วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 (2568) 9-15
Available online at www.tsae.asia

บทความวิจัย

ISSN 1685-408X

วิจัยและพัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลัง

Research and Development of an Automatic Variable Rate Fertilizer Applicator for Cassava

อานนท์ สายคำฟู[1*], วิชัย โอภานุกุล[1], ประสาท แสงพันธุ์ตา[1], พินิจ จิรัคคกุล[2], ธนพงศ์ แสนจุ้ม[1], เอกภาพ ป้านภูมิ[2], รัฐภูมิ สุริยะโชติ[1]

Arnon Saicomfu[1*], Wichai Opanukul[1], Prasart Sangphantha[1], Pinit Jirakkakul[2], Tanapong Sanchum[1], Akkaparp Panpoom[2], Ratthaphum Suriyachote

[1]สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Agicultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

[2]ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ตำบลบ้านทุ่ม อำเภอเมือง ขอนแก่น 40000

[2]Khon Kean Agricultural Engineering Research Center, Department of Agriculture, Ban Tum, Muang, Khon Kean 40000

*Corresponding author: Tel.: +66-8-6673-1028, Fax.: +66-25-792-757, E-mail: arnon.scf@gmail.com

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการผลิตพืชให้เหมาะสมกับความอุดมสมบูรณ์ของดินเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีตามความต้องการของพืชที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เช่น อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์ อัตราการหยอดปุ๋ย และการใช้สารกำจัดศัตรูพืช งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยและพัฒนา “เครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลัง” โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino mega 2560) ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง 24 V ขนาด 500 W ที่ใช้ขับเพลาหยอดปุ๋ยแบบ 3 ถัง โดยสั่งผ่านสัญญาณแบบ PWM (Pulse Width Modulation) และใช้เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) วัดความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จากล้อจักร (Ground wheel) จากผลการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ย 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 พบว่าอัตราการหยอดมีความแม่นยำเฉลี่ย 91.55%, 90.26% และ 94.07% ตามลำดับ และจากการทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยในแปลงมันสำปะหลัง พบว่า มีความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 4.79 rai hr^{-1} ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ 1.17 m s^{-1} ประสิทธิภาพเชิงพื้นที่ 75.43% และมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.69 l rai^{-1}

คำสำคัญ: เครื่องหยอดปุ๋ย, ระบบหยอดอัตโนมัติ, มันสำปะหลัง, การใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน

Abstract

Plant production technology, according to the specific fertility of the site, is applying the technology as plant requirements and according to each location such as seed sowing rate, fertilizer sowing rate and pesticide control rate. The purpose of this study was to investigate and develop "an Automatic Variable Rate Fertilizer Applicator for Cassava." The micro-controller (Arduino mega 2560) controlled the speed of the DC motors (24 V, 500 W) which are driven to sow tree fertilizers for 3 tanks. This machine controlled through the PWM (Pulse Width Modulation) signal and used an encoder to measure the ground wheel speed. The results showed that the accuracy of the 46-0-0, 18-46 and 0-0-60 fertilizer rate tests were 91.55%, 90.26% and 94.07% respectively. In addition, testing of an automated variable rate fertilizer applicator in the cassava field revealed that the average field was 4.79 rai hr^{-1} at average travelling speed of tractor 1.17 m s^{-1}, average field efficiency was 75.43% and average fuel consumption was 0.69 l rai^{-1}

Keywords: Fertilizer applicator, Automatic variable rate, Cassava, Fertilizer usage based on soil analysis

Received: August 09, 2023
Revised: January 21, 2024
Accepted: April 24, 2025
Available Online: May 13, 2025

1 บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ในปี 2565 มีพื้นที่เพาะปลูก 10,861,975 rai มีผลผลิต 34,068,005 ton โดยประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกมันสำปะหลังเป็นอันดับ 2 ของโลก สร้างมูลค่าการส่งออก 1.5 แสนล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) โดยที่ความต้องการผลผลิตมันสำปะหลังทั้งภายในประเทศและตลาดโลกยังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในปี 2559-2561 กลับมีผลผลิตลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยปี 2561 มีผลผลิตลดลงจากปี 2559 ราว 5.76% (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) เนื่องจากเกิดการระบาดของแมลงและโรคพืช และผลกระทบจากความผันแปรของสภาวะอากาศโลกและฤดูกาลยังเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง รวมถึงปัจจัยการผลิตที่มีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เมื่อความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตและเพื่อให้ได้ผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่หรือการเกษตรแบบแม่นยำสูง (Precision Agriculture) เข้ามาช่วยในกระบวนการเพาะปลูกมันสำปะหลัง

แหล่งปลูกมันสำปะหลังของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นดินทราย ดินร่วนทราย ซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำมากหรือที่เรียกว่าดินเลว จึงจำเป็นต้องใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มธาตุอาหารให้เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชที่จะช่วยสามารถทำให้มันสำปะหลังมีผลผลิตเพิ่มขึ้น กรมวิชาการเกษตรจึงมีคำแนะนำการใส่ปุ๋ยในการปลูกมันสำปะหลังตามค่าวิเคราะห์ดิน เพื่อให้เกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังสามารถใช้ปุ๋ยได้ตรงตามความอุดมสมบูรณ์ของดินและตรงตามความต้องการของพืช อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนปัจจัยการผลิตในส่วนของปุ๋ยได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งต้นทุนการผลิตมันสำปะหลังทั้งหมดเฉลี่ย 6,650 baht rai^{-1}ในส่วนนี้คิดเป็นต้นทุนของปุ๋ยเฉลี่ยมากถึง 1,634 baht rai^{-1} หรือคิดเป็น 24.57% ของต้นทุนการผลิตมันสำปะหลังทั้งหมด (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561; สำนักวิจัยและพัฒนาปัจจัยการผลิตผลทางการเกษตร, 2553) ดังนั้นหากเกษตรกรสามารถใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินได้ก็จะทำให้ลดต้นทุนในส่วนของค่าปุ๋ยได้อีกทางหนึ่ง โดยสามารถลดค่าปุ๋ยได้สูงสุดถึง 50% หรือคิดเป็นเงินจำนวน 830 baht rai^{-1} และหากคิดจากพื้นที่การปลูกทั้งประเทศประมาณ 8.3 million rai จะทำให้ประเทศไทยลดการนำเข้าปุ๋ยที่ใช้ในไร่มันสำปะหลังได้สูงสุดเป็นมูลค่ามากถึง 6.8 พันล้านบาทต่อปี

ซึ่งในปี 2558 สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรรม (ขนิษฐ์และคณะ, 2558) ได้ทำการวิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย โดยเครื่องดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีในไร่อ้อย หากนำมาประยุกต์ใช้งานไร่มันสำปะหลังยังมีข้อจำกัดของเครื่องทั้งในเรื่องของระยะปลูกระหว่างแถวและอัตราการใส่ปุ๋ยที่ความแตกต่างกันระหว่างการปลูกอ้อยกับการปลูกมันสำปะหลัง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ วิจัยและพัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลัง ให้สามารถควบคุมอัตราการหยอดแม่ปุ๋ยได้ตรงตามค่าวิเคราะห์ดินหรือตามอัตราคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร โดยปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ให้ใส่ในอัตราตั้งแต่ 5-31 kg rai^{-1}, 4-17 kg rai^{-1} และ 7-31 kg rai^{-1} ตามลำดับ (สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตผลทางการเกษตร, 2553) และการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยดังกล่าวเป็นแบบวงปิด (Close Loop control System) ซึ่งจะมีการตรวจจับสัญญาณความเร็วรอบของเพลากำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยป้อนกลับ (Feedback control) ไปยังสมองกลฝังตัวหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ (micro-controller) เพื่อให้อัตราการหยอดปุ๋ยมีความแม่นยำมากขึ้น

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ออกแบบระบบควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย

การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัตินี้จะควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ยี่ห้อ Arduino รุ่น Mega2560 เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ขนาด 500 W ผ่าน DC Motor Drive จำนวน 3 ชุด คือ ควบคุมขับเพลาหยอดปุ๋ยถัง N P และ K สำหรับปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ตามลำดับ ซึ่งปุ๋ยทั้ง 3 สูตรนี้จะใช้เป็นแม่ปุ๋ยที่นำมาผสมสำหรับการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน พร้อมติดตั้งโรตารี่เอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encoder) ที่เพลาหยอดปุ๋ยจำนวน 3 ตัว สำหรับวัดความเร็วรอบเพลาหยอดปุ๋ยทั้ง 3 ถัง เพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับ (Feedback control) ของระบบควบคุม และใช้โรตารี่เอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encoder) อีก 1 ตัว สำหรับวัดความเร็วรอบของล้อจักร (Ground wheel) แบบล้อยาง เพื่อให้การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยมีความสัมพันธ์กับความเร็วการเคลื่อนที่ ซึ่งล้อจักรดังกล่าวมีแรงเสียดทาน (Friction) ที่น้อยมาก เนื่องจากไม่ได้ใช้ระบบส่งกำลังแบบเฟืองโซ่จากล้อจักร โดยจะใช้มอเตอร์กระแสตรงขับเพลาและอุปกรณ์กำหนดปริมาณปุ๋ยแทน ซึ่งในส่วนของการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงใช้โปรแกรม Arduino IDE สำหรับการเขียนภาษา C++ ซึ่งความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับเพลาและอุปกรณ์กำหนดจำนวนปุ๋ยควบคุมด้วยคำสั่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) โดยใช้หลักการปรับค่า Duty cycle ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยของบริษัทพรเจริญ (ช่างคิด) จำกัด มาดัดแปลงถังใส่ปุ๋ยให้เป็นแบบ 3 ถัง ซึ่งมีอุปกรณ์กำหนดจำนวนปุ๋ยเป็นแบบล้อร่อง (fluted wheel) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm และมีจำนวน 10 ร่อง แต่ละร่องมีขนาด 2 cm x 2.5 cm x 1.5 cm (กว้างxยาวxลึก) และสามารถปรับระยะของอุปกรณ์กำจัดวัชพืชแบบขาจิก (Ripper) ให้ใช้งานในไร่มันสำปะหลังได้ตั้งแต่ระยะแถวปลูก 110-140 cm ซึ่งสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบควบคุมอัตโนมัติกับเครื่องหยอดปุ๋ย ดังแสดงแนวคิดใน Figure 1

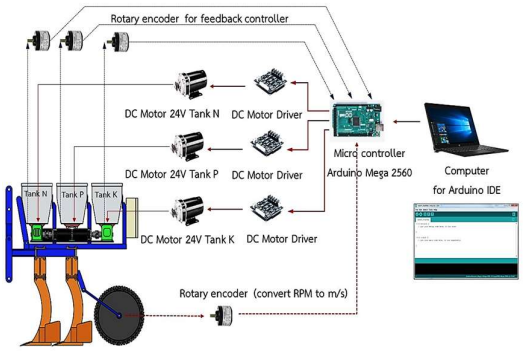

Figure 1 Concept of an automatic variable rate for fertilizer applicator.

2.2 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM)

จากการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับเพลาหยอดปุ๋ยด้วยคำสั่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) โดยสัญญาณดังกล่าวใช้หลักการปรับค่า Duty cycle นั้น จำเป็นต้องทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (rpm) โดยกำหนดค่า PWM ตั้งแต่ 25, 50, 75 และ 100% ของค่า Duty cycle แล้วบันทึกค่าความเร็วรอบที่วัดได้ เพื่อนำมาใช้เป็นสมการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

2.3 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (rpm) กับอัตราการหยอดปุ๋ย

หลังจากที่ได้สมการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แล้วต้องทำการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (rpm) กับอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร โดยกำหนดความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยตามที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดเกียร์ทดสามารถขับเพลาได้ คือ ตั้งแต่ 5, 10, 20, 30 จนถึง 60 rpm จับเวลา 1 min แล้วบันทึกค่าน้ำหนักปุ๋ยให้อยู่ในหน่วย kg min^{-1} ซึ่งทำการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร ที่ความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยต่าง ๆ กัน อย่างละ 3 ซ้ำ เพื่อนำมาคำนวนหาอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร ให้เป็นหน่วย kg rai^{-1} โดยได้กำหนดที่หน้ากว้างของเครื่องหยอดเท่ากับ 2.4 m (ระยะร่องมันสำหะปลัง 1.2 m หน้ากว้างการทำงานจำนวน 2 ร่องรวม 2.4m) และในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 1 m s^{-1} เนื่องจากเป็นความเร็วการทำงานของรถแทรกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับต่อพ่วงอุปกรณ์กำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ยในไร่มันสำปะหลัง (อานนท์และคณะ, 2565)

