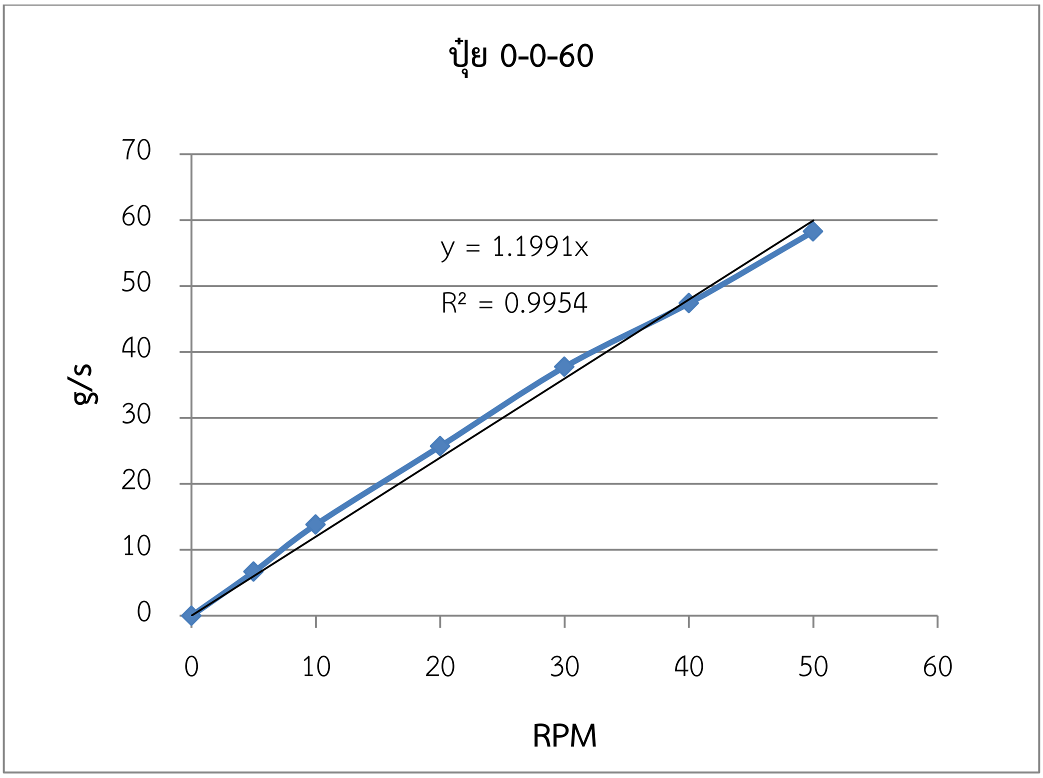
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย 46-0-0 (g/s) กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm)



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย 21-0-0 (g/s) กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm)



รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย 16-16-8 (g/s) กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm)



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ของอัตราการใส่ปุ๋ย 0-0-60 (g/s) กับรอบหมุนของมอเตอร์ (rpm)

***6. ผลการทดสอบความสามารถการทำงาน* ของต้นแบบที่ 2**

ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินในแปลงอ้อยตอของเกษตรกร อ. บ่อพลอย จ. กาญจนบุรี สภาพแปลงมีความชื้น 2.18% (มาตรฐานแห้ง) ความหนาแน่นดินสภาพแห้ง 1.60 g/cm^3 ระยะห่างระหว่างแถวอ้อย 1.8 m ค่า pH $<$ 7.3 ใช้รถแทรกเตอร์คูโบต้า รุ่น B2420 ขนาด 24 แรงม้า เป็นต้นกำลัง เลือกใช้เกียร์ 1 Hi ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ราว 1200 rpm ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 0.8 m/s ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบความสามารถการทำงานเครื่องต้นแบบที่ 2

รูปที่ 27 การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบที่ 2

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความสามารถการทำงานเครื่องต้นแบบที่ 2

