

รายงานฉบับสมบูรณ์

แผนการวิจัย “การจัดการเครื่องจักรกลการเกษตรในไร่อ้อยและระบบการ
ผลิตอ้อยเพื่อยกระดับคุณภาพผลผลิตอ้อย”

โดย

นายสุดสายสิน แก้วเรือง และคณะ

คณะเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เดือน ธันวาคม ปี 2562

สัญญาเลขที่ RDG61T0066

รายงานฉบับสมบูรณ์

แผนการวิจัย “การจัดการเครื่องจักรกลการเกษตรในไร่อ้อยและระบบการผลิตอ้อยเพื่อ
ยกระดับคุณภาพผลผลิตอ้อย”

คณะผู้วิจัย สังกัด

นายสุตสายสิน แก้วเรือง

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นายทรงยศ โชติชุติมา

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นายธนัชสันต์ พูนไพบูลย์พัฒน์

คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

นายศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นางสาวขวัญตรี แสงประชานารักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชุดโครงการวิจัยด้านอ้อยและน้ำตาล

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)	4-6
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	7
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	7
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	8-9
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	9
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	9

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

เครื่องจักรในไร่อ้อยเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการผลิตอ้อยในปัจจุบัน ซึ่งช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิต ลดปัญหาแรงงาน และเวลาในการผลิตอ้อย อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องจักรในประเทศยังคงต้องการพัฒนาและปัญหาผลกระทบบางประการที่เกิดจากการใช้เครื่องจักร แผนการวิจัยนี้มีเป้าหมายที่สำคัญ 2 ส่วน คือ 1. การแก้ปัญหาการใช้เครื่องจักรกับระบบการผลิตอ้อย โดยประกอบด้วยการจัดการปัญหาที่เกิดจากเครื่องจักร เช่น การอัดแน่นของดิน การจัดการระบบจราจรในไร่อ้อยที่ไม่เหมาะสม ส่งผลระยะยาวต่อคุณสมบัติของดินและผลผลิตอ้อยในที่สุด และ 2. พัฒนาเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจัดการเครื่องจักรในไร่อ้อยเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด มีราคาถูกลง และสามารถปรับใช้กับสภาพไร่อ้อยของเกษตรกรในประเทศไทย ซึ่งแผนวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 โครงการย่อย ซึ่งเป็นรายงานผลการดำเนินงานในช่วง 12 เดือน

โครงการย่อยที่ 1 ศึกษารูปแบบการจัดการของเครื่องเก็บเกี่ยวอ้อย และผลกระทบของเครื่องจักรกลต่อการบดอัดดินที่ใช้ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวอ้อย ซึ่งเครื่องจักรที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่น่าจะก่อให้เกิดการอัดแน่นของดิน เนื่องจากในกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อยมักมีการบรรทุกผลผลิตอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ ซึ่งน้ำหนักหลายตันที่กดทับลงไปบนดิน อาจส่งผลให้มีโอกาสเกิดการอัดแน่นของดินได้มากกว่าเครื่องจักรกลชนิดอื่น การเก็บเกี่ยวอ้อยเหล่านี้มักก่อให้เกิดชั้นดินดานไถพรวนขึ้นในพื้นที่ปลูกอ้อย และอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าในแปลงอ้อยต่อ นอกจากนี้ สภาพแปลงอ้อยที่มีการเผาและไม่เผาใบอ้อยอาจส่งผลต่อการเกิดการอัดแน่นของดินที่แตกต่างกัน แม้จะเกษตรกรมีการไถระเบิดชั้นดินดาน แต่ไม่ใช่เป็นการแก้ปัญหาการเกิดชั้นดินดานอย่างถาวร หากไม่มีการจัดการดินที่ถูกต้องและการจัดการการใช้เครื่องจักรกลเก็บเกี่ยวอย่างเหมาะสม โดยโครงการฯ นี้เป็นการศึกษารูปแบบการใช้เครื่องจักรเก็บเกี่ยวอ้อยเป็นหลัก เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประเมินผลกระทบที่เกิดกับคุณสมบัติของดิน และนำไปสู่การหาวิธีการบรรเทาปัญหาการอัดแน่นของดิน จากผลการทดลอง พบว่าแปลงทดสอบทั้งสองพื้นที่แม้ว่าสภาพรวมจะมีเนื้อดินที่เหมือนกัน คือ เป็นดินเหนียว แต่ปริมาณความชื้นของดินในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วง มีปริมาณความชื้นในดินน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง อาจเนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวงเกือบเท่าตัว เนื่องจากแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วงไม่มีการใส่ปุ๋ยคอกเพิ่มอินทรีย์วัตถุ ส่วนแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง มีการใส่ปุ๋ยคอกจากฟาร์มเพื่อช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อย ในพื้นที่อำเภอนองม่วงที่ไม่มีการใส่อินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อย การเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าการเก็บเกี่ยวแบบอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีการเผาอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว นอกจากนี้ ในสภาพแปลงอ้อยที่เป็นดินเหนียวและไม่มีการใส่อินทรีย์วัตถุ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก เนื่องจาก

จะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินเพิ่มขึ้นที่ระดับชั้นไทรพรวนความลึก 0-30 เซนติเมตร ภายหลังการเก็บเกี่ยว ขณะที่แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่นที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าจะสามารถช่วยลดค่าความหนาแน่นของดินชั้นไทรพรวนลงได้ (บริเวณชั้น 0-30 เซนติเมตร) แสดงให้เห็นว่าเกษตรกรในพื้นที่ดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายแข็งที่มีอินทรีย์วัตถุน้อย และมีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ควรเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อยให้มากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีอ้อยต่อ โดยทั้งสองพื้นที่แปลงทดสอบเป็นดินเหนียว และดินเหนียวปนทรายแข็ง ซึ่งง่ายต่อการอัดแน่นของดิน อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของดิน มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ใช้ปลูกอ้อย ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะแปรผันไปตามการเข้าทำงานของเครื่องจักรกลอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเครื่องจักรที่ใช้ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว ซึ่งการจัดการเครื่องจักรกับเกี่ยวให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ โดยภาพรวม แปลงทดสอบทั้งอ้อยต่อและอ้อยปลูกในพื้นที่อำเภอลำทะเมนชัยเป็นดินเหนียว ทำให้ภายหลังการเก็บเกี่ยว จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าแปลงทดสอบในพื้นที่อำเภอนางรอง โดยเฉพาะแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า

โครงการย่อยที่ 2 ศึกษาการควบคุมจราจรในฟาร์มเป็นการผสมผสานเทคโนโลยีทางด้านภูมิสารสนเทศกับเครื่องจักรกลเกษตร เพื่อกำหนดแนวทางการเดินรถและแถวปลูกของอ้อย โดยในต่างประเทศ เช่น ออสเตรเลีย จีน สหรัฐอเมริกา นิยมใช้การระบุตำแหน่งบนโลก (global positioning system: GPS) อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวนี้ยังมีราคาที่ยังค่อนข้างแพง อาจจะเหมาะสำหรับชาวไร่หรือบริษัทที่มีพื้นที่ปลูกที่มากหลายร้อยหลายพันไร่ อย่างไรก็ตามชาวไร่อ้อยพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างส่วนใหญ่แล้วเป็นชาวไร่ขนาดกลางและขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดของแปลงปลูก 10 -30 ไร่ ด้วยขนาดแปลงดังกล่าวนี้ จึงมีแนวคิดที่จะทดสอบระบบการควบคุมจราจรในฟาร์มโดยใช้เทคโนโลยีที่ชาวไร่มีอยู่บนพื้นที่ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการจัดการระบบดังกล่าวโดยไม่อาศัย GPS ผลการทดลองพบว่าในช่วง 6 เดือนแรก ดำเนินการทดลองที่แปลงบริษัท น้ำตาลพิษณุโลก จำกัด ต.สระเศรษฐี อ.บางกระทุ่ม จ.พิษณุโลก โดยทำการเตรียมพื้นที่ด้วยผลพลรวม 24 จาน 1 รอบ ไถระเบิดดินดานแบบตราหมากรุก 1 ครั้ง และพาวเวอร์แฮร์โรว จำนวน 2 ครั้ง ปลูกอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 ที่ระยะปลูก 1.8 เมตร ของระบบการควบคุมจราจรในฟาร์ม และระยะ 1.5 เมตร ตามวิธีของเกษตรกร อย่างไรก็ตาม ภายหลังการให้น้ำที่ระยะ 15 วันหลังปลูก แปลงทดลองได้ประสบปัญหาภัยแล้งระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม 2562 ทำให้พื้นที่เก็บน้ำของแปลงทดลองไม่มีน้ำสำรองพอที่จะให้แก่อ้อย จึงทำให้อ้อยส่วนใหญ่ตายไปมากกว่า 50% จึงทำให้ไม่สามารถดำเนินการทดลองต่อไป และไม่สามารถตอบวัตถุประสงค์ของการทดลองได้