2.4 ทดสอบความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ย

การทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยได้ใช้ปุ๋ยทั้ง 3 สูตร โดยกำหนดอัตราการหยอดไว้ 4 ระดับ คือ 5, 10, 20 และ 30 kg rai^{-1} ซึ่งเป็นอัตราการหยอดปุ๋ยต่ำสุดและสูงสุดตามคำแนะนำการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่มันสำปะหลังของกรมวิชาการเกษตร แล้วทำการทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยด้วยการพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น L345-II DT ใช้เกียร์ Low4 รอบเครื่องยนต์ 1,800 rpm ความเร็วในการเคลื่อนที่ประมาณ 1.2 m s^{-1} โดยทำการทดสอบในแปลงที่มีระยะร่อง 1.2 m และมีความยาว 100 m คิดเป็นพื้นที่แปลงทดสอบ (2 row x 1.2 m x 100 m) เท่ากับ 240 m^2 หรือ 0.15 rai และทำการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร ที่อัตราการหยอดต่าง ๆ อย่างละ 3 ซ้ำ แล้วนำปุ๋ยแต่ละสูตรที่ออกจากเครื่องหยอดมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณเป็นความแม่นยำของการหยอดปุ๋ยตามอัตราที่กำหนด

2.5 ทดสอบความสามารถการทำงานของเครื่องหยอดปุ๋ย

ทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องหยอดปุ๋ยในแปลงทดสอบที่มีขนาด กว้าง 24 m และยาว 120 m ซึ่งลักษณะเนื้อดินแบบดินร่วนเหนียว โดยพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น L345-II DT ใช้เกียร์ Low4 รอบเครื่องยนต์ 1,800 rpm ความเร็วในการเคลื่อนที่ประมาณ 1.2 m s^{-1}

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการออกแบบระบบควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย

การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัตินี้ได้ออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ สั่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ผ่านชุดขับมอเตอร์ (DC motor drive) ซึ่งเป็นวงจรแบบ Switching Amplifier คือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ โดยอาศัยหลักการปรับค่า Duty Cycle เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ซึ่งเกิดการสูญเสียกำลังงานที่น้อยมาก และการควบคุมแบบนี้จะใช้งานได้ดีที่ความถี่คงที่หรือความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (เอกชัย, 2552) ซึ่งในควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ขนาด 500 W จำนวน 3 ชุด คือ ควบคุมขับเพลาหยอดปุ๋ยถัง N P และ K สำหรับปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ตามลำดับ พร้อมติดตั้งโรตารี่เอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encode) ที่เพลาหยอดปุ๋ยจำนวน 3 ตัว เพื่อใช้วัดเป็นสัญญาณป้อนกลับ (Feedback control) ของระบบควบคุม และใช้โรตารี่เอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encode) อีก 1 ตัว วัดความเร็วรอบของล้อจักรแล้วแปลงเป็นความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

ทั้งนี้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยของแต่ละสูตรและระยะของระหว่างร่องมันสำปะหลังได้ และในส่วนของความเร็วของรถแทรกเตอร์สามารถวัดได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ที่ติดตั้งกับล้อจักร ซึ่งระบบควบคุมจะทำการประมวลผลอัตราการหยอดปุ๋ยให้สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และระยะระหว่างแถวปลูก ดังแสดงอุปกรณ์การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยใน Figure 2 และแสดงแผนภาพระบบควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยใน Figure 3

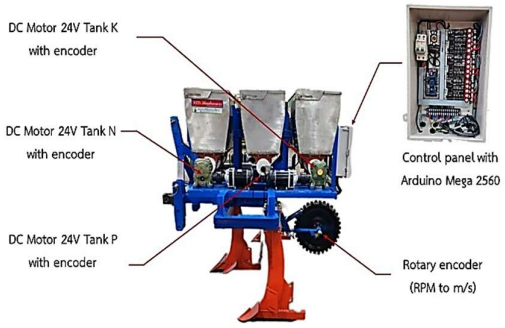

Figure 2 An automatic variable rate fertilizer applicator.

