

การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอัจฉริยะแบบแม่นยำ
และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร

DEVELOPMENT OF A PRECISION CONTROLLER
FOR SUGARCANE FERTILIZING MACHINES AND ITS APPLICATION
FOR THE VARIABLE RATE TECHNOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019- EN-M-100-111

การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอัจฉริยะแบบแม่นยำ
และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร

DEVELOPMENT OF A PRECISION CONTROLLER
FOR SUGARCANE FERTILIZING MACHINES AND ITS APPLICATION
FOR THE VARIABLE RATE TECHNOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2019-EN-M-100-111

DEVELOPMENT OF A PRECISION CONTROLLER
FOR SUGARCANE FERTILIZING MACHINES AND ITS APPLICATION
FOR THE VARIABLE RATE TECHNOLOGY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMUTL-2019-EN-M-100-111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอัจฉริยะแบบแม่นยำ และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร
นักศึกษา	นางสาว สุชาติ สีกัน
รหัสประจำตัว	60601033
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.วสุ อุดมเพทายกุล

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเกษตรกรที่เพาะปลูกอ้อยโรงงานเริ่มให้ความสนใจการใช้เทคโนโลยีเกษตรแม่นยำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตอ้อย แต่อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในเทคโนโลยีดังกล่าวยังมีราคาสูงสำหรับการลงทุน จึงจำกัดการใช้งานอยู่ในผู้ประกอบการขนาดใหญ่เท่านั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถติดตั้งบนเครื่องหยอดปุ๋ยอัจฉริยะที่เกษตรกรใช้อยู่ทั่วไป โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดอัตราปุ๋ยต่อพื้นที่ได้ผ่านกล่องควบคุมและได้อัตราปุ๋ยที่สม่ำเสมอและแม่นยำตลอดพื้นที่ และยังทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการต่อยอดระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการให้ปุ๋ยแบบผันแปร (Variable Rate Technology, VRT) โดยการกำหนดอัตราปุ๋ยผ่านไฟล์แผนที่ปุ๋ย (Prescription Map) ที่สร้างขึ้นโดยสามารถกำหนดอัตราปุ๋ยที่แตกต่างกันในแต่ละจุดของแปลงตามความต้องการของพืชได้ งานวิจัยในส่วนแรกเป็นการพัฒนาระบบควบคุมการหยอดปุ๋ยที่ใช้ข้อมูลความเร็วในการเคลื่อนที่จากเครื่องรับจีพีเอส แล้วทำการคำนวณและส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อขับเคลื่อนที่จากเครื่องรับจีพีเอส แล้วทำการคำนวณและส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อขับเคลื่อนที่จากเครื่องรับจีพีเอส แล้วทำการคำนวณและส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อขับเคลื่อนที่จากเครื่องรับจีพีเอส โดยได้มีการพัฒนากล่องควบคุมให้เกษตรกรสามารถป้อนค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้โดยตรง ในการศึกษาได้ทำการติดตั้งระบบเข้ากับเครื่องหยอดปุ๋ยขนาด 2 หัวหยอด มีการเลือกใช้อัตราทดของระบบส่งกำลังที่เหมาะสมระหว่างมอเตอร์กับเกียร์ขับเคลื่อน ในการทดสอบที่อัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่และความเร็วในการเคลื่อนที่ในช่วง 30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อไร่ และ 3 5 และ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถจ่ายปุ๋ยได้ตามอัตราที่กำหนด โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ของอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ ± 1.25 กิโลกรัมต่อไร่ และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปุ๋ยที่กำหนดและวัดได้ 0.994 ในการทดสอบภาคสนาม ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ของอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น ± 2.14 กิโลกรัมต่อไร่ และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 0.986 โดยในการทดสอบทั้งสองสภาวะ พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ทั้ง 3 อัตราอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แสดงว่าระบบสามารถจ่ายอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ได้อย่างแม่นยำถึงแม้ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน งานวิจัยในส่วนที่สองเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร

โดยควบคุมการหยอดปุ๋ยตามแผนที่ปุ๋ย (Prescription Map) ที่สร้างขึ้นโดยมีการกำหนดอัตราปุ๋ยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกัน 2 อัตรา คือ 40 และ 60 กิโลกรัมต่อไร่ ภายในพื้นที่ทดสอบ และทดสอบที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 4 และ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในการทดสอบภาคสนาม พบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ของอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่เท่ากับ ± 4.72 กิโลกรัมต่อไร่ และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 0.836 การที่ระบบมีค่าความผิดพลาดที่สูงเนื่องมาจากความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของ GPS และระบบมีการตอบสนองต่อคำสั่งการเปลี่ยนแปลงอัตราปุ๋ยที่ช้า ซึ่งสามารถพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Development of a precision controller for sugarcane fertilizing machines and its application for the variable rate technology
Student	Ms. Suchawadee Seekun
Student ID	60601033
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Dr. Vasu Udompetaikul

ABSTRACT

Nowadays, sugarcane farmers have shown an interest in applying precision agriculture technology to improve their production efficiency. However, the initial investment cost in this technology is still high. So, the adoption is still limited only within large enterprise growers. This research was to develop an automatic feed control system that can be installed on conventional granular fertilizing machines to achieve the desired fertilizing rate throughout the field with accuracy. Users could directly configure operational parameters on the control panel of the system. In addition, the research covered the feasibility study to include the capability of the variable rate technology (VRT) to this proposed system. The extended system could apply the fertilizing rate spatially corresponding to the information in the prescription maps. The first part of this research was to develop a fertilizing control system. The system uses the velocity information from a GPS receiver to calculate and generate the control signal to drive the DC motor and the screw feeder to apply the fertilization. The system was installed on a farmer's own fertilization machine. The tests were performed with the fertilizing rate of 30 to 70 kg/rai and the traveling speed of 3 to 7 km/h. In the laboratory, the actual application rate aligned well with the set value with the root mean squares error (RMSE) of ± 1.25 kg/rai and the coefficient of determination (R^2) of 0.994. In the field test, the RMSE slightly increased to ± 2.14 kg/rai with the R^2 value of 0.986. In both tests, the system was able to maintain a consistent application rate even though the travelling speed was different ($p \geq 0.05$). The second part of the research was the feasibility study to apply VRT technology to the system. A prescription map with 2 different application rates (40 and 60 kg/rai) for the testing area was created.

The test was performed in 2 traveling speeds of 4 and 6 km/h. The result shows the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์ทางการ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RMSE of ± 4.72 kg/rai with the R^2 value of 0.836. Accuracy of the GPS unit and the slow controlling response caused this high error in application rate. This work shows a feasibility to develop a VRT system in sugarcane production.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากท่านอาจารย์ ดร. วสุ อุดมเพทายกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความตั้งใจจริงและความทุ่มเทอย่างมากจากท่านอาจารย์จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ให้ความรักความเมตตาช่วยเหลือข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงกราบขอบพระคุณและขอบคุณไว้ในโอกาสนี้

ขอขอบคุณทุนวิจัยเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2561 โดยมีบริษัท อัส จำกัด เป็นผู้ร่วมวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ทดลองงานวิจัยทั้งในด้านของบุคลากร อุปกรณ์ และสถานที่ ณ ตำบลบ่อทอง อำเภอบางระก่า จังหวัดพิษณุโลก

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่เคารพรักของข้าพเจ้าที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จครั้งนี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนการศึกษาและให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ หากมีสิ่งใดที่ขาดตกบกพร่องหรือมีข้อผิดพลาดประการใดข้าพเจ้าต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วยและหวังว่าคุณค่าของวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่มากนักน้อยสำหรับทุกท่านที่สนใจอ่านและศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในภายภาคหน้า

สุชาวดี สীগัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 แนวคิดของระบบ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 เครื่องหยุดบู้อ้อยทั่วไปและกลไกการทำงาน.....	5
2.1.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและหลักการทำงาน.....	6
2.1.3 สัญญาณควบคุม (PWM)	7
2.1.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	9
2.1.5 Global Positioning System (GPS)	13
2.1.6 Variable Rate Technology (VRT)	15
2.1.7 Geographic Information System (GIS).....	16
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1	การออกแบบและทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบแม่นยำ.....	25
3.1.1	ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบควบคุม.....	25
3.1.2	การออกแบบระบบควบคุม.....	28
3.1.2.1	อุปกรณ์ภายในระบบ (Hardware).....	28
3.1.2.2	ส่วนควบคุมระบบ (Control Panel).....	33
3.1.3	การติดตั้งระบบ.....	37
3.1.4	การทดสอบและวิเคราะห์ผลระบบต้นแบบ.....	38
3.1.4.1	การสอบเทียบระบบ.....	38
3.1.4.2	การทดสอบในสถานีทดสอบ.....	38
3.1.4.3	การทดสอบในพื้นที่ทดสอบ.....	39
3.1.4.4	การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	39
3.1.5	การทดสอบและวิเคราะห์ผลระบบที่ปรับปรุง.....	40
3.1.5.1	การสอบเทียบระบบ.....	40
3.1.5.2	การทดสอบในสถานีทดสอบ.....	41
3.1.5.3	การทดสอบในแปลงจริง.....	42
3.1.4.4	การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ.....	42
3.2	การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร กับระบบควบคุม.....	44
3.2.1	การออกแบบระบบ.....	44
3.2.1.1	การจัดทำแผนที่ปุ๋ย (Prescription Map).....	44
3.2.1.2	ส่วนควบคุมระบบ (Control Panel).....	47
3.2.1.3	หลักการทำงานของระบบควบคุม.....	47
3.2.1.4	ส่วนประกอบของส่วนควบคุม.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.2.2	การติดตั้งระบบควบคุม.....	49
3.2.3	การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	51
3.2.3.1	การสอบเทียบระบบ.....	51
3.2.3.2	การทดสอบในพื้นที่ทดสอบ.....	53
บทที่ 4	ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....	54
4.1	การออกแบบและทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดอ้อยแบบแม่นยำ.....	54
4.1.1	ผลการทดสอบระบบต้นแบบ.....	54
4.1.1.1	ผลการสอบเทียบระบบ.....	54
4.1.1.2	ผลการทดสอบในสถานีทดสอบ.....	55
4.1.1.3	ผลการทดสอบในพื้นที่ทดสอบ.....	56
4.1.2	ผลการทดสอบระบบที่ปรับปรุง.....	58
4.1.2.1	ผลการสอบเทียบระบบ.....	58
4.1.2.2	ผลการทดสอบภายในสถานีทดสอบ.....	59
4.1.2.3	ผลการทดสอบภายในแปลงจริง.....	60
4.1.2.4	ผลการเปรียบเทียบค่าสัญญาณ PWM ก่อน และหลังปรับปรุงระบบ.....	62
4.2	การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร กับระบบควบคุม.....	63
4.2.1	ผลการทดสอบระบบ.....	63
4.2.1.1	การสอบเทียบระบบ.....	63
4.2.1.2	การทดสอบภายในพื้นที่ทดสอบ.....	63
4.2.1.3	การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของพิกัดที่ วัดได้จาก GPS.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5	สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ.....	67
5.1	สรุปผลการศึกษา.....	67
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	68
	บรรณานุกรม.....	69
	ภาคผนวก.....	74
	ภาคผนวก ก. รายละเอียดชุดคำสั่งโปรแกรมที่ใช้.....	75
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลจากการทดสอบ.....	79
	ภาคผนวก ค. รายละเอียดอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง.....	104
	ประวัติผู้เขียน.....	113



สารบัญตาราง

ตารางที่		
2.1	รายละเอียดพารามิเตอร์ของไฟล์ภาพ Geotiff.....	18
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดเชิงเวลาทางทฤษฎีกับตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	25
3.3	ค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการหยุดเชิงเวลาในสถานที่ทดสอบของ ระบบก่อนและหลังการปรับปรุง.....	32
4.1	ข้อมูลของค่าสัญญาณ PWM ภายในสถานีทดสอบก่อนการปรับปรุงระบบ	62
4.2	ตารางแสดงข้อมูลของค่าสัญญาณ PWM ภายในสถานีทดสอบหลังการ ปรับปรุงระบบ.....	62
4.3	ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดตำแหน่ง GPS จากจุดอ้างอิง....	66
ข.1	ข้อมูลการสอบเทียบระบบ (ระบบต้นแบบ).....	80
ข.2	ข้อมูลการทดสอบในสถานีทดสอบ (ระบบต้นแบบ).....	81
ข.3	ข้อมูลการทดสอบในแปลงทดสอบ (ระบบต้นแบบ).....	82
ข.4	ข้อมูลการสอบเทียบระบบ (ระบบที่ปรับปรุง).....	89
ข.5	ข้อมูลการทดสอบในสถานีทดสอบ (ระบบที่ปรับปรุง).....	90
ข.6	ข้อมูลการทดสอบในแปลงจริง (ระบบที่ปรับปรุง).....	91
ข.7	ข้อมูลการสอบเทียบระบบ (ระบบที่ประยุกต์ใช้ VRT).....	98
ข.8	ข้อมูลการทดสอบในแปลงทดสอบ (ระบบที่ประยุกต์ใช้ VRT).....	99
ข.9	ข้อมูลความคลาดเคลื่อนของระบบพิกัด GPS.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		
1.1	แผนภาพแนวคิดของระบบควบคุมส่วนที่ 1	3
1.2	แผนภาพแนวคิดของระบบควบคุมส่วนที่ 2	4
2.1	ตัวอย่างเครื่องหยุดปุ๋ยอ้อยทั่วไป.....	6
2.2	การควบคุมมอเตอร์ด้วยสัญญาณ PWM แบบระบบเปิด.....	7
2.3	การทำงานของสัญญาณ PWM.....	8
2.4	ตัวอย่างสัญญาณ PWM.....	8
2.5	บอร์ด Arduino MEGA 2560 R3.....	9
2.6	ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรม Arduino IDE (Version 1.6.13)	10
2.7	ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรม python IDE.....	12
2.8	รายละเอียดของสัญญาณ Raspberry pi 3 model B+.....	13
2.9	ข้อมูลประโยชน์ข้อดีข้อเสียในการรับส่งสัญญาณ GPS.....	14
2.10	ลักษณะความแตกต่างระหว่างข้อมูลภาพ.....	17
2.11	การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของพิกเซล.....	18
3.1.1	แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ PWM และความเร็วรอบของเกิลียวป้อน.....	26
3.1.3	ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและอัตราการหยุดเชิงเวลา.....	27
3.1.4	ความสัมพันธ์ของสัญญาณ PWM และความเร็วรอบ.....	28
3.1.5	แผนภาพระบบการควบคุมมอเตอร์.....	29
3.1.6	ระบบส่งกำลังเพื่อขับเกิลียวป้อนปุ๋ยของเครื่องต้นแบบ.....	30
3.1.7	ระบบส่งกำลังเพื่อขับเกิลียวป้อนปุ๋ยของเครื่องหยุดปุ๋ยที่ใช้ศึกษา (ครั้งที่ 1).....	31
3.1.8	ระบบส่งกำลังเพื่อขับเกิลียวป้อนปุ๋ยของเครื่องหยุดปุ๋ยที่ใช้ศึกษา (ครั้งที่ 2).....	32
3.1.9	แผนภาพแสดงการทำงานของส่วนควบคุม.....	34
3.1.10	ตัวอย่างการแสดงผลเมนูบนจอ LCD.....	35
3.1.11	ส่วนประกอบของส่วนควบคุม.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.12	การติดตั้งระบบควบคุมบนเครื่องหยอดปุ๋ย.....	37
3.1.13	การทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น....	39
3.1.14	การสอบเทียบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	40
3.1.15	การทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ในสถานี....	41
3.1.16	การชั่งน้ำหนักตัวอย่างปุ๋ยในการทดสอบในสถานี.....	41
3.1.17	การสอบเทียบค่าอัตราการหยอดเชิงเวลา.....	42
3.1.18	แผนการทดสอบภายในแปลง.....	43
3.1.19	การสุ่มเก็บข้อมูลและชั่งน้ำหนักปุ๋ยที่ได้.....	43
3.1.20	การสุ่มเก็บข้อมูลและชั่งน้ำหนักปุ๋ยที่ได้.....	44
3.2.1	เสาอากาศและอุปกรณ์ RTK GPS.....	45
3.2.2	การวัดพิกัด และกำหนดตำแหน่งอ้างอิงของพื้นที่ทดสอบ.....	45
3.2.3	ขั้นตอนการสร้างแผนที่ปุ๋ยด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (QGIS).....	46
3.2.4	แผนที่ปุ๋ยที่มีความแตกต่างของอัตราการหยอด.....	46
3.2.5	โพลีชาร์ตการทำงานของระบบควบคุมการหยอดปุ๋ยด้วยแผนที่ปุ๋ย.....	47
3.2.6	ส่วนประกอบของอุปกรณ์สำหรับส่วนควบคุมระบบ VRT.....	49
3.2.7	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์และระบบควบคุม.....	50
3.2.8	การทดสอบภายในสถานีทดสอบ.....	52
3.2.9	การเก็บข้อมูลอัตราการหยอดเชิงเวลาในสถานีทดสอบ.....	52
3.2.10	พื้นที่ทดสอบภาคสนามและตัวอย่างการหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ระบบ GPS วัดได้ (วัดคูนพื้นที่) เมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง (เส้น).....	52
3.2.11	การทดสอบภาคสนามและเก็บข้อมูล (ขาไป).....	53
3.2.12	การทดสอบภาคสนามและเก็บข้อมูล (ขากลับ).....	53
4.1.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยอดเชิงเวลา..	54
4.1.2	กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยอดเชิงเวลาที่วัดได้.....	55
4.1.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยอดที่ต้องการและอัตราการหยอดที่วัดได้.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4	กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยุดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยุดเชิงเวลาที่วัดได้.....	57
4.1.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดที่ต้องการและอัตราการหยุดที่วัดได้.....	57
4.1.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยุดเชิงเวลา	58
4.1.7	กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยุดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยุดเชิงเวลาที่วัดได้.....	59
4.1.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดที่ต้องการและอัตราการหยุดที่วัดได้.....	60
4.1.9	กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยุดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยุดเชิงเวลาที่วัดได้.....	61
4.1.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดที่ต้องการและอัตราการหยุดที่วัดได้.....	61
4.2.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยุดเชิงเวลา	63
4.2.2	กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยุดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยุดเชิงเวลาที่วัดได้.....	64
4.2.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดที่ต้องการและอัตราการหยุดที่วัดได้.....	65
4.2.4	แผนที่แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ในการทดสอบ.....	66
4.2.5	กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณ GPS จากจุดอ้างอิง.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทำเกษตรสมัยใหม่หรือเกษตรแบบแม่นยำ (Precision Agriculture) เป็นการทำการเกษตรด้วยการใช้เทคโนโลยีหรือหุ่นยนต์ เครื่องจักร ฯลฯ ที่มีความแม่นยำสูงเข้ามาช่วยในการทำงาน โดยให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อม และการใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่าที่สุด ในยุคที่แรงงานในภาคเกษตรลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ภาคการเกษตรเริ่มมีการปรับตัวโดยนำเอาเทคโนโลยีเข้ามาปรับปรุงและประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมากขึ้น [1] หลักการและเทคโนโลยีเกษตรแม่นยำจึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำเกษตรกรรมด้านอ้อย [2] โดยมีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการผลิตอ้อย เช่น GPS Guidance[3], เทคนิคระบบการประมวลผลภาพ (Image Processing) [4] และเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร (Variable Rate Technology, VRT) [5] เป็นต้น Variable Rate Technology (VRT) เป็นเทคโนโลยีการให้น้ำ ให้ปุ๋ย ในปริมาณที่ถูกต้อง ณ เวลาที่ถูกต้องแก่พืชตามความเหมาะสมของพื้นที่ ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีหลักของการทำเกษตรแบบแม่นยำ (Precision Agriculture) เกิดจากการนำระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (Global Positioning System: GPS) และระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) มาใช้ร่วมกันในการบริหารจัดการข้อมูลภายในพื้นที่หรือแปลงเพาะปลูก โดยในปีการศึกษา 2559 วิทยุพัชร์ และคณะ ได้พัฒนาต้นแบบแนวคิดของระบบอัตโนมัติสำหรับควบคุมเกี่ยวการให้ปุ๋ยด้วยเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร (Variable Rate Technology, VRT) ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณปุ๋ยต่อพื้นที่ตามอัตราที่กำหนดแม้ความเร็วในการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนแปลงในขณะทำงานได้ ซึ่งจากการทดสอบและวิเคราะห์การใช้งานเบื้องต้น พบว่าระบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยเชิงพื้นที่ได้อย่างแม่นยำในช่วงอัตรา 30-60 กิโลกรัมต่อไร่ ที่ความเร็ว 2-6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง [7] อย่างไรก็ตาม ต้นแบบดังกล่าวยังขาดส่วนป้อนข้อมูลการทำงานจากผู้ใช้งาน โดยผู้ควบคุมต้องสั่งการผ่านคอมพิวเตอร์เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าอัตราปุ๋ยและค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งไม่สะดวกในการทำงานจริง นอกจากนี้การศึกษาดังกล่าวยังเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ ยังไม่มีการทดสอบยืนยันในภาคสนาม

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยแบบแม่นยำที่สะดวกและง่ายต่อการใช้งานโดยจะทำการทดสอบในสภาพการใช้งานจริง และศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร กับระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของการให้ปุ๋ยภายในแปลง และการให้ปุ๋ยเกินความจำเป็นของอ้อย โดยส่งผลเสียต่อดินลดลงได้ และลดต้นทุนในการใช้ปุ๋ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยแบบแม่นยำ และทดสอบในสภาพการทำงานจริง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมของเครื่องหยอดปุ๋ยแบบแม่นยำ
- 1.3.2 ออกแบบและติดตั้งระบบส่งกำลังที่เหมาะสมกับเครื่องหยอดปุ๋ยที่ใช้ในการทดสอบ
- 1.3.3 ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมควบคุมและส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้งาน
- 1.3.4 ทดสอบระบบในสภาพการทำงานจริงพร้อมสรุปผล
- 1.3.5 ออกแบบและพัฒนาระบบเพื่อประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร (VRT)
- 1.3.6 ทดสอบและสรุปผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร

1.4 แนวคิดของระบบ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยด้วยการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์และระบบ GPS เพื่อแก้ไขปัญหาการลื่นไถลของล้อดินบนพื้นผิวที่มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังสามารถกำหนดอัตราการหยอดได้โดยไม่ต้องปรับแต่งระบบเฟืองโซ่ส่งกำลัง ช่วยให้เกษตรกรสามารถใส่ปุ๋ยได้อย่างสม่ำเสมอและแม่นยำทั่วทั้งแปลง อีกทั้งสามารถประยุกต์หลักการเพื่อใช้ในระบบการให้ปุ๋ยแบบผันแปร (VRT) ที่สามารถเลือกให้ปุ๋ยในแต่ละตำแหน่งของแปลงตามที่คุณผู้กำหนด เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ปุ๋ยและช่วยลดต้นทุนในการผลิต โดยถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ได้แก่

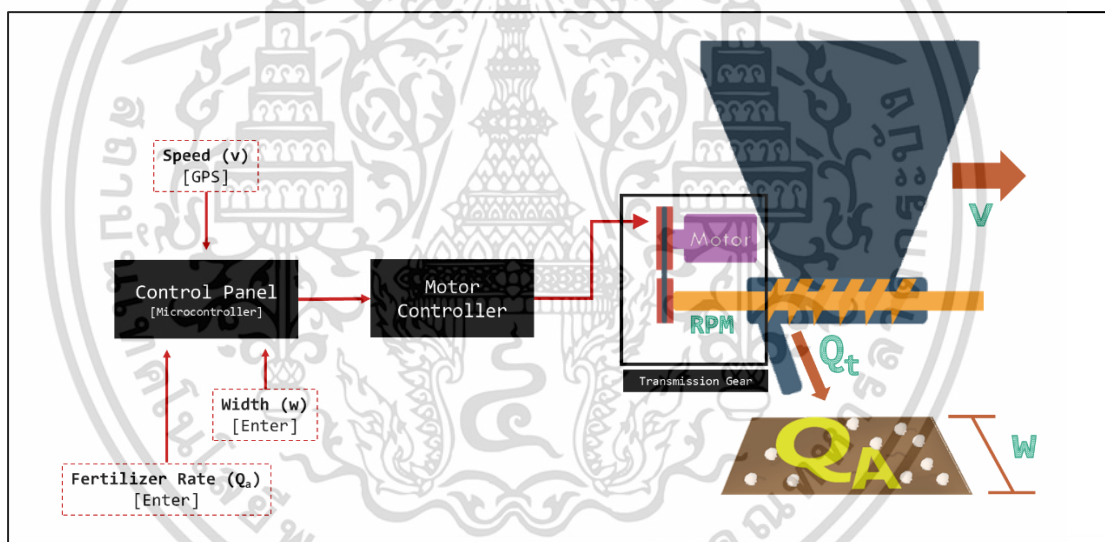
- 1) การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

เครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยโดยทั่วไปที่มีกลไกการขับเคลื่อนโดยใช้กำลังจากแรงฉุดลากของล้อขับเคลื่อนที่สัมผัสพื้นดิน แต่ถ้าหากพื้นดินไม่สม่ำเสมอจะเกิดการลื่นไถลของล้อที่แตกต่างกันทำให้เกิดความแปรปรวนของอัตราการหยอดได้ จากปัญหาดังกล่าวเพื่อช่วยลดปัญหาความแปรปรวนในการหยอดผู้วิจัยจึงให้ความสนใจกับการควบคุมอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ (Q_p) ให้คงที่และสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อก้าวถึงการให้ปุ๋ย โดยทั่วไปจะนึกถึงอัตราการให้ปุ๋ยเชิงพื้นที่ (Q_a) เช่นเป็นกิโลกรัมต่อไร่ แต่ในทางปฏิบัติ รถแทรกเตอร์และเครื่องหยอดปุ๋ยมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา และทำการหมุนของเกิลียวป้อนเพื่อหยอดปุ๋ยลงสู่พื้นดิน สิ่งที่ระบบทำคือการจ่ายอัตราการหยอดปุ๋ยเชิงเวลา (q_t) ซึ่งจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ (v) และหน้ากว้างในการทำงาน (w) หากความเร็วสูงขึ้นหรือระยะระหว่างแถวเพิ่มขึ้น ระบบจะต้องจ่ายปุ๋ยด้วยอัตราการหยอดเชิงเวลาที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ที่ต้องการ

ดังนั้นแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาระบบ คือระบบจะต้องทราบความเร็วในการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลความเร็วจากเครื่องรับสัญญาณ GPS เมื่อมีการกำหนดค่าอัตราการหยอดต่อพื้นที่ และหน้ากว้างในการทำงานโดยผู้ใช้งาน จะสามารถคำนวณอัตราการหยอดเชิงเวลา ณ ขณะนั้นได้ ซึ่งผู้วิจัยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการคำนวณและประมวลผลและส่งสัญญาณควบคุมไปยังมอเตอร์โดยผ่านชุดวงจรขับเคลื่อนเพื่อควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของเกิลียว ทำให้สามารถควบคุมอัตราการหยอดต่อเวลาได้ สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 1.1



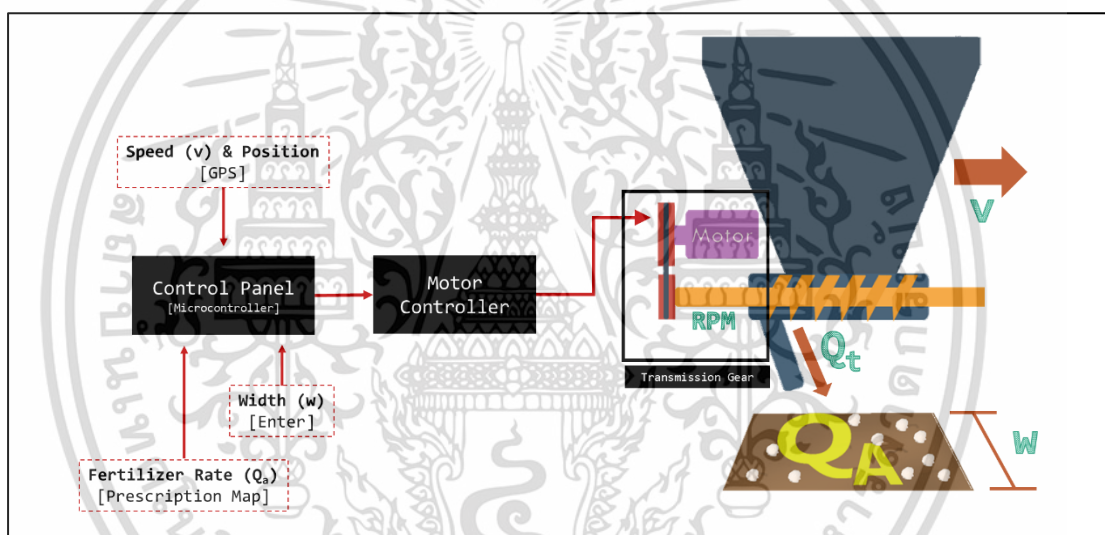
รูปที่ 1.1 แผนภาพแนวคิดของระบบควบคุมส่วนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร

เป็นการนำแนวคิดของเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปรมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น โดยในการศึกษานี้เป็นการให้ระบบหยุดปุ๋ยในอัตรา (Q_a) ตามที่กำหนดไว้ในไฟล์แผนที่การให้ปุ๋ย (Prescription Map) ที่จัดทำไว้ล่วงหน้า โดยแต่ละพิกเซล (pixel) ของไฟล์แผนที่จะทราบค่าพิกัดบนพื้นโลก และเก็บค่าอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่เอาไว้ ดังนั้นระบบ VRT ที่พัฒนาขึ้นนี้จะใช้ค่าพิกัดจาก GPS มารระบุตำแหน่งและอ่านค่าอัตราปุ๋ยจากพิกเซลของไฟล์แผนที่ที่แทนการป้อนค่าคงที่ในระบบก่อนหน้า ส่วนการทำงานอื่นๆ ของระบบยังคงเหมือนเดิม

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเครื่องรับ GPS ที่ใช้เป็นเครื่องรับที่ใช้งานทั่วไปความแม่นยำของพิกัดไม่สูง อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบ โดยในการศึกษานี้เป็นการศึกษาในครั้งแรกเพื่อหาความเป็นไปได้ของการพัฒนาเทคโนโลยี VRT ที่มีราคาไม่สูง แผนผังการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แผนภาพแนวคิดของระบบในส่วนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1.1. เครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยทั่วไปและกลไกการทำงาน

การบำรุงรักษาอ้อยทั้งอ้อยปลูกใหม่และอ้อยต่อ เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานและจำเป็นต้องใช้แรงงานจำนวนมาก เพื่อให้ทันต่อเหตุการณ์ ฤดูกาล และทันเวลา ซึ่งในอดีตการใช้แรงงานในการบำรุงรักษาอ้อย อย่างเช่นในการกำจัดวัชพืช ให้ปุ๋ยบำรุงด้วยการหว่านด้วยมือ แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการเกษตรจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการคิดค้น พัฒนาเครื่องมือต่างๆทั้งในเชิงงานวิจัยและเชิงพาณิชย์ เพื่อลดการใช้แรงงานคน และลดเวลาในการทำงาน เครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ปัจจุบันเกษตรกรนิยมใช้ โดยมีการออกแบบให้มีฟังก์ชันในการใช้งานหลากหลาย และแตกต่างกันออกไป ได้แก่

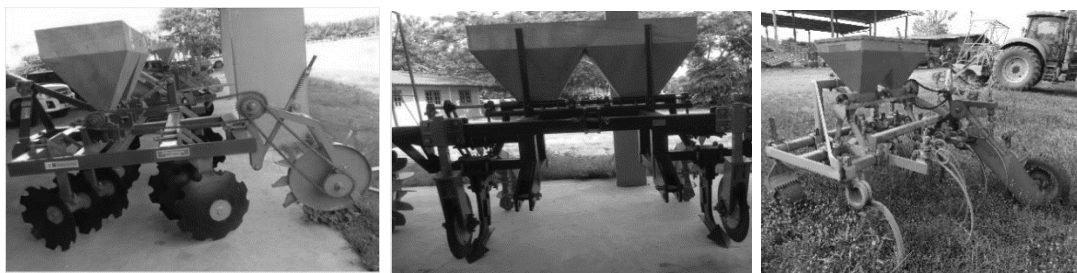
2.1.1.1. เครื่องใส่ปุ๋ยพรวนดินพร้อมฝังกลบปุ๋ยแบบงานใบจักร ประกอบด้วย โครงสร้างเหล็ก ถึงบรรจุปุ๋ย 2 ถึง งานใบจักร 2 แถวจำนวน 12 งาน ลูกกลิ้งสัมผัสดินและโซ่สำหรับฉุดลาก ซึ่งมีกลไกการทำงานโดยที่ลูกกลิ้งสัมผัสพื้นดินเพื่อขับเฟืองโซ่ทำให้โซ่ฉุดลากและเกลียวหยอดหมุนลำเลียงปุ๋ยออกจากถังลงสู่พื้นดิน

2.1.1.2. เครื่องใส่ปุ๋ยติดคราดขาแข็งพร้อมล้อจาน ประกอบด้วย ถึงบรรจุปุ๋ยขนาด 50 กิโลกรัม 2 ถึง คราดขาแข็ง 2 ขา ล้อจาน สำหรับตัดหน้าดินและตัดใบอ้อย ลูกกลิ้ง และโซ่ฉุดลากเฟืองขับ ซึ่งเครื่องใส่ปุ๋ยชนิดนี้จะนิยมใช้กับอ้อยต่อเนื่องจากมีคุณสมบัติในการตัดหน้าดินและตัดใบอ้อยเพื่อไม่ให้ติดคราดขาแข็ง

2.1.1.3. เครื่องใส่ปุ๋ยติดคราดสปริง เป็นเครื่องมือที่เกษตรกรนิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากทำการใส่ปุ๋ยภายในร่องอ้อยได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ลดการระเหิดของปุ๋ยในอากาศ โดยขาสปริงจะสั่นอยู่ตลอดเวลา ทำให้ดินแตกตัวได้ดีและทำการกระตุ้นให้รากหาอาหารได้ดี

เครื่องหยอดปุ๋ยที่กล่าวมาข้างต้นส่วนใหญ่มีกลไกการทำงานของเครื่องหยอดปุ๋ยโดยลูกกลิ้งสัมผัสดินเกิดแรงฉุดลากของโซ่เพื่อขับเฟืองและขับเกลียวหยอดตามลำดับ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยทั่วไป

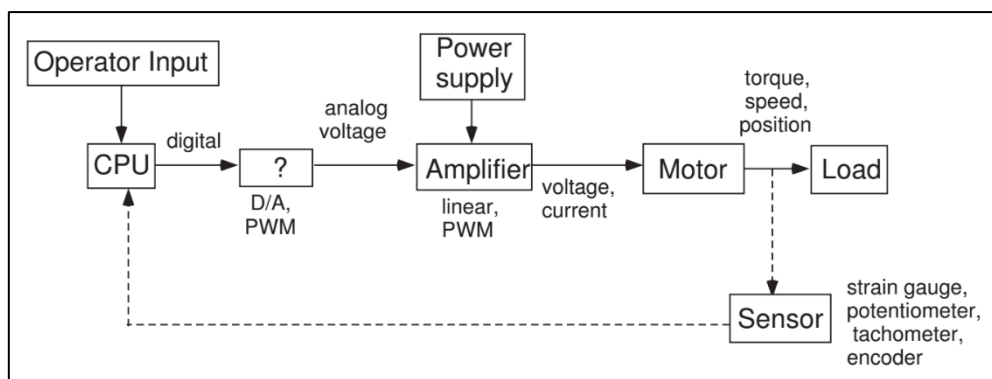
2.1.2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและหลักการทำงาน

มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยมีหลักการทำงานนี้ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะมีแรงเกิดขึ้นที่ลวดตัวนำ ทำให้ลวดตัวนำเกิดการเคลื่อนที่ด้วยการหมุน โดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ มอเตอร์กระแสตรง (Direct Current Motor, DC Motor) และมอเตอร์กระแสสลับ (Alternating Current Motor, AC Motor) [9]

มอเตอร์กระแสตรง (Direct Current Motor, DC Motor) มีโครงสร้างและหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปแต่ต้องป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสนามและขดลวดอาร์มเจอร์เพื่อให้มอเตอร์เกิดการหมุนและสร้างแรงบิด ส่วนใหญ่จะใช้ในงานที่ต้องการควบคุมความเร็วและแรงบิดและยังสามารถนำเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้ได้ โดยข้อดีของมอเตอร์กระแสตรง คือ ช่วงของความเร็วที่สามารถปรับใช้งานกว้าง สามารถใช้งานได้ทั้งแรงบิดคงที่และความเร็วคงที่ มีการเร่งหรือการหน่วงความเร็วทำได้อย่างรวดเร็วและตอบสนองได้ดีต่อการควบคุมแบบป้อนกลับ [10]

การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงสามารถควบคุมได้ทั้งสัญญาณไฟฟ้า (แรงดัน, กระแสไฟฟ้า) และสัญญาณเชิงกล (แรงบิด, ความเร็ว, ตำแหน่ง) ซึ่งในการควบคุมมอเตอร์ด้วยสัญญาณไฟฟ้าจะอาศัยการรับกระแสไฟฟ้ามาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply) ผ่านตัวแปลงสัญญาณหรือวงจรขับมอเตอร์ (Motor Driver) ที่รับค่าสัญญาณควบคุม (PWM) จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นสรุปได้ว่าการควบคุมมอเตอร์โดยการควบคุมสัญญาณไฟฟ้าจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การควบคุมมอเตอร์ด้วยสัญญาณ PWM แบบระบบเปิด.