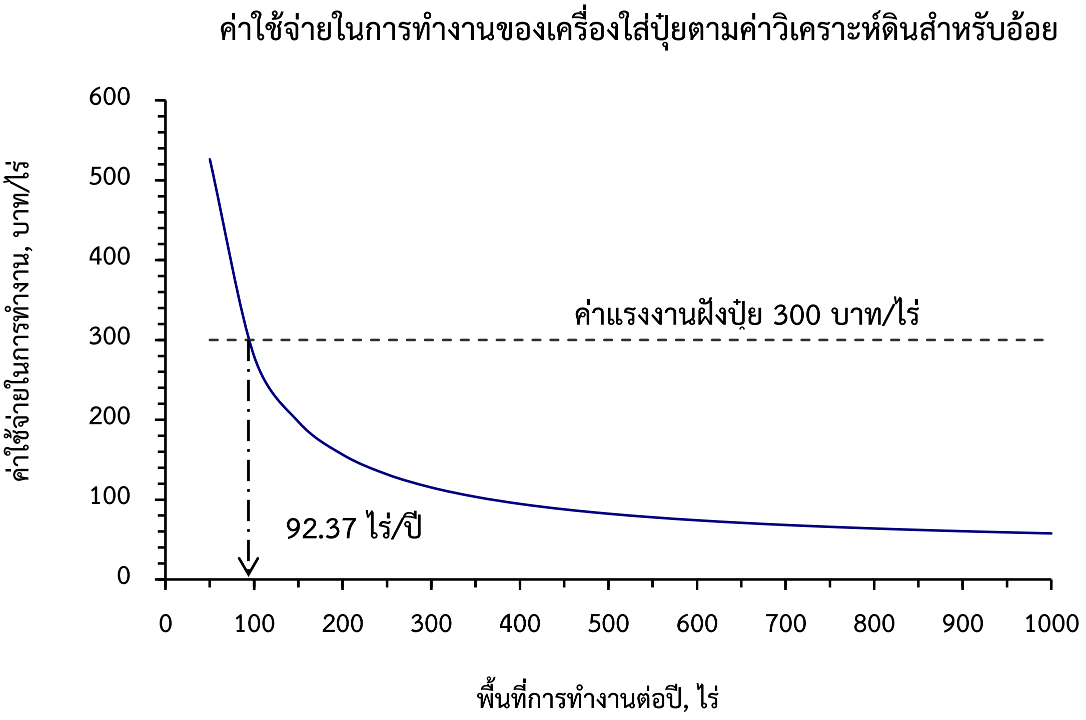
	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Avg.
Area (rai)	1.51	1.30	1.51	-
Field capacity (rai/h)	3.13	2.99	2.93	3.02
Field efficiency (%)	96.55	92.31	90.32	93.06
Fuel consumption (l/rai)	0.46	0.43	0.46	0.45

จากตาราง พบว่าความสามารถการทำงานเฉลี่ย 3.02 ไร่/ชั่วโมง ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 0.8 m/s ประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ย 93.06% ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.45 ลิตร/ไร่

7. การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

คำนวณหาจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยเปรียบเทียบการใช้เครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย และการใช้แรงงานคนฝังปุ๋ย โดยคำนวณในกรณีที่เกษตรกรต้องการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินผสมปุ๋ยใช้เองหรือผู้รับจ้างซื้อรถแทรกเตอร์ และเครื่องใส่ปุ๋ย มาใช้งานหรือใช้รับจ้าง กำหนดให้ราคาของรถแทรกเตอร์ขนาด 24 แรงม้า ราคา 322,000 บาท และการใช้งานรถแทรกเตอร์เพื่อใส่ปุ๋ยประมาณ 25% ของการใช้งานทั้งหมด เครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยราคา 98,000 บาท (ภาคผนวก-ค)

จากการคำนวณสามารถเขียนกราฟแสดงความความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายในการใช้งานเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย กับ การใช้แรงงานคนฝังปุ๋ยได้ดัง รูปที่ 28



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การใช้งานต่อปี กับค่าใช้จ่ายในการใช้งาน

จากรูปที่ 28 จะเห็นว่าต้นทุนในการใช้งานของเกษตรกรจะลดลงเมื่อพื้นที่การใช้งานมากขึ้น เกษตรกรสามารถพิจารณาได้ว่าควรจะซื้อรถแทรกเตอร์พร้อมเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยมาใช้งานหรือไม่ โดยพิจารณาจากต้นทุนในการใช้งานเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยติดรถแทรกเตอร์ ซึ่งควรจะต่ำกว่าราคาค่าจ้างแรงงานฝังปุ๋ยในปัจจุบัน

ค่าจ้างแรงงานฝังปุ๋ยด้วยแรงงานคน 300 บาท/ไร่ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การใช้งานต่อปี กับต้นทุนในการทำงาน จะเห็นว่าที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทำงาน 300 บาท/ไร่ พื้นที่การใช้งานเท่ากับ 92.37 ไร่/ปี ดังนั้นเกษตรกรที่จะซื้อรถแทรกเตอร์พร้อมเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย มาใช้งานหรือรับจ้างควรมีพื้นที่การใส่ปุ๋ยอ้อยไม่ต่ำกว่า 92.37 ไร่/ปี เป็นเวลา 7 ปี จึงจะคุ้มต่อการซื้อรถแทรกเตอร์พร้อมพร้อมเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยมาใช้งาน