โครงการย่อยที่ 3 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือพัฒนาระบบสนับสนุนการควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยโดยใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก อุปกรณ์ส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกอ้อยติดตามรถตัดอ้อย ประกอบด้วย 1) เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก 2) กล้องควบคุมและแสดงผล (กล้อง No. 1) 3) กล้องรับสัญญาณแบบไร้สาย (กล้อง No. 2) 4) Joy stick และ 5) แบตเตอรี่ เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่ติดตั้งด้านหลังชุดเกี่ยวโน้มต้นอ้อยทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของรถตัดอ้อยระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกกับต้นอ้อย 50 เซนติเมตร เซ็นเซอร์จะทำหน้าที่ระบุตำแหน่งของรถตัดอ้อยแสดงผลโดยสัญญาณหลอดไฟเพื่อสนับสนุนการควบคุมแนวการวิ่งของรถตัดอ้อย และติดตั้งเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกบริเวณสะพานลำเลียงท่อนอ้อยเพื่อวัดระดับกองท่อนอ้อยในกระบะรถบรรทุก ระยะระหว่างกองท่อนอ้อยในกระบะรถบรรทุกกับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกถูกกำหนดไว้ที่ระยะห่าง 50 เซนติเมตร เมื่อระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์กับส่วนบนของกองอ้อยในกระบะรถบรรทุกมีขนาดน้อยกว่า 50 เซนติเมตร อุปกรณ์จะแสดงสัญญาณในห้องคนขับรถตัดอ้อย ในลักษณะสัญญาณไฟกระพริบที่กล้องอุปกรณ์ภายในห้องคนขับรถตัดอ้อย จากนั้นคนขับรถตัดอ้อยจะแสดงสัญญาณไฟกระพริบไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณในห้องคนขับรถบรรทุกเพื่อขับรถบรรทุกเลื่อนไปทางด้านหน้าและด้านหลัง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยที่ถูกพัฒนาโดยการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกนั้นสามารถตรวจวัดแนวต้นอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่พัฒนาสามารถแสดงผลในลักษณะหลอดไฟกระพริบทั้งในกรณีการควบคุมแนวการวิ่งของรถตัดอ้อยและการควบคุมระยะห่างระหว่างชุดสายพานลำเลียงอ้อยกับกระบะรถบรรทุกอ้อย ระยะห่างระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการวัดระยะทางของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกโดยพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแนวต้นอ้อยเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความถูกต้องในการวัดระยะลดลง ขณะที่ความเร็วการเดินทางของยานพาหนะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการวัดระยะทางของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก และระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก 50 เซนติเมตร เป็นระยะที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานจริง

โครงการย่อยที่ 4 โครงการนี้เป็นโครงการต่อเนื่องมาจากโครงการย่อยเรื่อง การพัฒนาต้นแบบระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติสำหรับควบคุมแนวการทำงานของรถแทรกเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งที่จะช่วยควบคุมแนวอ้อยให้ตรง และมีระยะห่างระหว่างแถวที่เหมาะสม (Traffic control) อย่างไรก็ตามระบบที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดด้านสภาพพื้นที่ใช้งาน เช่น ความลาดเอียง และคุณภาพการเตรียมดิน จึงมีความจำเป็นต้องมีการพัฒนาชุดเซ็นเซอร์และกลไกสำหรับสนับสนุนการทำงานของระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น โดยมุ่งเน้นเพิ่มความสามารถในการชดเชยแรงกระทำด้านข้างและการยกตัวของรถแทรกเตอร์ในสามมิติ อันเนื่องมาจากสภาพพื้นที่ลาดเอียงและสภาพการเตรียมดินที่แตกต่างกัน เพื่อขยายข้อจำกัดให้

สามารถใช้งานระบบได้ครอบคลุมพื้นที่การผลิตอ้อยมากยิ่งขึ้น จากผลการทดลองระบบการควบคุมที่ได้ ออกแบบและติดตั้งไปซึ่งมีอยู่สองแบบคือ ระบบที่ใช้ Servomotor และระบบที่ไฮดรอลิกส์ ระบบสามารถใช้งานได้บนพื้นที่ที่เรียบ ชรุขระ ใช้งานได้นาน ส่วนข้อมูล Input/Output ที่มีเก็บเพื่อนำมาหา Transfer function ด้วยวิธี System identification และเมื่อนำระบบการควบคุมการเลี้ยงแบบอัตโนมัติมาใช้ทดลอง บนพื้นที่จริง ในการทดลองช่วงแรกแทรกเตอร์มีการส่ายไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ซึ่งเกิดจากความไม่ สัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ควบคุมการเลี้ยงจาก Pixhawk 3Pro และระบบการบังคับเลี้ยง ส่วนปัจจัยอื่นนั้นก็ ส่งผลด้วยแต่ยังไม่ชัดเจนมากนัก ส่วนตัวควบคุมแบบ PID Controller นั้นได้ทำการใช้ค่าที่เดิมตลอดและมีการปรับจูนมาแล้ว แต่ในอนาคตผู้วิจัยคิดว่าควรที่จะมีการหาค่า Gain PID controller ที่เหมาะสมกับแต่ละ สภาพพื้นที่และมีการอัปเดตค่าตลอดเวลาเพื่อการควบคุมที่ดียิ่งขึ้น

ในส่วนงบประมาณ ทุกโครงการมีการใช้จ่ายตามกรอบงบประมาณตามที่ได้ออกไว้ ยกเว้น โครงการย่อยที่ 2 ที่ไม่สามารถดำเนินโครงการฯ ต่อได้สำเร็จ จึงไม่มีการใช้งบประมาณได้ครบทั้งหมด แต่อาจมีบางโครงการที่ใช้งบประมาณบางหมวดต่ำกว่างบประมาณที่ตั้งไว้ อย่างไรก็ตาม สามารถบริหารจัดการให้มีการถัวเฉลี่ยการใช้ให้อยู่ภายในกรอบงบประมาณพอดี

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เครื่องจักรในไร่อ้อยเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการผลิตอ้อยในปัจจุบัน ซึ่งช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิต ลดปัญหาแรงงาน และเวลาในการผลิตอ้อย อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องจักรในประเทศยังคงต้องการพัฒนาและปัญหาผลกระทบบางประการที่เกิดจากการใช้เครื่องจักร แผนการวิจัยนี้มีเป้าหมายที่สำคัญ 2 ส่วน ทั้งแนวทางการแก้ปัญหาการใช้เครื่องจักรกับระบบการผลิตอ้อย โดยประกอบด้วยการจัดการปัญหาที่เกิดจากเครื่องจักร เช่น การอัดแน่นของดิน การจัดการระบบจราจรในไร่อ้อยที่ไม่เหมาะสม ส่งผลระยะยาวต่อคุณสมบัติของดินและผลผลิตอ้อยในที่สุด ตลอดจนการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้เครื่องจักรในไร่อ้อย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด มีราคาถูกลง และสามารถปรับใช้กับสภาพไร่อ้อยของเกษตรกรในประเทศไทยอย่างเหมาะสม ดังนั้น แนวทางการแก้ปัญหา จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องการแก้ปัญหาการบดอัดแน่นของดินที่เกิดจากการจัดการเครื่องจักรในไร่อ้อย และพัฒนาเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจัดการเครื่องจักรในไร่อ้อย

1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย

1. เพื่อรวบรวมข้อมูลพื้นฐานการใช้เครื่องจักรกลเกษตรในการเขตกรรมอ้อยในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยเพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการระบบการจราจรในแปลงอ้อย

2. เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ช่วยทำงานหรือบังคับการทำงานของเครื่องจักรกลให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น และมีความเหมาะสมกับวิธีการทำงานแบบลดการจราจรในแปลงอ้อยให้น้อยลง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ประเมินผลกระทบของการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของดินในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ และแปลงอ้อยที่มีการเผาและไม่เผาของเกษตรกรพื้นที่ภาคกลาง ทดสอบระบบการควบคุมจราจรในฟาร์มเปรียบเทียบกับการผลิตอ้อยตามแบบของเกษตรกร ในพื้นที่ผลิตอ้อยของชาวไร่อ้อยจังหวัดพิษณุโลก ประเมินประสิทธิภาพระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยโดยพิจารณาความสามารถในการทำงานเชิงไร่ (effective field capacity) ประเมินประสิทธิภาพเชิงไร่ในกรณีการเก็บเกี่ยวอ้อยด้วยรถตัดที่ใช้ระบบควบคุมพาหนะติดตามรถตัดอ้อยเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ระบบควบคุมที่พัฒนา และประเมินปริมาณอ้อยที่สูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อยทั้งกรณีใช้ระบบควบคุมที่พัฒนาและกรณีไม่ใช้ระบบควบคุม และประเมินความพึงพอใจของผู้ควบคุมรถตัดอ้อยและผู้ขับพาหนะบรรทุก ศึกษาการทำงานรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น และพัฒนาระบบเพื่อใช้ควบคุมรถแทรกเตอร์ในกระบวนการปลูกอ้อย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แผนการวิจัยฉบับนี้เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรในไร่อ้อยภายใต้การจัดการแปลงของเกษตรกรในประเทศไทย และช่วยลด/ชะลอผลกระทบของเครื่องจักรที่มีต่อคุณสมบัติของดินในไร่อ้อย

บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยโครงข่ายย่อยทั้ง 4 โครงการ ทางคณะผู้วิจัยได้ทบทวนเอกสารตามการรายงานของโครงข่ายย่อยที่ 1, 2, 3 และ 4

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

แผนการบริหารแผนงานวิจัยและแผนการดำเนินงาน พร้อมทั้งขั้นตอนตลอดแผนงานวิจัย โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานบริหารแผนงานวิจัย ดังนี้

3.1 ประชุมคณะวิจัยชี้แจงรายละเอียดแต่ละโครงการวิจัย เพื่อทำความเข้าใจ และกำหนดเป้าหมาย และกลยุทธ์ในการดำเนินงานวิจัยของแต่ละโครงการ โดยดำเนินการในช่วง เดือนแรกของโครงการวิจัย

3.2 ประชุมติดตามผลการดำเนินงานทุก 2 เดือนในระดับแผนงานวิจัย ระหว่างนักวิจัย ผู้ช่วยวิจัยเพื่อติดตามความก้าวหน้าของงานวิจัย ปัญหาอุปสรรคในการดำเนินการวิจัย พร้อมทั้งรับฟังข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะจากนักวิจัยสำหรับในแต่ละโครงการวิจัยจะมีการประชุมทุกเดือน

3.3 ติดตามผลการดำเนินงาน ณ แปลงวิจัยหรือห้องปฏิบัติการอย่างน้อยทุกๆ 3 เดือน

3.4 จัดทำรายงานความก้าวหน้าของแต่ละโครงการและแผนงานวิจัยเพื่อนำเสนอต่อแหล่งทุนตามกำหนดเวลา

3.5 จัดทำรายงานสรุปโครงการวิจัยฯ ของแต่ละโครงการวิจัยและแผนงานวิจัย เพื่อนำเสนอต่อแหล่งทุน

การดำเนินงานของโครงการย่อยแต่ละโครงการย่อย ได้ดังนี้

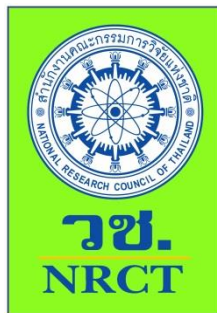
ลำดับที่-ชื่อโครงการย่อย	วิธีวิจัย (โดยย่อ)
1. การประเมินการเก็บเกี่ยวอ้อยที่มีต่อคุณสมบัติของดินในไร่อ้อยในพื้นที่ภาคกลาง	- สัมภาษณ์ - การทดสอบในแปลงอ้อย
2. การทดสอบระบบการควบคุมจราจรในการผลิตอ้อยพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง	- สัมภาษณ์ - การทดสอบในแปลงอ้อย
3. ระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย	- วิจัย สร้าง ทดสอบเครื่องควบคุมกลไกเครื่องจักรและการทำงานของรถบรรทุก
4. การพัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์	- วิจัย พัฒนาซอฟต์แวร์การควบคุมการนำทางรถแทรกเตอร์

บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาของแผนงาน ซึ่งประกอบไปด้วยโครงการย่อยทั้ง 4 โครงการ ทางคณะผู้วิจัยได้ดำเนินผลการศึกษาและอภิปรายผลของโครงการย่อยที่ 1, 2, 3 และ 4

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ดำเนินการตามแผนงานและติดตามโครงการย่อยที่ 1, 2, 3 และ 4



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการย่อยที่ 1

การประเมินการเก็บเกี่ยวอ้อยที่มีต่อคุณสมบัติของดินในไร่อ้อย
ในพื้นที่ภาคกลาง

โดย

ผศ.ดร. ทรงยศ โชติชูติมา

ผศ.ดร. สุธาสัยสิน แก้วเรือง

ดร. ปิยะพงษ์ ศรีวงษ์ราช

เดือน ธันวาคม ปี 2562

สัญญาเลขที่ RDG61T0066

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการประเมินการเก็บเกี่ยวอ้อยที่มีต่อคุณสมบัติของดินในไร่อ้อยในพื้นที่ภาคกลาง

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. ทรงยศ โชติชูติมา
ผศ.ดร. สุธาสัยสิน แก้วเรือง
ดร. ปิยะพงษ์ ศรีวงษ์ราช

สังกัด

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชุดโครงการวิจัยด้านอ้อยและน้ำตาล

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

บทสรุปผู้บริหาร

Executive Summary

ปัญหาการเกิดดินดานซึ่งเกิดจากการอัดตัวแน่นทึบ จนขัดขวางการเจริญเติบโตและการขนถ่ายของรากอ้อย อ้อยที่ปลูกในดินที่มีชั้นดินดานจะมีระบบรากตื้น ทำให้อ้อยดูดกินธาตุอาหารและน้ำได้น้อย อ้อยเกิดอาการแคระแกรนหรือยืนต้นแห้งตาย เครื่องจักรที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดการอัดแน่นของดิน เนื่องจากในกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อยมักมีการบรรทุกผลผลิตอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ ซึ่งน้ำหนักหลายตันที่กดทับลงไปบนดิน อาจส่งผลให้มีโอกาสเกิดการอัดแน่นของดินได้มากกว่าเครื่องจักรกลชนิดอื่น การเก็บเกี่ยวอ้อยเหล่านี้มักก่อให้เกิดชั้นดินดานไถพรวนขึ้นในพื้นที่ปลูกอ้อย และอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าในแปลงอ้อยต่อ นอกจากนี้ สภาพแปลงอ้อยที่มีการเผาและไม่เผาใบอ้อยอาจส่งผลต่อการเกิดการอัดแน่นของดินที่แตกต่างกัน แม้จะเกษตรกรมีการไถระเบิดชั้นดินดาน แต่ไม่ใช่เป็นการแก้ปัญหาการเกิดชั้นดินดานอย่างถาวร หากไม่มีการจัดการดินที่ถูกต้องและการจัดการการใช้เครื่องจักรกลเก็บเกี่ยวอย่างเหมาะสม ดังนั้น จึงควรศึกษาวิจัยการเก็บเกี่ยวในด้านการสำรวจข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์และรูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อยของเกษตรกรทั้งในสภาพแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ เพื่อเป็นแนวทางในการชะลอการเกิดการบดอัดแน่นของดินที่เกิดขึ้นในไร่อ้อยอย่างยั่งยืน จากผลการทดลอง พบว่าแปลงทดสอบทั้งสองพื้นที่แม้ว่าสภาพรวมจะมีเนื้อดินที่เหมือนกัน คือ เป็นดินเหนียว แต่ปริมาณความชื้นของดินในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วง มีปริมาณความชื้นในดินน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนาทอง อาจเนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนาทองเกือบเท่าตัว เนื่องจากแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วงไม่มีการใส่ปุ๋ยคอกเพิ่มอินทรีย์วัตถุ ส่วนแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนาทอง มีการใส่ปุ๋ยคอกจากฟาร์มเพื่อช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อย ในพื้นที่อำเภอนองม่วงที่ไม่มีการใส่อินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อย การเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีการเผาอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว นอกจากนี้ ในสภาพแปลงอ้อยที่เป็นดินเหนียวและไม่มีการใส่อินทรีย์วัตถุ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก เนื่องจากจะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินเพิ่มขึ้นที่ระดับชั้นไถพรวนความลึก 0-30 เซนติเมตร ภายหลังการเก็บเกี่ยว ขณะที่แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่นที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าจะสามารถช่วยลดค่าความหนาแน่นของดินชั้นไถพรวนลงได้ (บริเวณชั้น 0-30 เซนติเมตร) แสดงให้เห็นว่าเกษตรกรในพื้นที่ดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายแป้งที่มีอินทรีย์วัตถุน้อย และมีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ควรต้องเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อยให้มากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีอ้อยต่อ โดยทั้งสองพื้นที่แปลงทดสอบเป็นดินเหนียว และดินเหนียวปนทรายแป้ง ซึ่งง่ายต่อการอัดแน่นของดิน แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของดิน มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ใช้ปลูกอ้อย ค่าความต้านทานการแทง

ทะเลของดินจะแปรผันไปตามการเข้าทำงานของเครื่องจักรกลอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเครื่องจักรที่ใช้ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว ซึ่งการจัดการเครื่องจักรก็เกี่ยวข้องให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ โดยภาพรวม แปลงทดสอบทั้งอ้อยต่อและอ้อยปลูกในพื้นที่อำเภอลำทะเมนชัยเป็นดินเหนียว ทำให้ภายหลังการเก็บเกี่ยว จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุดินมากกว่าแปลงทดสอบในพื้นที่อำเภอหนองม่วง โดยเฉพาะแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า