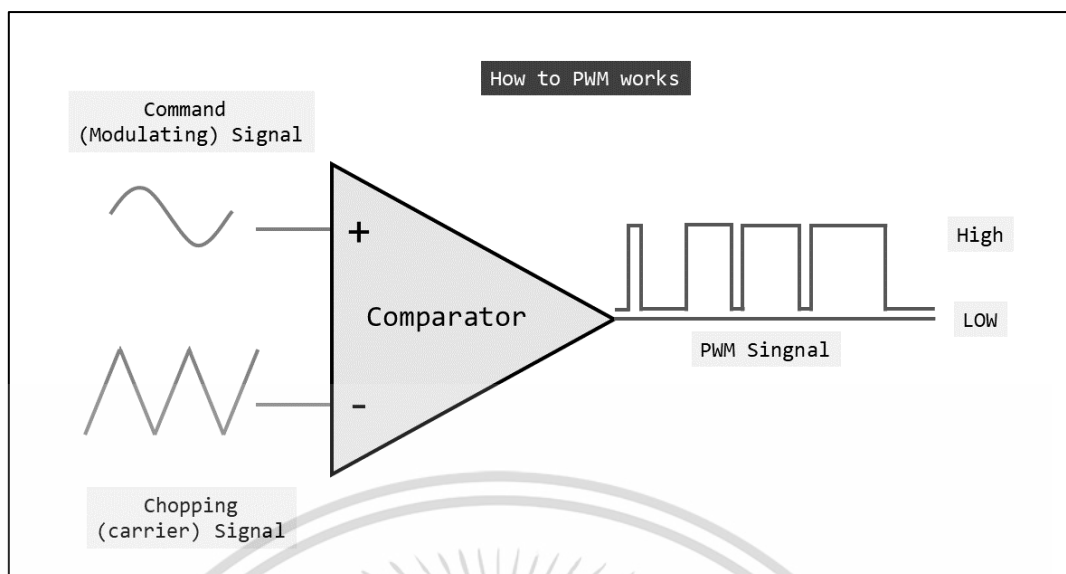
2.1.3. สัญญาณควบคุม (PWM)

PWM (Pulse-Width Modulation) คือสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่คงที่แต่ความกว้างของพัลส์จะเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งถือเป็นเทคนิคพื้นฐานในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์เช่น การควบคุมมอเตอร์ความเร็วของมอเตอร์ [11] เทคนิคนี้ทำให้เราสามารถอ่าน/เขียนข้อมูลแบบ analog ด้วยสัญญาณ digital ได้ โดยตัวควบคุมการสร้างสัญญาณดิจิทัล (Digital control) จะสร้างสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ออกมา ดังรูปที่ โดยสัญญาณที่สร้างออกมาจะสลับกันระหว่าง เปิด (HIGH) กับ ปิด (LOW) ด้วยคาบเวลาหนึ่งๆ ทำให้สามารถเขียนค่าเป็นแบบอะนาล็อกได้ (อาจเป็น 0-255 หรือ 0-1023) รูปแบบสัญญาณเปิด-ปิดนี้ สามารถจำลองเป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่าง เปิด (5 Volts) กับ ปิด (0 Volts) [10]

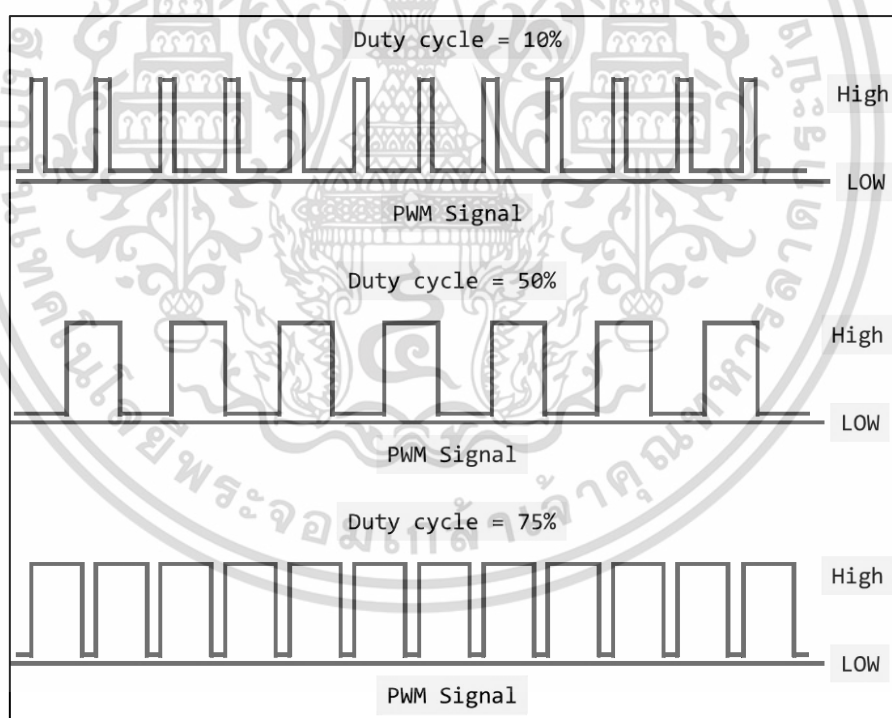
ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับ สัดส่วนเวลาของสัญญาณในช่วงเวลาที่มีสถานะเป็น HIGH กับ ช่วงเวลาที่เป็น LOW โดย ช่วงเวลาทั้งหมดที่สัญญาณมีสถานะเป็น HIGH นั้นจะเรียกว่าเป็น "ความกว้าง Pulse (Pulse Width)" โดยสัญญาณพัลส์ เมื่อเทียบ % ของช่วงเวลาที่เป็น HIGH (หรือก็คือ % ของ Pulse Width) กับ % ของคาบเวลา (Period) ของพัลส์สัญญาณนั้นๆ เราจะเรียกว่า Duty Cycle [11]

สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นเทคนิคที่ Arduino และ Raspberry pi ใช้ในการนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ ผ่านชุดไดรฟ์ (Motor Driver)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การทำงานของสัญญาณ PWM



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสัญญาณ PWM

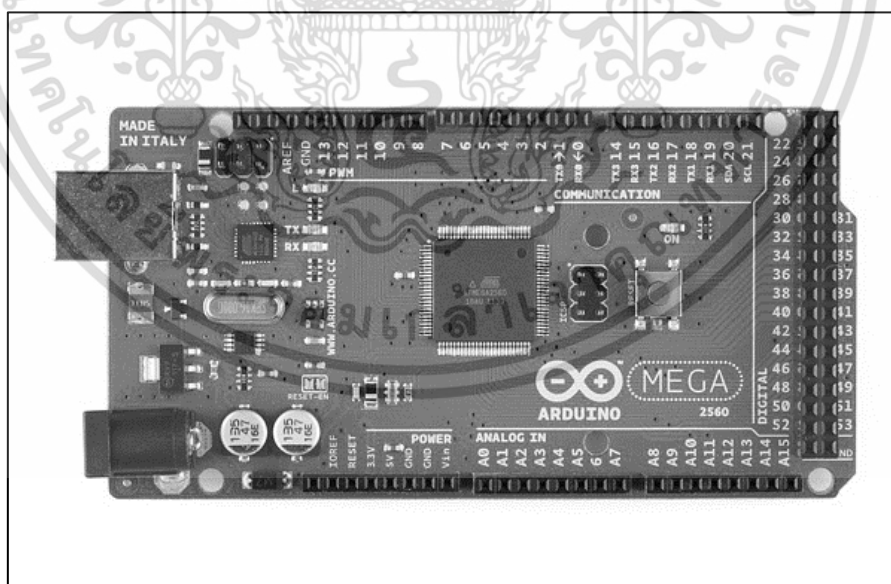
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4. ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ถูกสร้างขึ้นในรูปแบบของ chip ซึ่งประกอบด้วย หน่วยประมวลผล (Processor unit) หน่วยความจำ (Memory unit) และหน่วยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (I/O Port) ไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันมีหลายตระกูลให้เลือกใช้งาน เช่น MCS-51, PIC, AVR, ARM, Basic และ Stamp, PSoC เป็นต้น โดยจะสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาแอสเซมบลี ภาษาเบสิก ภาษาซีหรือภาษาอื่น ๆ ที่บริษัทผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละตระกูลได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานร่วมกัน

2.1.4.1. Arduino

Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source ที่มีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software แสดงในรูปแบบที่ 2.5 โดยบอร์ด Arduino มีหลายรุ่นให้เลือกใช้ โดยในแต่ละรุ่นอาจมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดของบอร์ด หรือสเปค เช่น จำนวนของขารับส่งสัญญาณ, แรงดันไฟที่ใช้, ประสิทธิภาพของ MCU เป็นต้น [13] ภาษาที่ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมควบคุม MCU จะเป็นภาษา C/C++ หรือที่เรียกอีกแบบว่า ภาษา Arduino โดยมีเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Arduino, คอมไพล์โปรแกรม (Compile) และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด (Upload) นั่นคือ Arduino IDE (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.5 บอร์ด Arduino MEGA 2560 R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 หน้าต่างโปรแกรม Arduino IDE (Version 1.6.13)

ในงานวิจัยนี้ใช้ Arduino รุ่น MEGA 2560 R3 ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR : ATmega2560 เป็นชิพหลักของระบบ มี digital input/output จำนวน 54 ช่องสัญญาณ (โดยมี 15 ช่องที่สามารถใช้งาน PWM output ได้), analog inputs 16 ช่องสัญญาณ, ความเร็ว CPU 16 MHz, สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วย USB มีหน่วยความจำและขาสัญญาณต่างๆ ให้ต่อใช้งานมากขึ้น [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.2. Raspberry Pi

Raspberry Pi เป็นบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Single-Board Computer หรือ SBC) ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Raspberry Pi Foundation สามารถเชื่อมต่อกับจอคอมพิวเตอร์ คีย์บอร์ด และเมาส์ได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเขียนโปรแกรม หรือเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะขนาดเล็ก [14]

บอร์ด Raspberry Pi รองรับระบบปฏิบัติการลินุกซ์ (Linux Operating System) ได้หลายระบบ เช่น Raspbian (Debian), Pidora (Fedora) และ Arch Linux เป็นต้น โดยติดตั้งบน SD Card ซึ่งปัจจุบันมีด้วยกัน 2 โมเดล คือ โมเดล A และ โมเดล B ซึ่งทั้ง 2 โมเดลมีคุณสมบัติทางเทคนิคที่ใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเพียงบางส่วน โดยถูกออกแบบมาให้มีหน่วยประมวลผล (Processor unit), หน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) และหน่วยความจำ (Memory unit) อยู่ภายในชิปเดียวกัน อีกทั้งยังมีจุดเชื่อมต่อ GPIO ที่สามารถนำไปเชื่อมต่อและใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ได้ ในการสั่งงานและควบคุมการทำงานด้วยการเขียนคำสั่งและเขียนโปรแกรมควบคุม จะใช้ภาษาหลักๆ เป็นภาษา Python [15]

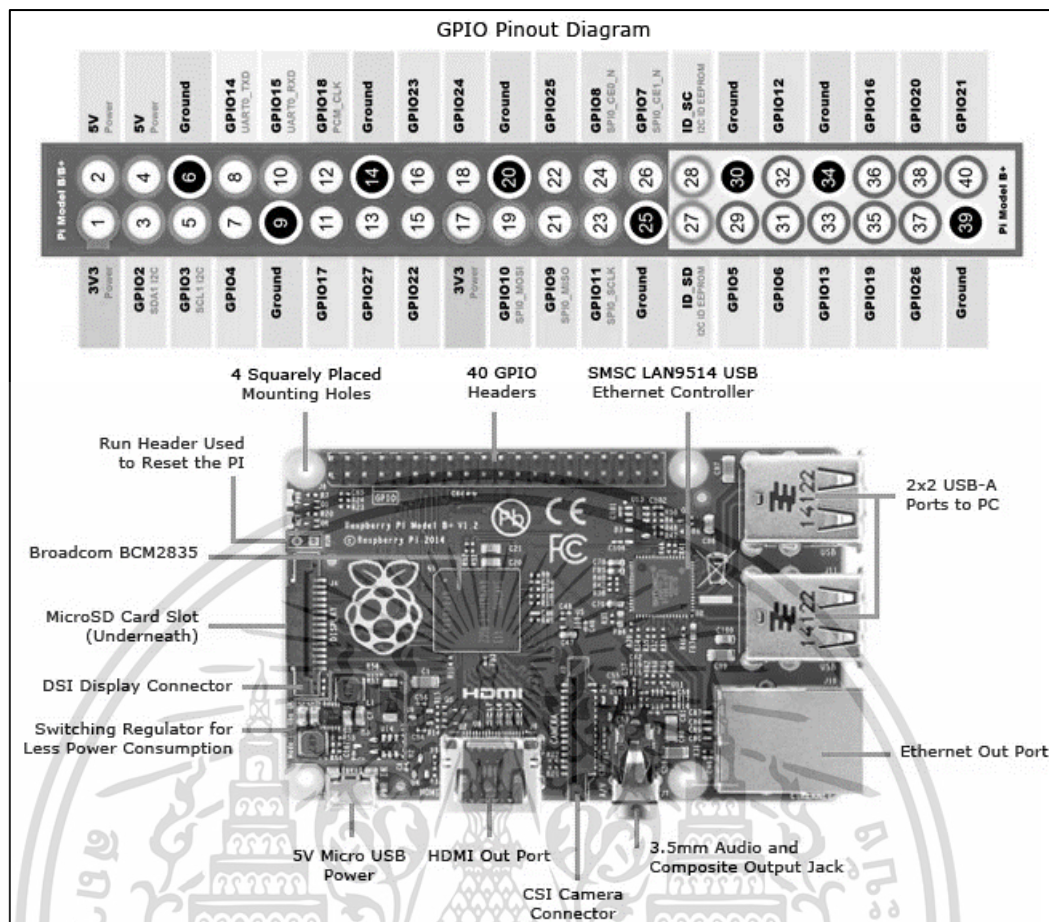
Python เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมสูงสุดในปัจจุบัน เนื่องจากมีความง่ายต่อการเรียนรู้และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ โดยสร้างขึ้นเมื่อ ค.ศ. 1994 โดยโปรแกรมเมอร์ชื่อ Guido van Rossum ซึ่งไพธอนเป็นภาษาเปิดเผย Source Code ภายใต้ลิขสิทธิ์ของ Python Software โดยมีเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python, คอมไพเลอร์ (Compile) และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด (Upload) นั่นคือ Python IDE นอกจากนี้ยังมีอีกหลากหลายโปรแกรมที่สามารถใช้ร่วมกับภาษาไพธอนได้ อย่างเช่น Thonny IDE, Geany IDE, Verdict IDE เป็นต้น [16]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรม python IDE

ในส่วนที่สองของงานวิจัยนี้ใช้บอร์ด Raspberry Pi 3 Model B+ มีชิปประมวลผลหลักเป็น Broadcom BCM2837 ARM แกนประมวลผล Cortex-A53 แบบ 4 แกน (Quad-Core) ความเร็วในการทำงาน 1.4 GHz ต่อแกน และหน่วยประมวลผลกราฟิกเป็น Broadcom, Video Core IV dual-core GPU และหน่วยความจำ (Memory unit) เป็น 1GB LPDDR2 SDRAM [17] และมี GPIO (General Purpose Input Output) จำนวน 40 ช่องสัญญาณโดยมีสามารถใช้งานช่องสัญญาณ SPI (SPI0 จำนวน 10 ช่องสัญญาณ, SPI1 จำนวน 11 ช่องสัญญาณ), I2C (จำนวน 4 ช่องสัญญาณ), Serial (จำนวน 2 ช่องสัญญาณ) และ PWM output ได้ทั้ง Software PWM (ทุกช่องสัญญาณ) และ Hardware PWM (GPIO12, GPIO13, GPIO18 และ GPIO19) [18] [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รายละเอียดของสัญญาณ Raspberry pi 3 model B+

2.1.5. Global Positioning System (GPS)

GPS ย่อมาจาก Global Positioning System หรือ ระบบกำหนดพิกัดบนโลกและถูกพัฒนาขึ้นโดยNMEA (National Marine Electronics Association) มักจะใช้โปรโตคอลมาตรฐาน (NMEA 0183) โดยในตัวโปรโตคอลมาตรฐาน มีชนิดของข้อมูลและรายละเอียดย่อไปตามประเภทการใช้งาน แต่โดยรวมจะเก็บข้อมูลหลักๆของ GPS ไว้ เช่น position, velocity, time, DOP และอื่นๆ อย่างไรก็ตาม GPS หรืออุปกรณ์รับสัญญาณ GPS (GPS Receiver) แต่ละยี่ห้อจะสามารถรับส่งข้อมูลโปรโตคอลของ NMEAได้แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน เช่น SiRF chipset รองรับ GPGLL, GPGLL, GPGSA, GPGSV, GPRMC, และ GPVTG เป็นต้น [20]

โดย NMEA สามารถระบุข้อมูลออกมาได้หลายแบบด้วยกัน ซึ่งเมื่อมีการเริ่มส่งข้อมูลมาจะเริ่มต้นการส่งด้วยเครื่องหมาย \$ และตามด้วยรูปแบบของข้อมูล แล้วจบด้วยเครื่องหมาย * ยกตัวอย่างเช่นข้อมูลชนิด GPRMC—Recommended Minimum Specific GNSS Data โดยแสดง

ตัวอย่างข้อมูลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\$GPRMC,123519,A,4807.038,N,01131.000,E,022.4,084.4,230394,003.1,W*6A ประกอบด้วย ข้อมูล 12 ข้อมูลดังนี้ [21]

[0]	RMC	Recommended Minimum sentence C
[1]	161229.487	Fix taken at 12:35:19 UTC
[2]	A	Status A=active or V=Void.
[3],[4]	4807.038,N	Latitude 48 deg 07.038' N
[5],[6]	01131.000,E	Longitude 11 deg 31.000' E
[7]	022.4	Speed over the ground in knots
[8]	084.4	Track angle in degrees True
[9]	230394	Date - 23 rd . of March 1994
[10]	003.1,W	Magnetic Variation
[11]	*6A	The checksum data, always begins with *

รูปที่ 2.9 ข้อมูลประโยคข้อความในการรับส่งสัญญาณ GPS

โดยในงานวิจัยนี้ผู้ใช้จะใช้รูปแบบข้อมูลของ GPRMC เนื่องจากมีชนิดของข้อมูลของระบบ กำหนดพิกัดบนโลก ซึ่งคำนวณพิกัดจากดาวเทียมที่โคจรอยู่รอบโลก และจำเป็นต้องใช้ดาวเทียมตั้งแต่ 3 ดวงขึ้นไป ที่จะทำให้สามารถบอกตำแหน่งได้ โดยระบุในข้อมูลตำแหน่งที่ 3 4 5 6 นอกเหนือจากการใช้ GPS ในการระบุตำแหน่งแล้ว ยังสามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการหาความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ ระบุในตำแหน่งที่ 7 ของชุดข้อมูล ซึ่งมีหลักการในการคำนวณความเร็วของ GPS คือ เมื่อ GPS สามารถระบุตำแหน่งของเราที่เวลาใดๆ เมื่อเวลาผ่านไป เมื่อ GPS ระบุตำแหน่งได้อีกหนึ่งจุดแล้วสามารถหารระยะว่าห่างจากจุดก่อนหน้าเท่าใดเมื่อนำระยะทางที่เปลี่ยนไปหารด้วยเวลาที่เปลี่ยนไปเราก็จะได้ความเร็วของสิ่งที่เราต้องการ และสามารถที่จะลดความคลาดเคลื่อนจากการวัดความเร็วในแบบอื่น อย่างเช่นการวัดความเร็วด้วยล้อหมุนที่จะทำให้เกิดการเลื่อนไถลได้ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6. Variable rate technology (VRT)

ปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสื่อสารและเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้มีการประยุกต์ใช้ในภาคเกษตรอย่างกว้างขวาง โดยการนำเทคโนโลยีสารสนเทศและวิทยาศาสตร์การเกษตรมาผสมผสานกันเพื่อปรับปรุงการผลิตพืชเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน เกษตรแม่นยำ (precision agriculture) หรือการทำเกษตรกรรมแบบแม่นยำ (precision farming) มีความแตกต่างการเกษตรแบบดั้งเดิม [23]

เทคโนโลยีอัตราผันแปร (Variable rate technology, VRT) ในการทำเกษตรแม่นยำเป็นการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการจัดการกิจกรรมภายในพื้นที่เพื่อให้ความแม่นยำมากขึ้นและเกิดประโยชน์สูงสุด เช่นการให้ปุ๋ย การให้น้ำ การใช้สารเคมีในปริมาณที่ถูกต้อง ณ เวลาที่เหมาะสมแก่พืช ซึ่งเกิดจากการนำระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (Global Positioning System: GPS) และระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) มาใช้ร่วมกันในการบริหารจัดการข้อมูลภายในพื้นที่หรือแปลงเพาะปลูก [24] เทคโนโลยีอัตราผันแปร (VRT) สามารถควบคุมได้ตั้งแต่การควบคุมอัตราการไหลอย่างง่ายไปจนถึงการควบคุมจัดการอัตราที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น การผสมทางเคมีและรูปแบบการใช้งาน เป็นต้น [25]

VRT สามารถใช้เพื่อจัดการกับความแปรปรวนเชิงพื้นที่ระหว่างแปลงหรือระหว่างโซนพื้นที่สามารถตามหลักการทำงานได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. ควบคุมอัตราตามแผนที่ (Map-based) เป็นการควบคุมอัตราตามแผนที่ของโซนพื้นที่ตามความแปรปรวนที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการควบคุมตามแผนที่นั้น จำเป็นต้องมีการจัดการและวิเคราะห์ข้อมูลภายในพื้นที่นั้นและสร้างเป็นแผนที่ตามความแปรปรวนมาป้อนให้แก่ระบบ มักจะถูกออกแบบมาสำหรับการให้ปุ๋ย หยอดปุ๋ย และการให้น้ำ เป็นต้น
2. ควบคุมแบบเรียลไทม์ (Real-time control) เป็นการควบคุมอัตราระหว่างทำงานโดยการใช้ระบบเซ็นเซอร์ในการตรวจจับความแปรปรวนภายในพื้นที่และป้อนข้อมูลให้แก่ระบบหรือ on-the-go ซึ่งมักจะถูกออกแบบเพื่อนำมาใช้สำหรับงานเฉพาะจุด เช่น การใช้สารกำจัดวัชพืช เป็นต้น[26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7. Geographic Information System (GIS)

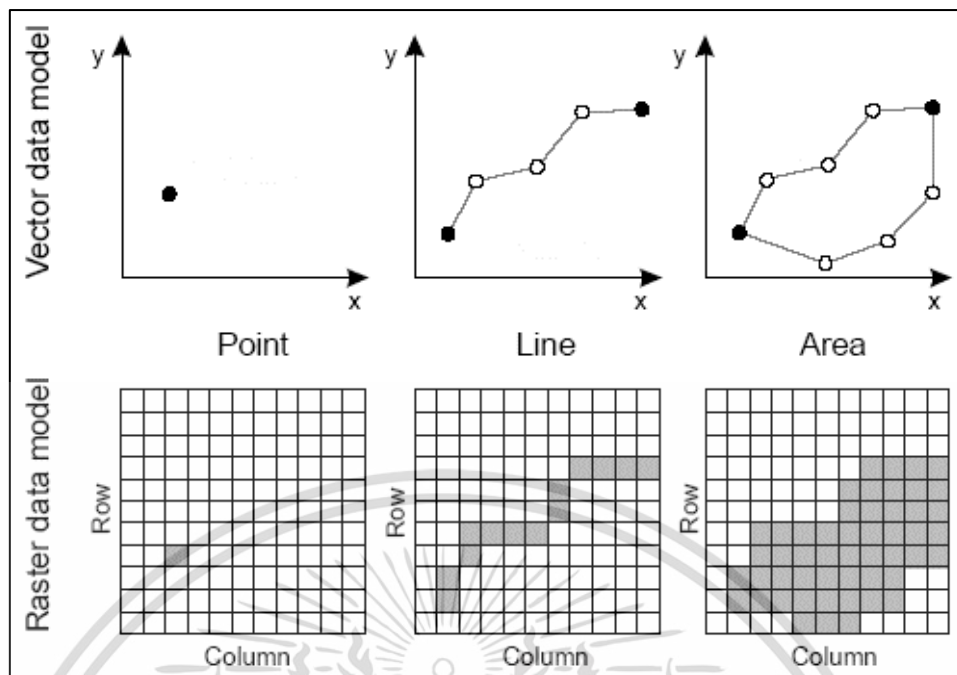
ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) คือการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) นั้นจะแสดงในรูปของภาพ (graphic) แผนที่ (map) ที่เชื่อมโยงกับข้อมูลเชิงบรรยาย (Attribute Data) หรือฐานข้อมูล (Database) โดยในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มีข้อมูล 2 รูปแบบ[27] ได้แก่

1. ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) เป็นข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งที่ตั้งของข้อมูลต่างๆที่อยู่บนพื้นโลก ที่สามารถอ้างอิงตำแหน่งทางภูมิศาสตร์() โดยข้อมูลเชิงพื้นที่นี้สามารถแสดงเป็นสัญลักษณ์ได้ 3 รูปแบบคือ
 - จุด (Point) จะใช้แสดงข้อมูลเป็นลักษณะของตำแหน่งที่ตั้ง
 - เส้น (Line) จะใช้แสดงข้อมูลที่เป็นลักษณะของเส้น
 - พื้นที่ (Area or Polygon) จะใช้แสดงข้อมูลที่เป็นลักษณะของพื้นที่
2. ข้อมูลที่ไม่อยู่ในเชิงพื้นที่ (Non- Spatial data) เป็นข้อมูลเชิงบรรยาย (Attribute) ที่จะอธิบายถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ในพื้นที่นั้น ๆ เช่น ข้อมูลจำนวนประชากรในเขตต่าง ๆ เป็นต้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ
 - ตารางข้อมูลที่เชื่อมโยงกับกราฟิก (Graphic table)
 - ตารางข้อมูลที่ไม่เชื่อมโยงกับกราฟิก (Non-Graphic table) [27]

ลักษณะของข้อมูลเชิงพื้นที่ สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. ข้อมูลเชิงทิศทาง (Vector Data) คือข้อมูลที่แสดงด้วย จุด เส้น หรือพื้นที่ ที่ประกอบด้วยจุดพิกัดทางแนวราบ (X , Y) และ/หรือ แนวตั้ง (Z) หรือ Cartesian Coordinate System ถ้าเป็นพิกัดตำแหน่งเดียวก็จะเป็นค่าของจุด ถ้าจุดพิกัดสองจุดหรือมากกว่าจะเป็นค่าของเส้น ส่วนพื้นที่นั้นจะต้องมีจุดมากกว่า 3 จุดขึ้นไป และจุดพิกัดเริ่มต้นและจุดพิกัดสุดท้ายจะต้องอยู่ตำแหน่งเดียวกัน
2. ข้อมูลแสดงลักษณะเป็นกริด (Raster Data) เป็นข้อมูลที่มีโครงสร้างเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเท่า ๆ กัน เรียกว่าจุดภาพ (Grid cell, Pixel) เรียงต่อเนื่องกันในแนวราบและแนวตั้ง และสามารถอ้างอิงค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ได้ ขนาดของตารางกริด หรือความละเอียด (resolution) ในการเก็บข้อมูล จะใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับการจัดแบ่งจำนวนแถว (row) และจำนวนคอลัมน์ (column) ตัวอย่างข้อมูลที่จัดเก็บโดยใช้ตารางกริด เช่น ภาพถ่ายดาวเทียม Landsat หรือข้อมูลระดับค่าความสูง (digital elevation model:DEM) เป็นต้น[28] [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ลักษณะความแตกต่างระหว่างข้อมูลภาพ

GeoTIFF เป็นรูปแบบไฟล์รูปแบบแท็ก ไฟล์ .tif มาตรฐานหรือรูปภาพที่มีข้อมูลเชิงพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ ที่ฝังอยู่ในไฟล์ .tif โดยแท็กเหล่านี้สามารถรวมข้อมูลเป็นเมตาเรสเตอร์ (raster metadata) สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้:

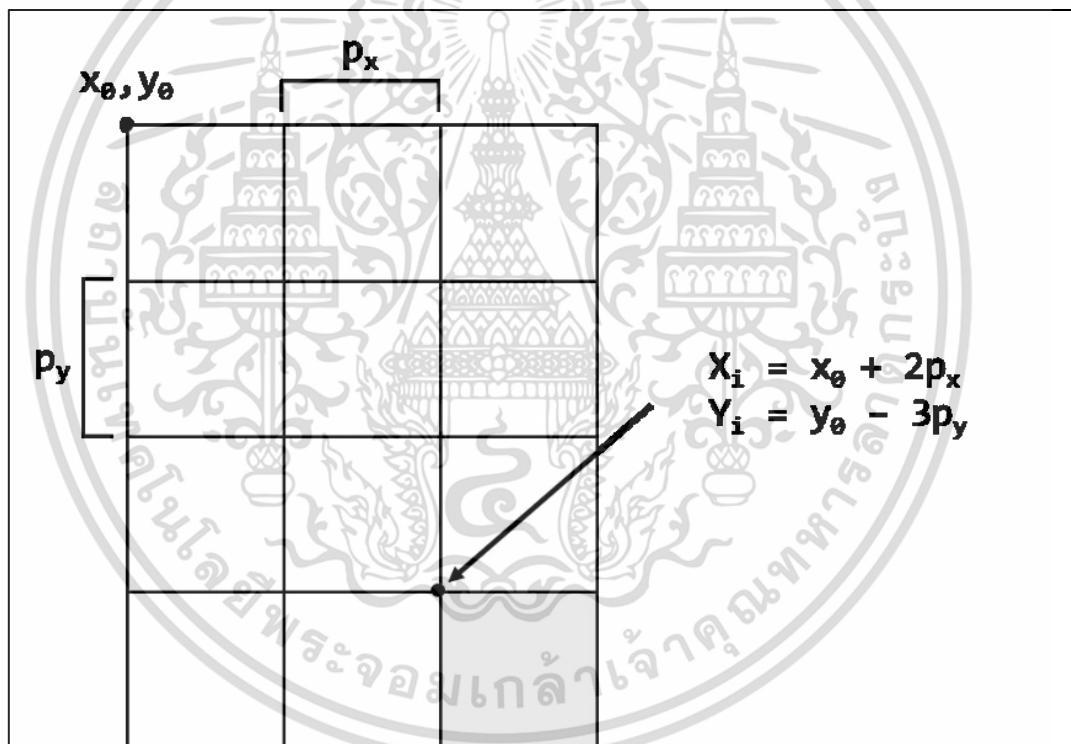
1. ขอบเขตเชิงพื้นที่ (Spatial Extent) อธิบายว่าข้อมูลในภาพชุดนี้ครอบคลุมพื้นที่ใดบ้าง
2. ระบบพิกัดอ้างอิง (Coordinate reference system) อธิบายเกี่ยวกับระบบพิกัดที่ถูกฉายลงบนพื้นที่ใดๆ ซึ่งพิกัดอ้างอิงจะถูกใช้ในการหาพิกัดต่างๆภายในภาพ
3. ความละเอียดของภาพ (Resolution) เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบเรสเตอร์ (raster) ซึ่งหมายความว่าภายในภาพจะประกอบด้วยพิกเซล โดยข้อมูลจะบ่งบอกว่าแต่ละพิกเซลครอบคลุมพื้นที่ใดบนพื้นโลก [30]