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมได้พัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย โดยออกแบบเป็นแบบแถวเดี่ยวสำหรับติดพ่วงรถแทรกเตอร์ขนาด 24 แรงม้า มีส่วนประกอบหลักคือ ถังใส่ปุ๋ยหลัก 3 ถัง ความจุถังละ 30-40 กิโลกรัม ชุดลูกหยอดแบบร่องเฉียง ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสเตปปิ้ง จำนวน 3 ชุด ใบตัดอ้อยแบบซี่ (Cutting disk toothed edge type) ขนาด 18 นิ้ว จำนวน 2 ใบ ขาไถเปิดร่องดิน (Chisel plows) จำนวน 2 ใบ ท่อนำปุ๋ย และล้อวัดความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ ที่ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดรอบแบบ Proximity switch กล่องสมองกลควบคุมมอเตอร์สามารถใส่ปุ๋ยได้ตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร โดยจะผสมปุ๋ยและหยอดปุ๋ยตามผลจากการคำนวณ โดยมีปุ๋ยหลัก 3 ถัง คือปุ๋ยสูตร 46-0-0 หรือ 21-0-0, 16-16-8 และ 0-0-60 ค่าจากการวิเคราะห์ดินจะมี อินทรียวัตถุ 4 ระดับ ฟอสฟอรัส 3 ระดับ โปแตสเซียม 3 ระดับ pH 2 ระดับ และแยกเป็นอ้อยตอกับอ้อยปลูก รวมเป็น 144 ทางเลือก และยังเลือกระยะระหว่างแถวได้ 3 ระดับ การทำงานเมื่อรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่จะมีใบตัดอ้อยแบบซี่ตัดใบอ้อยให้ขาด จากนั้นมีขาไถเปิดร่องดิน ไถเปิดร่องลึกประมาณ 15-20 เซนติเมตร ขณะเดียวกัน ปุ๋ยจากทั้ง 3 ถัง จะไหลมารวมกันที่ขาไถเปิดร่องดิน และถูกฝังลงดิน

จากการทดสอบในแปลงอ้อย พบว่า ความสามารถการทำงานเฉลี่ย 3.02 ไร่/ชั่วโมง ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 0.8 m/s ประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ย 93.06% ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.45 ลิตร/ไร่ จากการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนพบว่า เกษตรกรที่จะซื้อรถแทรกเตอร์พร้อมเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย มาใช้งานหรือรับจ้างควรมีพื้นที่การปลูกอ้อยไม่ต่ำกว่า 92.37 ไร่/ปี เป็นเวลา 7 ปี จึงจะคุ้มต่อการซื้อรถแทรกเตอร์พร้อมพร้อมเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยมาใช้งาน

บทสรุปผลและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย ได้ดำเนินงานเสร็จสิ้นตามกำหนด และบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ได้กำหนดไว้ คือได้ต้นแบบเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย สามารถใช้เป็นต้นแบบให้กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกอ้อย หรือผู้ผลิตนำไปผลิตเชิงพาณิชย์ เพื่อช่วยสนับสนุนให้เกษตรกรหันมาใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินมากขึ้น ลดขั้นตอนและต้นทุนการผสมปุ๋ย จ่ายปุ๋ยได้แม่นยำทำให้เกิดการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และลดการสูญเสียทรัพยากรได้ สอดคล้องกับนโยบายเกษตร 4.0 ที่พัฒนาการเกษตรแบบดั้งเดิม ไปสู่การเกษตรสมัยใหม่ ที่เน้นการบริหารจัดการและเทคโนโลยี หรือการทำเกษตรแบบแม่นยำสูง

บรรณานุกรม

กรมวิชาการเกษตร. 2553. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ. กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา สำนักวิจัยและพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ. 122 หน้า.

ขนิษฐ์ หว่านณรงค์ อัคคพล เสนาณรงค์ พินิจ จิรัคคกุล เวียง อากรชี และอุทัย ธานี. 2558. ทดสอบและพัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยสำหรับปุ๋ยผสม. รายงานผลงานเรื่องเต็มการทดลองที่สิ้นสุด 2558. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร.

ขนิษฐ์ หว่านณรงค์ อัคคพล เสนาณรงค์ เวียง อากรชี วีระ สุขประเสริฐ และอาธร พรบุญ. 2559. วิจัยและพัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบผสมแม่ปุ๋ยภายในตัวเอง. *ใน: การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17*. 8-10 กันยายน 2559 ณ ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุม อิมแพ็ค เมืองทองธานี จ.นนทบุรี

พรรณพิมล ฉัตราคม. 2558. ความต้องการใช้ปุ๋ยในการเกษตรของประเทศไทย. ส่วนวิจัยครัวเรือนเกษตรการจัดการฟาร์มและปัจจัยการผลิต สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. สืบค้นจาก: http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=684&filename=index [พ.ค. 2558].