บทคัดย่อ

ปัญหาดินดานขัดขวางการเจริญเติบโตและการขนถ่ายของรากอ้อย เครื่องจักรที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการอัดแน่นของดินและส่งผลให้เกิดชั้นดินดานในพื้นที่ปลูกอ้อย การศึกษาครั้งนี้ทำการประเมินรูปแบบการจัดการของการเก็บเกี่ยวอ้อยที่มีต่อคุณสมบัติบางประการของดินในแปลงเกษตรกรพื้นที่อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี ในปี 2561-2562 โดยวางแผนการทดลองสปลิตพล็อต (Split plot in RCBD) กรรมวิธีประกอบด้วยปัจจัยหลัก คือ แปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ ส่วนปัจจัยรองคือรูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อย ประกอบด้วย 1. การใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย 2. การใช้รถตัดอ้อยที่สับต้นอ้อยแล้วใช้สายพานลำเลียงท่อนอ้อยใส่รถบรรทุก และ 3. ใช้รถตัดอ้อยที่ท่อนอ้อยไหลลงตะกร้าเหล็กที่วางอยู่ท้ายรถตัดอ้อย ผลการทดลองพบว่าการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่น เนื่องจากการเผาอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว ในสภาพแปลงอ้อยที่เป็นดินเหนียวและไม่มีการใส่อินทรีย์วัตถุควรหลีกเลี่ยงการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก เนื่องจากจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินเพิ่มขึ้น แปลงอ้อยที่มีอินทรีย์วัตถุมากจะสามารถช่วยลดค่าความหนาแน่นของดิน ดังนั้น แปลงอ้อยที่มีอินทรีย์วัตถุและการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ควรเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในแปลง ค่าความต้านทานการแทงทะลุดินจะแปรผันตามการเข้าทำงานของเครื่องจักรกลอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเครื่องจักรที่ใช้ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว

Abstract

Hardpans problem obstructs growth and root penetration of sugarcane. sugarcane harvester was one of the factors that caused soil compaction and resulted occurrence of hardpans in sugarcane field. The present study was to evaluate sugarcane harvesting methods on some soil properties in farmer field in Nong Muang district, Lopburi Province during 2018-2019. The experiment was arranged in Split plot in RCBD. Treatments were plant cane and ratoon cane field as main plot, the sub plot were harvesting methods that consisted of 1. labor combined with sugarcane loader 2. sugarcane harvester combined with truck and 3. sugarcane harvester combine with basket. The results showed that labor combined with sugarcane loader method had lower organic matter than other methods because farmer burned sugarcane before manual harvesting. In clay soil and no organic matter application of sugarcane field, should be avoid sugarcane harvester combined with truck method because resulted in increased bulk density of soil. The high organic matter of sugarcane field helped to reduce bulk density of soil. Therefore, low organic matter field and using sugarcane harvester combined with truck method, should be added organic matter. It was evidenced that soil penetration resistance varied with agricultural machines, especially harvester machine in the harvesting stage.

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	หน้า
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	16
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	16
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	16
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	17
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	22
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	25
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	110
ภาคผนวก	112
ตัวอย่างแบบสอบถามเกษตรกร	116

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1	
ตารางที่ 1 การเก็บข้อมูลในแปลงอ้อย	23
ตารางที่ 2 ข้อมูลเกษตรกรในอำเภอท่าหลวงและอำเภอหนองม่วง	25
ตารางที่ 3 ช่วงอายุของเกษตรกร	26
ตารางที่ 4 ที่อยู่เกษตรกรที่สำรวจแบบสอบถาม	26
ตารางที่ 5 จำนวนแปลงปลูกอ้อยของเกษตรกร	26
ตารางที่ 6 พื้นที่ปลูกทั้งหมด	27
ตารางที่ 7 ประเภทเอกสารสิทธิ์ถือครองที่ดิน	28
ตารางที่ 8 ลักษณะดินปลูกอ้อย	28
ตารางที่ 9 สภาพพื้นที่ปลูกอ้อย	28
ตารางที่ 10 ชนิดอ้อยที่ปลูก	29
ตารางที่ 11 พันธุ์อ้อยปลูก	29
ตารางที่ 12 ระบบการให้น้ำการปลูกอ้อย	29
ตารางที่ 13 ช่วงเดือนปลูกอ้อย	30
ตารางที่ 14 ค่า CCS	30
ตารางที่ 15 น้ำหนักผลผลิต	30
ตารางที่ 16 จำนวนรถแทรกเตอร์ของเกษตรกร	32
ตารางที่ 17 ยี่ห้อรถแทรกเตอร์	32
ตารางที่ 18 อายุรถแทรกเตอร์	33
ตารางที่ 19 อุปกรณ์ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์	33
ตารางที่ 20 จำนวนรถตัดอ้อย	33
ตารางที่ 21 ยี่ห้อรถตัดอ้อย	34
ตารางที่ 22 จำนวนรถคืบอ้อย	34
ตารางที่ 23 อายุรถคืบอ้อย	34
ตารางที่ 24 ยี่ห้อรถคืบอ้อย	35
ตารางที่ 25 จำนวนรถบรรทุกอ้อย	35
ตารางที่ 26 อายุรถบรรทุกอ้อยขนาด 10 ล้อ	36
ตารางที่ 27 เครื่องมือเตรียมดินครั้งที่ 1	37
ตารางที่ 28 เครื่องมือเตรียมดินครั้งที่ 2	37
ตารางที่ 29 เครื่องมือเตรียมดินครั้งที่ 3	37
ตารางที่ 30 เครื่องมือเตรียมดินครั้งที่ 4	38

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 31 ระบบการปลูกอ้อย	38
ตารางที่ 32 ระบบแถวการปลูกอ้อย	39
ตารางที่ 33 ระยะห่างระหว่างร่องอ้อย	39
ตารางที่ 34 อัตราท่อนพันธุ์	39
ตารางที่ 35 การใส่ปุ๋ยเคมี ครั้งที่ 1	40
ตารางที่ 36 การใส่ปุ๋ยเคมี ครั้งที่ 2	41
ตารางที่ 37 การใส่ปุ๋ยเคมี ครั้งที่ 3	41
ตารางที่ 38 วิธีการใส่ปุ๋ย ครั้งที่ 1	42
ตารางที่ 39 วิธีการใส่ปุ๋ย ครั้งที่ 2	42
ตารางที่ 40 วิธีการใส่ปุ๋ย ครั้งที่ 3	42
ตารางที่ 41 การควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 1	43
ตารางที่ 42 การควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 2	43
ตารางที่ 43 การควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 3	44
ตารางที่ 44 สารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 1	44
ตารางที่ 45 สารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 2	45
ตารางที่ 46 สารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 3	45
ตารางที่ 47 วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 1	46
ตารางที่ 48 วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 2	46
ตารางที่ 49 วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 3	46
ตารางที่ 50 การจัดการแปลงอ้อยก่อนเก็บเกี่ยวผลผลิต	47
ตารางที่ 51 รูปแบบการเก็บเกี่ยวผลผลิต	47
ตารางที่ 52 ชนิดรถบรรทุกอ้อย	47
ตารางที่ 53 ระยะทางขนส่งอ้อย	48
ตารางที่ 54 การเตรียมดินอ้อยต่อครั้งที่ 1	48
ตารางที่ 55 การเตรียมดินอ้อยต่อครั้งที่ 2	49
ตารางที่ 56 ต้นทุนการผลิตอ้อย	49
ตารางที่ 57 ต้นทุนการเตรียมดินอ้อยต่อ	50
ตารางที่ 58 ต้นทุนการใส่ปุ๋ยและแรงงาน	50
ตารางที่ 59 ต้นทุนสารเคมีและแรงงาน	51
ตารางที่ 60 ต้นทุนค่าเก็บเกี่ยวผลผลิต	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 61 ปริมาณความชื้นของดิน (%) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี	69
ตารางที่ 62 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี	71
ตารางที่ 63 เนื้อดินในแปลงทดลองอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี	73
ตารางที่ 64 ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (g/cm ³) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี	77
ตารางที่ 65 ปริมาณความชื้นของดิน (%) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี	95
ตารางที่ 66 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี	97
ตารางที่ 67 เนื้อดินในแปลงทดลองอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี	99
ตารางที่ 68 ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (g/cm ³) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี	103

สารบัญ

[illegible]

สารบัญ

[illegible]

สารบัญ

[illegible]