ในการอ่านข้อมูลภายในไฟล์ GeoTIFF นั้นจำเป็นต้องรู้ข้อมูลพื้นฐานหรือข้อมูลเฉพาะที่ถูกเก็บไว้ในโครงสร้างข้อมูลแบบเรียงลำดับ จำนวน 6 ตัวแปร สามารถยกตัวอย่างข้อมูลดังนี้ (691620.53581, 5.0, 0.0, 1518148.36208, 0.0, -5.0) ซึ่งแสดงข้อมูลในตารางที่ 2.1 และอธิบายลักษณะของข้อมูลเมื่ออยู่ภายในไฟล์ภาพดังรูป 3.1 [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 อธิบายลักษณะของข้อมูลเมื่ออยู่ในไฟล์ภาพ

ตำแหน่ง	รายละเอียดของข้อมูล	ตัวอย่าง
[0]	จุดกำเนิดพิกัดแกน x (Origin x coordinate, x_0)	691620.53581
[1]	ข้อมูลความกว้างของพิกเซล (Pixel width)	5.0
[2]	ข้อมูลการหมุนของพิกเซลในแกน x (x pixel rotation) (0° if image is north up)	0.0
[3]	จุดกำเนิดพิกัดแกน y (Origin y coordinate, y_0)	1518148.36208
[4]	ข้อมูลการหมุนของพิกเซลในแกน y (y pixel rotation) (0° if image is north up)	0.0
[5]	ข้อมูลความสูงของพิกเซล Pixel height (negative)	-5.0



รูปที่ 2.11 การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของพิกเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นายสายรุ่ง และคณะ ได้ทำการออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องหยอดสารเคมีแบบแม่นยำที่สามารถควบคุมอัตราการหยอดได้ตามที่ต้องการ โดยใช้เทคโนโลยีการวัดและควบคุมอัตราการหยอดสารเคมีในอัตราที่ต้องการด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีสารเคมีเป้าหมายคือสารเคมี Fosthiazate มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก จากการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในแปลงทดสอบพบว่าระบบมีความผิดพลาดเฉลี่ยของอัตราการหยอดเชิงพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 3.7% และ 10.4% ตามลำดับและยังกล่าวอีกว่า ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นความผิดพลาดเชิงระบบที่สามารถปรับแก้ด้วยการคาร์ริเบรชัน และความผิดพลาดอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการสั่นไถลภายในแปลงทดสอบของล้อควบคุม (4.28%) หากสามารถลดอิทธิพลของการสั่นไถลหรือสามารถวัดและปรับค่าการสั่นไถลได้ในขณะทำงานจะช่วยเพิ่มความแม่นยำของระบบได้ดีขึ้น [32]

นายวิชัย โอภาณุกุล ได้พัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยผสมสำหรับอ้อยแบบ 2 แถว ส่วนประกอบหลังคือถังใส่ปุ๋ย 2 ถัง สำหรับใส่ปุ๋ยที่ผสมไว้แล้วตามค่าวิเคราะห์ดิน ชุดกำหนดอัตราการให้ปุ๋ยแบบเฟืองจักรยาน สามารถปรับอัตราการหยอดได้ตั้งแต่ 10-87 กิโลกรัมต่อไร่ เครื่องใส่ปุ๋ยผสมสามารถใช้กับปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินได้ โดยสามารถเลือกเปลี่ยนอัตราการให้ปุ๋ยได้ แต่ไม่สามารถใส่ปุ๋ยได้แม่นยำเนื่องจากระบบการขับลูกหยอดแบบเฟือง แต่สามารถใส่ปุ๋ยได้ใกล้เคียง อัตราความผิดพลาดไม่เกิน 10% [33]

ณัชพล ศิริล้วนและคณะ ได้พัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยแบบแม่นยำขึ้น ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการหยอดปุ๋ยให้สอดคล้องกับความเร็วของแทรกเตอร์ เมื่อทดสอบจริงและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่มีผลต่ออัตราการหยอดปุ๋ยบนพื้นเรียบแต่เมื่อทดลองจริงในแปลงทดสอบความเร็วมีผลต่ออัตราการหยอด เนื่องจากเป็นพื้นที่ขรุขระทำให้เกิดการสั่นสะเทือน นายณัชพลและคณะได้กล่าวว่า หากสามารถลดความขรุขระของพื้นผิวลงได้จะช่วยเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลได้มากขึ้น [6]

ภิญญาพัชญ์ และคณะ ได้ทำการพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อจากนายณัชพลและคณะ ซึ่งเป็นการพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการควบคุมเกลียวลำเลียงในเครื่องหยอดปุ๋ยและนำเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปรมารวมด้วย จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีการตอบสนองต่อคำสั่งได้ดีสามารถปรับอัตราการหยอดได้อย่างรวดเร็ว และมีความแม่นยำในการหยอด (เชิงมวล) ที่ดีและระบบสามารถหยอดปุ๋ยได้ใกล้เคียงกับอัตรา (เชิงพื้นที่) ที่กำหนด แต่ควรได้รับการพัฒนาและปรับปรุงต่อไป [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T. A. Ishola และคณะ ได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือใส่ปุ๋ย Variable Rate Technology (VRT) สำหรับปาล์มน้ำมันแบบ 3 มิติด้วยซอฟต์แวร์ Solid Works ซึ่งประกอบด้วยวาล์วโรตารีพัลลมโบลเวอร์สายพานสกรูและถังปุ๋ยด้วยและถูกติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ขนาด 43.9 kW 4WD ที่ออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน โดยเครื่องนี้มีความจุ 1.20 ตัน, วาล์วโรตารี 2.13 กก./วินาที, เครื่องเป่าลมเทอร์โบขนาด 3.27 กิโลวัตต์จำนวน 2 เครื่อง, และสายพานลำเลียงสกรูขนาด 11.70 กิโลกรัมต่อวินาที ส่วนประกอบเหล่านี้ทำงานด้วยระบบไฮดรอลิก โดยมอเตอร์ไฮดรอลิกต่อพ่วงไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รถแทรกเตอร์ ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตและผลกำไรในสวนปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้ยังคาดว่าจะไปอีกนานในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปุ๋ยมากเกินไปในสวนปาล์มน้ำมัน แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการใส่ปุ๋ยแบบผันแปรสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดี [34]

M.R. Maleki และคณะ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตำแหน่งของเซ็นเซอร์ดิน 'on-the-go' ที่ติดตั้งบนระบบการใส่ปุ๋ยอัตราแปรผัน (VR) โดยการวัดเวลาหน่วงระหว่างการรับข้อมูลฟอสฟอรัสในดิน (P) จากเซ็นเซอร์ดินและการเปลี่ยนอัตราปุ๋ยในระบบการหยอด ซึ่งระบบตรวจจับนั้นใช้เซ็นเซอร์ดินร่วมกับเครื่องวัดปริมาณเซกซิส (Zeiss spectrophotometer (CORONA fiber VISNIR 1.7) เวลาที่ทำให้เกิดการหน่วงของระบบ เกิดจากระบบต้องใช้เวลาในการรวบรวมสเปกตรัมของดิน วิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณเพื่อเปลี่ยนแปลงอัตราปุ๋ย ณ เวลาที่เคลื่อนที่ภายในร่องเปิด โดยมีการทดสอบแบบคงที่และแบบไดนามิกเพื่อวัดเวลาที่ล่าช้าเหล่านี้ สำหรับการทดสอบแบบไดนามิกนั้นได้ใช้เครื่องปั่นไฮดรอลิก (Four Poster Vibratory Stands) เพื่อจำลองการสั่นสะเทือนของการทำงานภายในแปลงจริง ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยสำคัญในการจัดวางเซ็นเซอร์ดินที่ด้านหน้าของระบบการใส่ปุ๋ย 'on-the-go' คือความเร็วของรถแทรกเตอร์ และยังพบว่าควรติดตั้งเซ็นเซอร์ดินที่ด้านหน้าของรถแทรกเตอร์และควรมีการหน่วงเวลาพิเศษเพิ่มเติมด้วย[35]

งานวิจัยนี้มีแนวคิดภายใต้การนำเทคโนโลยีอัตราผันแปรแบบควบคุมตามแผนที่เพื่อช่วยรักษาสภาพแวดล้อมในการทำการเกษตรเนื่องจากการใช้ปัจจัยการผลิตเช่นปุ๋ยและยาฆ่าแมลงในวงกว้าง Ajay V และคณะได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ดังนี้(1) ชนิดของดิน (องค์ประกอบทางเคมีของดิน) (2) สีของดินและพื้นผิว (3) ภูมิประเทศ (พื้นดินสูงพื้นที่ต่ำ) (4) ผลผลิตพืช เพื่อนำผลวิเคราะห์ทางเคมีเหล่านี้มาสร้างเป็นแผนที่เพื่อควบคุมมอเตอร์กระแสตรงในการเปิด-ปิดของวาล์วสำหรับการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสม (เช่นปุ๋ย) ในพื้นที่เดียวกัน ระบบสามารถควบคุมอัตราการไหลโดยอัตโนมัติด้วยการปรับขนาดวาล์วไฮดรอลิกและสามารถเปลี่ยนการหมุนของมอเตอร์ไฮดรอลิกตามความเร็วในการทำงานในเวลาเดียวกัน และยังพบว่าระบบที่ใช้มอเตอร์ไฮดรอลิกเป็นกลไกขับเคลื่อนมีความเหมาะสมมากกว่ามอเตอร์กระแสตรง ได้ทำการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและทดสอบภาคสนาม ซึ่งผลการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองภาคสนามพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 5. % และมีค่า %CV อยู่ระหว่าง 0.35% ถึง 2% แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมการให้ปุ๋ยด้วยเทคโนโลยีอัตราผันแปรสามารถทำให้ประหยัดปุ๋ยและมีการให้ปุ๋ยในปริมาณที่เหมาะสม โดยเวลาตอบสนองการให้ปุ๋ยต่อระบบควบคุมน้อยกว่า 0.9 วินาที [36]

Ahmed A. Alameena และคณะได้พัฒนาระบบควบคุมเพื่อประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันควบคุมอัตราการให้ปุ๋ยแบบผันแปร (VRA) และประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นด้วยการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ กระจบบอกสูบนิวเมติกและเอ็นโค้ดเดอร์ โดยเครื่องหยอดเมล็ดควบคุมการปรับอัตราด้วยด้วยมือ (SOLA TRISEM 294 / R ESP, รุ่น: 37193 TIPO250) ถูกปรับเปลี่ยนระบบควบคุมการปรับอัตราให้เป็นแบบอัตโนมัติตามเวลาจริง ซึ่งทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นโดยทำการปรับอัตราการการหยอดที่ต้องการโดยอัตโนมัติเมื่อความเร็วเปลี่ยนอยู่ในช่วง 3-12 km h⁻¹ เมื่อทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและวิเคราะห์ผลแบบ ANOVA เพื่อประเมินความแม่นยำของระบบที่พัฒนาขึ้น ผลการศึกษาพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับอัตราการให้ปุ๋ยอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเร็วในการทำงานที่ตรวจสอบแล้วพบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่มีผลต่อการทำงานของระบบอย่างมีนัยสำคัญ ($P > F = 0.7968$) นอกจากนี้ระบบยังมีความคลาดเคลื่อนโดยรวม (ความแตกต่างระหว่างอัตราการให้ปุ๋ยที่ต้องการและจริง) ที่ $\pm 2.6\%$ และเวลาตอบสนองของระบบที่พัฒนานั้นพบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.006 และ 0.011 วินาที (สำหรับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการให้ปุ๋ย 1 กิโลกรัม) [37]

José F. Reyes ได้ทำการทดสอบระบบควบคุมด้วยเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร ซึ่งระบบประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์, จอแสดงผล LCD, วาล์วควบคุมสัดส่วนการไหลแบบอิเล็กทรอนิกส์ (a proportional flow control electro-valve), เซ็นเซอร์ความเร็วรอบในการหมุน (a rotational speed sensor) และมอเตอร์ไฮดรอลิกติดตั้งกับเกลียวหยอดปุ๋ยของเครื่องหยอดปุ๋ย อัตราการหยอดปุ๋ยจะถูกกำหนดตามแผนที่ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ซึ่งระบบดังกล่าวได้ทำการทดสอบในพื้นที่ขนาดเล็ก 0.6 เฮกเตอร์ (โดยออกแบบการทดลองแบบสุ่มสี่ครั้งและการทำซ้ำสามครั้ง) ได้ทำการสุ่มตัวอย่าง 21 ตัวอย่างภายในขอบเขตของแผนที่เพื่อวิเคราะห์ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่(ความสูงของพิกเซลภายในแผนที่) อยู่ที่ 1 ม., 2 ม., 3 ม., 4 ม. และ 5 ม. และความกว้างของพิกเซลภายในแผนที่ 3.5 ม. พบว่า ความคลาดเคลื่อนของระบบโดยรวมอยู่ที่ 5.46% และความคลาดเคลื่อนของอัตราการหยอดอยู่ระหว่าง 20% ถึง 29% ที่ความละเอียด 1 ม. และลดลงเป็นค่าระหว่าง 12% และ 14% ที่ความละเอียด 5 เมตรสำหรับตัวอย่างทดสอบทั้งหมด สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบความ

แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างอัตราการหยอดที่ความละเอียด 1 ม. เท่านั้น เนื่องจากความแคบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของช่วงเวลาสำหรับระดับความละเอียดนี้และการตอบสนองแบบไดนามิกของระบบเกลียวหยอด José F. Reyes สรุปไว้ว่า ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถควบคุมอัตราปุ๋ยที่ใช้กับพืชภายในแปลงที่ความละเอียดของสูงกว่า 1 เมตร [5]

E. Tola และคณะ (2008) กล่าวว่าทำให้ปุ๋ยเฉพาะเพื่อบำรุงการเจริญเติบโตเป็นส่วนสำคัญในการทำเกษตรกรรมแบบแม่นยำและจำเป็นต้องลดต้นทุนของผลผลิตในขณะเดียวกันก็ต้องรักษาสีเขียวด้วย ซึ่งใช้ระบบนิวเมติกมาใช้แทนการหยอดแบบทั่วไป (เชิงกล) และใช้เซนเซอร์ตรวจสอบการหยอดแบบตอบสนองทันที เพื่อทำให้ลดค่าความผิดพลาดทางสถิติในการหยอดเมื่อเทียบกับระบบการหยอดทั่วไป จากผลการทดสอบพบว่า การติดตั้งระบบอัตโนมัติเพื่อกำหนดอัตราการหยอด การตรวจสอบระบบเป็นระยะ ๆ และการควบคุมอัตราการหยอดสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบสามารถใช้กับโปรแกรมการหยอดแบบผันแปรอย่างมีนัยสำคัญด้วยค่าความผิดพลาดทั้งหมดของระบบอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ และยังพบว่าระบบควบคุมมีการตอบสนองต่อขั้นตอนการปรับเปลี่ยนอัตราการหยอดอยู่ในช่วง 0.95-1.90 วินาที และการเลือกตรวจสอบในช่วงระยะทางมากกว่า 3 เมตร สามารถช่วยให้การพัฒนาระบบการตรวจสอบและควบคุมขั้นตอนได้อย่างแม่นยำ การทดสอบเพิ่มเติมตามสภาพแปลงจริงมีความจำเป็นเพื่อยืนยันผลการทดสอบเหล่านี้และเพื่อปรับปรุงแก้ไขให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น [38]

Rui Zhang และคณะได้ทำการพัฒนาระบบควบคุมการหยอดปุ๋ยแบบผันแปรตามพื้นที่เพื่อควบคุมปริมาณการหยอดปุ๋ยด้วยเซนเซอร์ optical ด้วยการวัด NDVI ในแปลง ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ส่งเข้า-ออกภายในระบบควบคุม และได้ออกแบบอุปกรณ์ กระบวนการควบคุมการหยอดปุ๋ย ซอฟต์แวร์หลัก และการควบคุมการตอบสนองย้อนกลับ และยังกล่าวอีกว่า ระบบควบคุมการหยอดแบบผันแปรตามพื้นที่ ประกอบด้วย เซนเซอร์ 6 ตัวติดตั้งหน้าแทรกเตอร์ , โมดูล อินเทอร์เน็ต , ไมโครคอนโทรลเลอร์, เซนเซอร์วัดความเร็ว , เซนเซอร์วัดการหมุน , วาล์ว PWM และ มอเตอร์ไฮดรอลิกส์ ซึ่ง VRT รูปแบบนี้จะไม่ใช่แผนที่ใช้แบบจำแนกความแตกต่างแต่ระบบจะทำงานด้วยการให้เซนเซอร์ตรวจวัดข้อมูลความต้องการจ่ายปุ๋ยภายในแปลงแบบตอบสนองทันที เกลียวหยอดปุ๋ยสามารถควบคุมให้อัตโนมัติได้โดยการพฤติกรรมของวาล์วไฮดรอลิกส์ที่เปลี่ยนไปตามความเร็วในการทำงานและยังควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ให้ทำงานแบบผันแปรตามข้อมูลปริมาณปุ๋ยที่เซนเซอร์วัดได้ ในการทดสอบทำโดยตั้งค่าปริมาณปุ๋ยที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าค่าความผิดพลาดของปริมาณปุ๋ยอยู่ในระดับที่ดี ซึ่งมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 5.17% และมีค่า CV อยู่ระหว่าง 0.35%-2.67% การตอบสนองต่อเวลาของระบบควบคุมมีการตอบสนองที่ใช้เวลาน้อยกว่า 0.875 วินาที ซึ่งถือว่าระบบมีการตอบสนองได้ดีและสามารถทำงานด้วยการแปรผันตามข้อมูลที่เซนเซอร์วัดได้เป็นอย่างดี [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

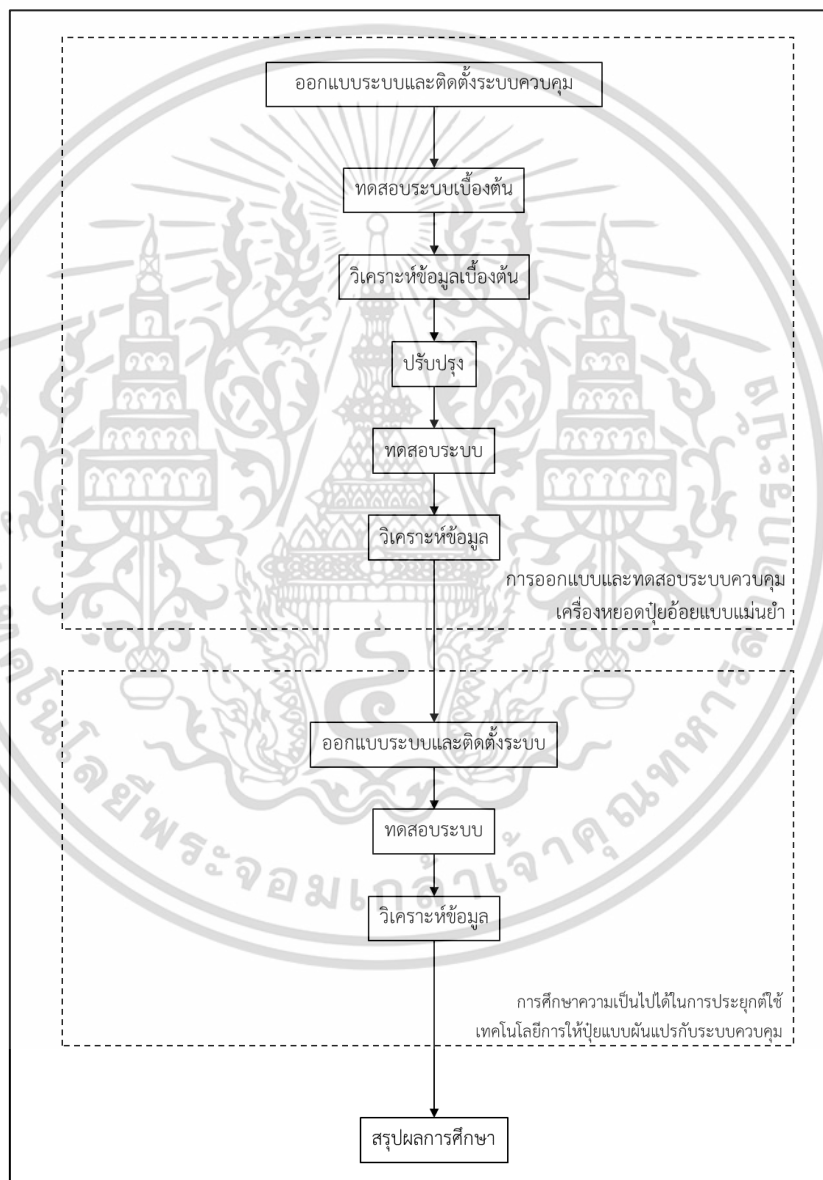
สุริยา วรวงศ์ และคณะ ได้ทำการประยุกต์เทคโนโลยีความแม่นยำทางการเกษตรเข้ามาใช้ใน ระบบการให้ปุ๋ย ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อการใส่ปุ๋ยให้แม่นยำเหมาะสมกับความต้องการของต้นอ้อย โดยใช้ เทคนิคการประมวลผลภาพ (image Processing) ซึ่งทำงานโดยการนำภาพประมวลผลด้วย คอมพิวเตอร์ มาวิเคราะห์และสร้างระบบ เพื่อระบุตำแหน่งและปริมาณในการให้ปุ๋ยที่เหมาะสมกับ อ้อย เพื่อลดการสูญเสีย ได้นำระบบไฮดรอลิกส์มาใช้เพื่อขับและควบคุมเกลียวหยอดปุ๋ย และได้ทำ การทดลองสมรรถนะของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแม่นยำที่ผ่านระบบการประมวลผลภาพ(Image Processing) โดยใช้ค่าชี้วัดการศึกษาได้แก่ ค่าทางสถิติของความสูง และค่าสถิติของขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของต้นอ้อยเปรียบเทียบระหว่างก่อนใส่ปุ๋ยกับหลังจากใส่ปุ๋ยด้วยเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแม่นยำ โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์สีเขียวจากต้นอ้อยตัวอย่างในแปลงทดสอบ มาเป็นตัวกำหนดอัตราการให้ปุ๋ย ซึ่ง พบว่าต้นอ้อยมีความสูง และขนาดลำต้นสม่ำเสมอทั่วแปลงทดสอบหลังจากการให้ปุ๋ยด้วยเครื่องที่ พัฒนาขึ้น และปุ๋ยสามารถใส่ได้ทั่วแปลงทดสอบโดยที่ไม่ต้องเติมปุ๋ยเพิ่มเหมือนแต่ก่อนทำให้สามารถ ประหยัดต้นทุนให้กลับเกษตรกร [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วนตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งการออกแบบและทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยแบบแม่นยำ และส่วนที่สองเป็นศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปรกับระบบควบคุม โดยจะอธิบายในหัวข้อและแสดงตามแผนภาพดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1.1 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1. การออกแบบและทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบแม่นยำ

3.1.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบควบคุม

จากแนวคิดของระบบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 (หัวข้อ 1.4) ในการควบคุมอัตราการหยอดเชิงเวลา (q_t) เพื่อให้ได้อัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่ต้องการ จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ (v), หน้ากว้างในการทำงาน (w) และอัตราการหยอดที่ต้องการต่อพื้นที่ (Q_a) จึงทำให้จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดและขอบเขตในการออกแบบระบบ โดยสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_t \propto (Q_a \times v \times w) \quad (3.1)$$

สมการดังกล่าวสามารถพัฒนาเพื่อคำนวณอัตราการหยอดเชิงเวลาทางทฤษฎี แสดงได้ดังสมการที่ 3.2 และสามารถคำนวณค่าอัตราการหยอดเชิงเวลาทางทฤษฎีที่อัตราปุ๋ย (Q_a) ความเร็วในการเคลื่อนที่ (v) และหน้ากว้างในการทำงาน (w) ที่ต่างกันในช่วงที่คาดว่าจะใช้งาน แสดงดังตารางที่ 3.1

$$q_t \left[\frac{g}{s} \right] = \frac{(Q_a \left[\frac{kg}{rai} \right] \times v \left[\frac{km}{h} \right] \times w [m])}{5.76} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงเวลาทางทฤษฎี

Speed [km/h]	Theoretical q_t [g/s] at following desired Q_a [kg/rai]					
	30	40	50	60	70	80
2.0	15.63	20.83	26.04	31.25	36.46	41.67
3.0	23.44	31.25	39.06	46.88	54.69	62.50
4.0	31.25	41.67	52.08	62.50	72.92	83.33
5.0	39.06	52.08	65.10	78.13	91.15	104.17
6.0	46.88	62.50	78.13	93.75	109.38	125.00
7.0	54.69	72.92	91.15	109.38	127.60	145.83
8.0	62.50	83.33	104.17	125.00	145.83	166.67

ในส่วนของการควบคุม เมื่อทราบว่าอัตราการหยอดเชิงเวลา (q_t) ที่ต้องใช้ในขณะนั้นเป็นเท่าไรแล้ว ก็จำเป็นต้องควบคุมความเร็วรอบของเกิลยวี่ป้อน (RPM) และค่าสัญญาณควบคุม (PWM)

ตามลำดับ โดย สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

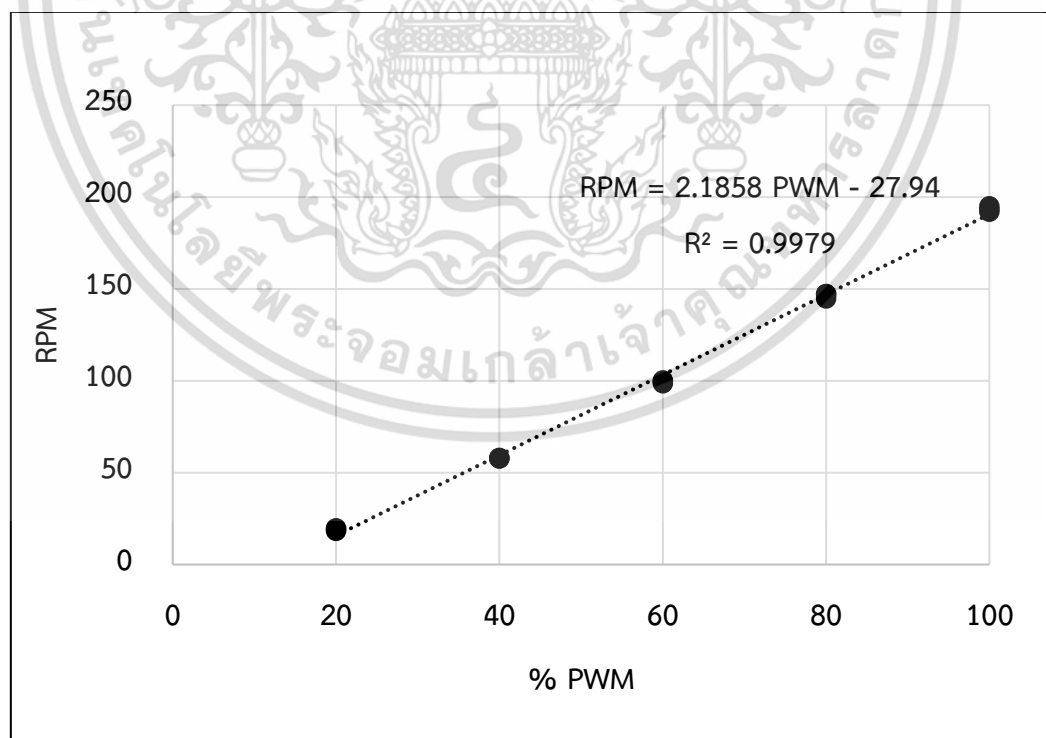
$$\text{RPM} \propto q_t \quad (3.3)$$

$$\text{PWM} \propto \text{RPM} \quad (3.4)$$

โดยทั่วไปสมการที่ 3.3 และ 3.4 มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ตามสมการระบบขนถ่ายแบบเกลียว [42] และ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่โหลดคงที่ จำเป็นต้องมีการทดสอบและหาค่าคงที่ของสมการความสัมพันธ์ของสมการทั้งสองที่กล่าวมา ดังจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

3.1.1.1 ความสัมพันธ์ของสัญญาณ PWM และความเร็วยรอบของเกลียวป้อน (RPM)

สมการ 3.4 แสดงให้เห็นว่าความเร็วยรอบของเกลียวป้อนเป็นฟังก์ชันของค่าสัญญาณ PWM เมื่อผู้วิจัยจึงทำการทดสอบเบื้องต้นของระบบเดิมที่ใช้ศึกษา [7] ดังกล่าว และคำนวณหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง ซึ่งจากทดสอบพบว่าความเร็วยรอบและสัญญาณ PWM มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Equation)

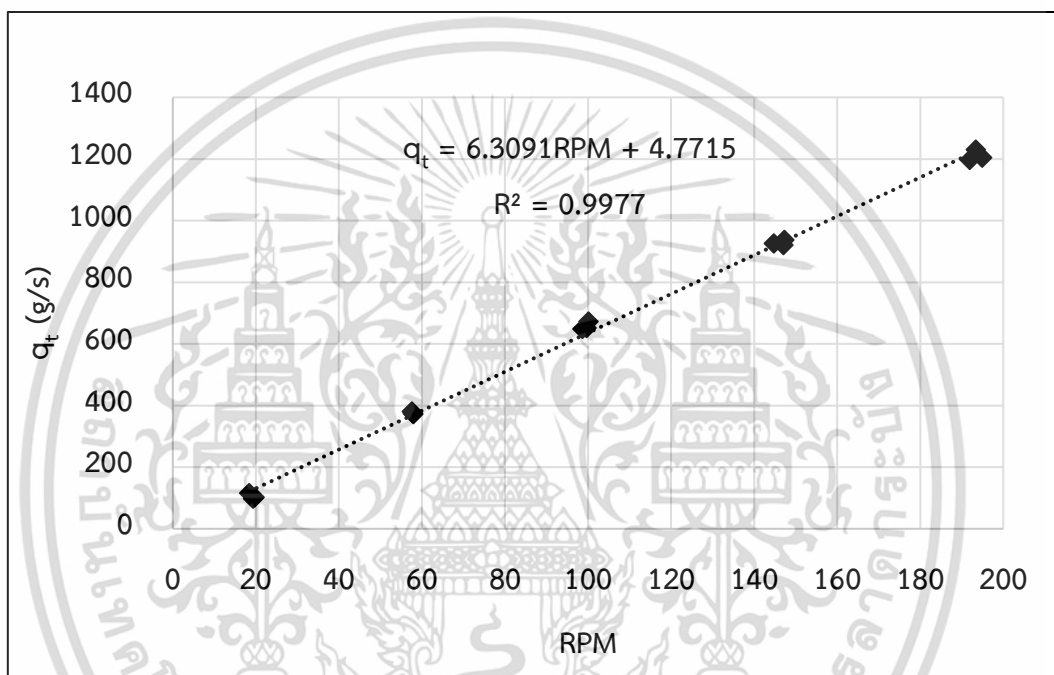


รูปที่ 3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ PWM และความเร็วยรอบของเกลียวป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเกลิยวบ้อน (RPM) และอัตราการหยอดเชิงเวลา (q_t)

สมการ 3.3 แสดงให้เห็นว่าอัตราการหยอดเชิงเวลา (q_t) เป็นฟังก์ชันของค่าสัญญาณ PWM เมื่อผู้วิจัยจึงทำการทดสอบเบื้องต้นของระบบเดิม [7] และคำนวณหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง ซึ่งจากทดสอบพบว่าอัตราการหยอดเชิงเวลา (q_t) เป็นฟังก์ชันของค่าสัญญาณ PWM มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Equation)



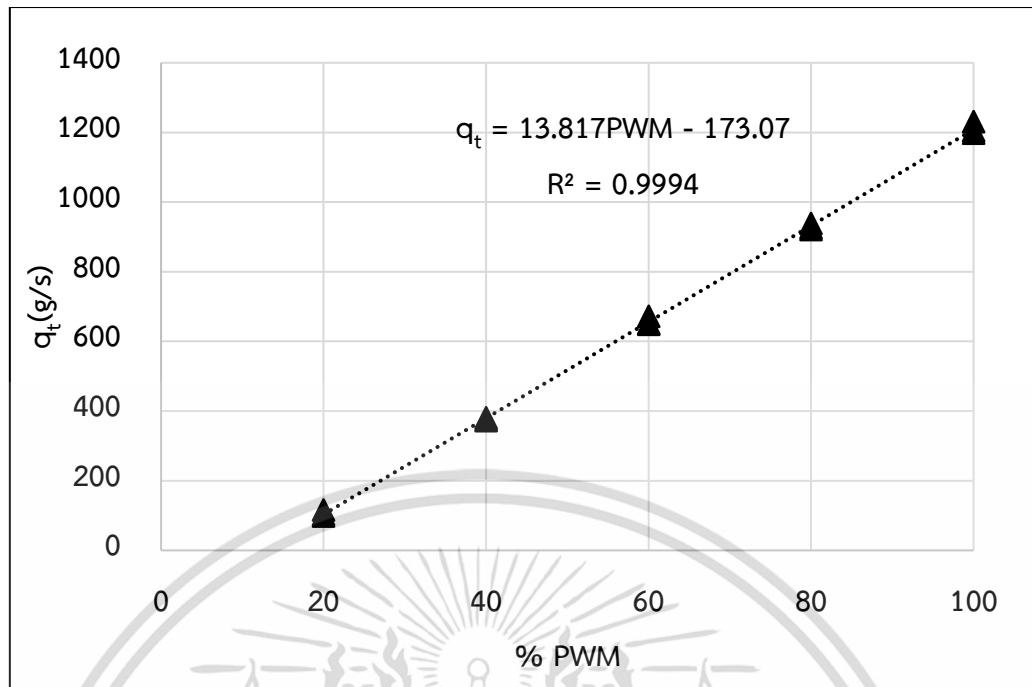
รูปที่ 3.1.3 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและอัตราการหยอดเชิงเวลา

3.1.1.3 ความสัมพันธ์ของสัญญาณ PWM และอัตราการหยอดเชิงเวลา (q_t)