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2553). หุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อเกษตรกรรมความแม่นยำสูง. สืบค้นจาก: http://admission.eng.ku.ac.th/highlights/kuagrobot [มิ.ย. 2557].

วิชัย โอภานุกุล พินิจ จิรัคคกุล และวีระ สุขประเสริฐ. 2556. รายงานวิจัยกิจกรรมสำรวจการใช้เครื่องฝังปุ๋ยอ้อยในประเทศ. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร.

สายรุ้ง กิตติวิเศษกุล และวสุ อุดมเพทายกุล. 2558. การพัฒนาระบบการหยอดสารเคมีในปริมาณน้อยเพื่อกำจัดศัตรูพืชควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. หน้า 120. ใน: รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 16 ประจำปี 2558 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 8. 17-19 มีนาคม 2558 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. 2560. ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปุ๋ยเคมีสูตรที่สำคัญ ปี 2554-2559 สืบค้นจาก: http://www.oae.go.th/download/FactorOfProduct/Fertilizer_value49-54.html [ม.ค. 2561].

อัคคพล เสนาณรงค์ และ ขนิษฐ์ หว่านณรงค์. 2560. นวัตกรรมเกษตรไทยมุ่งสู่ Thailand 4.0. เอกสารประกอบการบรรยายในงานสัมมนา. 8 กันยายน 2560 ณ ห้องประชุม Amber 2-3 (Hall 3) ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุม อิมแพ็ค เมืองทองธานี จ.นนทบุรี

Ehtesham, F. and L. Mohammad. 2012. Design, development and field evaluation of a map-based variable rate granular fertilizer application control system. *CIGR Journal*. Vol.14, No.4: 255-261.

Wu, C., Chen, X., Han, Y. and Zhang S. (2004). System modeling and control of automatically variable rate fertilizer applicator, Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International, vol. 1(10-13), October 2004, pp. 513 - 518.