สารบัญภาพ

ภาพที่

หน้า

ภาพที่ 49	ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอนาทอง จังหวัดลพบุรี	90
ภาพที่ 50	ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอนาทอง จังหวัดลพบุรี	90
ภาพที่ 51	ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอนาทอง จังหวัดลพบุรี	91
ภาพที่ 52	ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอนาทอง จังหวัดลพบุรี	92
ภาพที่ 53	ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอนาทอง จังหวัดลพบุรี	92

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวกที่	หน้า
1 ปริมาณน้ำฝนรวม (มม.) ของแปลงทดสอบในพื้นที่อำเภอหนองม่วงและท่าหลวง จังหวัดลพบุรี ระหว่างปี 2561-2562	112
2 รายชื่อและที่อยู่เกษตรกรในพื้นที่ทำการทดลองของจังหวัดลพบุรี	113

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวกที่	หน้า
1 สัมภาษณ์เกษตรกรในพื้นที่จังหวัดลพบุรี	114
2 เครื่องจักรกลที่ใช้ในการจัดการแปลงอ้อย	114
3 รถตัดอ้อยของเกษตรกรในพื้นที่อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	115
4 สภาพแปลงอ้อยของเกษตรกรในพื้นที่อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	115

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัญหาการเกิดดินดานซึ่งเกิดจากการอัดตัวแน่นที่บ จนขัดขวางการเจริญเติบโตและการ ไซซอนของรากอ้อย อ้อย ที่ปลูกในดินที่มีชั้นดินดานจะมีระบบรากตื้น ทำให้อ้อยดูดกินธาตุอาหารและน้ำได้น้อย อ้อยเกิดอาการแคระแกรนหรือยืน ต้นแห้งตาย การใช้เครื่องจักรกลการเกษตรชนิดต่าง ๆ เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดดินดาน เกษตรกรยังไม่ตระหนักถึง การใช้เครื่องจักรกล ขาดความรู้ในการใช้เครื่องจักรอย่างเหมาะสม ควบคุมแนวทางเดินของเครื่องจักรกลซ้ำที่เดิม และวาง แนวปลูกอ้อยให้อยู่ระหว่างล้อของเครื่องจักร เพื่อไม่ให้เกิดชั้นดินดานทั่วทั้งพื้นที่ เป็นต้น นอกจากเครื่องจักรกลที่ใช้ในการ เตรียมดิน ปลูก ดูแลรักษาแล้ว เครื่องจักรที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดการอัดแน่นของดิน เนื่องจากในกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อยมักมีการบรรทุกผลผลิตอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ ซึ่งน้ำหนักหลายตันที่กดทับลงไปบนดิน อาจส่งผลให้มีโอกาสเกิดการอัดแน่นของดินได้มากกว่าเครื่องจักรกลชนิดอื่น การเก็บเกี่ยวอ้อยเหล่านี้มักก่อให้เกิดชั้นดิน ดานไถพรวนขึ้นในพื้นที่ปลูกอ้อย และอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าในแปลงอ้อยต่อ นอกจากนี้ สภาพแปลงอ้อยที่มีการเผาและไม่ เผาใบอ้อยอาจส่งผลต่อการเกิดการอัดแน่นของดินที่แตกต่างกัน แม้จะเกษตรกรมีการไถระเบิดชั้นดินดาน แต่ไม่ใช่เป็นการ แก้ปัญหาการเกิดชั้นดินดานอย่างถาวร เนื่องจากชั้นดินดานสามารถกลับมาเกิดขึ้นใหม่ได้อีก ถ้าหากไม่มีการจัดการดินที่ ถูกต้องและการจัดการการใช้เครื่องจักรกลเก็บเกี่ยวอย่างเหมาะสม ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับจำนวนเที่ยวการเดินรถของขั้นตอน การตัด เคลื่อนย้ายผลผลิตในแปลง รูปแบบการเดินรถ และสภาพความชื้นดินขณะเครื่องจักรทำงาน ดังนั้น จึงควร ศึกษาวิจัยการเก็บเกี่ยวในด้านการสำรวจข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์และรูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อยของเกษตรกรทั้งในสภาพ แปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ เพื่อเป็นแนวทางในการชะลอการเกิดการบดอัดแน่นของดินที่เกิดขึ้นในไร่อ้อยอย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษารูปแบบการจัดการของเครื่องเก็บเกี่ยวอ้อย และผลกระทบของเครื่องจักรกลต่อการบดอัดดินที่ใช้ใน ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวอ้อย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ประเมินผลกระทบของการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของดินในแปลงอ้อยปลูกและอ้อย ต่อ และแปลงอ้อยที่มีการเผาและไม่เผาของเกษตรกรพื้นที่ภาคกลาง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยที่เหมาะสมต่อการลด/ชะลอการอัดแน่นของดินในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อในพื้นที่ของเกษตรกรในภาคกลาง

บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการนี้เป็นการวิจัยต่อเนื่องจากโครงการวิจัยการจัดการเครื่องจักรกลการเกษตรในไร่อ้อยพื้นที่ภาคกลาง ซึ่งเน้นการศึกษาข้อมูลการจราจรของเครื่องจักรกลการเกษตรในไร่อ้อย และผลกระทบต่อการบดอัดดินของที่เกิดจากการใช้เครื่องจักรกลหลักทั้งระบบการผลิตอ้อยที่ใช้ในไร่อ้อย ส่วนโครงการฯ นี้จะเป็นการศึกษารูปแบบการใช้เครื่องจักรเก็บเกี่ยวอ้อยเป็นหลัก เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประเมินผลกระทบที่เกิดกับคุณสมบัติของดิน และนำไปสู่การหาวิธีการบรรเทาปัญหาการอัดแน่นของดิน เนื่องจากขั้นตอนการเก็บเกี่ยวเป็นช่วงที่มีน้ำหนักกดทับมากกว่าการเกษตรกรรมด้านอื่นๆ ซึ่งการใช้เครื่องจักรเก็บเกี่ยวขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักมากอาจเร่งให้เกิดชั้นดินดานเร็ว เนื่องจากมีการบรรทุกน้ำหนักอ้อยและเคลื่อนย้ายภายในแปลงปลูก ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่จะศึกษาครั้งนี้ คือ

1 รูปแบบการตัดอ้อยในพื้นที่ภาคกลาง

1.1 คนตัดร่วมกับการใช้รถคืบ

ใช้แรงงานคนตัดอ้อย และใช้รถคืบดันอ้อยที่ตัดวางเรียงในแปลงอ้อยขึ้นใส่รถบรรทุก เพื่อขนไปยังโรงงานต่อไป



ภาพที่ 1 การใช้แรงงานคนตัดอ้อยสตร่วมกับรถคืบอ้อย

(ที่มา: มุลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์)

1.2 รถตัดอ้อยที่สับต้นอ้อยแล้วใช้สายพานลำเลียงท่อนอ้อยใส่รถบรรทุก

รถบรรทุกอ้อยจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับรถตัดอ้อย รถตัดอ้อยชนิดนี้มีขนาดใหญ่เหมาะสมสำหรับพื้นที่แปลงปลูกอ้อยขนาดใหญ่ หากพื้นที่แปลงมีขนาดเล็กก็อาจจะทำงานได้ไม่สะดวก เนื่องจากขณะทำงานทั้งรถตัดอ้อยและรถบรรทุก ต้องหันเลี้ยวกลับรถบ่อยครั้งที่บริเวณหัวแปลง เพราะความยาวแปลงปลูกอ้อยสั้น ทำให้สูญเสียเวลาตัดอ้อยและ

สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก นอกจากนี้ ล้อของรถบรรทุกที่ท่อนอ้อยที่วิ่งตามรถตัดอ้อยก็อาจจะกดทับตออ้อย ส่งผลให้ตออ้อยถูกกดทับเสียหาย และชั้นดินก็ถูกอัดแน่นมากขึ้น อันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลผลิตอ้อยในปีถัดไปลดลง



ภาพที่ 2 รถตัดอ้อยที่สับต้นอ้อยแล้วใช้สายพานลำเลียงท่อนอ้อยใส่รถบรรทุก
(ที่มา: มุลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์)

1.3 รถตัดอ้อยที่ท่อนอ้อยไหลลงตะกร้าเหล็กที่วางอยู่ท้ายรถตัดอ้อย

รถตัดอ้อยชนิดนี้มีหลักการทำงาน คือ ตะกร้าจะถูกปล่อยวางบนพื้นดินเมื่อท่อนอ้อยเต็มตะกร้า รถจะยกตะกร้าไปเทใส่รถบรรทุกที่จอดรอ จึงไม่เกิดการกดทับตออ้อยและไม่กดอัดชั้นดิน แต่ก็มีข้อด้อยอยู่บ้าง คือ การเปลี่ยนตะกร้าใหม่แต่ละครั้ง รถตัดอ้อยไม่ได้ตัดอ้อย สูญเสียเวลาทำงาน แต่สามารถทำงานได้ดีในภูมิประเทศที่พื้นที่มีลักษณะลาดเอียง หรือพื้นที่เนินเขา (ภาพที่ 1) เนื่องจากรถมีขนาดเล็ก และน้ำหนักตัวรวเบา จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ในที่ลาดชัน และการหันเลี้ยวก็สะดวก และไม่จำเป็นต้องใช้รถบรรทุกวิ่งตามไปรับท่อนอ้อย