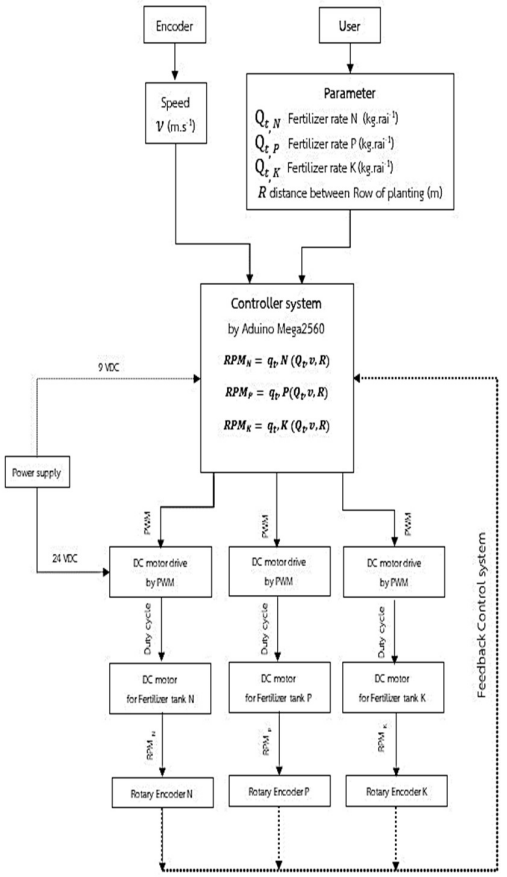

Figure 3 Flow chart of the controller system for fertilizer rate.

จากแผนงานการออกแบบระบบควบคุมข้างต้น สามารถนำมาเขียนสมการเบื้องต้นใช้สำหรับควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยให้สัมพันธ์กับความเร็วรถแทรกเตอร์และระยะของร่องปลูกมันสำปะหลังได้ โดยใช้แนวคิดและหลักการออกแบบให้เป็นระบบควบคุมแบบฟังก์ชั่นเชิงเวลา (t) ดังสมการที่ 1 ถึง 3

$$RPM_N = q_t N(Q_t, v, R) \quad (1)$$

$$RPM_P = q_t P(Q_t, v, R) \quad (2)$$

$$RPM_K = q_t K(Q_t, v, R) \quad (3)$$

เมื่อ RPM_N คือ ความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย N (rpm)

RPM_P คือ ความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย P (rpm)

RPM_K คือ ความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย K (rpm)

$q_t N$ คือ สมการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย N

$q_t P$ คือ สมการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย P

$q_t K$ คือ สมการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย K

Q_t คือ อัตราการหยอดปุ๋ย (kg rai^{-1})

v คือ ความเร็วของรถแทรกเตอร์ (m s^{-1})

R คือ ระยะระหว่างแถวปลูก (m)

ซึ่งสมการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร นั้นจะสามารถหาได้จากการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.2 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM)

จากการออกแบบสมการควบคุมความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยในแต่ละสูตรเบื้องต้นเรียบร้อยแล้ว และเนื่องจากเป็นการควบคุมด้วยการสั่งสัญญาณ PWM จึงต้องทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) โดยผลการทดสอบดังแสดงใน Figure 4 to 6

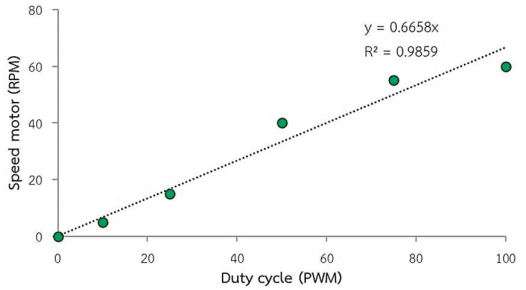

Figure 4 The relations between PWM and RPM of tank N.