ภาคผนวก-ก

โปรแกรม ภาษา C (Binary to Frequency Part) สำหรับบอร์ด ET-Base Mega 1280

```
/*******************************************************
This program was created by the
CodeWizardAVR V3.12 Advanced
Automatic Program Generator
ฉ Copyright 1998-2014 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.
http://www.hpinfotech.com
Project :
Version :
Date    : 3/6/2017
Author  :
Company :
Comments:
Chip type               : ATmega64
Program type            : Application
AVR Core Clock frequency: 16.000000 MHz
Memory model            : Small
External RAM size       : 0
Data Stack size         : 1024
*******************************************************/
```

```
#include <mega64.h>

#include <delay.h>

long  Frequency  = 5500;

long Duty = 0;

long F_PWM[101]= {0,37000,19000,12000,9000,7900,6700,5500,4700,4200,3700

                  ,3400,3100,2900,2700,2500,2375,2250,2125,2000,1900

                  ,1800,1700,1634,1566,1500,1450,1400,1350,1300,1250

                  ,1200,1170,1135,1100,1075,1050,1025,1000,960,935

                  ,912,888,865,850,835,820,805,790,770,740

                  ,732,728,720,685,674,666,658,650,635,620

                  ,613,606,599,592,585,575,562,550,544,538

                  ,533,525,516,508,495,490,485,478,471,465

                  ,458,451,445,441,438,433,429,425,422,418

                  ,412,410,405,400,395,390,386,382,379,374};

// Declare your global variables here

void main(void)

{

// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization

// Port A initialization

// Function: Bit7=In Bit6=In Bit5=In Bit4=In Bit3=In Bit2=In Bit1=In Bit0=In

DDRA=(0<<DDA7) | (0<<DDA6) | (0<<DDA5) | (0<<DDA4) | (0<<DDA3) | (0<<DDA2) |
(0<<DDA1) | (0<<DDA0);
```

```
// State: Bit7=T Bit6=T Bit5=T Bit4=T Bit3=T Bit2=T Bit1=T Bit0=T

PORTA=(0<<PORTA7) | (0<<PORTA6) | (0<<PORTA5) | (0<<PORTA4) | (0<<PORTA3) |
(0<<PORTA2) | (0<<PORTA1) | (0<<PORTA0);

// Port B initialization

// Function: Bit7=In Bit6=Out Bit5=Out Bit4=In Bit3=In Bit2=In Bit1=In Bit0=In

DDRB=(0<<DDB7) | (1<<DDB6) | (1<<DDB5) | (0<<DDB4) | (0<<DDB3) | (0<<DDB2) |
(0<<DDB1) | (0<<DDB0);

// State: Bit7=T Bit6=0 Bit5=0 Bit4=T Bit3=T Bit2=T Bit1=T Bit0=T

PORTB=(0<<PORTB7) | (0<<PORTB6) | (0<<PORTB5) | (0<<PORTB4) | (0<<PORTB3) |
(0<<PORTB2) | (0<<PORTB1) | (0<<PORTB0);

// Port C initialization

// Function: Bit7=In Bit6=In Bit5=In Bit4=In Bit3=In Bit2=In Bit1=In Bit0=In

DDRC=(0<<DDC7) | (0<<DDC6) | (0<<DDC5) | (0<<DDC4) | (0<<DDC3) | (0<<DDC2) |
(0<<DDC1) | (0<<DDC0);

// State: Bit7=T Bit6=T Bit5=T Bit4=T Bit3=T Bit2=T Bit1=T Bit0=T

PORTC=(0<<PORTC7) | (0<<PORTC6) | (0<<PORTC5) | (0<<PORTC4) | (0<<PORTC3) |
(0<<PORTC2) | (0<<PORTC1) | (0<<PORTC0);

// Port D initialization

// Function: Bit7=In Bit6=In Bit5=In Bit4=In Bit3=In Bit2=In Bit1=In Bit0=In

DDRD=(0<<DDD7) | (0<<DDD6) | (0<<DDD5) | (0<<DDD4) | (0<<DDD3) | (0<<DDD2) |
(0<<DDD1) | (0<<DDD0);

// State: Bit7=T Bit6=T Bit5=T Bit4=T Bit3=T Bit2=T Bit1=T Bit0=T

PORTD=(0<<PORTD7) | (0<<PORTD6) | (0<<PORTD5) | (0<<PORTD4) | (0<<PORTD3) |
(0<<PORTD2) | (0<<PORTD1) | (0<<PORTD0);
```

```
// Port E initialization

// Function: Bit7=In Bit6=In Bit5=In Bit4=In Bit3=In Bit2=In Bit1=In Bit0=In

DDRE=(0<<DDE7) | (0<<DDE6) | (0<<DDE5) | (0<<DDE4) | (0<<DDE3) | (0<<DDE2) |
(0<<DDE1) | (0<<DDE0);

// State: Bit7=T Bit6=T Bit5=T Bit4=T Bit3=T Bit2=T Bit1=T Bit0=T

PORTE=(0<<PORTE7) | (0<<PORTE6) | (0<<PORTE5) | (0<<PORTE4) | (0<<PORTE3) |
(0<<PORTE2) | (0<<PORTE1) | (0<<PORTE0);

// Port F initialization

// Function: Bit7=In Bit6=In Bit5=In Bit4=In Bit3=In Bit2=In Bit1=In Bit0=In

DDRF=(0<<DDF7) | (0<<DDF6) | (0<<DDF5) | (0<<DDF4) | (0<<DDF3) | (0<<DDF2) |
(0<<DDF1) | (0<<DDF0);

// State: Bit7=T Bit6=T Bit5=T Bit4=T Bit3=T Bit2=T Bit1=T Bit0=T

PORTF=(0<<PORTF7) | (0<<PORTF6) | (0<<PORTF5) | (0<<PORTF4) | (0<<PORTF3) |
(0<<PORTF2) | (0<<PORTF1) | (0<<PORTF0);

// Port G initialization

// Function: Bit4=In Bit3=In Bit2=In Bit1=In Bit0=In

DDRG=(0<<DDG4) | (0<<DDG3) | (0<<DDG2) | (0<<DDG1) | (0<<DDG0);

// State: Bit4=T Bit3=T Bit2=T Bit1=T Bit0=T

PORTG=(0<<PORTG4) | (0<<PORTG3) | (0<<PORTG2) | (0<<PORTG1) | (0<<PORTG0);