ภาพที่ 3 รถตัดอ้อยที่ท่อนอ้อยไหลลงตะกร้าเหล็กที่วางอยู่ท้ายรถตัดอ้อย
(ที่มา: มุลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์)

2. ชนิดของแปลงอ้อยในพื้นที่ภาคกลาง

2.1 อ้อยปลูก

จากข้อมูลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดลพบุรี พบว่าเป็นแปลงอ้อยปลูกเท่ากับ 42% และเป็นแปลงอ้อยต่อ 58% แปลงอ้อยปลูกส่วนใหญ่จะได้รับผลกระทบที่เกิดจากการอัดแน่นของดินน้อยกว่าอ้อยต่อ เนื่องจากจำนวนครั้งที่เครื่องจักรเข้าทำงานในแปลงที่น้อยกว่า

2.2 อ้อยตอ

จากข้อมูลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดลพบุรี พบว่าเป็นแปลงอ้อย 1 2 และตอ 3 เท่ากับ 42 21 และ 27 % ตามลำดับ และเป็นแปลงอ้อยตอ 58% ดินในแปลงอ้อยตอจะได้รับการบดอัดจากเครื่องจักรมากกว่าอ้อยปลูก เนื่องจากมีการบดอัดดินสะสมมาตั้งแต่ระยะที่ยังเป็นอ้อยตอ ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดการอัดแน่นของดินจึงมากกว่า อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดของดิน ความชื้นในขณะเครื่องจักรทำงาน ที่จะส่งผลเร่งให้เกิดการอัดแน่นของดินได้เร็วขึ้นด้วย

3. ชนิดของดินในแปลงปลูกอ้อย

ชนิดของดินและความอุดมสมบูรณ์ของดิน มีผลต่อผลผลิต และอายุของการไถตอมาก กล่าวคือ ถ้าเป็นดินร่วนเหนียว-ร่วนปนทราย ที่มีอินทรีย์วัตถุมากกว่า 1.5 % ตออ้อยจะมีผลผลิตสูง และไถตอได้หลายปี แต่ถ้าเป็นดินร่วนปนทราย-ทรายร่วน ดินมีอินทรีย์วัตถุน้อยกว่า 1.5 % ผลผลิตของอ้อยตอจะต่ำ ถ้าอินทรีย์วัตถุต่ำมาก ผลผลิตของอ้อยตอจะต่ำมากและไถตอได้ไม่นาน ฉะนั้นถ้าดินมีอินทรีย์วัตถุต่ำจะต้องปรับปรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ เช่น ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด เป็นต้น ประเทือง (2016) รายงานว่าการบดอัดดินโดยการประยุกต์ใช้วิธี Modified Proctor Test ได้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าจากการทดสอบด้วย oedometer ที่ 200 กิโลปาสกาล ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าชนิดของดินและปริมาณความชื้นของดินมีผลกระทบทั้งต่อความหนาแน่นและความต้านทานการแทงทะลุของดินอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับความหนาแน่นดินเท่านั้น โดยพบว่า มีค่าความหนาแน่นของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของดินจะสูงขึ้นเรียงตามลำดับชนิดดินคือ ดินร่วน ดินร่วนปนทรายแป้ง และดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง

การใช้เครื่องจักรกลการเกษตรชนิดต่าง ๆ เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดดินดานขึ้น Usaborisut (2011) ได้ศึกษาผลกระทบการใช้เครื่องจักรกลเกษตรที่มีต่อการบดอัดดินโดยใช้พารามิเตอร์ความต้านทานการแทงทะลุและความหนาแน่นในไร่อ้อยที่ใช้เครื่องจักรกลเกษตรและไร่อ้อยที่ใช้แรงงานเป็นหลักพบว่าความหนาแน่นมากที่สุดคือ 1.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรกับไร่อ้อยที่ใช้เครื่องจักรกลเกษตรในขณะที่ไร่อ้อยที่ใช้แรงงานเป็นหลักมีความหนาแน่นดิน 1.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนการต้านทานการแทงทะลุในแนวระนาบร่องอ้อยที่ชั้นที่ลึก 45 ซม. มีค่าเฉลี่ยของต้านทานการแทงทะลุในพื้นที่ใช้เครื่องจักรกลเกษตรสูงกว่าที่ใช้แรงงานเป็นหลัก 23.3 % และมีค่าความต้านทานการแทงทะลุเกิน 2 เมกะปาสกาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในไร่อ้อยที่เป็นอ้อยตอหลายปี

Stewart et al. (1970) และ Torri et al. (1994) ชี้ให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นรวมของดินมีค่าลดลงเมื่อดินมีปริมาณของเศษหิน (rock fragments) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเศษหินทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มขึ้นในดิน สำหรับดินทราย (sandy soil) การเพิ่มขึ้นของอนุภาคทรายทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากอนุภาคทรายทำให้ช่องว่างขนาดเล็ก (micropore) ลดลง (Koolen and Kuipers, 1983) หากค่าความหนาแน่นรวมของดิน มีค่าสูงก็จะเป็นข้อจำกัดต่อการเจริญของราก ดังนั้นความหนาแน่นรวมจึงเป็นตัวชี้วัดตัวหนึ่งในคุณภาพของดิน (USDA-NRCS,1996) และจากการใช้เครื่องจักรกลทางการเกษตร ก่อให้เกิดการอัดแน่น (compaction) ของดินซึ่งส่งผลให้ขนาดและปริมาณช่องว่างตลอดจนความต่อเนื่อง (continuity) ของช่องว่างลดลง ทำให้การซาบซึมน้ำและการอุ้มน้ำของดินถูกจำกัดก็จะเกิดการชะล้างพังทลาย (erosion) ไปกับน้ำบ่าบนผิวดิน (Voorhees, 1986; Dexter, 2004) อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นรวมของ

ดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชก็ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน กล่าวคือค่าความหนาแน่นรวมของดินที่ชี้ว่าดินนั้นเกิดภาวะอัดแน่นของดินชนิดหนึ่งก็อาจจะเป็นภาวะที่ดินอยู่ในสภาพเกาะตัวกันหลวมๆ (loose state) ของดินอีกชนิดหนึ่ง (Hakansson, 1990) โดยทั่วไปความหนาแน่นรวมของดินที่เป็นชั้นดาน (crust) ก็จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.78 ถึง 1.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสำหรับดินในกลุ่มที่มีเนื้อดินเป็น silt sand, loamy sand และ sandy loam แต่ชั้นดานที่เกิดดินตะกอนลมหอย (loess) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.44 ถึง 1.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Roth, 1996) ในอดีตการผลิตอ้อยเน้นการเกษตรกรรมอย่างเข้มข้นรวมถึงการศึกษาค้นคว้าการเสื่อมลงของเนื้อดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินและสภาพดินในขณะเตรียมดิน Wood (1985) ชี้ให้เห็นว่าการลดลงผลผลิตเป็นผลมาจากโครงสร้างของดินเสื่อมลง โดยเฉพาะดินชั้นบน (7 ซม.) มีความหนาแน่นสูงขึ้นและความพรุนลดลงในพื้นที่ที่เพาะปลูกอย่างเข้มข้นกับกับดินรกร้าง ความแตกต่างเกิดขึ้นจากถูกบดอัดจากเครื่องเก็บเกี่ยวและการบดทับจากล้อเครื่องจักรอื่นบ่อยๆ

นอกจากนี้ การใช้งานเครื่องจักรภายใต้สภาพดินเปียกส่งผลให้เพิ่มการบดอัด อาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของรากตามมาและผลผลิตอ้อย ซึ่งในแปลงที่มีการจัดการเผาใบอ้อยและไม่เผา อาจส่งผลต่อการอัดแน่นของดินแตกต่างกันออกไปด้วย อีกทั้งเกษตรกรปลูกอ้อย มีการไถพรวนเตรียมดินที่ระดับความลึกเดียวกันอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานาน ทำให้โครงสร้างของดินถูกทำลายลง เม็ดดินแตกละเอียด เมื่อฝนตก อนุภาคของดินเหนียว ทรายแป้ง รวมทั้งอินทรีย์วัตถุถูกชะล้างลงมาสะสมกันใต้ชั้นไถพรวน ถ้าหากไม่มีการจัดการดินที่ถูกต้องและความสมดุลของการใช้เครื่องจักรกลต่างๆ ที่เกี่ยวกับจำนวนเที่ยวการเดินรถของการเกษตรกรรมขั้นตอนต่างๆ รูปแบบการเดินรถ และสภาพความขึ้นดินขณะทำงาน จึงควรศึกษาวิจัยการเกษตรกรรมเชิงค้นหาข้อมูลเพื่อปรับแก้พฤติกรรมกรรมเกษตรที่คุ้นชินแบบเดิมมาสู่หลักแห่งการชะลอการเกิดการบดอัดแน่นของดิน

เอกสารอ้างอิง

- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2530. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และธัญญา นิยมภา. 2547. ผลกระทบของการอัดแน่นดินต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของอ้อย, ใน รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สกว.
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effect of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. *Geoderma* 120:201-214.
- Hakansson, I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.* 16:105-120.
- Koolen, A.J. and Kuipers H. 1983. *Agricultural soil mechanics*. Advanced series Agricultural Sciences 13, Springer-Verlage, Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- Usaborisut, P. and W. Sukcharoenpharat. 2011. Soil compaction in sugarcane fields induced by mechanization. *American Journal of Agricultural and Biological Science* 6(3):418-422.
- Roth, K. 1996. Average flow in heterogeneous media of trending conductivity. *J. Hydrol* 183:57-68.