เนื่องจากสมการ 3.3 สามารถแทนค่าในสมการ 3.4 ได้ ในทางปฏิบัติจึงสามารถใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ PWM และอัตราการหยอดเชิงเวลา (q_t) ได้โดยตรง (สมการที่ 3.5) โดยไม่ต้องพิจารณา RPM ทั้งนี้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในทางปฏิบัติมีจำนวนมาก เช่น ขนาดและลักษณะเม็ดปุ๋ย ความหนาแน่นของปุ๋ย ลักษณะและตัวแปรในการออกแบบถังบรรจุและเกลิยวล่ำเลียง อัตราทดของชุดเฟือง รวมถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์และระบบควบคุม จำเป็นต้องมีการทดลองเพื่อสร้างสมการสอบเทียบ (Calibration) ก่อนใช้งานทุกครั้ง

$$\text{PWM} \propto q_t \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณ PWM และอัตราการหยุดเชิงเวลา

3.1.2 การออกแบบระบบควบคุม

3.1.2.1 อุปกรณ์ภายในระบบ (Hardware)

ระบบควบคุมเครื่องหยุดปุ๋ยอ้อยด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาขึ้น ถูกออกแบบให้สามารถติดตั้งกับเครื่องหยุดปุ๋ยทั่วไปได้ และพัฒนาส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) เพื่อรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการควบคุมระบบ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

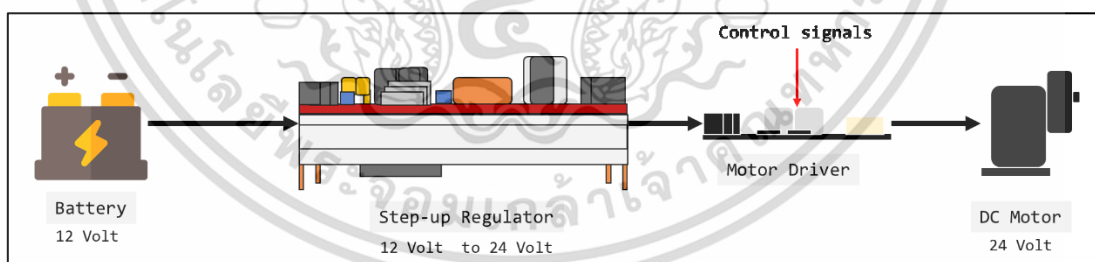
3.1.2.1.1 ชุดควบคุมมอเตอร์ (Motor Controller)

ระบบต้นแบบเดิมที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งเป็นงานวิจัยของณัฐพลและคณะ [6] และ ภาณุญาพัชญ์และคณะ [7] เป็นการพัฒนาระบบควบคุมเกลิยวหยุดของเครื่องหยุดปุ๋ย โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมเกลิยวหยุด [7] โดยยังเป็นการทดสอบระบบควบคุมกับเครื่องหยุดปุ๋ยต้นแบบภายในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบและพัฒนาระบบเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในแปลงปลูกอ้อยจริง ประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ ชุดควบคุมมอเตอร์และชุดเกียร์ทดรอบ ดังนี้

ในการออกแบบส่วนควบคุมเกลิยวหยุดของณัฐพลและคณะ [6] ซึ่งเป็นระบบต้นแบบเดิมที่ใช้ศึกษาของภาณุญาพัชญ์และคณะ [7] พบว่าในส่วนนี้ได้ใช้มอเตอร์เกียร์ ขนาด 60 วัตต์ (อัตราทดภายในมอเตอร์เกียร์ 1:18) มีความเร็วรอบมอเตอร์ 100 รอบต่อนาที สามารถขับเกลิยวหยุดที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยส่งกำลังด้วยโซ่และเฟืองที่อัตราทด 1 : 2 จากนั้นสัญญาณพัลส์ และคณะได้ทำการทดสอบระบบภายในแปลงทดสอบ ที่อัตราการใส่ปุ๋ย 30, 45 และ 60 กิโลกรัมต่อไร่ และกำหนดหน้ากว้างในการทำงาน (w) 1.5 เมตร และทดสอบที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 3 ระดับ ได้แก่ 2, 4 และ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อกำหนดอัตราการให้ปุ๋ยที่สูง และมีความเร็วในการเคลื่อนที่สูง ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลง ไม่สามารถขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบตามสัญญาณควบคุมที่ระบบสั่งให้ได้

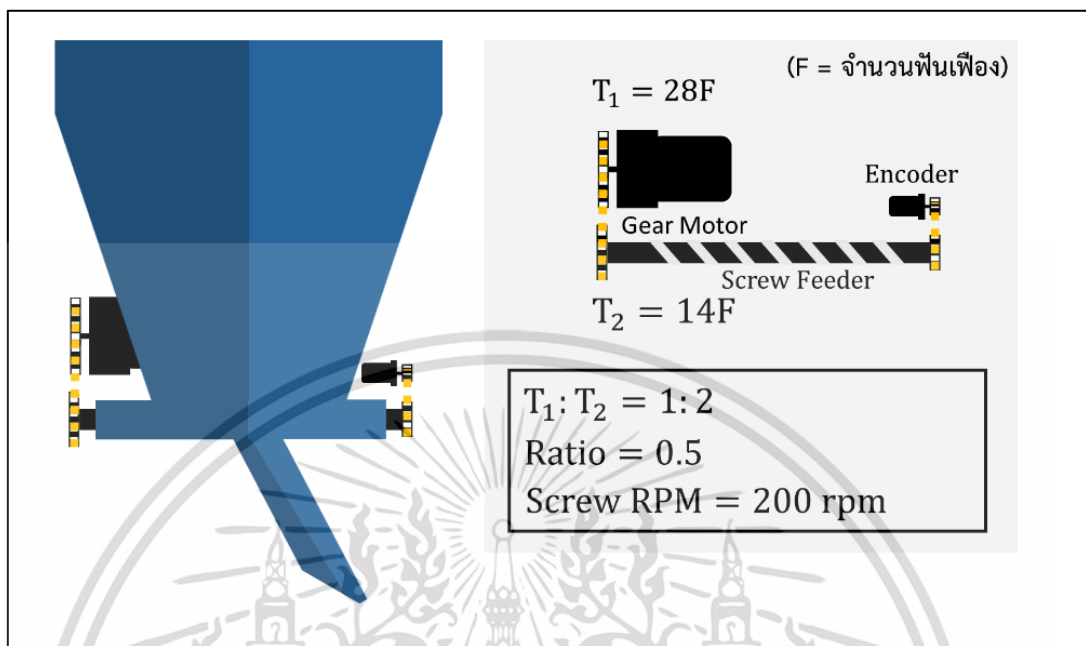
ผู้วิจัยจึงทำการเปลี่ยนเป็นมอเตอร์เกียร์ให้มีขนาดกำลังไฟฟ้ามากขึ้น โดยคำนึงถึงแหล่งจ่ายไฟของรถแทรกเตอร์ (แบตเตอรี่) ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 12 โวลต์ รวมถึงระบบไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์โดยทั่วไปมีช่องต่อที่ขั้วอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 20 แอมแปร์ คิดเป็น 240 วัตต์ อย่างไรก็ตาม ในการเลือกใช้อุปกรณ์ พบว่าดีซีมอเตอร์อุตสาหกรรมส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ โดยมีความหลากหลายของชนิดและรูปแบบให้เลือก และมีราคาถูกกว่ามอเตอร์ 12 โวลต์ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้อุปกรณ์ขนาด 250วัตต์ 24 โวลต์ (ภาคผนวก) โดยในการทำงานจะควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ทำงานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งในการออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงความเร็วของมอเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ โดยแหล่งจ่ายไฟได้จากแบตเตอรี่ของรถแทรกเตอร์ที่แรงดันไฟฟ้าอาจไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับการชาร์จและการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆบนรถแทรกเตอร์ จึงมีการใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อรักษาแรงดันไฟให้คงที่ที่ 24 โวลต์ สามารถแสดงแผนภาพของระบบได้ดังนี้



รูปที่ 3.1.5 แผนภาพระบบการควบคุมมอเตอร์

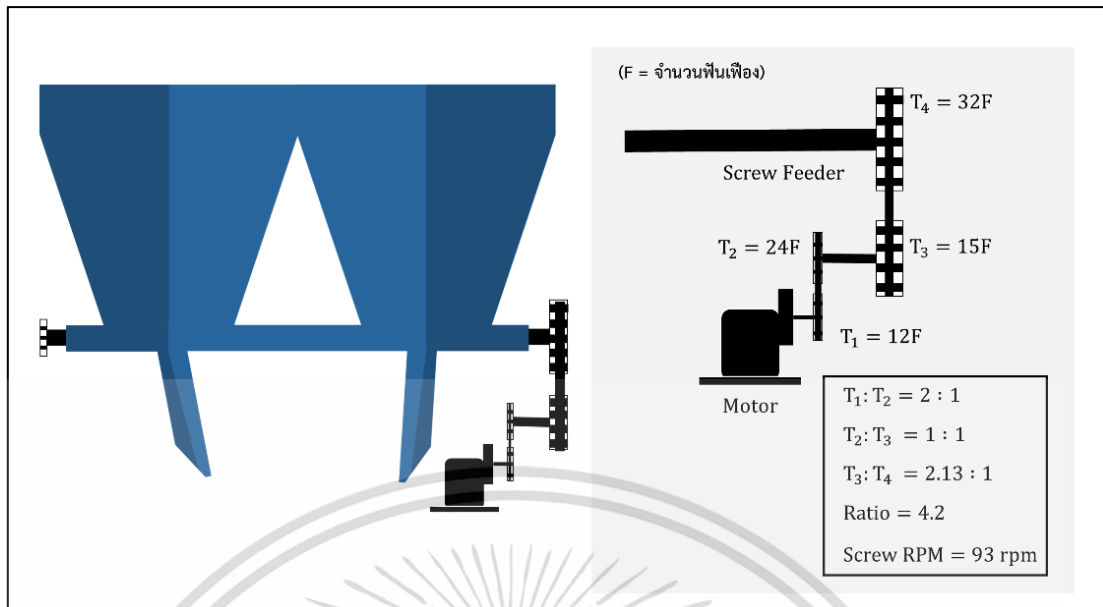
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1.2 ชุดเกียร์ทดรอบ (Transmission Gears)



รูปที่ 3.1.6 ระบบส่งกำลังเพื่อขับเกลียวป้อนปุ๋ยของเครื่องต้นแบบ

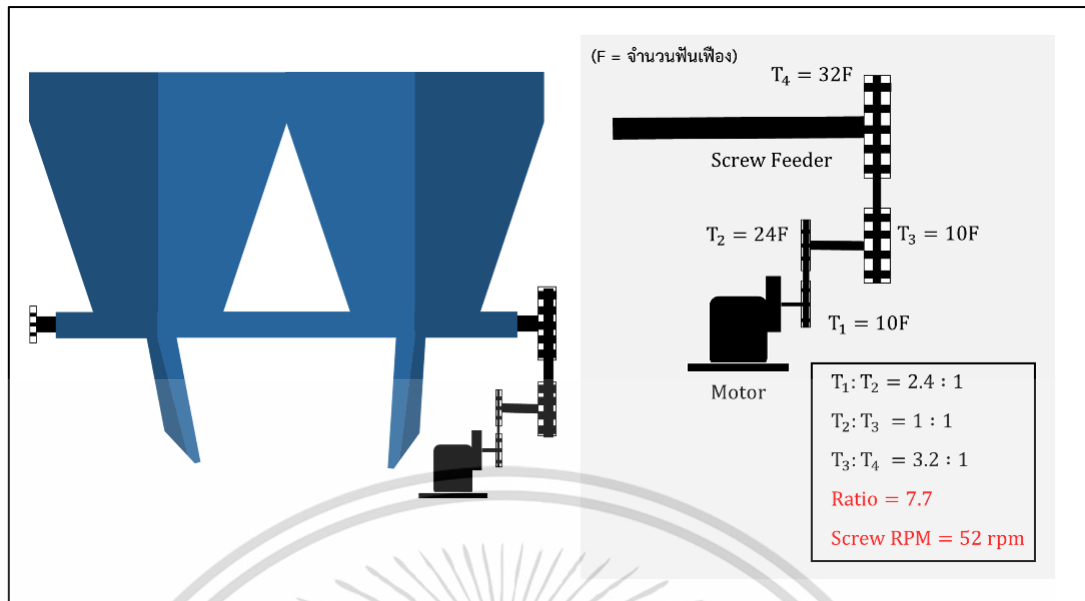
จากรูปที่ 3.1.6 แสดงการออกแบบชุดเกียร์ทดรอบของณัฐพลและคณะ [6] และ ภิญญาพัชญ์และคณะ [7] โดยใช้อัตราทด 2:1 มีความเร็วรอบของเกลียวหยอด 200 รอบต่อนาที ซึ่งจากกล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา (3.1.1.1) พบปัญหาในการขับเกลียวหยอดให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการตามสัญญาณควบคุมที่อัตราการหยอดสูง ความเร็วสูง และทำการเปลี่ยนมอเตอร์เกียร์ให้มีขนาดกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับเกลียวหยอดเปลี่ยนไป ผู้วิจัยจึงทำการออกแบบชุดเกียร์ทดรอบใหม่ดังรูป (รูปที่ 3.1.7) โดยทำเพื่อทดสอบระบบต่อไป



รูปที่ 3.1.7 ระบบส่งกำลังเพื่อขับเคลื่อนป้อนปุ๋ยของเครื่องหยอดปุ๋ยที่ใช้ศึกษา
(ครั้งที่ 1: ระบบต้นแบบ)

จากการออกแบบชุดเกียร์ทดรอบข้างต้น (3.1.7) ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งกับเครื่องพรวนกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ย (เครื่องหยอดปุ๋ย) ยี่ห้อ นครสวรรค์สตีล(NKS) รุ่น เอส.อาร์.ที.ซิกส์.เอส.เอส และทดสอบร่วมกับระบบควบคุม สามารถอธิบายผลการทดสอบในบถัดไป พบว่าเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงตัวเครื่องหยอดปุ๋ย ระบบมีความคลาดเคลื่อนของอัตราการหยอดเชิงเวลาที่ความเร็วรอบต่ำ โดยระบบสามารถทำงานได้คล่องตัวตั้งแต่ 18%PWM ขึ้นไป แต่หากสัญญาณ PWM น้อยกว่า 14% ระบบจะไม่สามารถขับเคลื่อนหยอดปุ๋ยได้ ผู้วิจัยจึงทำการคำนวณและออกแบบชุดเกียร์ทดรอบใหม่ เพื่อลดความเร็วรอบของเกียร์หยอด และเพิ่มแรงบิดในการขับเคลื่อน (รูปที่ 3.1.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.8 ระบบส่งกำลังเพื่อขับเคลื่อนของเครื่องหยอดปุ๋ย (ครั้งที่ 2 : ระบบที่ปรับปรุง)

หลังจากการคำนวณและปรับปรุงชุดเกียร์ใหม่ ได้ทำการทดสอบภายในสถานทดสอบ (แสดงผลการทดสอบในบทที่ 4) และทำการเก็บข้อมูลค่าสัญญาณ PWM ที่ระบบส่งไปยังวงจรมอเตอร์ พบว่า ที่ความเร็วต่ำ อัตราการหยอดต่ำ ระบบเริ่มทำงานที่ค่าสัญญาณประมาณ 18% PWM ซึ่งทำให้ระบบสามารถขับเคลื่อนได้อย่างคล่องตัวในช่วงที่มีความเร็วและอัตราการหยอดในการทดสอบต่ำๆ และยังมี ความคลาดเคลื่อนของอัตราการหยอดเชิงเวลาลดลงอีกด้วย แสดงตารางการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบค่าสัญญาณ PWM ก่อนและหลังทำการปรับปรุง

Speed [km/h]	Q_a [kg/rai]	ระบบควบคุมต้นแบบ(ครั้งที่ 1)				ระบบควบคุมที่ปรับปรุง(ครั้งที่ 2)			
		q_t -Theory [g/s]	q_t -Measured [g/s]	Error [g/s]	PWM [%]	q_t -Theory [g/s]	q_t -Measured [g/s]	Error [g/s]	PWM [%]
3	30	11.75	11.28	-0.5	14.7	11.75	11.72	0.0	18.3
3	50	19.58	18.50	-1.1	20.2	19.58	19.37	0.2	27.8
3	70	27.41	25.78	-1.6	25.6	27.41	27.18	0.2	37.4
5	30	19.58	18.70	-0.9	20.2	19.58	19.26	0.3	27.8
5	50	32.63	31.08	-1.5	29.3	32.63	32.42	0.2	43.3
5	70	45.68	42.77	-2.9	38.4	45.68	45.89	-0.2	59.6
7	30	27.41	25.53	-1.9	25.6	27.41	27.42	0.0	37.4
7	50	45.68	42.29	-3.4	38.4	45.68	45.7	0.0	59.6
7	70	63.95	59.25	-4.7	51.1	63.95	64.11	-0.2	81.8

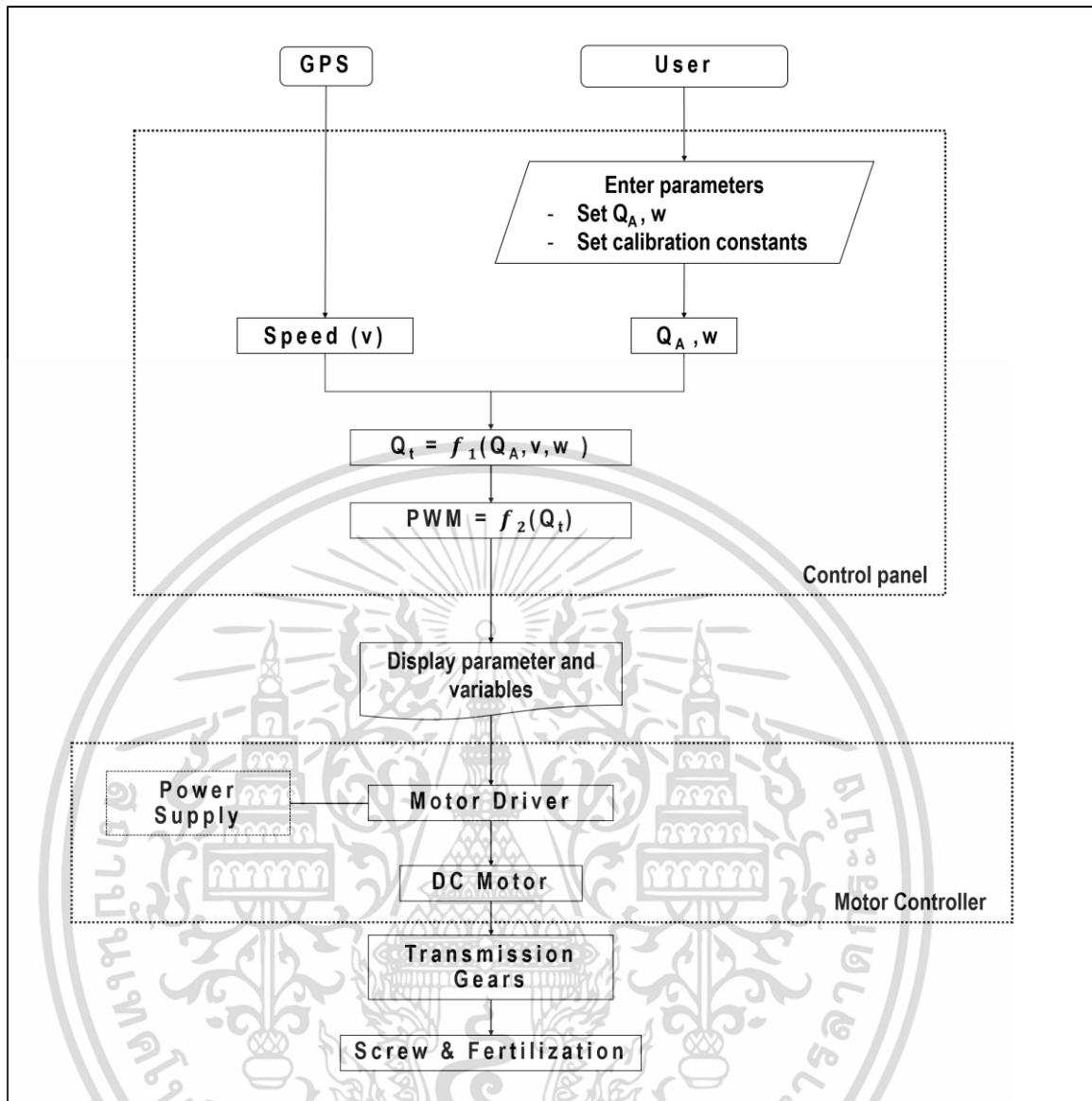
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 ส่วนควบคุมระบบ (Control Panel)

จากที่กล่าวมาว่าต้นแบบของปัญญาประดิษฐ์และคณะ [7] ยังต้องใช้การป้อนข้อมูลตัวแปรต่างๆ ในการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ซึ่งไม่สะดวกต่อการใช้งานจริง งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบและพัฒนา ส่วนควบคุมระบบโดยสร้างชุดคำสั่ง เมนูการใช้งานและกล่องควบคุมที่ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น สวิตช์ปิด-เปิด จอ LCD แสดงผล ปุ่ม สำหรับค่าต่างๆ และไฟLCD แสดงสถานการณ์ทำงาน เป็นต้น ซึ่งในการออกแบบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ หลักการทำงานของส่วนควบคุม เมนูการใช้งาน และส่วนประกอบของกล่องควบคุม ดังต่อไปนี้

3.1.2.2.1 หลักการทำงานของส่วนควบคุม

หลักการทำงานของส่วนควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA ในการรับสัญญาณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จากเครื่องรับ GPS และรับค่าตัวแปรที่ถูกกำหนดโดย ผู้ใช้งาน ได้แก่ อัตราการหยุดเชิงพื้นที่ที่ต้องการ และหน้ากว้างในการทำงาน เป็นต้น เพื่อคำนวณค่า สัญญาณควบคุมPWM และจากหัวข้อความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญภายในระบบ และการทดสอบ เบื้องต้น พบว่าอัตราการหยุดเชิงมวลแปรผันโดยตรงกับสัญญาณ PWM โดยไม่ได้สนใจความเร็ว รอบเกสียวและเพื่อลดกระบวนการการคำนวณของระบบลง จึงทำการออกแบบการทำงานของระบบ ให้เหลือเพียงความสัมพันธ์ของอัตราการหยุดเชิงมวลและค่าสัญญาณ PWM และส่งค่าสัญญาณ PWM ให้แก่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อควบคุมเกสียวหยุดปยุตามความเร็วรอบที่เหมาะสมและความเร็วรถ แทรกเตอร์เคลื่อนที่ไป สามารถแสดงแผนผังการทำงานของระบบได้ดังรูปที่ 3.1.9



รูปที่ 3.1.9 แผนภาพแสดงการทำงานของส่วนควบคุม

3.1.2.2.2 เมนูการใช้งาน

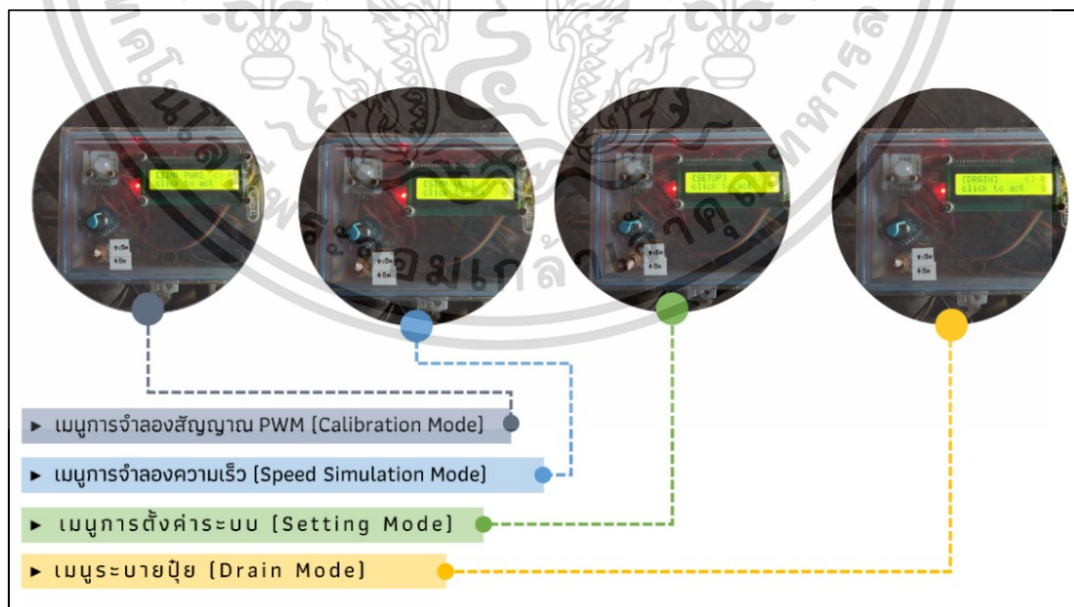
ในการออกแบบและสร้างส่วนของเมนูการใช้งาน ผู้วิจัยได้คำนึงถึงความสะดวกและเข้าใจง่ายในการตั้งค่า เพื่อทำการทดสอบและใช้งาน จึงได้ทำการออกแบบเมนูการใช้งานและการแสดงผลผ่านจอ LCD เพื่อความสะดวกในการป้อนค่าและคำสั่งให้แก่ระบบควบคุม ประกอบด้วย

- 1) เมนูการตั้งค่าระบบ (Setting Mode) เป็นเมนูหลักของระบบเพื่อใช้ในการตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำงาน ได้แก่ อัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่ต้องการ, หน้ากว้างในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าสอบเทียบระบบ เพื่อควบคุมอัตราการหยุดให้ได้ตามความต้องการ โดยจะอธิบายเรื่องการสอบเทียบระบบในหัวข้อถัดไป

- 2) เมนูการจำลองสัญญาณ PWM (Calibration Mode) เมนูนี้เพื่อใช้จำลองสัญญาณ PWM และส่งไปยังวงจรขับเพื่อควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนป้อนปุ๋ย เมนูนี้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยในการสอบเทียบระบบ มอเตอร์จะทำงานตามสัญญาณ PWM ที่ให้ ผู้ใช้งานจะทำการตวงปุ๋ยในเวลาที่กำหนด จะสามารถคำนวณอัตราการหยุดปุ๋ยเชิงเวลา (มวลปุ๋ยที่ตวงได้เทียบกับเวลาที่ใช้) เมื่อทดสอบที่หลายระดับ PWM และหลายซ้ำ จะสามารถหาสมการและค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWM กับ อัตราการหยุดปุ๋ยเชิงเวลา (q_p) เพื่อนำไปป้อนในเมนูการตั้งค่าระบบได้
- 3) เมนูการจำลองความเร็ว (Speed Simulation Mode) เป็นเมนูสำหรับการจำลองความเร็วในการเคลื่อนที่ เพื่อใช้ในการทดสอบภายในสถานี โดยการป้อนค่าความเร็วที่ต้อง (km/h) ให้แก่ระบบแทนการรับค่าสัญญาณจากเครื่องรับสัญญาณ GPS ซึ่งสะดวกต่อการทดสอบภายในสถานีทดสอบ
- 4) เมนูระบายปุ๋ย (Drain Mode) เป็นเมนูที่ถือว่าเพิ่มความสะอาดหลังจากการใช้งานเครื่องหยุดปุ๋ย เนื่องจากเมนูนี้ใช้สำหรับการระบายปุ๋ยออกจากถัง เพราะในการบำรุงรักษาเครื่องหยุดปุ๋ยเพื่อยืดระยะเวลาการใช้งาน จะต้องทำการระบายปุ๋ยออกจากถังและทำความสะอาดถังหลังใช้งานเสร็จทุกครั้ง



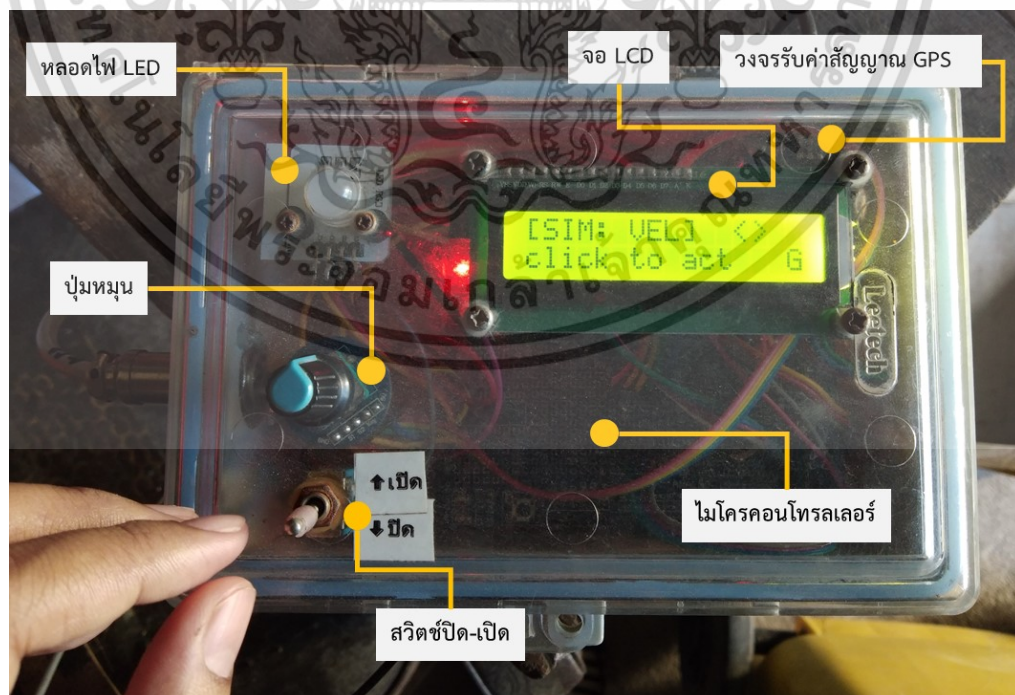
รูปที่ 3.1.10 ตัวอย่างการแสดงผลเมนูบนจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2.3 ส่วนประกอบของกล่องควบคุม

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้จัดทำกล่องควบคุมสำหรับส่วนการควบคุมระบบ เพื่อเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานให้เกิดความสะดวกและเข้าใจง่ายในการใช้งาน จึงออกแบบให้มีอุปกรณ์ที่มีการใช้งานไม่ซับซ้อน แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) หลอด LED : ใช้เพื่อแสดงสถานะการทำงาน เมื่อระบบสามารถรับค่าข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณGPS ได้ LED จะแสดงสถานะไฟ สีเขียว แต่เมื่อระบบไม่สามารถรับข้อมูลหรือไม่มีข้อมูลเข้าสู่ระบบ LED จะเป็นสีแดง และเมื่อเครื่องถูกเปิดเพื่อทำงาน LED จะแสดงสถานะไฟสีเขียวพร้อมกระพริบ
- 2) จอแสดงผล LCD : เป็นส่วนที่แสดงข้อมูลจากการคำนวณและข้อมูลที่จำเป็นจากระบบสู่หน้าจอ
- 3) ปุ่มหมุน : ใช้สำหรับเพื่อเลื่อนซ้าย-ขวา, ขึ้น-ลง และกดเพื่อตกลง ในการตั้งค่าหรือเลือกหน้าเมนูต่างๆ
- 4) สวิตช์ปิด-เปิด : สำหรับการควบคุมการปล่อยสัญญาณควบคุมไปยังชุดควบคุมมอเตอร์และสั่งเริ่มทำงานและหยุดทำงาน ตามต้องการโดยการโยกขึ้น-ลง (เปิด-ปิด)
- 5) ไมโครคอนโทรลเลอร์ : สำหรับประมวลผลภายในระบบควบคุม
- 6) วงจรรับค่าสัญญาณ GPS : สำหรับรับ-ส่งข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ GPS



รูปที่ 3.1.11 ส่วนประกอบของส่วนควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

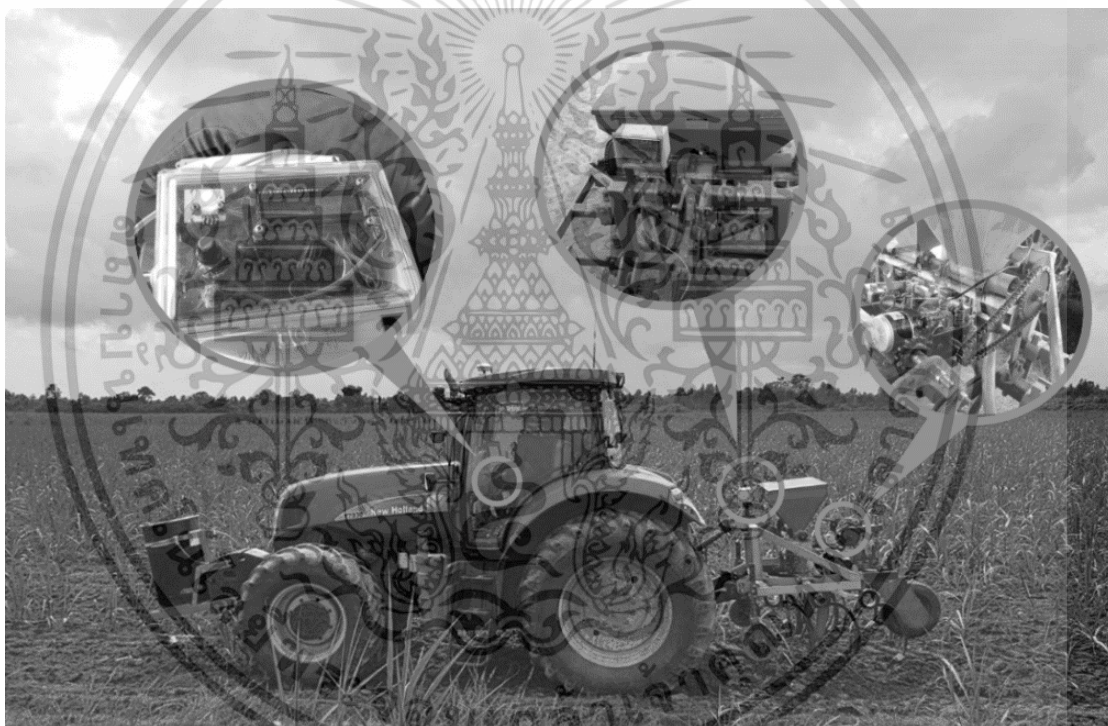
3.1.3 การติดตั้งระบบ

การติดตั้งระบบควบคุมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นทั้ง 3 ส่วน ดังนี้

1) Control Panel: ติดตั้ง ไว้ในห้องคนขับบนรถแทรกเตอร์ ซึ่งจะถูควบคุมการทำงานด้วยคนขับหรือผู้ใช้งาน โดยจะทำการรับส่งสัญญาณด้วยสายสัญญาณ ส่งสัญญาณไปยังส่วนต่างๆ