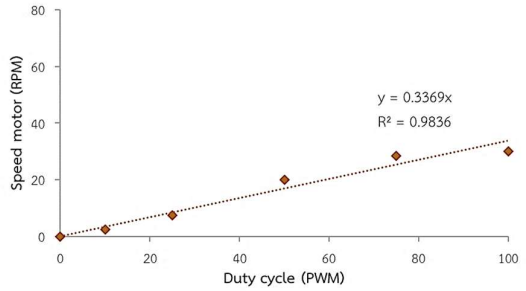

Figure 5 The relations between PWM and RPM of tank P.

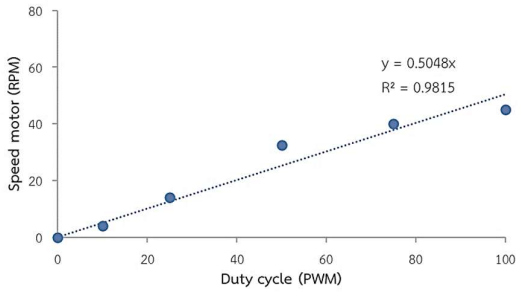

Figure 6 The relations between PWM and RPM of tank K

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ของค่า Duty cycle (PWM) กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) ของปุ๋ยแต่ละสูตรจะมีความสัมพันธ์ที่ไม่เหมือนกัน เนื่องจากอัตราการใส่ปุ๋ยในแปลงของแต่ละสูตรมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ในดิน ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้อ้างอิงอัตราการใส่ปุ๋ยมันสำปะหลังตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร โดยปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ให้ใส่ในอัตราตั้งแต่ 5-31 kg rai^{-1}, 4-17 kg rai^{-1} และ 7-31 kg rai^{-1} ตามลำดับ จึงทำให้การออกแบบความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย N P และ K โดยใช้ชุดห้องเกียร์ทดรอบให้มีความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 60, 40 และ 50 rpm ตามลำดับ และส่งผลให้ความสัมพันธ์ของค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยแต่ละสูตรมีความแตกต่างกันนั่นเอง

3.3 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) กับอัตราการหยอดปุ๋ย

เมื่อได้ความสัมพันธ์ของค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) แล้ว จึงทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) กับอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร (46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60) โดยผลการทดสอบดังแสดงใน Figure 7 to 9

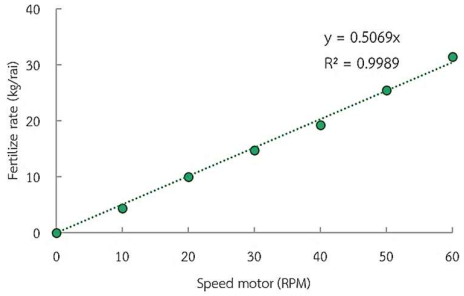

Figure 7 The relations between fertilizer rate (46-0-0) and speed motor of tank N

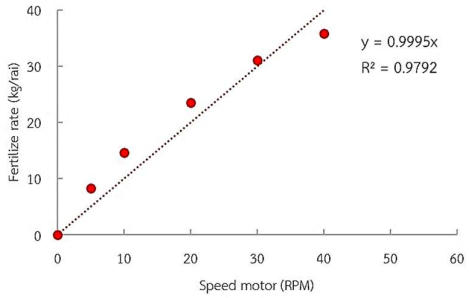

Figure 8 The relations between fertilizer rate (18-46-0) and speed motor of tank P

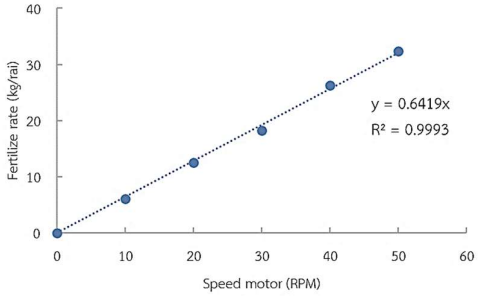

Figure 9 The relations between fertilizer rate (0-0-60) and speed motor of tank K

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) กับอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร มีความสัมพันธ์เป็นแบบสมการเส้นตรง (Linear equation) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาและพัฒนาระบบหยอดปุ๋ยอัตโนมัติตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่อ้อย (อานนท์และชัยยากร, 2562) และผลการทดสอบพบว่าปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 มีอัตราการหยอดปริมาณสูงสุดเท่ากับ 31 kg rai^{-1} ที่ความเร็วรอบ 60 rpm, 37 kg rai^{-1} ที่ความเร็วรอบ 40 rpm และ 32 kg rai^{-1} ที่ความเร็วรอบ 50 rpm ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราที่เพียงพอสำหรับการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่มันสำปะหลัง

3.4 ผลการทดสอบความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ย

การทดสอบความแม่นยำของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบปรับอัตราการหยอดอัตโนมัติที่อัตราการหยอดต่างๆ ในแปลงทดสอบภาคสนามดังแสดงใน Figure 10 และผลการทดสอบดังแสดงใน Table 1

Figure 10 Fertilizer variable rate testing on field.