-
- Stewart, V.I., W.A. Adams and H.H. Abdulla. 1970. Quantitative pedological studies on soils derived from Silurian Mudstones. *European Journal of Soil Science*. 21:248-255.
- Torri, D., J. Poesen, F. Monaci and E. Busoni. 1994. Rock fragment content and fine soil bulk density. *CATENA* 23:65-71.
- USDA-NRCS. 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigation report No.42 U.S. department of Agriculture, Washington D.C.
- Voorhees, W.B. 1986. The effect of soil compaction on crop yield. SAE paper #860729, Warrendale, PA.
- Walkley, A. and I.A. Black, 1947. Chromic acid titration method for determination of soil organic matter. *Soil. Sci. Amer. Proc.* 63:257.
- Wood, A.W. 1985. Soil degradation and management under intensive sugarcane cultivation in North Queensland. *Soil Use and Management* 1:120-124.

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1 ออกแบบสำรวจเพื่อเก็บข้อมูล

3.1.1.1 ดำเนินการประชุมระดมสมองเพื่อออกแบบสอบถามสำหรับการเก็บข้อมูลเกษตรกรผู้ปลูกอ้อย โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเครื่องจักรกลหลักในไร่อ้อยเขตจังหวัดลพบุรี จากตัวแทนเกษตรกรและเกษตรกรทั่วไป และข้อมูลการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย 3 รูปแบบ ได้แก่ 1. ใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย 2. ใช้รถตัดอ้อยที่สับต้นอ้อยแล้วใช้สายพานลำเลียงท่อนอ้อยใส่รถบรรทุก และ 3. ใช้รถตัดอ้อยที่ท่อนอ้อยไหลลงตะกร้าเหล็กที่วางอยู่ท้ายรถตัดอ้อย โดยแบบสอบถามใช้สำหรับเก็บข้อมูลสภาพพื้นที่ปลูกทั้งในสภาพแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ ลักษณะดิน เครื่องจักรที่ใช้ในการเขตกรรม และรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย ข้อมูลเครื่องจักรเก็บเกี่ยวอ้อย เช่น ระยะฐานล้อ ขนาดล้อ น้ำหนักตัวรถ และเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของรถในแปลงอ้อย (การกลับริดในแปลงและนอกแปลงอ้อยในกรณีใช้รถบรรทุกอ้อย)

3.1.1.2 ดำเนินการติดต่อและประสานงานกับเกษตรกรผู้ปลูกอ้อย และโรงงานน้ำตาลในพื้นที่เป้าหมายอย่างน้อย 1 แห่ง เพื่อขอเก็บข้อมูลจากเกษตรกรแต่ละพื้นที่ที่มีรูปแบบการเก็บเกี่ยวต่างกัน โดยทำการสัมภาษณ์เกษตรกรหลักเพื่อให้ได้ข้อมูลล่วงหน้าด้านการใช้เครื่องจักรและติดตามการทำงานในแปลงตลอด 1 ฤดูกาลผลิต

3.1.1.3 สรุปรูปข้อมูลจากแบบสอบถามเพื่อคัดกรองพื้นที่ปลูกของเกษตรกรที่มีการเก็บเกี่ยวอ้อยแต่ละแบบ แต่พื้นที่ปลูกที่มีรูปร่างและขนาดของแปลงปลูกที่ใกล้เคียงกัน มีการจัดการแปลงปลูกที่เหมือนกัน เพื่อควบคุมปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลต่อการเก็บข้อมูลคุณสมบัติดิน

3.1.2 จัดหา/เตรียมพื้นที่ทดลอง

ติดต่อเกษตรกรเจ้าของพื้นที่เพื่อขอสำรวจแปลงปลูกอ้อย และเลือกแปลงปลูกอ้อยปลูกและอ้อยต่อที่มีการจัดการทั้งแบบเผาและไม่เผาใบอ้อย จำนวน 8 แปลง ที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และประชุมร่วมกับเกษตรกรเพื่อวางแผนเตรียมการทดลอง โดยจะต้องทราบตารางการทำงานในแปลงอ้อยของเกษตรกร ตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกไปจนถึงเก็บเกี่ยวอ้อย เพื่อกำหนดตารางการลงพื้นที่เก็บข้อมูลผลกระทบต่อการอัดของดิน

3.1.3 การเก็บข้อมูลผลกระทบต่อการอัดแน่นของดิน

ทำการเก็บข้อมูลตำแหน่งเดิมในช่วงระยะเวลาของการจัดการแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อที่มีทั้งการจัดการทั้งแบบเผาและไม่เผาใบอ้อย ดังนี้

ตารางที่ 1 การเก็บข้อมูลในแปลงอ้อย

การเก็บข้อมูลดิน (ครั้งที่)	แปลงอ้อยปลูก	แปลงอ้อยต่อ	ระยะเวลาเก็บข้อมูล (เดือนหลังปลูก)
1	ก่อนปลูก ^{1/}	ก่อนการใส่ปุ๋ยหรือกำจัดวัชพืช	0
2	หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย	หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย	4
3	ก่อนเก็บเกี่ยว	ก่อนเก็บเกี่ยว	8
4	หลังการเก็บเกี่ยวอ้อย ^{2/}	หลังการเก็บเกี่ยวอ้อย ^{2/}	13

หมายเหตุ ^{1/} ช่วงเวลาก่อนปลูก หมายถึง การเก็บข้อมูลในครั้งที่ 1

^{2/} ช่วงเวลาหลังเก็บเกี่ยว หมายถึง การเก็บข้อมูลในครั้งที่ 4 (ครั้งสุดท้าย)

3.1.3.1 ค่าความต้านทานการแทงทะลุดิน

กำหนดจุดที่จะเก็บข้อมูลการอัดแน่นของดินในแปลงอ้อย และหาค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน (cone index) ใช้ cone penetrometer กดดินโดยใช้หัวรูปกรวยขนาดพื้นที่ 2 ตารางเซนติเมตร ในการกด ทำการกดดินเพื่อเก็บข้อมูลจำนวน 16 จุด/แปลง โดยเริ่มเก็บข้อมูลจากหัวแปลงลึกเข้าไปภายในแปลงปลูก โดยแต่ละจุดห่างกัน 10 เมตร (0-30 เมตร) และที่ระดับความลึก 0- 60 เซนติเมตร จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณในสมการด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป จะได้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน ที่มีหน่วยเมกะปาสคาล (MPa) โดยหน่วยปาสคาล มีแรงดันหรือความต้านทาน เท่ากับนิวตันต่อตารางเมตร ($N\ m^{-2}$) หรือ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาทีกำลังสอง ($kg\ m^{-1}\ s^{-2}$)

3.1.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติดิน

เก็บดินด้วย soil core จุดเดียวกับที่เก็บข้อมูลการแทงทะลุ โดยทำการเก็บดินที่ระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร (จำนวน 4 ซ้ำ) จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติดิน

3.1.3.2.1 ความชื้นของดิน (soil moisture)

นำตัวอย่างดินของแต่ละแปลงที่ระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร มาชั่งน้ำหนัก (wet weight) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (dry weight) และคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินดังสมการต่อไปนี้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2530)

$$\text{ความชื้น (\%)} = (\text{wet weight} - \text{dry weight}) \times 100 / \text{dry weight}$$

3.1.3.2.2 อินทรีย์วัตถุ

ทำการเก็บดินที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร และนำมาวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ตามวิธีของ Walkley และ Black (1947)

3.1.3.2.3 เนื้อดิน (soil texture)