// Timer/Counter 0 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer 0 Stopped

// Mode: Normal top=0xFF

// OC0 output: Disconnected
```

```
ASSR=0<<AS0;

TCCR0=(0<<WGM00) | (0<<COM01) | (0<<COM00) | (0<<WGM01) | (0<<CS02) |
(0<<CS01) | (0<<CS00);

TCNT0=0x00;

OCR0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: 250.000 kHz

// Mode: Ph. & fr. cor. PWM top=ICR1

// OC1A output: Non-Inverted PWM

// OC1B output: Non-Inverted PWM

// OC1C output: Disconnected

// Noise Canceler: Off

// Input Capture on Falling Edge

// Timer Period: 0 us

// Output Pulse(s):

// OC1A Period: 0 us

// OC1B Period: 0 us

// Timer1 Overflow Interrupt: Off

// Input Capture Interrupt: Off

// Compare A Match Interrupt: Off

// Compare B Match Interrupt: Off

// Compare C Match Interrupt: Off
```

```
TCCR1A=(1<<COM1A1) | (0<<COM1A0) | (1<<COM1B1) | (0<<COM1B0) |
(0<<COM1C1) | (0<<COM1C0) | (0<<WGM11) | (0<<WGM10);

TCCR1B=(0<<ICNC1) | (0<<ICES1) | (1<<WGM13) | (0<<WGM12) | (0<<CS12) |
(1<<CS11) | (1<<CS10);

TCNT1H=0x00;

TCNT1L=0x00;

ICR1H=0x00;

ICR1L=0x00;

OCR1AH=0x00;

OCR1AL=0x00;

OCR1BH=0x00;

OCR1BL=0x00;

OCR1CH=0x00;

OCR1CL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer2 Stopped

// Mode: Normal top=0xFF

// OC2 output: Disconnected

TCCR2=(0<<WGM20) | (0<<COM21) | (0<<COM20) | (0<<WGM21) | (0<<CS22) |
(0<<CS21) | (0<<CS20);

TCNT2=0x00;

OCR2=0x00;
```

```
// Timer/Counter 3 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer3 Stopped

// Mode: Normal top=0xFFFF

// OC3A output: Disconnected

// OC3B output: Disconnected

// OC3C output: Disconnected

// Noise Canceler: Off

// Input Capture on Falling Edge

// Timer3 Overflow Interrupt: Off

// Input Capture Interrupt: Off

// Compare A Match Interrupt: Off

// Compare B Match Interrupt: Off

// Compare C Match Interrupt: Off

TCCR3A=(0<<COM3A1) | (0<<COM3A0) | (0<<COM3B1) | (0<<COM3B0) |
(0<<COM3C1) | (0<<COM3C0) | (0<<WGM31) | (0<<WGM30);

TCCR3B=(0<<ICNC3) | (0<<ICES3) | (0<<WGM33) | (0<<WGM32) | (0<<CS32) |
(0<<CS31) | (0<<CS30);

TCNT3H=0x00;

TCNT3L=0x00;

ICR3H=0x00;

ICR3L=0x00;

OCR3AH=0x00;

OCR3AL=0x00;
```

```
OCR3BH=0x00;

OCR3BL=0x00;

OCR3CH=0x00;

OCR3CL=0x00;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization

TIMSK=(0<<OCIE2) | (0<<TOIE2) | (0<<TICIE1) | (0<<OCIE1A) | (0<<OCIE1B) |
(0<<TOIE1) | (0<<OCIE0) | (0<<TOIE0);

ETIMSK=(0<<TICIE3) | (0<<OCIE3A) | (0<<OCIE3B) | (0<<TOIE3) | (0<<OCIE3C) |
(0<<OCIE1C);

// External Interrupt(s) initialization

// INT0: Off

// INT1: Off

// INT2: Off

// INT3: Off

// INT4: Off

// INT5: Off

// INT6: Off

// INT7: Off

EICRA=(0<<ISC31) | (0<<ISC30) | (0<<ISC21) | (0<<ISC20) | (0<<ISC11) | (0<<ISC10) |
(0<<ISC01) | (0<<ISC00);

EICRB=(0<<ISC71) | (0<<ISC70) | (0<<ISC61) | (0<<ISC60) | (0<<ISC51) | (0<<ISC50) |
(0<<ISC41) | (0<<ISC40);

EIMSK=(0<<INT7) | (0<<INT6) | (0<<INT5) | (0<<INT4) | (0<<INT3) | (0<<INT2) |
(0<<INT1) | (0<<INT0);

// USART0 initialization
```

```
// USART0 disabled
UCSR0B=(0<<RXCIE0) | (0<<TXCIE0) | (0<<UDRIE0) | (0<<RXEN0) | (0<<TXEN0) | (0<<UCSZ02) | (0<<RXB80) | (0<<TXB80);
// USART1 initialization
// USART1 disabled
UCSR1B=(0<<RXCIE1) | (0<<TXCIE1) | (0<<UDRIE1) | (0<<RXEN1) | (0<<TXEN1) | (0<<UCSZ12) | (0<<RXB81) | (0<<TXB81);
// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// The Analog Comparator's positive input is
// connected to the AIN0 pin
// The Analog Comparator's negative input is
// connected to the AIN1 pin
ACSR=(1<<ACD) | (0<<ACBG) | (0<<ACO) | (0<<ACI) | (0<<ACIE) | (0<<ACIC) | (0<<ACIS1) | (0<<ACIS0);
SFIOR=(0<<ACME);
// ADC initialization
// ADC disabled
ADCSRA=(0<<ADEN) | (0<<ADSC) | (0<<ADFR) | (0<<ADIF) | (0<<ADIE) | (0<<ADPS2) | (0<<ADPS1) | (0<<ADPS0);
// SPI initialization
// SPI disabled
SPCR=(0<<SPIE) | (0<<SPE) | (0<<DORD) | (0<<MSTR) | (0<<CPOL) | (0<<CPHA) | (0<<SPR1) | (0<<SPR0);
// TWI initialization
```

```
// TWI disabled
TWCR=(0<<TWEA) | (0<<TWSTA) | (0<<TWSTO) | (0<<TWEN) | (0<<TWIE);
while (1)
      {
      // Place your code here
            Frequency = F_PWM[PINA];
            ICR1 = Frequency;
            Duty = Frequency/2;
            OCR1A = Duty;
            OCR1B = Duty;
      }
}
```