Table 1 The result of fertilizer rate testing on field.

Fertilizer	Fertilizer rate (kg rai^{-1})		Accuracy (%)	
	configured	the result	accuracy	average
46-0-0	5	5.6	89.29	91.55
	10	11.3	88.50	
	20	21.8	91.74	
	30	29	96.67	
18-46-0	5	5.8	86.21	90.26
	10	11.7	85.47	
	20	21.6	92.59	
	30	31	96.77	
0-0-60	5	5.4	92.59	94.07
	10	10.6	94.34	
	20	21.5	93.02	
	30	28.9	96.33	

จากผลการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ย พบว่า ปุ๋ย 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 มีความแม่นยำเฉลี่ยเท่ากับ 91.55%, 90.26% และ 94.07% ตามลำดับ โดยความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร มีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.6-1.7 kg rai^{-1} ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบระบบควบคุมสำหรับเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบแม่นยำที่มีค่าความคาดเคลื่อน ในสถานีทดสอบและในแปลงอ้อยเท่ากับ ±1.3 kg rai^{-1} และ ±2.1 kg rai^{-1} ตามลำดับ (สุชาวดีและวสุ, 2562) นอกจากนี้ยังพบว่า ผลการทดสอบมีอัตราการหยอดปุ๋ยสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากสมการที่ใช้ควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ในการทดสอบนี้ได้ทำการพ่วงเครื่องหยอดปุ๋ยในแปลงมันสำปะหลังจึงทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนในขณะทำการทดสอบ และส่งผลโดยตรงให้ความหนาแน่นของปุ๋ยเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีผลอัตราการหยอดที่ทดสอบสูงกว่าอัตราที่ได้กำหนดไว้นั้นเอง

3.5 ผลการทดสอบความสามารถการทำงาน

การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยแบบปรับอัตราการหยอดอัตโนมัติในแปลงมันสำปะหลัง ดังแสดงใน Figure 11 ซึ่งในแปลงทดสอบนี้ได้กำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ในอัตรา 10, 6 และ 12 kg rai^{-1} ตามลำดับ และผลการทดสอบดังแสดงใน Table 2

Figure 1 1 An automatic variable rate fertilizer application testing on casava field.

Table 2 The result of automatic variable rate fertilizer application testing on casava field.

Description	
Field test condition	
- Area (W x L)	24 x 125 m
- Soil moisture content (dry basis)	5.73%
- Surface texture of soil	clay loam
Result	
- Fertilizer rate 46-0-0 (10 kg rai^{-1}) Accuracy (%)	10.9 kg rai^{-1} (91%)
- Fertilizer rate 18-46-0 (6 kg rai^{-1}) Accuracy (%)	6.7 kg rai^{-1} (88.4%)
- Fertilizer rate 0-0-60 (12 kg rai^{-1}) Accuracy (%)	13.6 kg rai^{-1} (88.7%)
- Speed of tractor	1.17 m s^{-1}
- Working width (planting: 2 row)	2.4 m
- Theory field capacity	6.35 rai hr^{-1}
- Field capacity	4.79 rai hr^{-1}
- Field efficiency	75.43%
- Fuel consumption	0.69 l rai^{-1}

จากผลการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยแบบปรับอัตราการหยอดอัตโนมัติในแปลงมันสำปะหลังที่มีระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 1.2 m และมันสำปะหลังมีอายุ 2 month โดยมีความสูงตั้งแต่ท้องร่องถึงยอดมันสำปะหลังตั้งแต่ 0.5-0.8 m ซึ่งในแปลงมันสำปะหลังมีความชื้นในดินเฉลี่ย 5.73% d.b. และความแข็งของดินที่วัดได้จากแรงกดมีค่าอยู่ในช่วง 25-40 kg cm^{-2} ผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการทำงานของเครื่องต้นแบบพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ล้อสูงเฉลี่ยเท่ากับ 4.79 rai hr^{-1} ประสิทธิภาพการทำงานเชิงพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 75.43% และมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.69 l rai^{-1} ส่วนความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ย 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 มีค่าเท่ากับ 91%, 88.4% และ 87% ตามลำดับ

4 สรุป

เครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลังพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ล้อสูง สามารถปรับอัตราการหยอดปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร โดยมีถังปุ๋ยจำนวน 3 ถัง สำหรับใส่แม่ปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 และสามารถปรับอัตราได้สูงสุด 31, 37 และ 32 kg rai^{-1} ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราที่เพียงพอสำหรับการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่มันสำปะหลัง และมีความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ยเฉลี่ย 91.55%, 90.26% และ 94.07% ตามลำดับ และจากการทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติตามค่าวิเคราะห์ดินพ่วงรถแทรกเตอร์ล้อสูงพบว่า ความสามารถในการทำงานของต้นแบบเฉลี่ยเท่ากับ 4.79 rai hr^{-1} ประสิทธิภาพการทำงานเชิงพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 75.43% โดยอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.69 l rai^{-1} ซึ่งหากเกษตรกรนำเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัตินี้ไปใช้งานในไร่มันสำปะหลังแล้วเลือกปรับอัตราการหยอดปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน ก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยได้ตรงตามความอุดมสมบูรณ์ของดินและตรงตามความต้องการของพืช อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนปัจจัยการผลิตในส่วนของปุ๋ยได้อีกทางหนึ่งด้วย

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชลพบุรี ที่เอื้อเฟื้อแปลงวิจัยสำหรับการทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติในไร่มันสำปะหลัง และขอขอบคุณบริษัทพรเจริญ (ช่างคิด) จำกัด ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์สำหรับการวิจัยเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลัง

6 เอกสารอ้างอิง

ขนิษฐ์ หว่านณรงค์, อัคคพล เสนาณรงค์, เวียง อากรชี, วีระ สุขประเสริฐ, อุทัย ธานี. 2561. วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19 ประจำปี 2561, 245-249. ประจวบคีรีขันธ์: ศูนย์ประชุมนานาชาติจุฬาภรณ์ วรวนา หัวหิน โฮเต็ล แอนด์ คอนเวนชั่น. 26-27 เมษายน 2561, หัวหิน, ประจวบคีรีขันธ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2561. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2561. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2562. สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้าปี 2562. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2565. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2565. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตผลทางการเกษตร. 2553. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมวิชาการเกษตร กระเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สุชาวดี สีกัน, วสุ อุดมเพทายกุล. 2562. การพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมสำหรับเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบแม่นยำ. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 ประจำปี 2562, 162–167. ชลบุรี: โรงแรมฮาร์ดร็อค. 14-15 มีนาคม 2562, พัทยา, ชลบุรี.

อานนท์ สายคำฟู, ชัยยากรณ์ จันทร์สุวรรณ. 2562. การศึกษาและพัฒนาระบบหยอดปุ๋ยอัตโนมัติตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่อ้อย. รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 57 ประจำปี 2562, เล่มที่ 2, 215-222. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2562, จตุจักร, กรุงเทพฯ.

อานนท์ สายคำฟู, วิชัย โอภานุกูล, ประสาท แสงพันธุ์ตา, พินิจ จิรัคคกูล, ธนพงศ์ แสนจุ้ม, เอกภาพ ป้านภูมิ, อนุชา เชาวโชติ, สิทธิชัย ดาสี, นิรุต บุญญา. 2565. วิจัยและพัฒนารถแทรกเตอร์ยกสูงสำหรับพ่วงอุปกรณ์กำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ยในไร่มันสำปะหลัง. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 ประจำปี 2565, 130-138. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. 18-19 สิงหาคม 2565, เมือง, เชียงใหม่.

เอกชัย มะการ. 2552. เรียนรู้ เข้าใจ ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วย Arduino พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัทอีทีที จำกัด.