2) Motor Controller: ติดตั้งระบบควบคุมไว้หน้าของเครื่องหยอดปุ๋ยโดยทำการรับสัญญาณควบคุมจากส่วนด้านหน้าห้องคนขับและแปลงสัญญาณควบคุมเป็นกระแสไฟฟ้าแล้วส่งไปยัง Transmission Gears

3) Transmission Gears : ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้า ชุดเพลาขับและชุดเฟืองโซ่ เมื่อได้รับคำสั่งที่ได้ทำการแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้ระบบทำงาน ซึ่งมีแบตเตอรี่ ขนาด 12 V จากรถแทรกเตอร์ต้นกำลังไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.1.12 ตัวอย่างการติดตั้งระบบควบคุมบนเครื่องหยอดปุ๋ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลระบบต้นแบบ

การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมจะต้องมีการทดสอบอุปกรณ์เบื้องต้น โดยทดสอบทั้งภายในสถานีทดสอบและภายในแปลงทดสอบ เพื่อทดสอบความเสถียรของระบบเมื่อทำงานในสภาพการทำงานจริง โดยในการทดสอบเบื้องต้นนี้ได้ทำการทดสอบในเขตพื้นที่อำเภอ บ่อทอง จังหวัดพิษณุโลก (บริษัท ธาอีส จำกัด)

3.1.4.1 การสอบเทียบระบบ

การสอบเทียบระบบ เป็นการทดสอบระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณควบคุม PWM และอัตราการหยุดเชิงเวลา เนื่องจากในการให้ปุ๋ยอ้อยแต่ละช่วงจะมีความแตกต่างของ สภาพอากาศ สภาพแวดล้อมภายในแปลง และความแตกต่างของสูตรปุ๋ยที่ให้แก่อ้อย จึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบระบบก่อนใช้งานทุกครั้ง หลังจากติดตั้งระบบควบคุมบนเครื่องหยุดปุ๋ยที่ต่อพ่วงท้ายแทรกเตอร์ จึงทำการสอบเทียบระบบด้วยการทดสอบหาความสัมพันธ์ของ %PWM (25% 38% 50% 63% และ 75%) กับอัตราการหยุดเชิงเวลา (q_r) ซึ่งในแต่ละค่า %PWM ผู้วิจัยจะทำการเก็บข้อมูลปุ๋ยจำนวน 5 ซ้ำๆ ละ 10 วินาที จากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Regression) เพื่อหาสมการเชิงเส้นของความสัมพันธ์นี้ แล้วทำการป้อนค่าสัมประสิทธิ์ (Regression Coefficient) หรือความชัน (Slope) และค่าจุดตัดแกน y (Intercept หรือ Offset) ที่ได้จากสมการให้แก่ระบบควบคุม

3.1.4.2 การทดสอบในสถานีทดสอบ

การทดสอบภายในสถานีทดสอบเป็นการทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณ PWM ที่ป้อนให้แก่กับอัตราการหยุดเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ โดยอันดับแรกจะติดตั้งระบบควบคุมบนเครื่องหยุดปุ๋ยที่ต่อพ่วงท้ายแทรกเตอร์และทำการสอบเทียบระบบด้วยการทดสอบหาความสัมพันธ์ของ %PWM (25% 50% และ 75%) และค่าอัตราการหยุดเชิงเวลา ซึ่งในแต่ละค่า %PWM จะทำการเก็บข้อมูลปุ๋ยจำนวน 5 ซ้ำๆ ละ 10 วินาที จากนั้นทำการป้อนค่าสอบเทียบไปยังระบบจากนั้นทำการทดสอบเบื้องต้นด้วยการจำลองความเร็วที่ความเร็ว 3 ระดับ (3 5 และ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และที่อัตราการหยุดเชิงพื้นที่ 3 อัตรา (30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อไร่) ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ โดยในแต่ละครั้งผู้วิจัยทำการเก็บข้อมูลปุ๋ยที่เครื่องทำการหยุดออกมาเป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึงทำการคำนวณหาอัตราการหยุดเชิงพื้นที่และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบว่าระบบทำการควบคุมเครื่องหยุดปุ๋ยให้หยุดปุ๋ยได้ตามการคำนวณทางทฤษฎี

3.1.4.3 การทดสอบในพื้นที่ทดสอบ

หลังจากได้ทำการติดตั้งระบบควบคุมบนเครื่องหยุดปุ๋ยที่ต่อพ่วงท้ายกับแทรกเตอร์และทดสอบบนทางเรียบโดยทำการจำลองตั้งค่าตัวแปรให้ระบบ ได้แก่ หน้ากว้างในการทำงาน 1.8 เมตร จากนั้นทำการทดสอบที่อัตราการหยุด 30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อไร่ และใช้ความเร็ว 3 5 และ 7 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการสุ่มเก็บข้อมูลด้วยระยะทาง 5 เมตร หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและสรุปปัญหาที่พบ เนื่องด้วยการทำงานในสภาพการทำงานจริงมีหลายปัจจัยเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้ต้องมีการปรับปรุงระบบเพื่อให้เกิดความแม่นยำของระบบมากขึ้น (รูปที่ 3.1.13)

3.1.4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

หลังจากทำการทดสอบทั้งในสถานีและแปลงทดสอบ ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบโดยการทดสอบค่าเฉลี่ย (One-sample t-test) โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ และทำการตั้งสมมติฐานในการทดสอบไว้ว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ควรมีค่าไม่แตกต่างจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดในแต่ละอัตรา เมื่อมีความเร็วที่แตกต่างกัน โดยได้อธิบายผลการวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 4 และแสดงตารางการวิเคราะห์ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.1.13 การทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การทดสอบระบบและวิเคราะห์ผลระบบที่ปรับปรุง

หลังจากทำการปรับปรุงระบบแล้ว ในการทดสอบระบบจะสามารถแบ่งออกตามหัวข้อดังนี้ การสอบเทียบระบบ การทดสอบภายในสถานี และการทดสอบภายในแปลงจริง ซึ่งได้ทำการทดสอบในแปลงอ้อยที่มีพื้นที่ 8,640 ตารางเมตร โดยทำการหยอดปุ๋ยให้แก่อ้อยพันธุ์ ขอนแก่น 3 ช่วงอายุ อ้อยประมาณ 1-2 เดือนทำการหยอดปุ๋ยเคมีสูตร 21-7-18 สามารถอธิบายขั้นตอนการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้นได้ดังต่อไปนี้

3.1.1.1.1 การสอบเทียบระบบ

ทำการสอบเทียบระบบด้วยการทดสอบหาความสัมพันธ์ของ %PWM (25% 38% 50% 63% และ 75%) และค่าอัตราการหยอดเชิงเวลา เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.1.3.1 ซึ่งในแต่ละค่า %PWM ผู้วิจัย จะทำการเก็บข้อมูลปุ๋ยจำนวน 5 ซ้ำๆ ละ 10 วินาที จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการของความสัมพันธ์นี้ แล้วทำการป้อนค่าที่ได้จากสมการให้แก่ระบบ

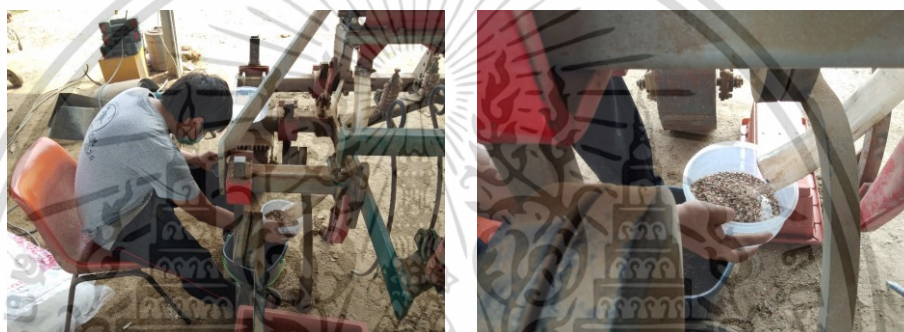


รูปที่ 3.1.14 การสอบเทียบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1.2 การทดสอบในสถานียทดสอบ

จากการสอบเทียบระบบและได้ค่าคงที่จากสมการความสัมพันธ์ของ %PWM และอัตราการหยุดเชิงเวลาแล้วจึงป้อนให้แก่ระบบ จากนั้นทำการทดสอบภายในสถานีด้วยการจำลองความเร็วที่ความเร็ว 3 ระดับ (3 5 และ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และทดสอบที่อัตราการหยุดเชิงพื้นที่ 3 อัตรา (30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อไร่) ซึ่งจะครอบคลุมการทำงานที่อาจจะเกิดขึ้นจริง ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ โดยในแต่ละครั้งผู้วิจัยทำการเก็บข้อมูลปุ๋ยที่เครื่องทำการหยุดออกมาเป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึงทำการคำนวณหาอัตราการหยุดเชิงพื้นที่และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบว่าระบบทำการควบคุมเครื่องหยุดปุ๋ยให้หยุดปุ๋ยได้ตามการคำนวณทางทฤษฎี



รูปที่ 3.1.15 การทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยุดปุ๋ยด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ภายในสถานี



รูปที่ 3.1.16 ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักตัวอย่างปุ๋ยในการทดสอบภายในสถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1.3 การทดสอบในแปลงจริง

ก่อนการทดสอบภายในแปลงจริงนี้ จะทำการติดตั้งระบบควบคุมบนเครื่องหยุดปุ๋ยและแทรกเตอร์ จากนั้นทำการสอบเทียบระบบอย่างง่าย (รูปที่ 3.1.17) ที่ 25% และ 75% PWM กับอัตราการหยุดเชิงเวลา (ต่อเวลา 10 วินาที) เนื่องจากการทดสอบที่ช่วงระยะเวลาเจริญเติบโต สภาพแวดล้อม สภาพอากาศ รวมทั้งสูตรปุ๋ยต่างกัน เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำงานของระบบ จึงจะต้องทำการสอบเทียบทุกครั้งก่อนใช้งาน หลังจากนั้นผู้วิจัยได้กำหนดพื้นที่ในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ด้วยระยะทาง 100 เมตร (ทดสอบหยุดตลอดร่องปลูกภายในแปลง) โดยระบบจะรับค่าความเร็วในการเคลื่อนที่จากเครื่องรับสัญญาณ โดยกำหนดรอบเครื่องรถแทรกเตอร์ให้มีความเร็วอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ 3 ระดับความเร็ว (3 5 และ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และทำการสุ่มเก็บข้อมูล (รูปที่ 3.1.18) เป็น 3 ช่วงๆละ 12 เมตร ทำการเว้นระยะทางเพื่อใช้ในการเปลี่ยนระดับความเร็ว ตามการวางแผนการทดสอบ (แบบสุ่มสมบูรณ์) แสดงใน รูปที่ 3.1.19 แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3.1.20) และคำนวณหาอัตราการหยุดเชิงพื้นที่ จากนั้นได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าทางสถิติของความแม่นยำของระบบควบคุมเครื่องหยุดปุ๋ย

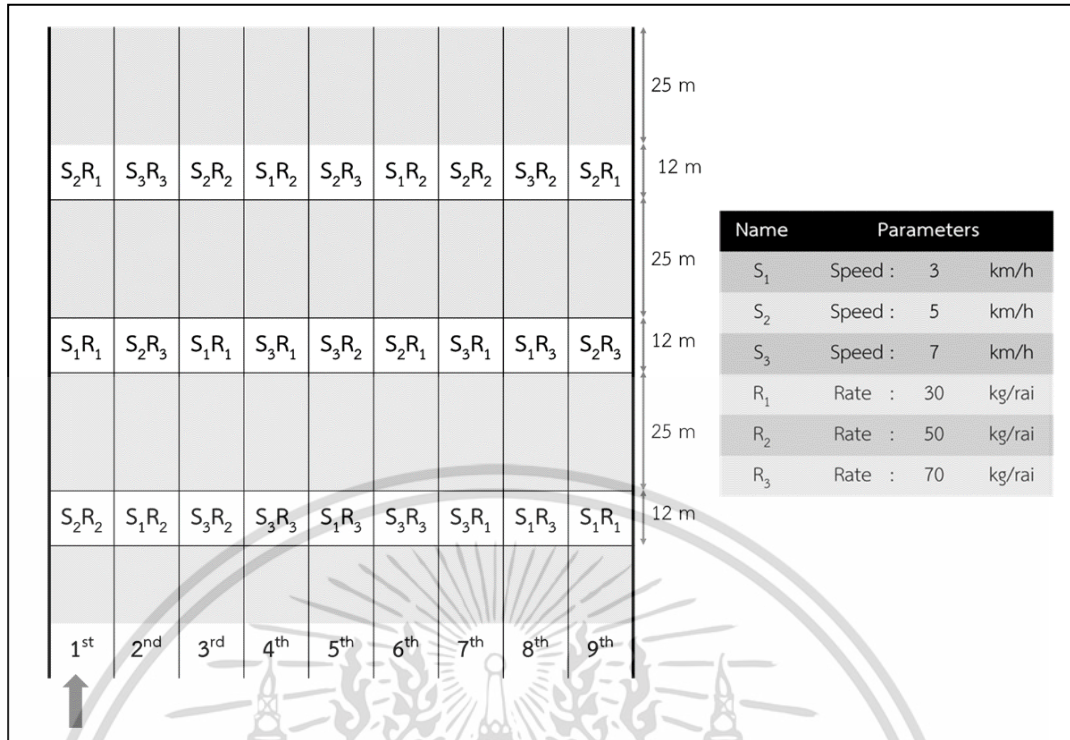
3.1.1.1.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบทั้งในสถานีและแปลงจริง ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบโดยการทดสอบค่าเฉลี่ย (One-sample t-test) โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ และทำการตั้งสมมติฐานในการทดสอบไว้ว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ควรมีค่าไม่แตกต่างจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดในแต่ละอัตราเมื่อมีความเร็วที่แตกต่างกัน โดยได้อธิบายผลการวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 4 และแสดงตารางการวิเคราะห์ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.1.17 การสอบเทียบค่าอัตราการหยุดเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.18 ตารางแผนการทดสอบภายในแปลง



รูปที่ 3.1.19 การสุ่มเก็บข้อมูลและซังน้ำหนักปุ๋ยที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.20 การสุ่มเก็บข้อมูลและซ่งน้ำหนักปุ๋ยที่ได้

3.2. การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปรกับระบบควบคุม

3.2.1. การออกแบบระบบ

ระบบการควบคุมการหยุดปุ๋ยแบบแม่นยำที่ได้พัฒนาขึ้นตามแนวทางในหัวข้อที่ 3.1 เป็นการควบคุมอัตราการหยุดต่อพื้นที่ให้สม่ำเสมอตามที่กำหนดบนแผนควบคุมตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ ยังไม่สามารถปรับค่าอัตราปุ๋ยต่อพื้นที่ได้โดยอัตโนมัติ ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาแนวทางการประยุกต์ระบบที่พัฒนาขึ้นเอให้สามารถใช้งานเทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร (VRT) ที่สามารถควบคุมอัตราปุ๋ยด้วยแผนที่ Prescription Map โดยได้ทำการออกแบบเพิ่มเติมในส่วนควบคุมระบบ (Control Panel) และได้จัดทำแผนที่ Prescription Map อย่างง่ายเพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบ การพัฒนาและทดสอบระบบ VRT ที่กล่าวมา มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1.1. การจัดทำแผนที่ปุ๋ย (Prescription Map)

การจัดทำและสร้างแผนที่ปุ๋ยจะต้องมีการระบุพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกภายในพื้นที่ทดสอบที่มีความแม่นยำจึงใช้ RTK GPS (Ublox-M6T) ในการวัดและระบุพิกัดของแผนที่ เนื่องจากระบบ RTK GPS มีความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ± 2 เซนติเมตร จึงสามารถใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ โดยได้กำหนดพื้นที่ทำการทดสอบขนาดกว้าง 15 เมตร ยาว 30 เมตร แบ่งเป็นช่องตามแนวยาว (ตามทิศตะวันออก/ตะวันตก) กว้างช่องละ 5 เมตร (รูปที่ 3.2.1 และ 3.2.2)



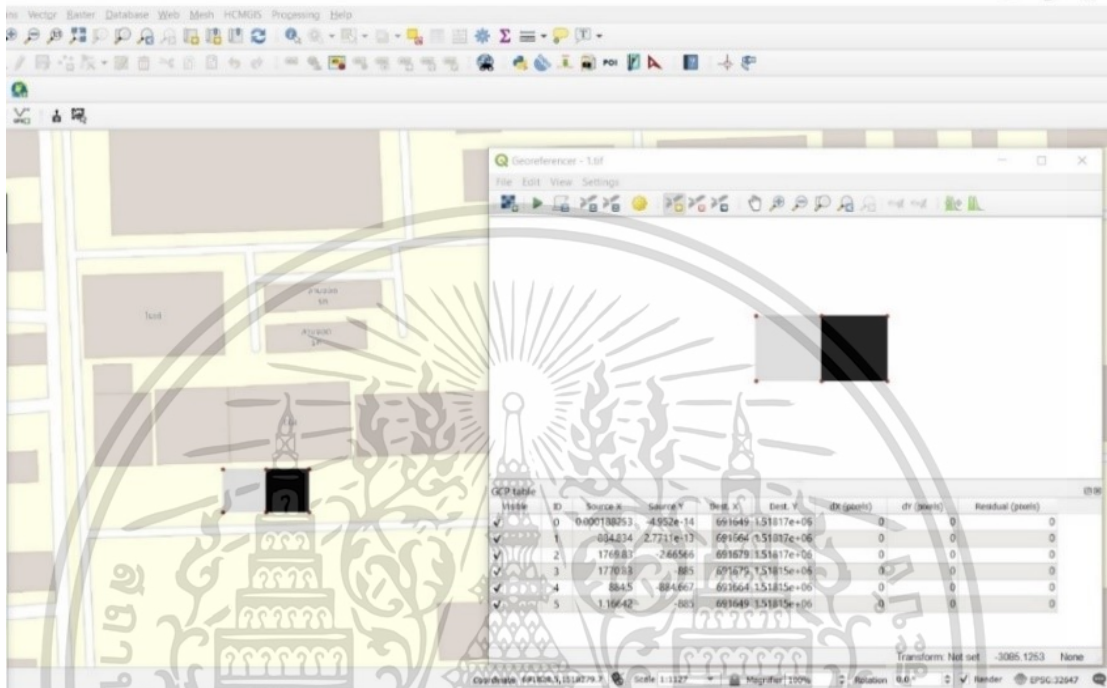
รูปที่ 3.2.1 เสาอากาศและอุปกรณ์ RTK GPS



รูปที่ 3.2.2 การวัดพิกัด และกำหนดตำแหน่งอ้างอิงของพื้นที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นได้ทำการนำพิกัดที่ได้มาจัดทำแผนที่ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป QGIS เวอร์ชัน 3.6 โดยแบ่งพื้นที่ (15x30 ตารางเมตร) ออกเป็นพื้นที่ย่อย 2 ส่วน ขนาด 15x15 ตารางเมตร และกำหนดอัตราปุ๋ยที่ต่างกัน 2 ระดับ (40 กิโลกรัมต่อไร่ และ 60 กิโลกรัมต่อไร่) ให้กับแต่ละพื้นที่ย่อย แสดงดังรูปที่ 3.2.3 และ 3.2.4



รูปที่ 3.2.3 ขั้นตอนการสร้างแผนที่ปุ๋ยด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (QGIS)



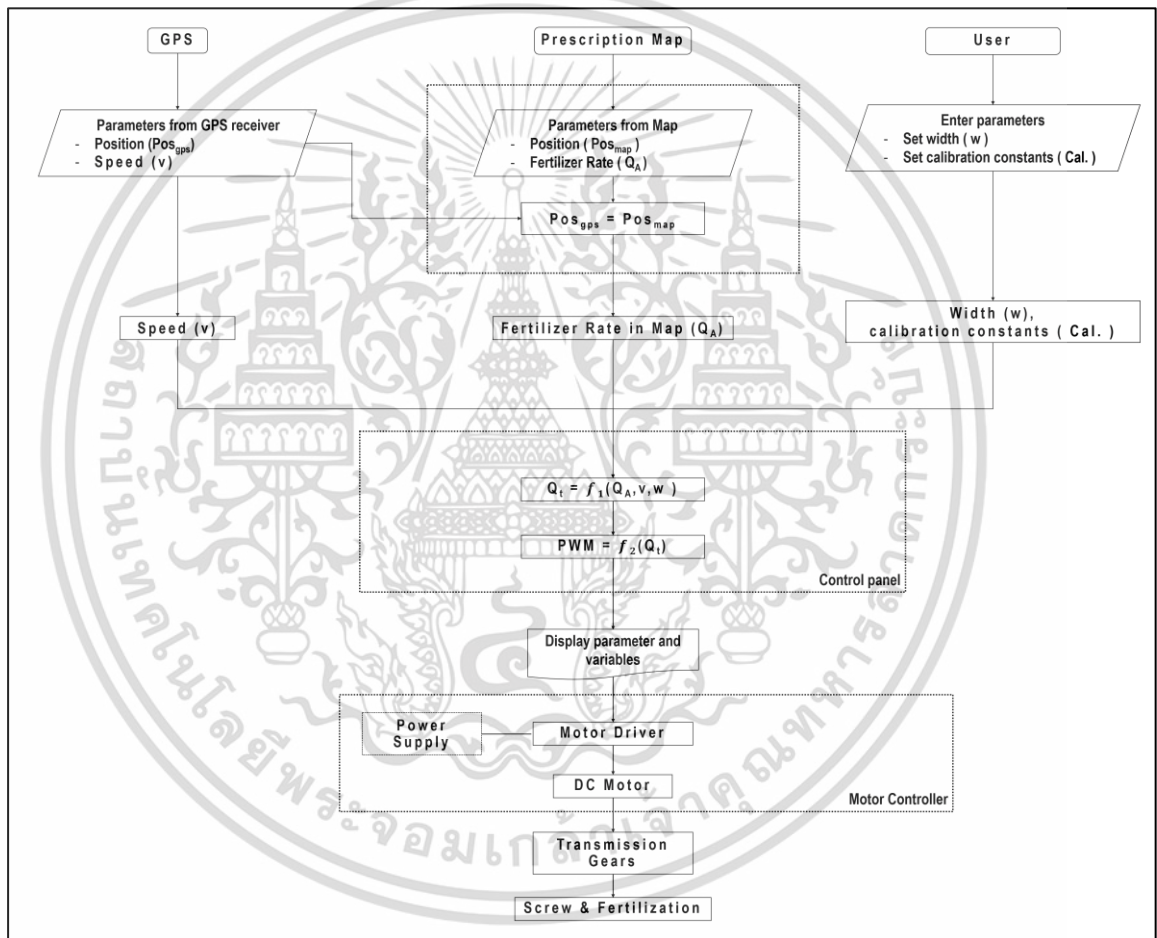
รูปที่ 3.2.4 แผนที่ปุ๋ยที่มีความแตกต่างของอัตราการหยอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2. ส่วนควบคุมระบบ (Control Panel)

ระบบควบคุม มีส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการคำนวณประมวลผล คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่เนื่องจากการอ่านข้อมูลในไฟล์แผนที่และคำนวณพิกัดจำเป็นต้องใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสมรรถนะในการประมวลผลสูง ซึ่ง Arduino Mega 2560 ที่ใช้ในระบบบก่อนหน้ายังมีข้อจำกัดหลายประการ ในการพัฒนาระบบ VRT ที่อ่านแผนที่ได้นี้จึงเลือกใช้ Raspberry Pi 3 Model B+ เป็นระบบประมวลผล

3.2.1.3. หลักการทำงานของระบบควบคุม



รูปที่ 3.2.5 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมการหยอดปุ๋ยด้วยแผนที่ปุ๋ย

รูป 3.2.5 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบควบคุมการหยอดปุ๋ยด้วยแผนที่ปุ๋ย หัวใจสำคัญของระบบยังคงเป็นคำนวณอัตราการหยอดเชิงเวลา ที่สัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ หน้ากว้างในการทำงาน และอัตราการหยอดที่ต้องการ แล้วจึงสั่งการควบคุมการหมุนของมอเตอร์และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลียวป้อน ส่วนที่แตกต่างคือการเปลี่ยนจากการกำหนดอัตราการป้อนเชิงพื้นที่โดยผู้ใช้งาน มาเป็นการใช้ข้อมูลพิกัดปัจจุบันจาก GPS และดึงข้อมูลอัตราป้อนจากแผนที่ป้อนแทน โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานของระบบเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ขั้นตอนการประมวลผล เมื่อได้รับพิกัดตำแหน่งปัจจุบันจากเครื่องรับสัญญาณ GPS ระบบจะประมวลผลค่าพิกัดปัจจุบันกับพิกัดตำแหน่งภายในแผนที่ ถ้าหากว่าตำแหน่งปัจจุบันเป็นตำแหน่งที่อยู่ภายในแผนที่ระบบจะทำการอ่านค่าอัตราป้อนต่อพื้นที่ ณ ตำแหน่งนั้นๆ ออกมา แล้วส่งค่าอัตราป้อนไปยังขั้นตอนการคำนวณ
- 2) ขั้นตอนการคำนวณค่าสัญญาณควบคุม การคำนวณค่าสัญญาณควบคุมทำได้โดย ระบบรับค่าอัตราป้อนที่ต้องการจากขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลจากแผนที่จำลองที่สร้างขึ้น และค่าหน้ากว้างในการทำงานที่ถูกกำหนดไว้ อีกทั้งยังมีค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ถูกรับค่าจากเครื่องรับสัญญาณ GPS แล้วทำการคำนวณหาอัตราการหยุดเชิงเวลาและค่าสัญญาณ PWM ที่เหมาะสมเพื่อส่งไปยังส่วนควบคุมมอเตอร์และทำการควบคุมการหมุนของเกลียวเพื่อให้ได้อัตราป้อนเชิงพื้นที่ตามค่าที่กำหนดไว้ภายในแผนที่

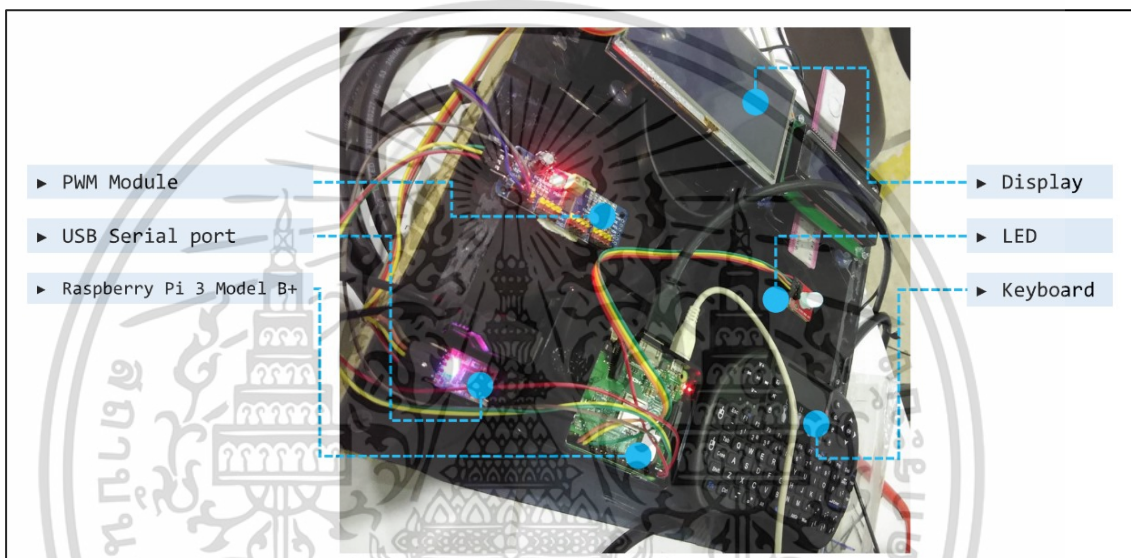
3.2.1.4. ส่วนประกอบของส่วนควบคุม

เนื่องจากการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบร่วมกับเทคโนโลยีการให้ป้อนแบบผันแปร ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ในส่วนควบคุมเพื่อใช้ในการทดสอบเท่านั้น โดยมี ส่วนประกอบและตำแหน่งการติดตั้งดังนี้

- 1) จอแสดงผลภาพ (Display) เนื่องจาก Raspberry Pi เป็นคอนโทรลเลอร์ที่เปรียบเสมือนคอมพิวเตอร์ จึงมีหน้าต่างแสดงผลและซอฟต์แวร์โปรแกรมสำเร็จรูปที่หลากหลาย อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ด้วย เมื่อเขียนชุดคำสั่งหรือใช้โหมดสำหรับนักพัฒนาโปรแกรม (Terminal หรือ Command line) จะสามารถสั่งรันโปรแกรมและแสดงผลผ่านจอแสดงผลภาพได้ ดังนั้นในการทดสอบเบื้องต้น จึงใช้จอแสดงผลภาพ (Display) ในการแสดงผลทั้งหมด โดยไม่ต้องแสดงผลผ่านจอแสดงผล LCD
- 2) หลอด LED ใช้สำหรับเป็นสัญญาณเตือนเมื่อทำการทดสอบ โดยจะแสดงสถานะไฟสีเขียวเมื่อเข้าสู่แผนที่ และแสดงสถานะไฟสีแดงเมื่อกำลังจะเข้าสู่แผนที่ในระยะก่อนถึงแผนที่ 5 เมตร
- 3) แป้นพิมพ์ (Keyboard) ใช้สำหรับพิมพ์คำสั่งภายในโปรแกรม บน Raspberry Pi เมื่อต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) บอร์ด Raspberry Pi เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลและคำนวณค่าเพื่อส่งสัญญาณควบคุมไปยังชุดควบคุมมอเตอร์
- 5) อุปกรณ์สื่อสาร แบบ USB (USB Serial port) เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อ เพื่อสื่อสารระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GPS และ Raspberry Pi ในการรับส่งพิกัดและความเร็ว
- 6) วงจรขยายสัญญาณ PWM (PWM Module) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยขยายสัญญาณ PWM เนื่องจาก Raspberry Pi มีคุณสมบัติในการปล่อยค่าสัญญาณ PWM จำนวน 8 บิต [17] จึงต้องใช้วงจรนี้ในการช่วยขยายค่าสัญญาณให้มีความละเอียดในการควบคุมมากขึ้น

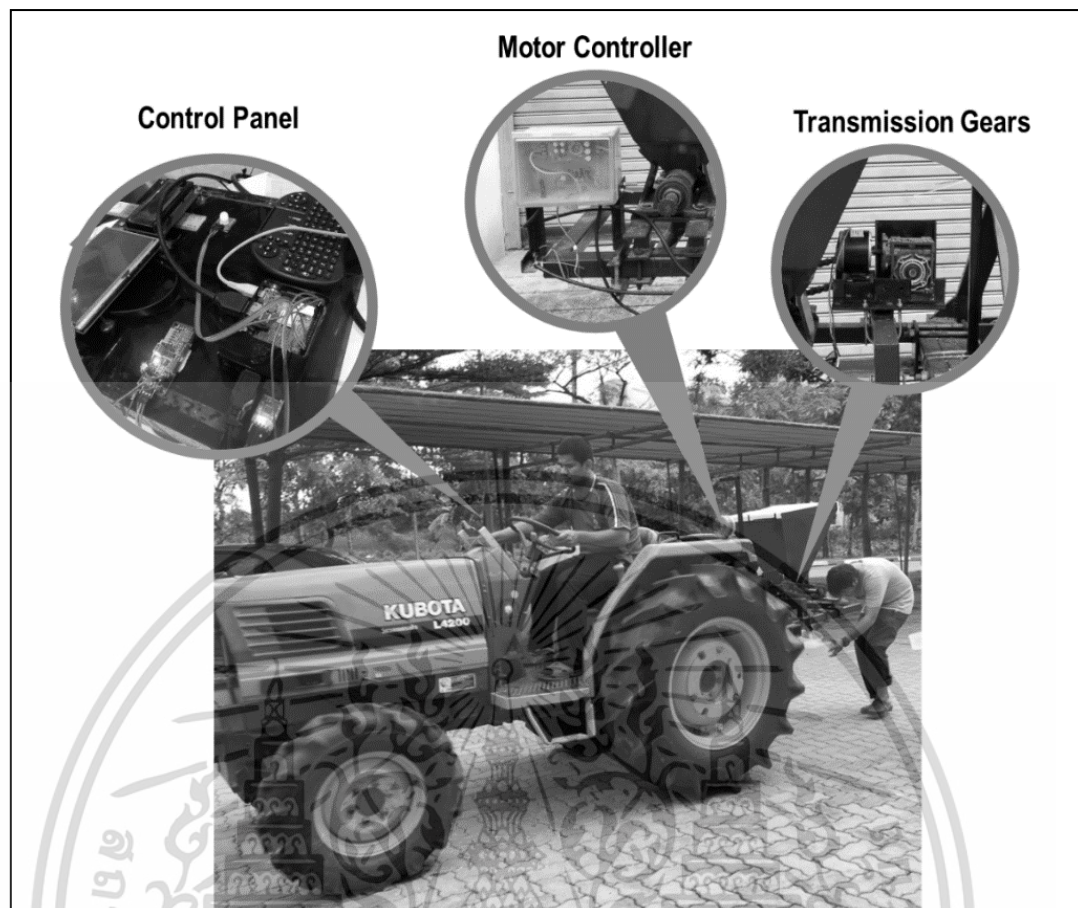


รูปที่ 3.2.6 ส่วนประกอบของอุปกรณ์สำหรับส่วนควบคุมระบบ VRT

3.2.2. การติดตั้งระบบควบคุม

การติดตั้งระบบควบคุมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ประกอบด้วย Control Panel: ติดตั้ง ไว้ในห้องคนขับบนรถแทรกเตอร์ ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมผ่านสายสัญญาณไปยังส่วน Motor Controller ที่ทำการติดตั้งระบบควบคุมไว้หน้าของเครื่องหยอดปุ๋ยเพื่อขยายสัญญาณควบคุมดิจิทัลเป็นสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการขับมอเตอร์และเกียร์ขับเคลื่อนในส่วนในระบบ Transmission Gears ภาพรวมของระบบแสดงดังรูปที่ 3.2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.7 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์และระบบควบคุม

3.2.3. การทดสอบระบบและวิเคราะห์ผล

ในการทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดปุ๋ยให้สามารถหยอดปุ๋ยตามความแตกต่างของอัตราการหยอดภายในแผนที่จำลองที่ได้จัดทำขึ้น สามารถแบ่งการทดสอบเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ การสอบเทียบระบบ และการทดสอบภายในพื้นที่ทดสอบ เนื่องจากระบบควบคุมยังคงมีขั้นตอนการทำงานคงเดิมจากหัวข้อที่ 3.1 ที่ได้กล่าวไป จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบระบบก่อนทำการทดสอบ