ภาคผนวก-ข

ตาราง ข-1 ข้อมูลอัตราการใส่ปุ๋ย 46-0-0 (g/s) ที่ความเร็วรอบหมุนต่างๆของมอเตอร์ rpm)

ความเร็วรอบหมุนมอเตอร์(rpm)	อัตราการใส่ปุ๋ย 46-0-0 (g/s)				St.dev.
	Rep.1	Rep.2	Rep.3	avg (g/s)	
0	0	0	0	0	0
5	5.81	5.84	5.81	5.82	0.02
10	11.32	11.44	11.42	11.39	0.07
20	20.63	20.76	20.67	20.69	0.07
30	29.79	29.99	29.77	29.85	0.12
40	39.03	38.95	39.22	39.07	0.14
50	48.61	48.40	48.82	48.61	0.21
60	58.09	56.77	56.49	57.12	0.85
70	63.68	63.82	63.94	63.82	0.13

ตาราง ข-2 ข้อมูลอัตราการใส่ปุ๋ย 21-0-0 (g/s) ที่ความเร็วรอบหมุนต่างๆของมอเตอร์ rpm)

ความเร็วรอบหมุนมอเตอร์(rpm)	อัตราการใส่ปุ๋ย 46-0-0 (g/s)					St.dev.
	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.4	avg (g/s)	
0	0	0	0	0	0.00	0.00
5	11.58	11.67	11.57	11.33	11.54	0.14
10	19.38	19.37	19.86	19.68	19.57	0.24
20	32.97	32.95	33.10	32.82	32.96	0.12
30	47.24	47.13	46.85	47.07	47.07	0.16
40	58.19	59.12	58.48	58.25	58.51	0.43
50	72.66	72.71	72.76	72.68	72.70	0.05
60	84.67	84.05	82.77	84.10	83.90	0.80
70	96.12	94.71	95.97	95.17	95.49	0.67
80	108.04	110.19	110.16	110.15	109.64	1.07
90	120.23	120.90	121.06	118.79	120.24	1.03
100	123.21	122.52	124.07	125.75	123.89	1.39

ตาราง ข-3 ข้อมูลอัตราการใส่ปุ๋ย 16-16-8 (g/s) ที่ความเร็วรอบหมุนต่างๆของมอเตอร์ rpm)

ความเร็วรอบหมุนมอเตอร์ (rpm)	อัตราการใส่ปุ๋ย 16-16-8 (g/s)				St.dev.
	Rep.1	Rep.2	Rep.3	avg (g/s)	
0	0	0	0	0	0
5	5.82	5.72	5.81	5.78	0.05
10	11.93	11.92	11.88	11.91	0.03
20	22.46	22.46	21.56	22.16	0.52
30	33.45	33.92	33.44	33.61	0.27
40	44.15	43.30	42.83	43.43	0.67
50	53.50	53.60	54.33	53.81	0.45
60	63.51	62.19	62.00	62.57	0.82
70	70.47	67.50	71.64	69.87	2.14
80	79.25	80.26	80.42	79.98	0.64
90	84.26	83.92	82.43	83.54	0.97

ตาราง ข-4 ข้อมูลอัตราการใส่ปุ๋ย 0-0-60 (g/s) ที่ความเร็วรอบหมุนต่างๆของมอเตอร์ rpm)

ความเร็วรอบหมุนมอเตอร์ (rpm)	อัตราการใส่ปุ๋ย 0-0-60 (g/s)				St.dev.
	Rep.1	Rep.2	Rep.3	avg (g/s)	
0	0	0	0	0	0
5	6.50	6.81	6.66	6.66	0.15
10	14.04	13.81	13.61	13.82	0.22
20	25.55	25.88	25.65	25.69	0.17
30	37.50	38.24	37.43	37.72	0.45
40	47.52	47.09	47.53	47.38	0.25
50	57.83	58.40	58.53	58.25	0.37

ภาคผนวก -ค

การคำนวณจุดคุ้มทุนของเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย

กำหนดให้ราคาของรถแทรกเตอร์ขนาด 24 แรงม้า ราคา 322,000 บาท และการใช้งานรถแทรกเตอร์เพื่อใส่ปุ๋ยประมาณ 25% ของการใช้งานทั้งหมด เครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย ราคา 98,000 บาท รวมราคาทั้งหมด 420,000 บาท โดยใช้งานรถแทรกเตอร์ 10 ปี และอุปกรณ์ 7 ปี