3.2.3.1. การสอบเทียบระบบ

ทำการติดตั้งระบบควบคุมบนเครื่องหยอดปุ๋ยที่ต่อพ่วงท้ายกับแทรกเตอร์ และทำการทดสอบโดยการจำลองค่าสัญญาณ PWM เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณ PWM และอัตราการหยอดเชิงเวลา ที่ 25-100 %PWM และทำสุ่มเก็บข้อมูลด้วยการจับเวลา (10 วินาที) จำนวน 5 ซ้ำ ทำการชั่งน้ำหนักและคำนวณหาสมการในการสอบเทียบระบบเพื่อป้อนให้แก่ระบบก่อนทำการทดสอบภาคสนาม แสดงดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.8 การทดสอบภายในสถานีทดสอบ



รูปที่ 3.2.9 การเก็บข้อมูลอัตราการหยุดเชิงเวลาในสถานีทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2. การทดสอบในพื้นที่ทดสอบ

ทำการทดสอบในพื้นที่ทดสอบและติดตั้งระบบควบคุมบนเครื่องหยอดปุ๋ยและแทรกเตอร์ (KUBOTA ขนาด 75 แรงม้า) ก่อนเริ่มทำการทดสอบได้ทำการสอบเทียบระบบตามที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้า เพื่อนำค่ามาป้อนให้แก่ระบบและควบคุมการทำงานของเครื่องหยอดปุ๋ย ซึ่งการทดสอบภาคสนามผู้วิจัยได้เตรียมพื้นที่เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และอ่านข้อมูลการหยอดบนแผนที่ด้วยระยะทาง 30 เมตร โดยระบบจะรับค่าพิกัดตำแหน่งและค่าความเร็วในการเคลื่อนที่จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส โดยกำหนดรอบเครื่องรถแทรกเตอร์ให้มีความเร็วอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ 2 ระดับความเร็ว (4 และ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และทำการสุ่มเก็บข้อมูลเป็น 3 ช่วงๆละ 5 เมตรตามระยะที่กำหนดในแผนที่ เมื่อแทรกเตอร์เคลื่อนที่ผ่านทุกระยะทาง 5 เมตรที่กำหนด ระบบจะแสดงสัญญาณไฟและเสียงเตือนเพื่อระบุตำแหน่งเพื่อใช้แจ้งการเปลี่ยนการตวงเก็บข้อมูลปุ๋ย และจะทำการเก็บข้อมูลความคลาดเคลื่อนของการอ่านค่าพิกัดตำแหน่งของ GPS ด้วยการทำสัญลักษณ์ไว้ที่พื้นเมื่อมีสัญญาณเสียงจากระบบ (ทุกระยะ 5 เมตร) พร้อมวัดระยะที่ผิดพลาดจากตำแหน่งอ้างอิง แล้วนำปุ๋ยมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาอัตราการหยอดเชิงพื้นที่และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ แสดงการทดสอบภาคสนามดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.2.10 พื้นที่ทดสอบภาคสนามและตัวอย่างการหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ระบบ GPS วัดได้ (วัดจุดบนพื้น) เมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง (เส้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.11 การทดสอบภาคสนามและเก็บข้อมูล (ขาไป)



รูปที่ 3.2.12 การทดสอบภาคสนามและเก็บข้อมูล (ขากลับ)

3.2.3.3. การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ

การทดสอบทั้งในสถานีและแปลงจริง ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบโดยการทดสอบค่าเฉลี่ย (One-sample t-test) โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ และทำการตั้งสมมุติฐานในการทดสอบไว้ว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ควรมีค่าไม่แตกต่างจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดในแต่ละอัตรา เมื่อมีความเร็วที่แตกต่างกัน โดยได้อธิบายผลการวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 4 และแสดงตารางการวิเคราะห์

ในภาคผนวก ข เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

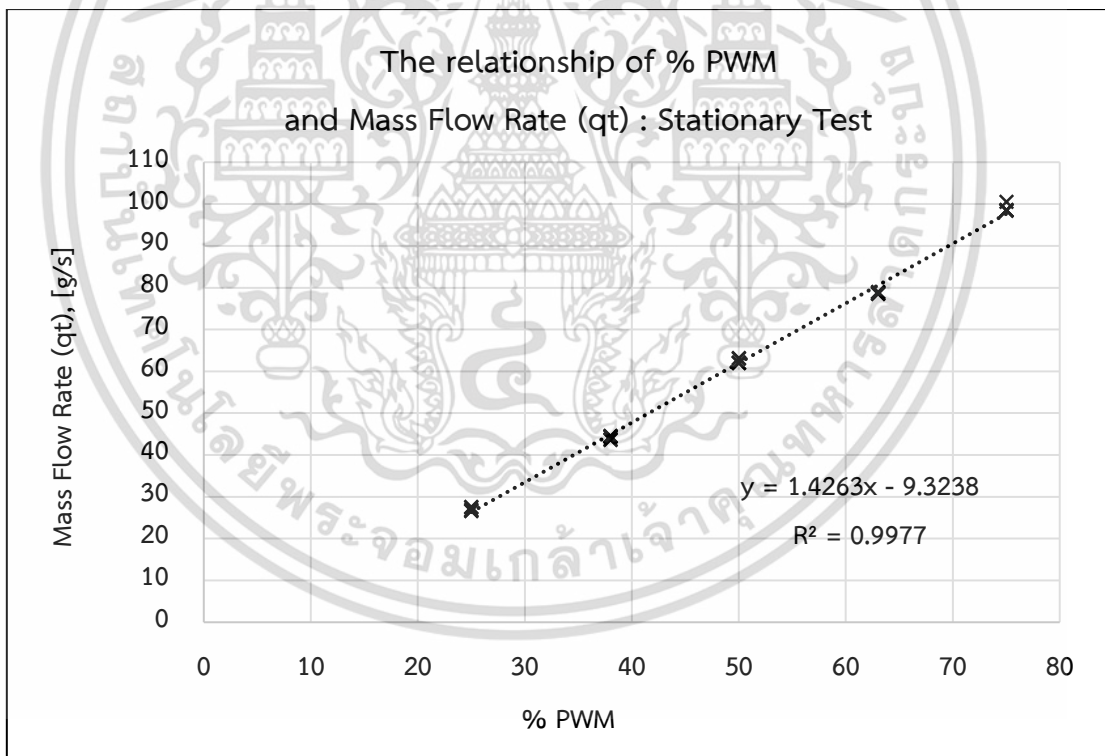
ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

4.1. การออกแบบและทดสอบระบบควบคุมเครื่องหยอดอ้อยแบบแม่นยำ

4.1.1. ผลการทดสอบระบบต้นแบบ

4.1.1.1. ผลการสอบเทียบระบบ

จากการสอบเทียบระบบ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยอดเชิงเวลา โดยทำการทดสอบที่ 25% 38% 50% 63% และ 75% PWM พบว่ามีค่าอัตราการหยอดเชิงเวลาอยู่เฉลี่ยแต่ละช่วงอยู่ที่ 27.04, 44.15, 62.50, 78.75 และ 98.94 กรัมต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าทั้งสองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ได้สมการคือ $y = 1.4263x - 9.3238$ และพบว่าค่าความเชื่อมั่นของความสัมพันธ์นี้ R^2 เท่ากับ 0.998 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังนี้

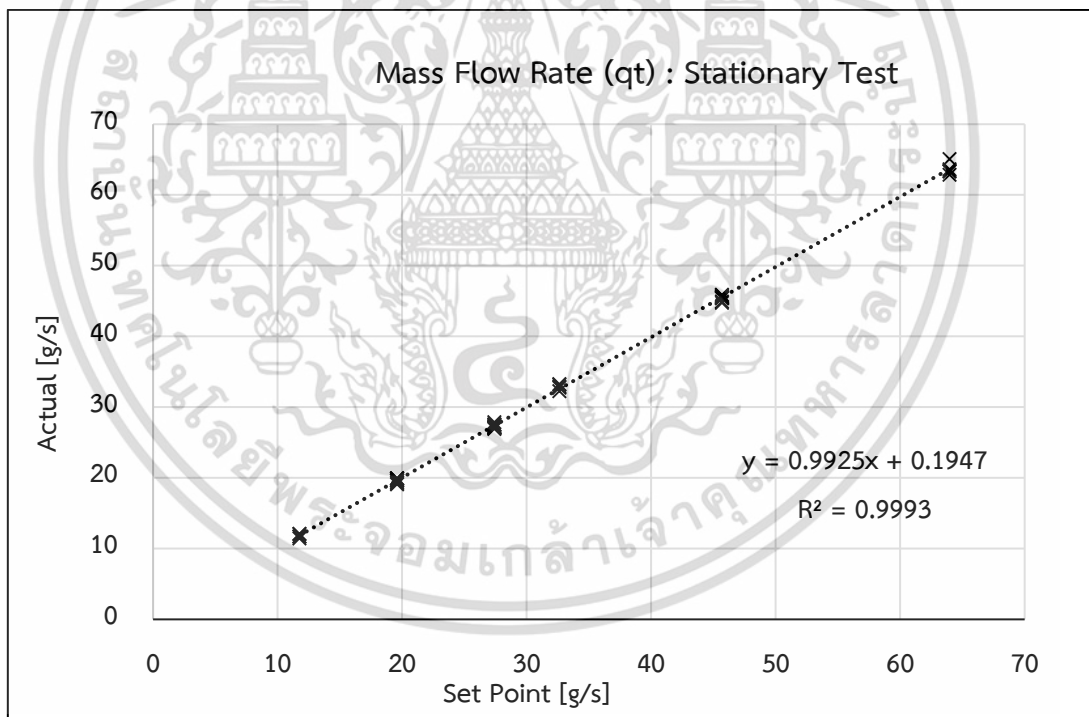


รูปที่ 4.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยอดเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

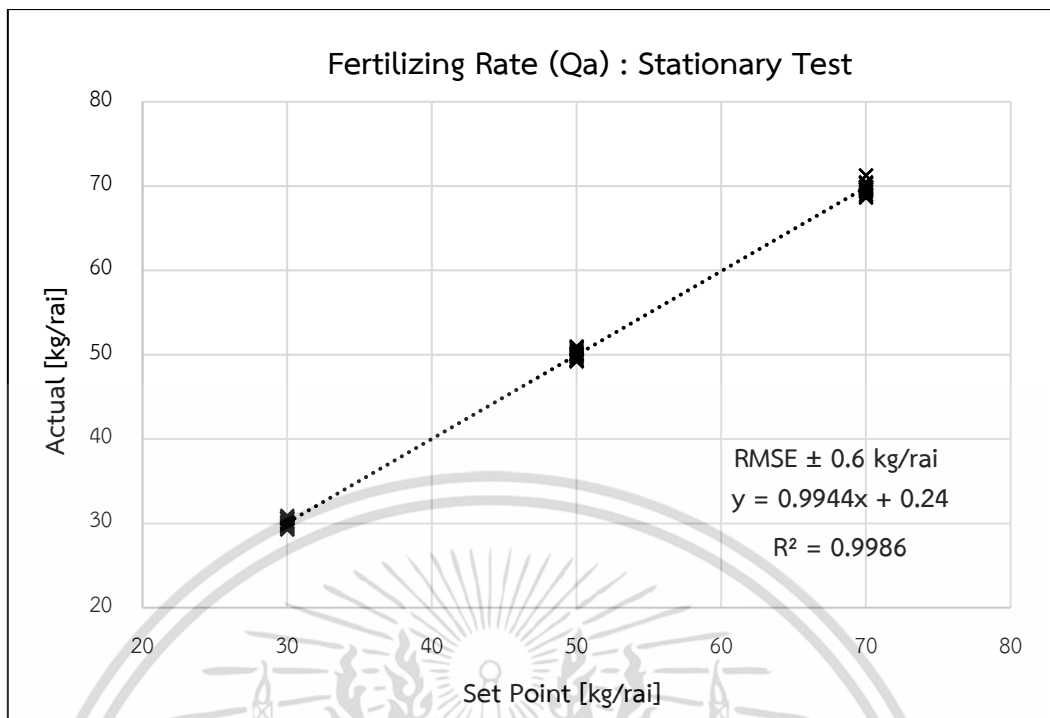
4.1.1.2. ผลการทดสอบในสถานีทดสอบ

จากผลการทดสอบเบื้องต้นโดยการจำลองความเร็วโดยการกำหนดความเร็ว 3 ระดับ ได้แก่ 3 5 และ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและทดสอบที่ 3 อัตราปุ๋ย ได้แก่ 30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งทำการกำหนดหน้ากว้างในการทำงานของเครื่องอยู่ที่ 1.5 เมตร เครื่องสามารถทำการหยุดได้ดังต่อไปนี้ที่อัตราปุ๋ย 30 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากับ 30.16 ± 0.65 , 30.23 ± 0.53 และ 29.76 ± 0.25 ตามลำดับ ที่อัตราปุ๋ย 50 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากับ 49.90 ± 0.58 , 50.39 ± 0.60 และ 49.75 ± 0.35 ตามลำดับ และที่อัตราปุ๋ย 70 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากับ 70.05 ± 0.84 , 69.73 ± 0.68 และ 69.69 ± 0.78 ตามลำดับ จึงได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า ค่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ (30 50 70 กิโลกรัมต่อไร่) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) กับค่าอัตราปุ๋ยที่กำหนด แสดงในภาคผนวก ข. เมื่อความเร็วเปลี่ยนไปทั้ง 3 ระดับ (3 5 และ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งเมื่อแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดที่กำหนดและอัตราการหยุดที่วัดได้ ยังพบว่ามีค่าความเชื่อมั่นของความสัมพันธ์นี้ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.999 โดยจะแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1.2 และ รูปที่ 4.1.3 และยังพบอีกว่าการทดสอบภายในสถานีมีและมีความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ ± 0.6 กิโลกรัมต่อไร่



รูปที่ 4.1.2 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยุดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยุดเชิงเวลาที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

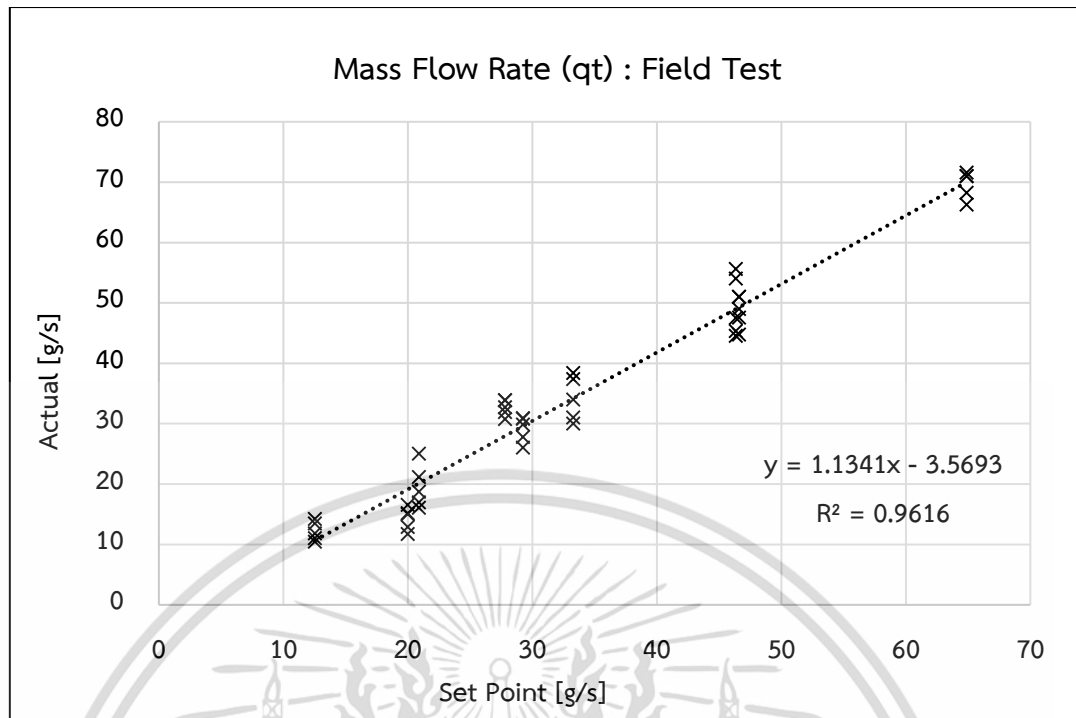


รูปที่ 4.1.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปุ๋ยที่ต้องการและอัตราปุ๋ยที่วัดได้

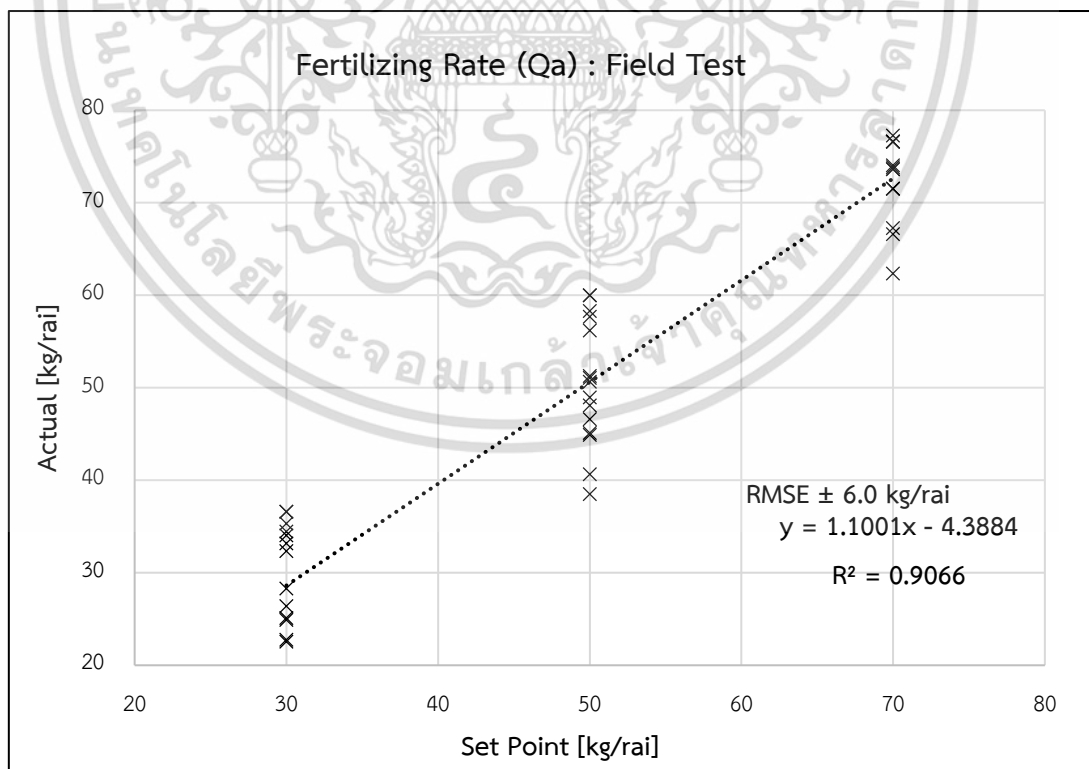
4.1.1.3. ผลการทดสอบในพื้นที่ทดสอบ

จากการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่าเมื่อทำการทดสอบโดยกำหนดอัตราปุ๋ยที่ 3 อัตรา และใช้ความเร็วที่ 3 ระดับเช่นเดียวกับการทดสอบเบื้องต้น(จำลองความเร็ว) ได้ค่าเฉลี่ยดังนี้ อัตราปุ๋ย 30 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 29.00 ± 3.87 , 21.60 ± 2.97 และ 35.20 ± 1.79 ตามลำดับ อัตราปุ๋ย 50 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 47.20 ± 8.50 , 51.40 ± 5.59 และ 53.20 ± 5.45 ตามลำดับและที่ อัตราปุ๋ย 70 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 69.80 ± 5.21 , 73.40 ± 4.16 และ 75.40 ± 2.30 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบค่าเฉลี่ย (One-sample t-test) พบว่า อัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดทั้ง 3 อัตราอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และยังพบอีกว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่กำหนดและอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่วัดได้ เท่ากับ 0.907 และพบอีกว่าการทดสอบภายในแปลงมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ ± 6.0 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงเวลาและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ได้ดังรูปที่ 4.1.4 และ 4.1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.4 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยอดเชิงเวลาที่ได้รับ



รูปที่ 4.1.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปุ๋ยที่ต้องการและอัตราปุ๋ยที่ได้รับ

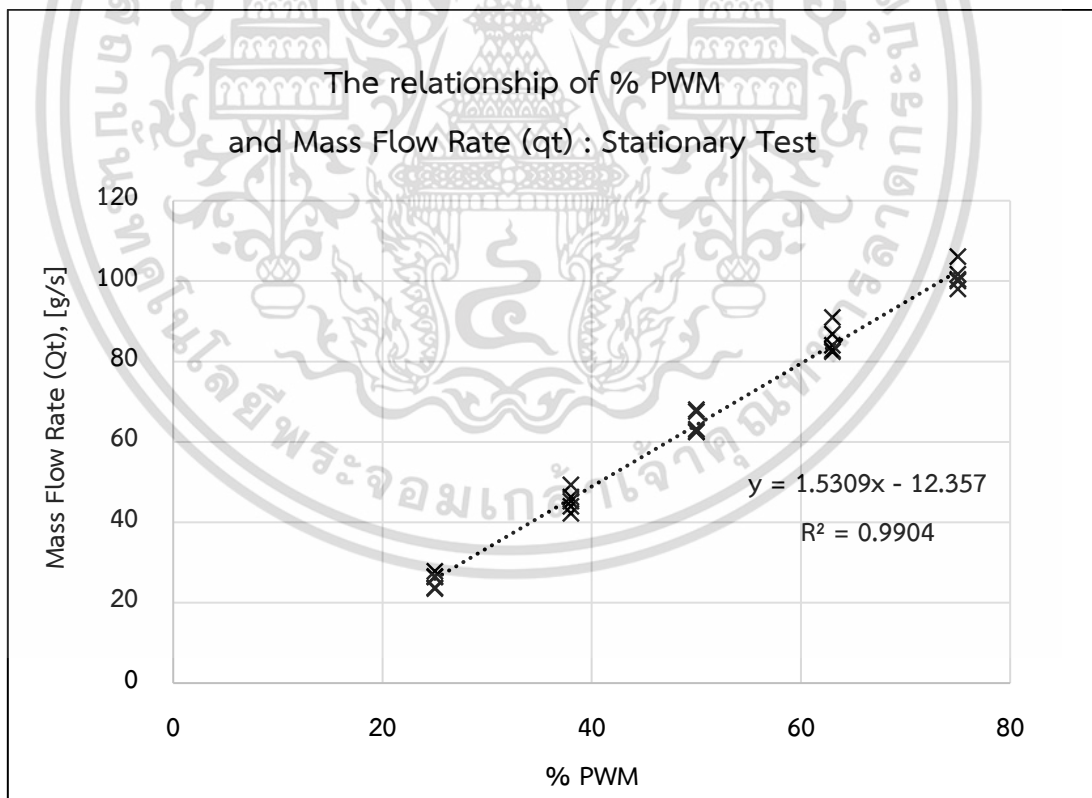
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2. ผลการทดสอบระบบที่ปรับปรุง

จากการปรับปรุงในส่วนของกลไกในการทำงานของระบบโดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราทดเนื่องจากในการทำงานในอัตราการหยุดที่กำหนดและความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ พบว่าระบบจะเริ่มทำงานได้อย่างคล่องตัวที่ %PWM ตั้งแต่ 10 % เป็นต้นไป สามารถแสดงผลการปรับปรุงระบบได้จากการ ผลการสอบเทียบระบบ โดยความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณ %PWM กับอัตราการหยุดเชิงเวลา ผลการทดสอบของอัตราการหยุดที่กำหนดและอัตราการหยุดที่ระบบทำได้ และสามารถแสดงตารางการเปรียบเทียบค่าสัญญาณ PWM ของระบบ ดังต่อไปนี้

4.1.2.1. ผลการสอบเทียบระบบ

จากการสอบเทียบระบบ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยุดเชิงเวลา โดยทำการทดสอบที่ 25% 38% 50% 63% และ 75%PWM พบว่ามีค่าอัตราการหยุดเชิงเวลาอยู่เฉลี่ยแต่ละช่วงอยู่ที่ 25.59, 45.42, 64.78, 85.42 และ 101.25 กรัมต่อวินาทีตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าทั้งสองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ได้สมการคือ $y = 1.5309x - 12.357$ และพบว่าค่าความเชื่อมั่นของความสัมพันธ์นี้ R^2 เท่ากับ 0.9904 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ได้ดังนี้

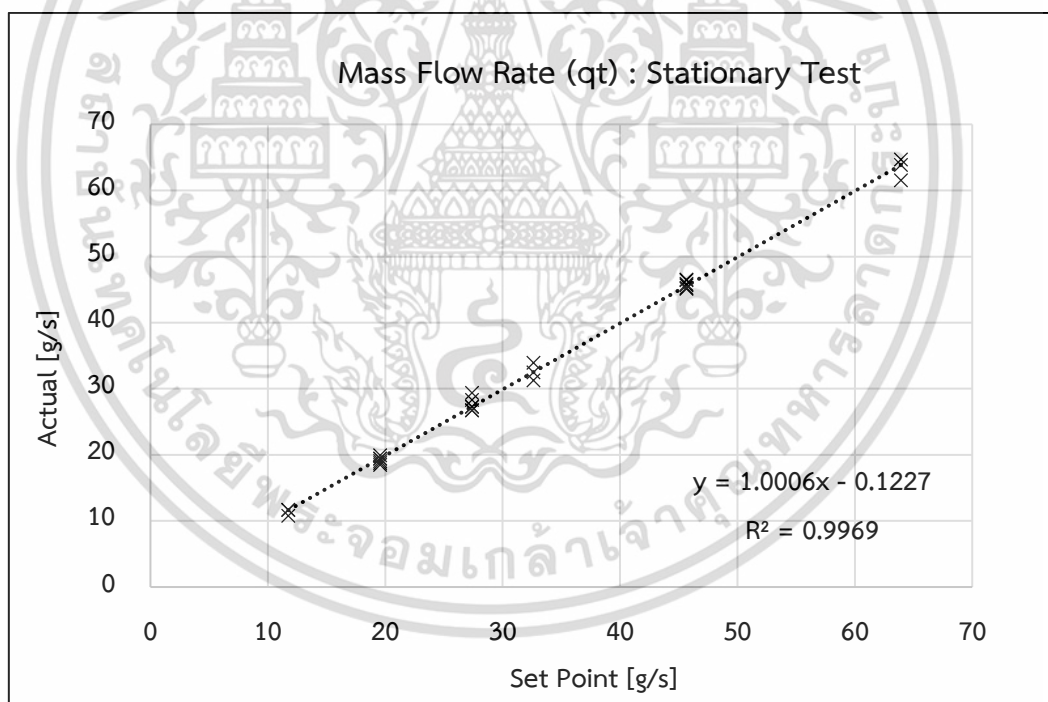


รูปที่ 4.1.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยุดเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

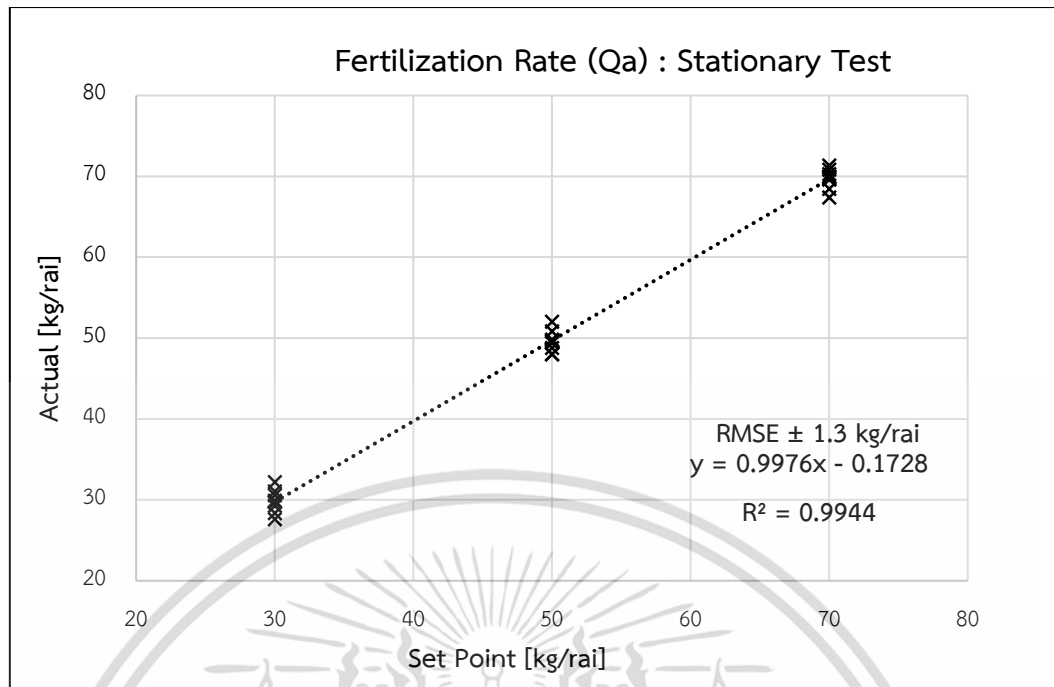
4.1.2.2. ผลการทดสอบภายในสถานีทดสอบ

จากผลการทดสอบเบื้องต้นโดยการจำลองความเร็วโดยการกำหนดความเร็ว 3 ระดับ ได้แก่ 3 5 และ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและทดสอบที่ 3 อัตราปุ๋ยได้แก่ 30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งทำการกำหนดหน้ากว้างในการทำงานของเครื่องอยู่ที่ 1.5 เมตร เครื่องสามารถทำการหยุดได้ตั้งต่อไปนี้ที่อัตราปุ๋ย 30 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากับ 29.08 ± 1.29 , 29.55 ± 1.12 และ 30.83 ± 1.46 ตามลำดับ ที่อัตราปุ๋ย 50 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากับ 48.83 ± 0.83 , 49.94 ± 2.03 และ 49.96 ± 0.78 ตามลำดับ และที่อัตราปุ๋ย 70 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากับ 69.26 ± 0.70 , 70.52 ± 0.72 และ 69.39 ± 1.79 ตามลำดับ จึงได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า ค่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อความเร็วเปลี่ยนไปทั้ง 3 ระดับแสดงข้อมูลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ข. ซึ่งเมื่อแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดที่กำหนดและอัตราการหยุดที่วัดได้เชิงเวลาและเชิงพื้นที่ พบว่ามีค่าความเชื่อมั่นของความสัมพันธ์นี้ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.997 (เชิงเวลา) และ 0.994 (เชิงพื้นที่) อีกทั้งยังพบว่าการทดสอบภายในสถานีมีและมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ ± 1.3 กิโลกรัมต่อไร่ โดยจะแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1.7 และรูปที่ 4.1.8



รูปที่ 4.1.7 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยุดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยุดเชิงเวลาที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

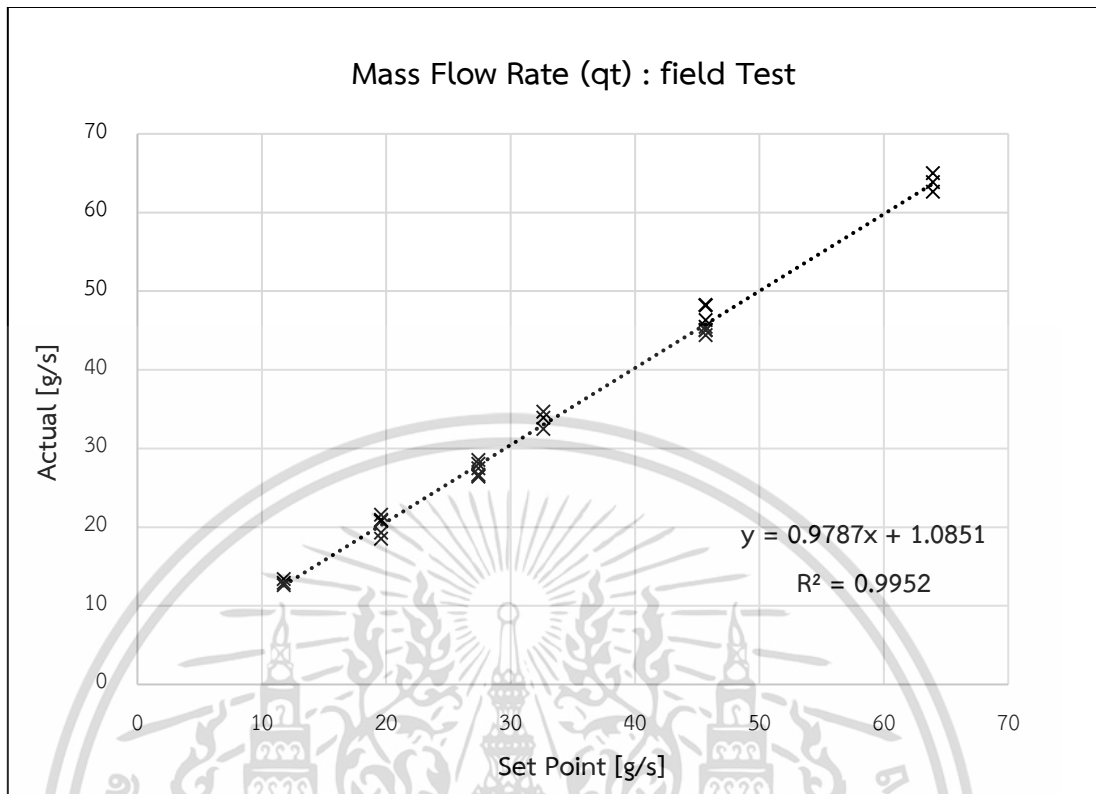


รูปที่ 4.1.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปุ๋ยที่ต้องการและอัตราปุ๋ยที่วัดได้

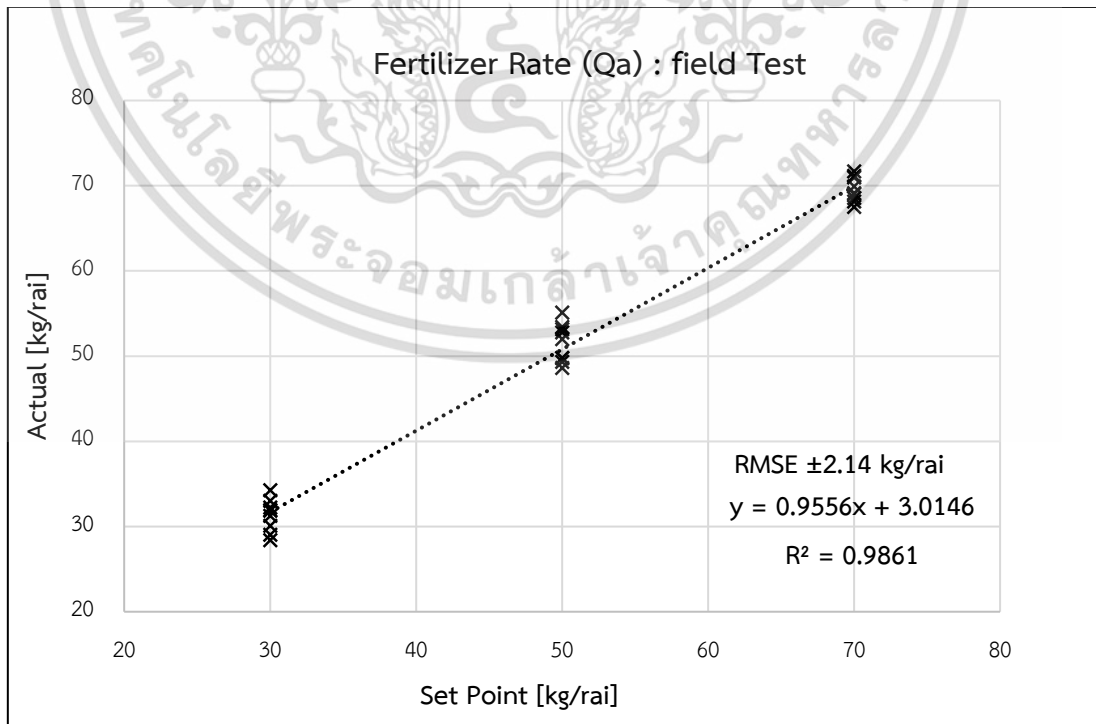
4.1.2.3. ผลการทดสอบภายในแปลงจริง

จากการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่าเมื่อทำการทดสอบโดยกำหนดอัตราปุ๋ยที่ 3 อัตรา และใช้ความเร็วที่ 3 ระดับเช่นเดียวกับการทดสอบเบื้องต้น(จำลองความเร็ว) ได้ค่าเฉลี่ยดังนี้ อัตราปุ๋ย 30 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 32.13 ± 0.90 , 31.00 ± 1.47 และ 31.03 ± 0.3 ตามลำดับ อัตราปุ๋ย 50 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 52.60 ± 2.98 , 51.63 ± 1.68 และ 50.40 ± 2.16 ตามลำดับและที่ อัตราปุ๋ย 70 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 69.10 ± 2.27 , 69.70 ± 1.13 และ 69.87 ± 1.25 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบค่าเฉลี่ย (One-sample t-test) พบว่า ที่แต่ละอัตราปุ๋ยที่วัดได้และอัตราปุ๋ยที่กำหนด (30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อไร่) ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 เมื่อความเร็วเปลี่ยนไป (ภาคผนวก ข.) และเมื่อแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่กำหนดและอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่วัดได้ในรูปของกราฟ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่กำหนดและอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่วัดได้ เท่ากับ 0.995 แสดงดังรูปที่ 4.1.10 อีกทั้งยังพบว่า ความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่ต้องการและอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่วัดได้ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.986 (รูปที่ 4.1.11) และมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ ± 2.1 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งเป็นค่าแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองการทำงานได้ดีและมีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.10 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยอดเชิงเวลาที่ได้



รูปที่ 4.1.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปุ๋ยที่ต้องการและอัตราปุ๋ยที่วัดได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.4. ผลการเปรียบเทียบค่าสัญญาณ %PWM ของระบบต้นแบบและระบบที่ปรับปรุง

จากการทดสอบทั้งก่อนและหลังปรับปรุงกลไกของระบบ เมื่อนำตารางการเก็บข้อมูลการทดสอบภายในสถานีทดสอบโดยการจำลองอัตราการหยุดและความเร็ว สามารถแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณ PWM ซึ่งทำให้ระบบสามารถทำงานได้ทั้งช่วงความเร็วต่ำและสูง รวมถึงช่วงอัตราการหยุดต่ำและอัตราการหยุดที่สูง แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงข้อมูลของค่าสัญญาณ PWM ภายในสถานีทดสอบระบบต้นแบบ

Speed	Rate	Before			
		Qt-Theory	Qt-Measured	Error	PWM
3	30	11.75	11.28	-0.5	14.7
3	50	19.58	18.50	-1.1	20.2
3	70	27.41	25.78	-1.6	25.6
5	30	19.58	18.70	-0.9	20.2
5	50	32.63	31.08	-1.5	29.3
5	70	45.68	42.77	-2.9	38.4
7	30	27.41	25.53	-1.9	25.6
7	50	45.68	42.29	-3.4	38.4
7	70	63.95	59.25	-4.7	51.1

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงข้อมูลของค่าสัญญาณ PWM ภายในสถานีทดสอบหลังการปรับปรุงระบบ

Speed	Rate	After			
		Qt-Theory	Qt-Measured	Error	PWM
3	30	11.75	11.72	0.0	18.3
3	50	19.58	19.37	0.2	27.8
3	70	27.41	27.18	0.2	37.4
5	30	19.58	19.26	0.3	27.8
5	50	32.63	32.42	0.2	43.3
5	70	45.68	45.89	-0.2	59.6
7	30	27.41	27.42	0.0	37.4
7	50	45.68	45.7	0.0	59.6
7	70	63.95	64.11	-0.2	81.8

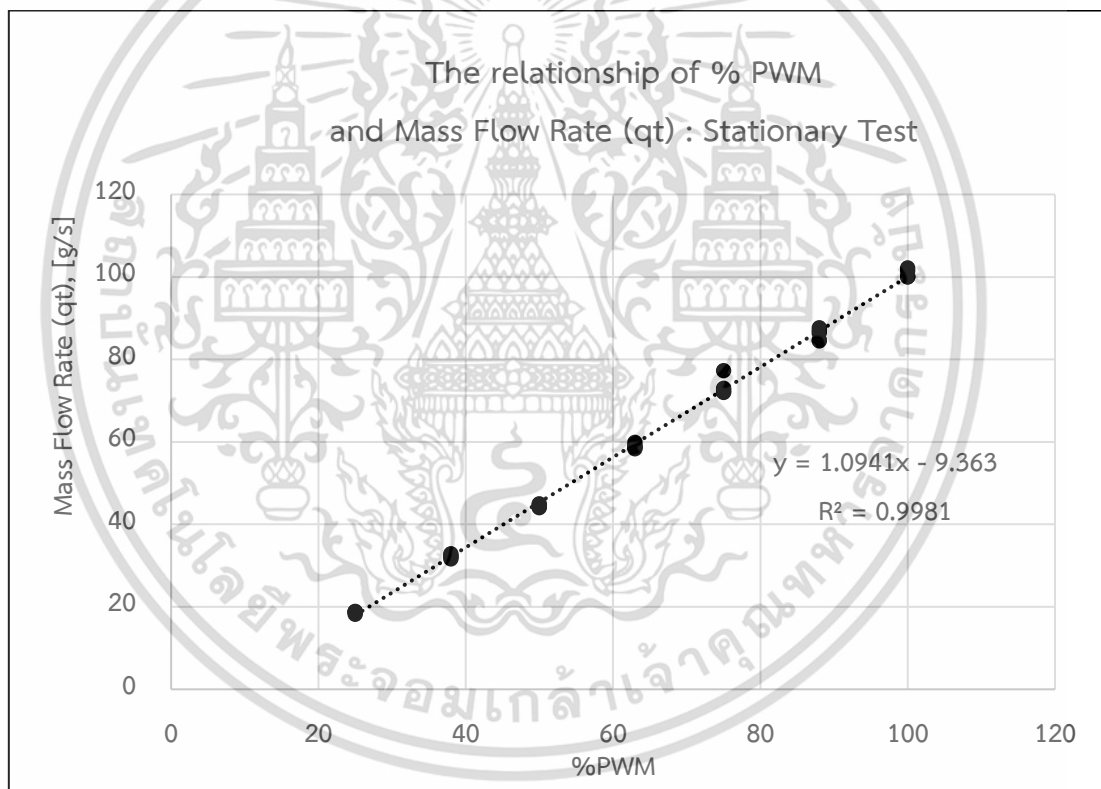
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2. การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปรกับระบบควบคุม

4.2.1. ผลการทดสอบระบบ

4.2.1.1. การสอบเทียบระบบ

จากการสอบเทียบระบบ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยอดเชิงเวลา โดยทำการทดสอบที่ 25% 38% 50% 63% 75% 88% และ 100% PWM พบว่ามีค่าอัตราการหยอดเชิงเวลาอยู่เฉลี่ยแต่ละช่วงอยู่ที่ 18.69, 32.25, 44.50, 58.99, 73.43, 86.1 และ 100.81 กรัมต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าทั้งสองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ได้สมการคือ $y = 1.0941x - 9.363$ และพบว่าค่าความเชื่อมั่นของความสัมพันธ์นี้ R^2 เท่ากับ 0.998 สามารถแสดงกราฟความของความสัมพันธ์ได้ดังนี้

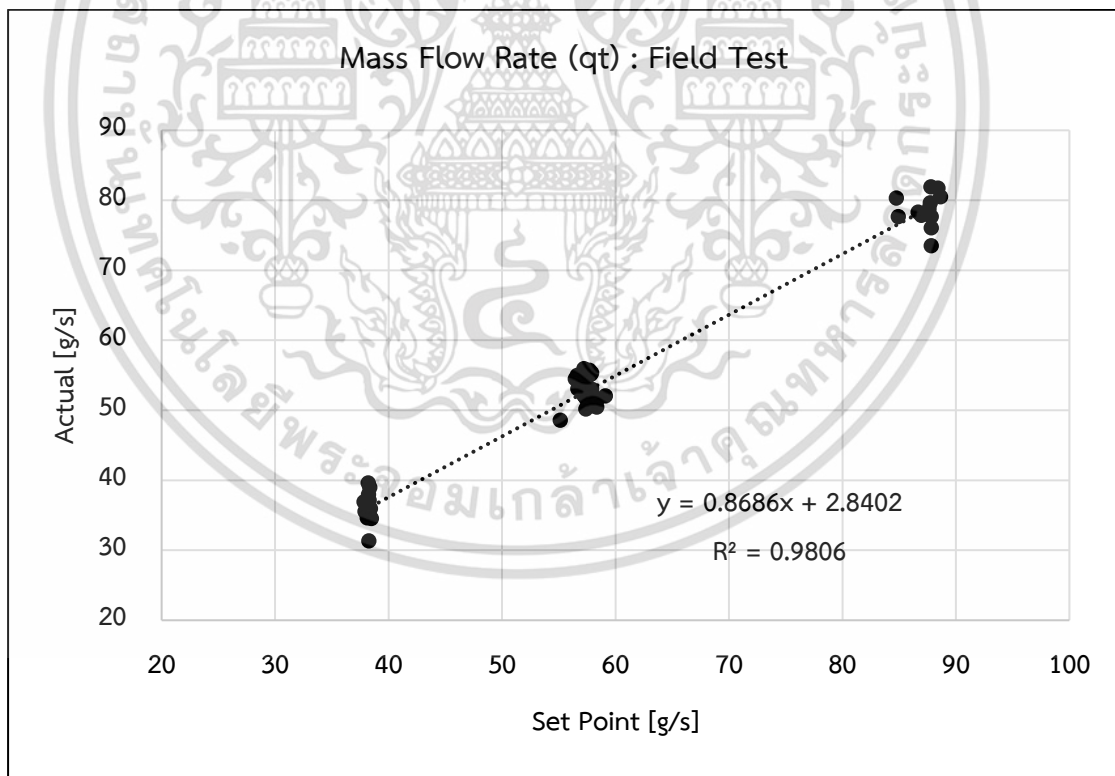


รูปที่ 4.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณ PWM และอัตราการหยอดเชิงเวลา

4.2.1.2. การทดสอบภายในพื้นที่ทดสอบ

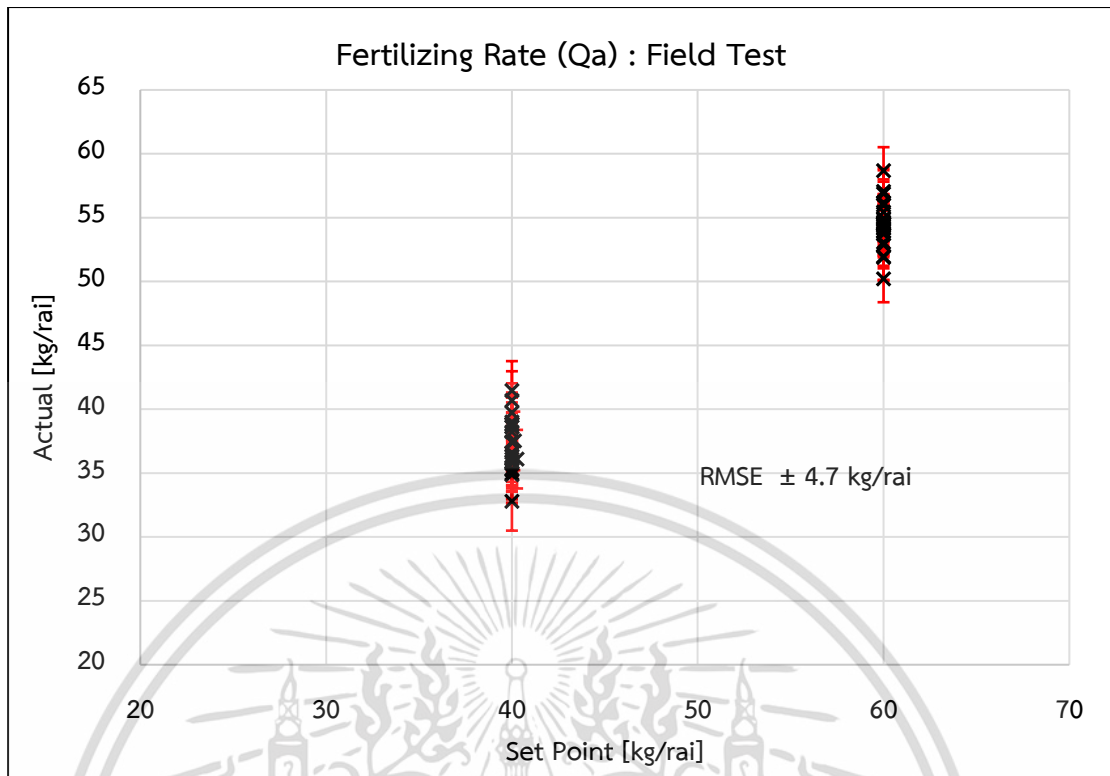
จากการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่าเมื่อทำการทดสอบโดยกำหนดอัตราปุ๋ยที่ 40 และ 60 กิโลกรัมต่อไร่ที่ถูกลงในแผนที่ และใช้ความเร็วที่ 2 ระดับ (4 และ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งทำการทดสอบเคลื่อนที่ไป 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศตะวันออกและทิศตะวันตก จึงได้ค่าเฉลี่ยดังนี้ เมื่อเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกที่อัตราปุ๋ย 40 กิโลกรัมต่อไร่ความเร็ว 4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 38.17 ± 2.14 และ ที่ความเร็ว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 36.50 ± 1.76 และที่อัตราปุ๋ย 60 กิโลกรัมต่อไร่ไปทางทิศตะวันตกที่ความเร็วทั้งสองระดับ (4 และ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) มีค่าเฉลี่ยของอัตราปุ๋ยเท่ากับ 55.67 ± 2.50 และ 54.00 ± 2.28 ตามลำดับ และเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออกที่อัตราปุ๋ย 40 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 37.17 ± 2.79 และ 37.00 ± 1.67 ตามลำดับ ที่อัตราปุ๋ย 60 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 54.67 ± 1.03 และ 54.00 ± 1.41 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบค่าเฉลี่ย (One-sample t-test) พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้และอัตราปุ๋ยที่กำหนดในแต่ละอัตรา (40 และ 60 กิโลกรัมต่อไร่) มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 เมื่อความเร็วแตกต่างกัน (แสดงตารางการวิเคราะห์ในภาคผนวก ข.) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ที่กำหนดและอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ที่วัดได้ในรูปของกราฟ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยอดเชิงเวลาที่กำหนดและอัตราการหยอดเชิงเวลาที่วัดได้ เท่ากับ 0.980 แสดงดังรูปที่ 4.2.2 อีกทั้งยังพบว่าความสัมพันธ์ของอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ที่ต้องการและอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ที่วัดได้ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.9535 (รูปที่ 4.2.3) และมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ ± 4.7 กิโลกรัมต่อไร่



รูปที่ 4.2.2 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการหยอดเชิงเวลาที่ต้องการและอัตราการหยอดเชิงเวลาที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยอดที่ต้องการและอัตราการหยอดที่วัดได้

4.2.1.3. ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของ GPS

จากผลการทดสอบระบบภายในพื้นที่ทดสอบ ซึ่งเป็นการทดสอบระบบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ย พบว่าระบบยังมีความคลาดเคลื่อนของอัตราการหยอดอยู่ที่ 3.9 กิโลกรัมต่อไร่ โดยในการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนของระบบพิกัดตำแหน่งที่รับจากเครื่องรับสัญญาณ GPS เนื่องจากตำแหน่งปัจจุบันในขณะทดสอบที่ GPS อ่านค่าได้มีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริงบนพื้นโลกอยู่ ซึ่งในการทดสอบมีการเก็บข้อมูลพิกัดที่ถูกอ่านค่าจากเครื่องรับสัญญาณ GPS และจากจุดอ้างอิงภายในแผนที่ แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยสามารถอธิบายได้ว่า ที่ทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออก ที่ความเร็ว 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมงมีความคลาดเคลื่อนจากพิกัดอ้างอิงบนแผนที่ด้วยระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.45 ± 0.70 เมตร และที่ความเร็ว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเท่ากับ 3.69 ± 1.67 เมตร ในทิศตะวันตกที่ความเร็ว 4 และ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่ามีคลาดเคลื่อนของพิกัดเป็นระยะทางเท่ากับ 1.83 ± 0.72 และ 1.60 ± 0.09 เมตร ตามลำดับ จึงทำให้ข้อมูลนำหนักปุ๋ยที่ทำการเก็บข้อมูลด้วยระยะทาง 10 เมตร และอัตราการหยอดเชิงพื้นที่ที่ได้และที่กำหนดภายในแผนที่ที่มีความคลาดเคลื่อนตามมา และยังสามารถแสดงกราฟความคลาดเคลื่อนของพิกัดทั้งหมด (รูปที่ 4.2.4) ดังรูปต่อไปนี้

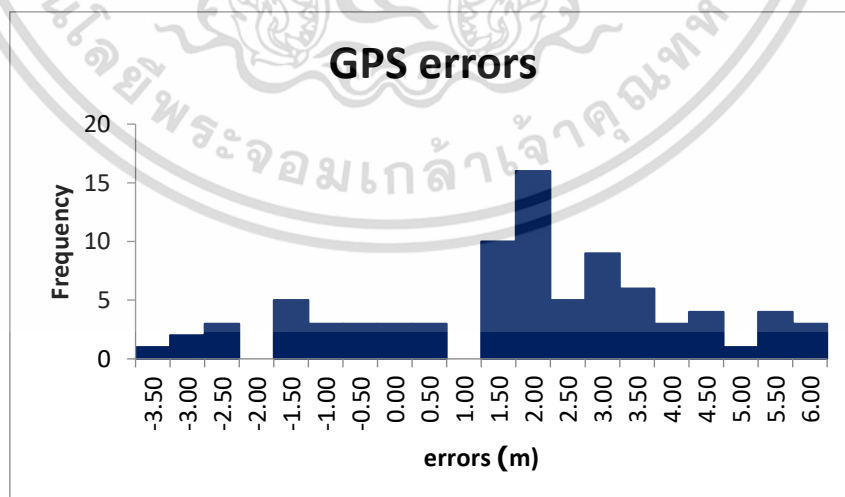
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดตำแหน่ง GPS จากจุดอ้างอิง

Speed/Heading	Easting	Westing
Low	2.45±0.70	1.83 ±0.72
High	3.69±1.67	1.60±1.13



รูปที่ 4.2.4 แผนที่พร้อมระบุทิศทางในการเคลื่อนที่ไปทางทิศวันออกและทิศตะวันตก



รูปที่ 4.2.5 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณ GPS จากจุดอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาจากการทดสอบระบบที่ได้ทำพัฒนาขึ้นได้ทำการศึกษาที่อัตราการหยุดปุ๋ยของเครื่องหยุดปุ๋ยที่ติดตั้งระบบควบคุมการหยุดปุ๋ยที่ 30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อไร่ ทดสอบที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแทรกเตอร์ที่ 3 5 และ 7 กิโลเมตร/ชั่วโมง แสดงให้เห็นการทำงานของระบบที่แม่นยำจากการวัดค่าความเร็วจาก GPS และการทำงานของระบบหยุดในเครื่องหยุดปุ๋ยอ้อย ซึ่งจากผลการศึกษาและทดสอบระบบพบว่าระบบที่ปรับปรุงและพัฒนาเพิ่มเติมมีความสามารถควบคุมระบบการหยุดปุ๋ยได้สอดคล้องกับอัตราการหยุดปุ๋ยเชิงพื้นที่ที่กำหนด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์ เท่ากับ 0.987 และเมื่อทดสอบภายในแปลงทดสอบพบว่ามีความสัมพันธ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์ เท่ากับ 0.986 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าการทำงานของระบบที่ปรับปรุงขึ้นไม่มีความแตกต่างทางสถิติของอัตราปุ๋ยที่กำหนดและอัตราปุ๋ยที่ระบบสามารถทำได้จริงเมื่อความเร็วเปลี่ยนไป อีกทั้งระบบสามารถปรับอัตราการหยุดปุ๋ยได้อย่างแม่นยำและสามารถนำไปใช้ได้ในลักษณะสภาพการใช้งานจริงได้ดี

ในส่วนของการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้น สามารถอ่านค่าอัตราปุ๋ยต่อพื้นที่จากแผนที่ปุ๋ย (Prescription Map) และนำมาใช้ในการควบคุมอัตราการหยุดของระบบได้ โดยจากการทดสอบโดยใช้แผนที่ปุ๋ยที่สร้างขึ้นที่มีอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ 40 และ 60 กิโลกรัมต่อไร่ และใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแทรกเตอร์ 4 และ 6 กิโลเมตร/ชั่วโมง พบว่าระบบมีความเป็นไปได้ของระบบในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปุ๋ยที่กำหนดและที่วัดได้ เท่ากับ 0.981 อย่างไรก็ตามอัตราการหยุดเชิงเวลาและอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่ที่ได้มีความแปรปรวนสูง และมีค่าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ทั้งนี้เนื่องจากระยะทางจากจุดที่เปลี่ยนอัตราปุ๋ยเชิงพื้นที่จนถึงจุดที่เก็บข้อมูล (ระยะทางในการเก็บข้อมูล) สั่นเกินไป ทำให้อัตราปุ๋ยยังไม่สม่ำเสมอและมีค่าต่ำกว่าที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2. ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยแบบผันแปร สามารถประยุกต์ใช้กับระบบได้ แต่อย่างไรก็ตามการระบุตำแหน่งพิกัดในขณะเครื่องทำงานหรือเคลื่อนที่ของระบบยังเกิดความคลาดเคลื่อนอยู่มาก เนื่องจากการรับส่งสัญญาณ GPS ในส่วนของค่าพิกัดของเครื่องรับสัญญาณ GPS (Ublox-M8N) มีความแม่นยำในการระบุพิกัดที่ต่ำ ควรใช้ระบบ GPS ที่มีความแม่นยำสูง เช่น RTK GPS แต่ก็จะทำให้ราคาของระบบสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ควรทดสอบในพื้นที่ที่มีความยาวของพื้นที่มากขึ้นเพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลในช่วงที่มีอัตราการหยดมีความเสถียรแล้ว และควรพัฒนาระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เพื่อให้อัตราการหยดมีความเสถียรโดยใช้ระยะทางที่สั้นลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทำไร่ง่าย ๆ ด้วย GPS Guidance, 9 มกราคม 2561. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://www.mitrpholmodernfarm.com/news/2018/01/ทำไร่ง่าย-ๆ-ด้วย-GPS-Guidance>
- [2] Smart Farm เกษตรอัจฉริยะ ทางเลือกเกษตรกรยุคไอที, 25 พฤษภาคม 2561. [ระบบออนไลน์]แหล่งที่มา: <http://www.mitrpholmodernfarm.com/news/2018/05>
- [3] ทำไร่ง่าย ๆ ด้วย GPS Guidance, 9 มกราคม 2561. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://www.mitrpholmodernfarm.com/news/2018/01>
- [4] สุริยา วรวงศ์และคณะ, (2560) การออกแบบและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแม่นยำในไร่อ้อยโดยเทคนิคการประมวลผลภาพ, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [5] José F. Reyes, Wilson Esquivel , Daniel Cifuentes , Rodrigo Ortega . 2558.“Field testing of an automatic control system for variable rate fertilizer application” Computers and Electronics in Agriculture 113: 260-265
- [6] ณัชพล ศิริล้วนและคณะ.2558 “การพัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบแม่นยำ” ปรียญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] ภิญญาพัชญ์ และคณะ, 2559 “การพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับควบคุมเกลียวลำเลียงในเครื่องหยอดปุ๋ย” ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [8] พรทิพย์ เกตุมา. “เครื่องจักรกลเกษตรเพื่อการจัดการไร่อ้อย” คู่มือการจัดการอ้อยอย่างยั่งยืน, 2559 ,หน้า55-62
- [9] ผศ. ศุภชัย สุรินทร์วงศ์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พ.ศ. 2541 กรุงเทพมหานคร: บริษัทประชาชน. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] ผศ. โยธิน เปรมปราณีรัชต์ วิเคราะห์และออกแบบ ระบบการควบคุมมอเตอร์ พ.ศ. 2526, หน้า 153-198
- [11] Pulse-width modulation, 2552. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: www.motionsystemdesign.com
- [12] ข้อมูลเกี่ยวกับ PWM อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, 2560. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://naringroup.blogspot.com>
- [13] ข้อมูลเกี่ยวกับ Arduino, 2556. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: www.arduino.cc
- [14] Gareth Halfacree, the official Raspberry Pi Beginner's Guide: how to use your new computer. 2018, Raspberry Pi Trading Ltd, Station Road, Cambridge, pp.10-25
- [15] thaieasyelec. 2553 บทความการพัฒนาโปรแกรมบน Raspberry Pi ด้วย Qt. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.thaieasyelec.com/article-wiki/embedded-electronics-application/raspberry-pi-programming-with-qt-ch1.html>
- [16] raspberrypi team. 2562. Python [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/python/README.md>
- [17] raspberrypi official. 2562. Raspberry Pi 3 Model B+ [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [18] raspberrypi team. 2562. gpio [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>
- [19] Jameco Electronics. 2562. Raspberry Pi Pinout Diagram | Circuit Notes. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.jameco.com/Jameco/workshop/circuitnotes/raspberry-pi-circuit-note.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] Bradford W. Parkinson, Per Enge, Penina Axelrad and James J. Spilker Jr. 2555. Global Positioning System: Theory and Applications, Volume II. 1996 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- [21] Chaipat Nengcomma. 2552. NMEA Sentence [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://emap.wordpress.com/2009/02/09/nmea-sentence/>
- [22] Global5 Co., Ltd. 2549.ความหมายของ GPS (Global Positioning System) และหลักการ ใช้ GPS, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.global5thailand.com/thai/gps.htm>
- [23] Premjit Sharma. Precision Farming. New Delhi: Tarun Offset Printers Delhi. 2550.
- [24] Farm Management. 2562.How to Make the Most of Variable Rate Technology [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.farmmanagement.pro/how-to-make-the-most-of-variable-rate-technology/>
- [25] Ivanov Igor.2561. Variable Rate Application in Precision Agriculture [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://medium.com/remote-sensing-in-agriculture/variable-rate-application-in-precision-agriculture-70a8b2be871d>
- [26] Sugar Research Australia.2557 Variable-rate technology [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://sugarresearch.com.au/>
- [27] สรรค์ใจกลั่นดาว. ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์:หลักการเบื้องต้น. ฉบับพิมพ์ครั้งที่2 แก้ไขเพิ่มเติม.สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์;2542.
- [28] Jaime Martindale.2562 Mapping and Geographic Information Systems (GIS) : What is GIS? [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://researchguides.library.wisc.edu/GIS>
- [29] 2562. GIS data [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: https://www.firenorth.org.au/nafi3/views/help/Maps_and_Fire_help4.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] Leah Wasser, Chris Holdgraf, Martha Morrissey .2561 Lesson 4. About the Geotiff (.tif) Raster File Format: Raster Data in Python [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics/lidar-raster-data-r/introduction-to-spatial-metadata-r/>
- [31] Chris Garrard. 2559. Geoprocessing with Python by Chris Garrard Sample Chapter 9. Manning Publications
- [32] สายรุ้ง และคณะ .2558 “เครื่องหยอดสารเคมีแบบแม่นยำ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [33] นายวิชัย โอบานุกุล 2558 วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตรความแม่นยำสูงสำหรับอ้อย, สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม
- [34] T. A. Ishola, A. Yahya, A. R. M. Shariff, and S. Abd Aziz. A new concept of Variable Rate Technology fertilizer applicator for oil palm. International journal of Agronomy and Plant Production. Vol., 2 (5), 181-186, 2011
- [35] M.R. Malekia,b,* , H. Ramona, J. De Baerdemaekera, A.M. Mouazenc. 2551. “A study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertiliser applicator” Bisystems Engineering 100 :160-166
- [36] Ajay V. Raipure and Dr. S. M. Deshmukh. 2015. “Design and evaluation of map-based control system for application of fertilizer” International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE) Volume 4, Issue 4: 727-725
- [37] Ahmed A. Alameena, Khalid A. Al-Gadia,b, ElKamil Tolaa. 2555 “Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application” Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST) : 370-373

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [3 8] Ehtesham Forouzanmehr, Mohammad Loghavi . 2555 “Granular fertilizer application rate control system with integrated output volume measurement” Agric Eng Int: CIGR Journal. Vol. 14, No.4: 255-261
- [39] Rui Zhang, Xiu Wang, Jianhua Guo, Liping Chen, Jianjun Zhou, Wei Ma. 2557 “Development of Variable Rate Fertilizer System Based on Optical Sensor”. Sensors & Transducers, Vol. 26, Special Issue, March 2014, pp. 1-6
- [40] สุริยา วรวงศ์ และ เกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์. 2560 “การออกแบบและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแมนย่ำในไร่อ้อยโดยเทคนิคการประมวลผลภาพ” การประชุมวิชาการสมาคมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติครั้งที่ 10 ประจำปี 2560 ,หน้า 198-203
- [41] Sathittham Sangthong. 2559. เข้าใช้งาน Raspberry Pi ด้วยวิธี Remote Desktop (RDP) ทั้ง 5 แพลตฟอร์ม [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://medium.com/sathittham/rpi-เข้าใช้งาน-raspberry-pi-ด้วยวิธี-remote-desktop-rdp-ทั้ง-5-แพลตฟอร์ม>
- [42] รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ 2556 วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ (เล่ม1) กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

รายละเอียดชุดคำสั่งโปรแกรมที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

import time
import math
import serial
import pynmea2
import utm
import RPi.GPIO as GPIO
from time import sleep
from osgeo import gdal, ogr
import sys
import RPi.GPIO as GPIO
import time
import board
import busio
import adafruit_pca9685
from pygame import mixer

i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)
pca = adafruit_pca9685.PCA9685(i2c)

pca.frequency = 1000
pwm = pca.channels[0]

mixer.init()
beep = mixer.Sound('beep-02.wav')
beep.set_volume(10)

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)
GPIO.setup(16, GPIO.OUT)
GPIO.setup(20, GPIO.OUT)
GPIO.setup(21, GPIO.OUT)

try:
    ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 38400, 8, 'N', 1, timeout=1)
except:
    ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB1', 38400, 8, 'N', 1, timeout=1)
serial.writeTimeoutError

#map value
def map (x,in_min,in_max,out_min,out_max):
    return (x-in_min)*(out_max - out_min) / (in_max - in_min) +
    out_min

#PWM Value
def D2PWM (dutycycle):
    PWM = dutycycle*655.35
    return int(PWM)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#Calibration Value
offset = -9.363
slope = 1.094
width = 0.9

# Reading the TIFF image
# input raster
inputRaster = '02R.tiff'
ds = gdal.Open(inputRaster) # open dataset
ndviBand = ds.GetRasterBand(1) # Getting raster band
transform_data = ds.GetGeoTransform() # Get raster georeference
information

cols = ds.RasterXSize
rows = ds.RasterYSize
X0 = transform_data[0]
Y0 = transform_data[3]
dX = transform_data[1]
dY = transform_data[5]

px_old = 0

while True:
    data = ser.readline().decode('utf-8')
    #print(data)

    if (data.startswith('$GPRMC')):
        fix = pynmea2.parse(data)
        ts = fix.timestamp.strftime('%H:%M:%S')
        lat = fix.latitude
        lon = fix.longitude
        speed = fix.spd_over_grnd / 0.54 # km/h

        utm_coordinate = utm.from_latlon(lat, lon)
        east = utm_coordinate[0]
        north = utm_coordinate[1]
        zone = utm_coordinate[2]
        Xi = east - X0
        Yi = north - Y0

        px = math.floor(Xi/dX)
        py = math.floor(Yi/dY)

        if px < 0 or px >= cols or py < 0 or py >= rows :
            rate = 0
        else:
            pixelValue = ndviBand.ReadAsArray(px, py, 1, 1)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    rate = pixelValue[0][0]
    if px != px_old:
        beep.play()

    feed = speed * int(rate) * width / 5.76
    PwM = int((feed - offset) / slope)
    dt = D2PWM(PwM)
    pwm.duty_cycle = dt

    px_old = px    # save px for the next comparison

    if Xi < -5 or Xi > 35 :
        #No LED ,overlay
        GPIO.output(20,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(21,GPIO.HIGH)
    elif Xi < 0 or Xi > 30 :
        #RED : close to map
        GPIO.output(16,GPIO.LOW)
        GPIO.output(20,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(21,GPIO.HIGH)
    elif Xi < 15:
        #GREEN :in map (1st pixel)
        GPIO.output(20,GPIO.LOW)
        GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(21,GPIO.HIGH)
    else:
        #BLUE : in map (2nd pixel)
        GPIO.output(21,GPIO.LOW)
        GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(20,GPIO.HIGH)

    print('%s,%5.1f, %5.1f,%5.1f, %2d,%2d, %10.2f,%10.2f, %5.1f,
%5.1f, %4d' %(ts,speed,Xi,Yi,px,py,east,north,rate,feed,PwM))
    else:
        print('NO GPS')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ข้อมูลการทดสอบ