ค่าในการคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายของแทรกเตอร์ต้นกำลัง

ราคารถแทรกเตอร์, P	= 322,000	บาท
ราคาซาก, S	= 25 %ของ P	บาท
อายุการใช้งาน, N	= 10	ปี
อัตราดอกเบี้ย, i	= 5.5	เปอร์เซ็นต์/ปี
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	= 27.59 (9 ม.ค. 2561)	บาท/ลิตร
อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	= 0.45	ลิตร/ไร่
ค่าน้ำมันหล่อลื่น	= 10% ของค่าน้ำมัน	
ค่าแรงขับรถแทรกเตอร์และคนงานรวม 13 คน	= 300	บาท/วัน/คน
ค่าบำรุงรักษารถแทรกเตอร์	= 0.50% ของP/100 ชั่วโมง	บาท/ชั่วโมง

ค่าในการคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย

ราคา, P_1	98,000	บาท
ราคาซาก, S_1	10%ของ P_1	บาท
อายุการใช้งาน, N_1	7	ปี
อัตราดอกเบี้ย, i_1	5.5	เปอร์เซ็นต์ต่อปี
ค่าบำรุงรักษา	0.5% ของ P_1/100ชั่วโมง	บาท/ชั่วโมง
ความสามารถการทำงาน	3.02	ไร่/ชั่วโมง
พื้นที่ทำงานต่อปี	A	ไร่

การคำนวณต้นทุนต่อปีของรถแทรกเตอร์

ราคารถแทรกเตอร์	322,000	บาท
<u>ค่าต้นทุนคงที่:</u>		
ค่าเสื่อมราคา	25,760	บาท/ปี
ค่าดอกเบี้ยในการลงทุน	10,626	บาท/ปี
รวมต้นทุนคงที่	36,386	บาท/ปี
ต้นทุนคงที่ในการเป็นต้นกำลังของเครื่องเครื่องใส่ปุ๋ย ตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย	9,096.50	บาท/ปี
(หนึ่งในสี่ของค่าใช้จ่ายคงที่รวม)		
<u>ค่าต้นทุนผันแปร:</u>		
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	37.49	บาท/ชั่วโมง
ค่าน้ำมันหล่อลื่น	3.75	บาท/ชั่วโมง
ค่าแรงขับรถแทรกเตอร์ 1คน	37.50	บาท/ชั่วโมง
ค่าบำรุงรักษารถแทรกเตอร์	16.10	บาท/ชั่วโมง
รวมค่าต้นทุนผันแปรของรถแทรกเตอร์	94.84	บาท/ชั่วโมง

การคำนวณต้นทุนต่อปีของเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย

ราคา, P	98,000	บาท
<u>ค่าต้นทุนคงที่:</u>		
ค่าเสื่อมราคา	12,600	บาท/ปี
ค่าดอกเบี้ยในการลงทุน	2,964	บาท/ปี
ค่าต้นทุนคงที่ของรถแทรกเตอร์	24,661	บาท/ปี
รวมค่าต้นทุนคงที่	24,661	บาท/ปี

<u>ค่าต้นทุนผันแปร:</u>

ค่าบำรุงรักษาเครื่องใส่ปุ๋ย	4.90	บาท/ชั่วโมง
ค่าต้นทุนผันแปรของรถแทรกเตอร์	94.84	บาท/ชั่วโมง
รวมค่าต้นทุนผันแปร	99.74	บาท/ชั่วโมง
ความสามารถการทำงาน	3.02	ไร่/ชั่วโมง
รวมค่าต้นทุนผันแปร	33.03	บาท/ไร่

ความสัมพันธ์ของต้นทุนต่อปีในการใช้เครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (A) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ต้นทุนต่อปีในการใช้เครื่องเครื่องใส่ปุ๋ย, บาท/ไร่ = ต้นทุนคงที่ + ต้นทุนผันแปร

= (24,661/A)+33.03 (1)

จุดที่คุ้มทุนของการใช้งานเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ย สามารถคำนวณได้เมื่อต้นทุนในการใช้งานเครื่องใส่ปุ๋ย ในสมการที่ (1) เท่ากับราคารับจ้างฝังปุ๋ยในปัจจุบันเท่ากับ 300 บาท/ไร่ (วิชัย และคณะ, 2556)

ต้นทุนในการใช้งานเครื่องใส่ปุ๋ย = ค่ารับจ้างฝังปุ๋ย

(24,661/A)+33.03 = 300

A = 92.37 ไร่/ปี