1.1. ออกแบบและทดสอบระบบควบคุม (ต้นแบบ)

1.1.1. ข้อมูลการสอบเทียบระบบ (ตารางที่ ข.1)

PWM & q_t				
%PWM	g	g/s	AVG	SD
25	827.5	27.58		
25	823.5	27.45		
25	799.0	26.63		
25	800.0	26.67		
25	806.5	26.88	27.04	0.45
38	1330.0	44.33		
38	1338.5	44.62		
38	1333.0	44.43		
38	1308.0	43.60		
38	1313.5	43.78	44.15	0.44
50	1865.0	62.17		
50	1892.0	63.07		
50	1896.0	63.20		
50	1860.0	62.00		
50	1862.5	62.08	62.50	0.58
63	2360.0	78.67		
63	2360.5	78.68		
63	2368.0	78.93		
63	2355.5	78.52		
63	2369.0	78.97	78.75	0.19
75	2953.5	98.45		
75	2957.5	98.58		
75	2957.5	98.58		
75	2956.5	98.55		
75	3016.0	100.53	98.94	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2. ข้อมูลการทดสอบภายในสถานีทดสอบ (ตารางที่ ข.2)

Width	Speed	rate	weight	qt- Theory	qt- Measured	Qa- Theory	Qa- Measured	Error	SD	RMSE
0.75	3	30	340.5	11.75	12.1	30	31	0.7		0.6
0.75	3	30	331.5	11.75	11.8	30	30	0.0		
0.75	3	30	330.5	11.75	11.7	30	30	-0.1		
0.75	3	30	341	11.75	12.1	30	31	0.9		
0.75	3	30	323	11.75	11.5	30	29	-0.7		
0.75	5	30	555.5	19.58	19.7	30	30	0.2		
0.75	5	30	562.5	19.58	19.9	30	31	0.6		
0.75	5	30	539.5	19.58	19.1	30	29	-0.7		
0.75	5	30	560.5	19.58	19.9	30	30	0.5		
0.75	5	30	563	19.58	20.0	30	31	0.6		
0.75	7	30	764.5	27.41	27.1	30	30	-0.3		
0.75	7	30	759.5	27.41	26.9	30	29	-0.5		
0.75	7	30	766	27.41	27.2	30	30	-0.3		
0.75	7	30	765.5	27.41	27.1	30	30	-0.3		
0.75	7	30	777	27.41	27.6	30	30	0.2	0.5	
0.75	3	50	544.5	19.58	19.3	50	49	-0.7		
0.75	3	50	553	19.58	19.6	50	50	0.1		
0.75	3	50	552.5	19.58	19.6	50	50	0.0		
0.75	3	50	560	19.58	19.9	50	51	0.7		
0.75	3	50	545	19.58	19.3	50	49	-0.6		
0.75	5	50	924	32.63	32.8	50	50	0.2		
0.75	5	50	928.5	32.63	32.9	50	50	0.5		
0.75	5	50	935.5	32.63	33.2	50	51	0.8		
0.75	5	50	938	32.63	33.3	50	51	1.0		
0.75	5	50	910	32.63	32.3	50	49	-0.5		
0.75	7	50	1280.5	45.68	45.4	50	50	-0.3		
0.75	7	50	1283	45.68	45.5	50	50	-0.2		
0.75	7	50	1267	45.68	44.9	50	49	-0.8		
0.75	7	50	1289.5	45.68	45.7	50	50	0.1		
0.75	7	50	1288	45.68	45.7	50	50	0.0	0.5	
0.75	3	70	768.5	27.41	27.3	70	70	-0.4		
0.75	3	70	762	27.41	27.0	70	69	-1.0		
0.75	3	70	778	27.41	27.6	70	70	0.5		
0.75	3	70	786.5	27.41	27.9	70	71	1.2		
0.75	3	70	772	27.41	27.4	70	70	-0.1		
0.75	5	70	1262.5	45.68	44.8	70	69	-1.4		
0.75	5	70	1294	45.68	45.9	70	70	0.3		
0.75	5	70	1282	45.68	45.5	70	70	-0.3		
0.75	5	70	1292.5	45.68	45.8	70	70	0.2		
0.75	5	70	1284.5	45.68	45.5	70	70	-0.2		
0.75	7	70	1788	63.95	63.4	70	69	-0.6		
0.75	7	70	1794.5	63.95	63.6	70	70	-0.3		
0.75	7	70	1785.5	63.95	63.3	70	69	-0.7		
0.75	7	70	1773	63.95	62.9	70	69	-1.2		
0.75	7	70	1835	63.95	65.1	70	71	1.2	0.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.3. ข้อมูลการทดสอบภายในแปลงทดสอบ (ตารางที่ ข.3)

Width	Speed	rate	weight	Qt- Theory	Qt- Measured	Qa- Theory	Qa- Measured	Error	SD	RMSE
0.75	3.2	30	76	12.53	13.51	30	32	2		6.0
0.75	3.2	30	59	12.53	10.49	30	25	-5		
0.75	3.2	30	66.5	12.53	11.82	30	28	-2		
0.75	3.2	30	62	12.53	11.02	30	26	-4		
0.75	3.2	30	80	12.53	14.22	30	34	4		
0.75	5.1	30	41.5	19.97	11.76	30	18	-12		
0.75	5.1	30	58.5	19.97	16.58	30	25	-5		
0.75	5.1	30	53.5	19.97	15.16	30	23	-7		
0.75	5.1	30	45.5	19.97	12.89	30	19	-11		
0.75	5.1	30	53	19.97	15.02	30	23	-7		
0.75	7.1	30	86	27.80	33.92	30	37	7		
0.75	7.1	30	81	27.80	31.95	30	34	4		
0.75	7.1	30	78	27.80	30.77	30	33	3		
0.75	7.1	30	83	27.80	32.74	30	35	5		
0.75	7.1	30	86	27.80	33.92	30	37	7	6.2	
0.75	3.2	50	119	20.88	21.16	50	51	1		
0.75	3.2	50	90.5	20.88	16.09	50	39	-11		
0.75	3.2	50	95.5	20.88	16.98	50	41	-9		
0.75	3.2	50	105.5	20.88	18.76	50	45	-5		
0.75	3.2	50	141	20.88	25.07	50	60	10		
0.75	5.1	50	132	33.28	37.40	50	56	6		
0.75	5.1	50	106	33.28	30.03	50	45	-5		
0.75	5.1	50	120	33.28	34.00	50	51	1		
0.75	5.1	50	135.5	33.28	38.39	50	58	8		
0.75	5.1	50	109.5	33.28	31.03	50	47	-3		
0.75	7.1	50	113	46.33	44.57	50	48	-2		
0.75	7.1	50	120.5	46.33	47.53	50	51	1		
0.75	7.1	50	137	46.33	54.04	50	58	8		
0.75	7.1	50	141	46.33	55.62	50	60	10		
0.75	7.1	50	115	46.33	45.36	50	49	-1	6.6	
0.75	3.2	70	146.5	29.23	26.04	70	62	-8		
0.75	3.2	70	168	29.23	29.87	70	72	2		
0.75	3.2	70	174	29.23	30.93	70	74	4		
0.75	3.2	70	173.5	29.23	30.84	70	74	4		
0.75	3.2	70	156.5	29.23	27.82	70	67	-3		
0.75	5.1	70	173	46.59	49.02	70	74	4		
0.75	5.1	70	168	46.59	47.60	70	72	2		
0.75	5.1	70	180	46.59	51.00	70	77	7		
0.75	5.1	70	158	46.59	44.77	70	67	-3		
0.75	5.1	70	180	46.59	51.00	70	77	7		
0.75	7.1	70	181.5	64.86	71.59	70	77	7		
0.75	7.1	70	173	64.86	68.24	70	74	4		
0.75	7.1	70	168	64.86	66.27	70	72	2		
0.75	7.1	70	180	64.86	71.00	70	77	7		
0.75	7.1	70	180	64.86	71.00	70	77	7	4.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2. ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ระบบต้นแบบ)

1.2.1. การทดสอบภายในสถานทดสอบ

สมมติฐาน $H_0 : \mu = 30$
(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

$H_a : \mu \neq 30$
(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์

One-Sample Statistics						
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean		
ST_Rate_30	15	30.0480	.51488	.13294		

One-Sample Test						
Test Value = 30						
95% Confidence Interval of the Difference						
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
ST_Rate_30	.361	14	.723	.04800	-.2371	.3331

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐาน

$$H_0 : \mu = 50$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 50$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้แตกต่างกับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ST_Rate 50	15	50.0160	.56150	.14498

One-Sample Test

Test Value = 50

95% Confidence Interval of the
Difference

t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper	
ST_Rate 50	.110	14	.914	.01600	-.2949	.3269

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้**ไม่มีความแตกต่าง**ไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐาน

$$H_0 : \mu = 70$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ต่ำกว่าอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 70$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ต่ำกว่าอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ST_Rate_70	15	69.8240	.77782	.20083

One-Sample Test

Test Value = 70

95% Confidence Interval of the

Difference

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
ST_Rate_70	-.876	14	.396	-.17600	-.6067	.2547

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2. การทดสอบภายในแปลงทดสอบ

สมมุติฐาน
 $H_0 : \mu = 30$
 (อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

$H_a : \mu \neq 30$
 (อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์

One-Sample Statistics						
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean		
FT_Rate_30	15	28.6000	6.38972	1.64982		

One-Sample Test						
Test Value = 30						
95% Confidence Interval of the Difference						
t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper	
FT Rate 30	-0.849	14	.410	-1.40000	-4.9385	2.1385

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติฐาน

$$H_0 : \mu = 50$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 50$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้แตกต่างกับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
FT_Rate_50	15	50.6000	6.69541	1.72875

One-Sample Test

Test Value = 50

t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
				Lower	Upper	
FT_Rate_50	.347	14	.734	.60000	-3.1078	4.3078

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติฐาน

$$H_0 : \mu = 70$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 70$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
FT_Rate_70	15	72.8667	4.47001	1.15415

One-Sample Test

Test Value = 70

95% Confidence Interval of the
Difference

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
FT_Rate_70	2.484	14	.026	2.86667	.3913	5.3421

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3. ออกแบบและทดสอบระบบควบคุม (ที่ปรับปรุง)

1.3.1. ข้อมูลการสอบเทียบระบบ (ตารางที่ ข.4)

PWM & Qt			
% PWM	g	g/s	AVG
25	237.5	23.75	
25	265.5	26.55	
25	263.5	26.35	
25	235.0	23.50	
25	278.0	27.80	25.59
38	422.5	42.25	
38	493.0	49.30	
38	440.0	44.00	
38	452.5	45.25	
38	463.0	46.30	45.42
50	675.5	67.55	
50	631.5	63.15	
50	627.0	62.70	
50	624.5	62.45	
50	680.5	68.05	64.78
63	909.5	90.95	
63	824.5	82.45	
63	828.5	82.85	
63	868.5	86.85	
63	840.0	84.00	85.42
75	980.5	98.05	
75	1004.0	100.40	
75	1017.0	101.70	
75	1061.0	106.10	
75	1000.0	100.00	101.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2. ข้อมูลการทดสอบในสถานีทดสอบ (ตารางที่ ข.5)

Width	velocity	Qt-Theory	Qt-measured	Qa-Theory	Qa-measured	Error	SD	RMSE
0.75	3	11.7	11.7	30	29.76	0.2		1.3
0.75	3	11.7	11.7	30	29.89	0.1		
0.75	3	11.7	10.8	30	27.59	2.4		
0.75	5	19.6	18.5	30	28.35	1.6		
0.75	5	19.6	20.0	30	30.57	-0.6		
0.75	5	19.6	19.4	30	29.73	0.3		
0.75	7	27.4	29.4	30	32.18	-2.2		
0.75	7	27.4	26.8	30	29.28	0.7		
0.75	7	27.4	28.4	30	31.03	-1.0	1.3	
0.75	3	19.6	19.1	50	48.79	1.2		
0.75	3	19.6	18.8	50	48.02	2.0		
0.75	3	19.6	19.5	50	49.68	0.3		
0.75	5	32.6	31.3	50	47.97	2.0		
0.75	5	32.6	32.5	50	49.81	0.2		
0.75	5	32.6	34.0	50	52.03	-2.0		
0.75	7	45.7	45.2	50	49.43	0.6		
0.75	7	45.7	46.5	50	50.85	-0.8		
0.75	7	45.7	45.3	50	49.59	0.4	1.2	
0.75	3	27.4	27.3	70	69.73	0.3		
0.75	3	27.4	27.3	70	69.60	0.4		
0.75	3	27.4	26.8	70	68.45	1.5		
0.75	5	45.7	45.9	70	70.27	-0.3		
0.75	5	45.7	45.7	70	69.96	0.0		
0.75	5	45.7	46.6	70	71.34	-1.3		
0.75	7	63.9	63.9	70	69.95	0.0		
0.75	7	63.9	61.6	70	67.38	2.6		
0.75	7	63.9	64.7	70	70.83	-0.8	1.1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3. ข้อมูลการทดสอบในแปลงจริง (ตารางที่ ข.6)

Width	velocity	Weight	Qt-Theory	Qt-measured	Qa-Theory	Qa-measured	Error	SD	RMSE
0.75	3	193	11.75	13.40	30	34.2	-4	2	2.14
0.75	3	186	11.75	12.92	30	33.0	-3		
0.75	3	181.5	11.75	12.60	30	32.2	-2		
0.75	5	179.5	19.58	20.78	30	31.8	-2		
0.75	5	180	19.58	20.83	30	31.9	-2		
0.75	5	160	19.58	18.52	30	28.4	2		
0.75	7	176	27.41	28.52	30	31.2	-1		
0.75	7	163.5	27.41	26.49	30	29.0	1		
0.75	7	169.5	27.41	27.47	30	30.1	0		
0.75	3	310.5	19.58	21.56	50	55.1	-5	2	
0.75	3	301	19.58	20.90	50	53.4	-3		
0.75	3	278	19.58	19.31	50	49.3	1		
0.75	5	299.5	32.63	34.66	50	53.1	-3		
0.75	5	293	32.63	33.91	50	52.0	-2		
0.75	5	280.5	32.63	32.47	50	49.8	0		
0.75	7	297.5	45.68	48.21	50	52.8	-3		
0.75	7	274	45.68	44.40	50	48.6	1		
0.75	7	280.5	45.68	45.45	50	49.8	0		
0.75	3	404	27.41	28.06	70	71.7	-2	1	
0.75	3	384	27.41	26.67	70	68.1	2		
0.75	3	380.5	27.41	26.42	70	67.5	3		
0.75	5	400	45.68	46.30	70	71.0	-1		
0.75	5	389	45.68	45.02	70	69.0	1		
0.75	5	389.5	45.68	45.08	70	69.1	1		
0.75	7	401	63.95	64.98	70	71.1	-1		
0.75	7	394	63.95	63.84	70	69.9	0		
0.75	7	386.5	63.95	62.63	70	68.6	1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4. ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ระบบที่ปรับปรุง)

1.4.1. การทดสอบในสถานทดสอบ

สมมติฐาน

$$H_0 : \mu = 30$$

(อัตราการหยุดที่วัดได้เท่ากับอัตราการหยุดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 30$$

(อัตราการหยุดที่วัดได้แตกต่างกับอัตราการหยุดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์

One-Sample Statistics						
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean		
ST_ActualRate_30	9	29.8200	1.37105	.45702		

One-Sample Test						
Test Value = 30						
95% Confidence Interval of the Difference						
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
ST_ActualRate_30	-.394	8	.704	-.18000	-1.2339	.8739

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐาน

$$H_0 : \mu = 50$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 50$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้แตกต่างกับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ST_ActualRate_50	9	49.5744	1.29182	.43061

One-Sample Test

Test Value = 50

95% Confidence Interval of the Difference

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
ST_ActualRate_50	-.988	8	.352	-.42556	-1.4185	.5674

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐาน

$$H_0 : \mu = 70$$

(อัตราการหยุดที่วัดได้ต่ำกว่าอัตราการหยุดที่กำหนดที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 70$$

(อัตราการหยุดที่วัดได้ต่ำกว่าอัตราการหยุดที่กำหนดที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ST_ActualRate_70	9	69.7233	1.19229	.39743

One-Sample Test

Test Value = 70

95% Confidence Interval of the Difference

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
ST_ActualRate_70	-.696	8	.506	-.27667	-1.1931	.6398

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2. การทดสอบในแปลงจริง

สมมติฐาน

$$H_0 : \mu = 30$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 30$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
FT_ActualRate_30	9	31.3111	1.86644	.62215

One-Sample Test

Test Value = 30

95% Confidence Interval of the
Difference

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
FT_ActualRate_30	2.107	8	.068	1.31111	-.1236	2.7458

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติฐาน

$$H_0 : \mu = 50$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 50$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
FT_ActualRate_50	9	51.5444	2.23836	.74612

One-Sample Test

Test Value = 50

95% Confidence Interval of the Difference

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
FT_ActualRate_50	2.070	8	.072	1.54444	-.1761	3.2650

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติฐาน

$$H_0 : \mu = 70$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 70$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
FT_ActualRate_70	9	69.5556	1.45612	.48537

One-Sample Test

Test Value = 70

95% Confidence Interval of the Difference

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
FT_ActualRate_70	-.916	8	.387	-.44444	-1.5637	.6748

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 70 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5. ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ระบบที่พัฒนาขึ้น

1.5.1. ข้อมูลการสอบเทียบระบบ (ตารางที่ ข.7)

PWM & q_t			
%PWM	g	g/s	AVG
25	188.5	18.85	
25	187.0	18.70	
25	188.0	18.80	
25	182.0	18.20	
25	189.0	18.90	18.69
38	320.0	32.00	
38	316.5	31.65	
38	329.0	32.90	
38	322.0	32.20	
38	325.0	32.50	32.25
50	444.5	44.45	
50	440.5	44.05	
50	450.0	45.00	
50	442.0	44.20	
50	448.0	44.80	44.50
63	588.5	58.85	
63	583.5	58.35	
63	587.0	58.70	
63	591.5	59.15	
63	599.0	59.90	58.99
75	773.0	77.30	
75	726.5	72.65	
75	720.0	72.00	
75	730.0	73.00	
75	722.0	72.20	73.43
88	845.5	84.55	
88	847.5	84.75	
88	877.0	87.70	
88	865.0	86.50	
88	870.0	87.00	86.1
100	1000.5	100.05	
100	1022.0	102.20	
100	1002.5	100.25	
100	1000.5	100.05	
100	1015.0	101.50	100.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.2.ข้อมูลการทดสอบในแปลงทดสอบ (ตารางที่ ข.8)

Heading	rate	Speed	Width	Weight	times/pixel	Qt-Theory	Qt-Measured	Qa-Theory	Qa-measured	Error	summary	SD	RMSE
W	40	6.40	1.3	155.0	2.80	57.91	55.36	40	38	-2	40 kg/rai	2.29	3.9
W	40	6.42	1.3	152.0	3.00	58.10	50.67	40	35	-5	60 kg/rai	1.83	5.71
W	60	6.47	1.3	220.5	3.00	87.83	73.50	60	50	-10	West	2.38	4.57
W	60	6.46	1.3	223.0	2.80	87.73	79.64	60	54	-6	East	2.23	4.87
E	60	6.47	1.3	213.0	2.80	87.83	76.07	60	52	-8	Total	2.32	4.72
E	60	6.52	1.3	212.5	2.60	88.43	81.73	60	55	-5			
E	40	6.34	1.3	140.5	2.80	57.39	50.18	40	35	-5			
E	40	6.24	1.3	163.5	3.00	56.46	54.50	40	39	-1			
W	40	6.45	1.3	165.0	3.20	58.39	51.56	40	35	-5			
W	40	6.38	1.3	189.5	3.40	57.71	55.74	40	39	-1			
W	60	6.24	1.3	241.0	3.00	84.74	80.33	60	57	-3			
W	60	6.26	1.3	233.0	3.00	84.91	77.67	60	55	-5			
E	60	6.47	1.3	213.0	2.60	87.80	81.92	60	56	-4			
E	60	6.47	1.3	217.5	2.80	87.83	77.68	60	53	-7			
E	40	6.35	1.3	154.5	3.00	57.48	51.50	40	36	-4			
E	40	6.29	1.3	149.0	2.80	56.87	53.21	40	37	-3			
W	40	6.40	1.3	159.0	3.00	57.91	53.00	40	37	-3			
W	40	6.53	1.3	177.0	3.40	59.09	52.06	40	35	-5			
W	60	6.39	1.3	235.0	3.00	86.68	78.33	60	54	-6			
W	60	6.53	1.3	241.5	3.00	88.64	80.50	60	54	-6			
E	60	6.41	1.3	218.0	2.80	86.96	77.86	60	54	-6			
E	60	6.46	1.3	220.5	2.80	87.64	78.75	60	54	-6			
E	40	6.39	1.3	146.0	2.80	57.78	52.14	40	36	-4			
E	40	6.26	1.3	165.0	3.00	56.64	55.00	40	39	-1			
W	60	4.23	1.3	159.5	4.20	38.23	37.98	40	40	0			
W	60	4.22	1.3	145.5	4.20	38.13	34.64	40	36	-4			
W	40	4.23	1.3	218.5	4.00	57.45	54.63	60	57	-3			
W	40	4.21	1.3	235.0	4.20	57.21	55.95	60	59	-1			

1.5.3.ข้อมูลการทดสอบในแปลงทดสอบ (ตารางที่ ข.8) (ต่อ)

Heading	rate	Speed	Width	Weight	times/ pixel	Qt- Theory	Qt- Measured	Qa- Theory	Qa- measured	Error	summary	SD	RMSE
E	60	4.21	1.3	220.0	4.20	57.19	52.38	60	55	-5			
E	60	4.22	1.3	228.5	4.40	57.33	51.93	60	54	-6			
E	40	4.23	1.3	138.0	4.40	38.26	31.36	40	33	-7			
E	40	4.18	1.3	155.0	4.20	37.84	36.90	40	39	-1			
W	40	4.25	1.3	145.0	4.20	38.48	34.52	40	36	-4			
W	40	4.23	1.3	156.0	4.20	38.29	37.14	40	39	-1			
W	60	4.26	1.3	229.5	4.40	57.80	52.16	60	54	-6			
W	60	4.30	1.3	212.0	4.20	58.36	50.48	60	52	-8			
E	60	4.22	1.3	218.5	4.20	57.27	52.02	60	55	-5			
E	60	4.06	1.3	204.0	4.20	55.13	48.57	60	53	-7			
E	40	4.22	1.3	158.5	4.00	38.22	39.63	40	41	1			
E	40	4.23	1.3	146.0	4.20	38.30	34.76	40	36	-4			
W	40	4.24	1.3	156.0	4.00	38.35	39.00	40	41	1			
W	40	4.24	1.3	151.0	4.20	38.39	35.95	40	37	-3			
W	60	4.26	1.3	231.5	4.20	57.82	55.12	60	57	-3			
W	60	4.27	1.3	221.0	4.20	57.91	52.62	60	55	-5			
E	60	4.18	1.3	233.5	4.40	56.69	53.07	60	56	-4			
E	60	4.22	1.3	219.0	4.20	57.22	52.14	60	55	-5			
E	40	4.19	1.3	156.5	4.40	37.92	35.57	40	38	-3			
E	40	4.25	1.3	152.5	4.40	38.41	34.66	40	36	-4			

1.6. ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติ

1.6.1. การทดสอบในแปลงทดสอบ

สมมติฐาน $H_0 : \mu = 30$
(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

$H_a : \mu \neq 30$
(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์

One-Sample Statistics						
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean		
ActualRate_40	24	37.2083	2.08471	.42554		

One-Sample Test						
Test Value = 40						
95% Confidence Interval of the Difference						
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
ActualRate_40	-6.560	23	.000	-2.79167	-3.6720	-1.9114

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 40 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) (ค่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้น้อยกว่าค่าอัตราปุ๋ยที่กำหนด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติฐาน

$$H_0 : \mu = 60$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 60 กิโลกรัมต่อไร่)

$$H_a : \mu \neq 60$$

(อัตราการหยอดที่วัดได้ได้เท่ากับอัตราการหยอดที่กำหนดที่ 60 กิโลกรัมต่อไร่)

ผลการวิเคราะห์**One-Sample Statistics**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ActualRate_60	24	54.5833	1.90917	.38971

One-Sample Test

Test Value = 60

	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
ActualRate_60	-13.899	23	.000	-5.41667	-6.2228	-4.6105

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้มีความแตกต่างไปจากอัตราปุ๋ยที่กำหนดไว้ที่ 60 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) (ค่าอัตราปุ๋ยที่วัดได้น้อยกว่าค่าอัตราปุ๋ยที่กำหนด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7. ข้อมูลความคลาดเคลื่อนของระบบพิกัด GPS (ตารางที่ ข.9)

#	Low-Easting	High-Easting	Low-Westing	High-Westing
1	3.49	3.62	0.48	-3.66
2	3.56	4.15	1.25	-3.05
3	3.14	4.00	0.46	-2.60
4	3.07	4.04	1.53	-1.51
5	3.22	4.21	1.45	-0.95
6	2.80	4.12	1.73	-0.50
7	2.24	4.59	1.74	-0.30
8	1.58	1.89	3.12	-1.76
9	1.49	1.75	3.15	-1.98
10	1.49	1.72	2.73	-1.67
11	1.67	1.42	2.73	-1.24
12	1.62	1.15	2.43	-1.18
13	1.82	1.28	2.31	-1.16
14	1.46	1.59	2.05	-0.90
15	2.74	5.73	1.72	-3.48
16	2.83	5.89	1.76	-2.80
17	2.77	5.52	1.61	-2.94
18	2.65	5.42	1.68	-1.67
19	2.65	5.08	1.48	-0.46
20	2.76	5.18	1.62	-0.05
21	2.49	5.06	1.39	0.25
AVG	2.45	3.69	1.83	-1.60
MAX	3.56	5.89	3.15	0.25
MIN	1.46	1.15	0.46	-3.66
SD	0.70	1.67	0.72	1.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

รายละเอียดอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)



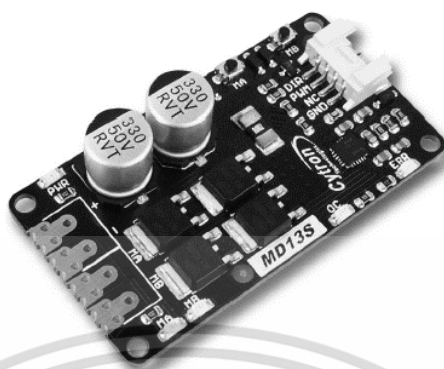
รูปที่ ค.1 มอเตอร์เกียร์

รายละเอียด

Make:	Zhejiang Unite Motor, China
Model:	MY1016Z2
Voltage:	24 V /36 V
Rated Power:	250 W
Full Load Current:	≤ 13.4 A
RPM:	3000
Rated Torque/N.m:	0.80 N.m
Efficiency:	$\geq 78\%$
Reduction Ratio:	9.78:1
Dimension:	37x32x26 cm
Weight:	2.115 Kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor Driver)



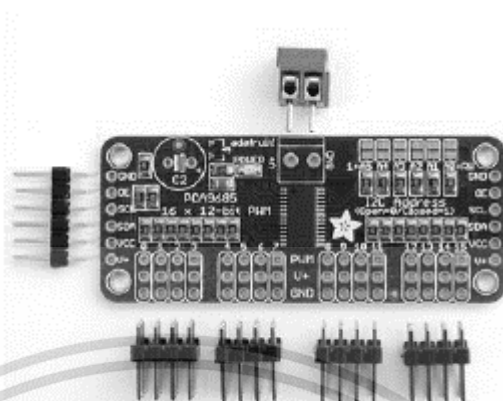
รูปที่ ค.2 วงจรขับมอเตอร์

รายละเอียด

Make	Cytron Technologies, Malaysia
Model:	MD13S
Input Voltage:	6 V - 30 V
Maximum Continuous Motor Current:	13 A
Peak Motor Current:	39 A
Maximum PWM Frequency:	20 KHz
Logic Input Low Level:	0 V - 0.5 V
Logic Input High Level:	3 V - 5.5 V
Weight:	22.5 g
Dimension:	33x61 mm
Support:	Lock-antiphase and sign-magnitude
PWM operation,	Fully NMOS H-Bridge, SMD
Compatible,	TTL PWM from microcontroller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วงจรขยายสัญญาณ PWM (PWM 12 bit 16 channels Module)



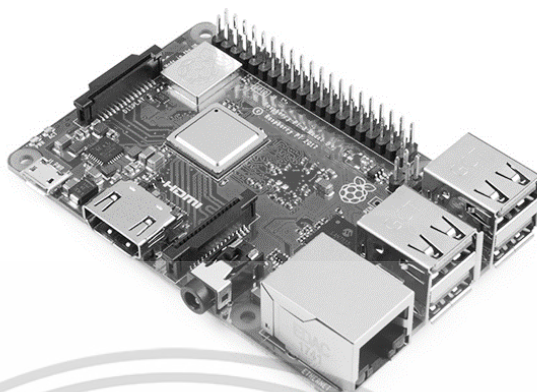
รูปที่ ค.3 วงจรขยายสัญญาณ PWM

รายละเอียด

Make:	Adafruit Industries, United State
Model:	PCA9865
Input voltage:	2.3 V – 5.5 V
Maximum External Clock:	50 MHz
Number of Channel:	16
Number of Bit:	12
Weight:	5.5 g
Dimension:	62.5x25.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. บอร์ด Raspberry Pi (Raspberry Pi Board)



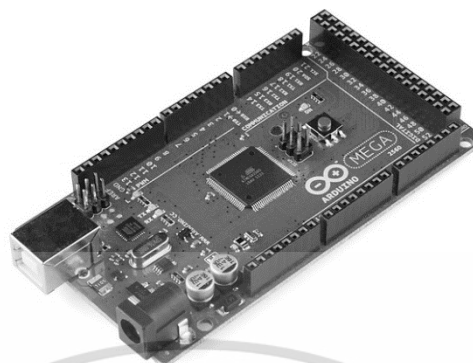
รูปที่ ค.4 บอร์ด Raspberry Pi

รายละเอียด

Make:	Raspberry Pi Foundation, United Kingdom
Model:	Raspberry Pi 3 Model B+
Input:	5 V/2.5 A DC
Processor:	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4 GHz
Memory:	1GB LPDDR2 SDRAM
Access:	Extended 40-pin GPIO header
Connectivity:	2.4 GHz and 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE, Gigabit Ethernet over USB 2.0 (maximum throughput 300 Mbps), 4 × USB 2.0 ports
Video & sound:	1 × full size HDMI MIPI DSI display port MIPI CSI camera port 4 pole stereo output and composite video port
Multimedia:	H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode(1080p30); OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics
SD card support:	Micro SD format for loading operating system and data storage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. บอร์ด Arduino Mega (Arduino Mega Board)



รูปที่ ค.5. บอร์ด Arduino Mega

รายละเอียด

Make:	Arduino
Model:	MEGA 2560 R3
Microcontroller:	ATmega2560
Operating Voltage:	5V
Input Voltage (recommended):	7-12V
Input Voltage (limits):	6-20V
Digital I/O Pins:	54
Analog Input Pins:	16
DC Current per I/O Pin:	40 mA
DC Current for 3.3V Pin:	50 mA
Flash Memory:	256 KB
SRAM:	8 KB
EEPROM:	4 KB
Clock Speed:	16 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. วงจรรับสัญญาณ GPS (GPS Receiver)



รูปที่ ค.6 วงจรรับสัญญาณ GPS

รายละเอียด

Make:	u-blox, Switzerland
Model:	Neo-M8N
Input power:	2.7 V to 3.6 V
Memory:	Flash
Supported antennas:	Active and passive
Data-logger:	position, velocity, and time
Receiver type:	72-channel u-blox M8 engine
Nav. update rate Single GNSS:	up to 18 HZ
Concurrent GNSS:	up to 10 Hz
Position accuracy:	2.0 m CEP
Acquisition Cold starts:	26 s
Aided starts:	2 s
Reacquisition:	1.5 s
Sensitivity Tracking & Nav:	-167 dBm
Cold starts:	-148 dBm
Hot starts:	-156 dBm
Operating temp.:	-40° C to 85° C
Storage temp.:	-40° C to 85° C
Time pulse Configurable:	0.25 Hz to 10 MH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จอแสดงผลภาพ LCD (Liquid crystal display)



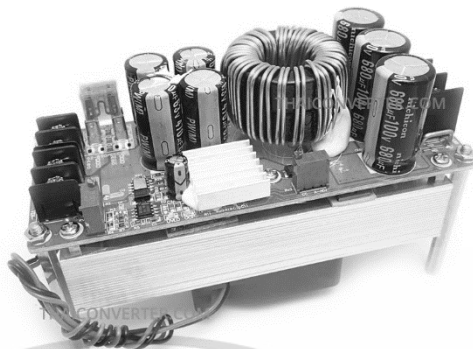
รูปที่ ค.7. จอแสดงผลภาพ LCD

รายละเอียด

Display format:	20 x 4 characters, 5 x 8 dots includes cursor
Built-in controller:	ST 7066 (or equivalent)
Duty cycle:	1/16
Input power:	5 V / 3 V
Can be Driven by:	pin 1, pin 2, pin 15, pin 16 or A and K
N.V. optional:	3 V
Dimension:	62.5x146 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า (Step-up Regulator)



รูปที่ ค.8. วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า

รายละเอียด

Input voltage:	12-60V DC
Input Current:	30A (MAX)
Output voltage:	12-80V continuously adjustable
Constant current range:	0.8-20A (+/- 0.3A)
Output Current:	30A, Max
Quiescent current:	15-30mA
Working temperature:	-40 ~ + 85 degrees
Conversion efficiency:	up to 95%
Overcurrent protection:	none
Short circuit protection:	Fuse 30A
Weight:	490 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวสุชาวดี สীগัน
วัน เดือน ปีเกิด 20 ธันวาคม 2537 ที่ขอนแก่น
ที่อยู่ 33 ม.4 ตำบลนาชุมแสง อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น 40150
โทร.095-526-9597
ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน -
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย -



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้