ทำการเก็บดินที่ระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร และนำมาแยกอนุภาคทราย หยาบ แป้ง และดินเหนียว ได้อย่างถูกต้องโดยอาศัยหลักการวัตถุที่มีขนาดแตกต่างกันจะตกตะกอนที่เวลาต่างกัน สามารถตรวจสอบเนื้อดินได้โดยอาศัยโดอะแกรมสามเหลี่ยม การวิเคราะห์เชิงกลมี 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. แยกอินทรีย์สารจากส่วนอื่นๆโดยใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
2. ทำให้อนุภาคอินทรีย์ทุกอนุภาคให้อยู่ในสภาพเดี่ยวๆ (dispersing agent) โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือแคลกอน (calgon)
3. แยกส่วนดินผง ขนาดใหญ่กว่าขนาด 2 มิลลิเมตรออกไปโดยใช้วิธีร่อนด้วยตะแกรงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร
4. หาปริมาณอนุภาคในกลุ่มขนาดต่างๆในดินผง โดยใช้วิธีไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer method) ซึ่งมีขั้นตอนทำดังต่อไปนี้โดยนำตัวอย่างดินมาทำจัดอินทรีย์วัตถุ ด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่อนดินในน้ำผ่านตะแกรง 2 มิลลิเมตร ล้างดินด้วยน้ำทำให้ดินแห้ง ชั่งตัวอย่างดินที่ได้ แล้วนำไปทำเป็นสารแขวนลอยในน้ำด้วยการใส่สารส่งเสริมการกระจายของอนุภาคดิน (dispersion agent) เช่น สารละลายแคลกอน (calgon solution) 5 เปอร์เซ็นต์ ปั่นสารแขวนลอยด้วยเครื่องปั่น ถ่ายของผสมลงใน กระบอกตวงแบบตกตะกอน (sedimentation cylinder) ให้หมดแล้วหย่อนไฮโดรมิเตอร์ ลงไปโดยตั้งเวลาอ่านที่ 40 วินาที และ 2 ชั่วโมง อ่านอุณหภูมิ ค่าที่อ่านได้ที่ 40 วินาทีเป็นปริมาณของกลุ่มทรายแป้ง และ ดินเหนียว และ แคลกอน รวมกัน ส่วน 2 ชั่วโมงเป็นปริมาณของกลุ่มขนาดของดินเหนียวและ แคลกอน นำเอาผลการทดลองไปหาเปอร์เซ็นต์ของ ทราย ทรายแป้งและดินเหนียว จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาประเภทของเนื้อดินโดยอาศัยไดอะแกรมสามเหลี่ยม (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2530)

3.1.3.2.4 ค่าหนาแน่นรวมของดิน (bulk density)

ทำการเก็บดินที่ระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร โดยใช้ soil core จากนั้นนำไปอบตัวอย่างดินใน core ดินที่จะหาค่าความหนาแน่นรวมควรมีความชื้นพอสมควร ไม่มีกรวดหรือก้อนหินขนาดใหญ่เพราะจะทำให้เครื่องกระแทกสำหรับเก็บดินเสียหายได้ ตัดดินส่วนเกินที่อยู่นอก core ออกให้หมด นำดินใน core ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมงหรือจนมีน้ำหนักคงที่ นำมาใส่ desiccator จนถึงอุณหภูมิห้อง นำดินใน core ไปชั่งน้ำหนัก นำค่าไปคำนวณดังสมการ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2530)

$$Db = Msd/Vts$$

Db = ความหนาแน่นรวมของดิน

Msd = มวลของดิน หาได้จากการนำเอาดินแห้งไปชั่ง มีหน่วยเป็น กรัม หรือปอนด์

Vts = ปริมาตรรวมของดินหาได้จากการนำเอาดินแห้งไปแทนที่น้ำ มีหน่วย เป็น มิลลิลิตรหรือ

ลูกบาศก์ฟุต

3.1.4 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปการดำเนินงาน

3.2 สถานที่ดำเนินงาน

แปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อของเกษตรกรในพื้นที่จังหวัดลพบุรีและสระบุรี

บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษา

โครงการวิจัยได้ดำเนินการดังนี้

1. พัฒนาแบบสอบถามเพื่อเก็บข้อมูลการปลูกและการจัดการอ้อยของเกษตรกรในพื้นที่เป้าหมาย

ทำการร่างแบบสอบถามโดยใช้แบบสอบถามที่ใช้ในโครงการจัดการเครื่องจักรกลการเกษตรในไร่อ้อยพื้นที่ภาคกลาง ปี 2559 เป็นต้นแบบ เพื่อให้ครอบคลุมทั้งด้านขนาดพื้นที่ปลูก ลักษณะแปลงปลูก การจัดการแปลง ปลูกอ้อย และรูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อย

2. ผลการรวบรวมข้อมูลเครื่องจักรกลที่เกี่ยวข้องตั้งแต่การปลูกจนถึงการเก็บเกี่ยว

จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยในพื้นที่จังหวัดลพบุรี พบว่า คณะผู้วิจัยได้ประสานกับเกษตรกรที่มีการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ ในพื้นที่อำเภอหนองม่วง และอำเภอท่าหลวง ซึ่งได้เสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 6 ตอน ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของเกษตรกร

จากการสำรวจสอบถามเกษตรกรที่ประกอบอาชีพปลูกอ้อยในพื้นที่จังหวัดลพบุรี ได้แก่อำเภอท่าหลวง และอำเภอหนองม่วง พบว่าเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยเป็นเพศชาย 19 ราย และเพศหญิง 8 ราย คิดเป็นร้อยละ 70.37 และ 29.63 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) เกษตรกรมีอายุในช่วงอายุ 51-55 ปี มากที่สุด รองลงมาคือ ช่วงอายุ 46-50 ปีและ ช่วงอายุ 36-40 ปีหรือร้อยละ 29.63, 22.23 และ 18.52 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ซึ่งพบว่า เกษตรกรที่สำรวจอาศัยในอำเภอท่าหลวงและอำเภอหนองม่วง คิดเป็นร้อยละ 48.15 และ 51.85 ตามลำดับ (ตารางที่ 4) เกษตรกรส่วนใหญ่มีแปลงปลูกอ้อย จำนวน 1-5 แปลงมากที่สุด และ จำนวน 6-10 แปลง รองลงมา คิดเป็นร้อยละ 59.26 และ 37.04 ตามลำดับ (ตารางที่ 5) เกษตรกรมีพื้นที่ปลูก 0-50 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 44.46 และ พื้นที่ปลูก 51-100 ไร่ และ 401 ไร่ขึ้นไป คิดเป็นร้อยละ 18.52 (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 2 ข้อมูลเกษตรกรในอำเภอท่าหลวงและอำเภอหนองม่วง

เพศ	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ชาย	8	29.63	11	40.74
หญิง	5	18.52	3	11.11
รวม	13		14	

ตารางที่ 3 ช่วงอายุของเกษตรกร

ช่วงอายุ	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ช่วงอายุ 20-30 ปี				
ช่วงอายุ 31-35 ปี			1	3.70
ช่วงอายุ 36-40 ปี	1	3.70	4	14.82
ช่วงอายุ 41-45 ปี	2	7.41	1	3.70
ช่วงอายุ 46-50 ปี	4	14.82	2	7.41
ช่วงอายุ 51-55 ปี	5	18.52	3	11.11
ช่วงอายุ 56-60 ปี	1	3.70	3	11.11
รวม	13		14	

ตารางที่ 4 ที่อยู่เกษตรกรที่สำรวจแบบสอบถาม

ที่อยู่ (อำเภอ)	จำนวน (คน)	ร้อยละ
ท่าหลวง	13	48.15
หนองม่วง	14	51.85
รวม		

ตารางที่ 5 จำนวนแปลงปลูกอ้อยของเกษตรกร

จำนวนแปลงเพาะปลูกอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แปลงปลูก จำนวน 1-5 แปลง	7	25.93	9	33.33
แปลงปลูก จำนวน 6-10 แปลง	5	18.52	5	18.52
แปลงปลูก จำนวน 11-15 แปลง	1	3.70		
แปลงปลูก จำนวน 16-20 แปลง				
แปลงปลูก จำนวน 21-25 แปลง				
แปลงปลูก มากกว่า 26 แปลง				
รวม	13		14	

ตารางที่ 6 พื้นที่ปลูกทั้งหมด

จำนวนพื้นที่ปลูกทั้งหมด	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 0-50 ไร่	5	18.53	7	25.93
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 51-100 ไร่	2	7.41	3	11.11
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 101-150 ไร่	1	3.70	1	3.70
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 151-200 ไร่	1	3.70		
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 201-250 ไร่				
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 251-300 ไร่	1	3.70		
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 301-350 ไร่				
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 351-400 ไร่	1	3.70		
พื้นที่ปลูกตั้งแต่ 401 ไร่ ขึ้นไป	2	7.41	3	11.11
รวม	13		14	

ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินในการเพาะปลูกอ้อย

เนื่องจากพื้นที่ปลูกอ้อยของเกษตรกรส่วนใหญ่มีการถือครองเอกสารสิทธิ์ที่เป็น ภ.บ.ท.5 มากที่สุด รองลงมา คือ โฉนด น.ส.๓ ส.ป.ก และ ส.ค.๑ หรือ ร้อยละ 48.15, 22.22, 18.53 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 7) ซึ่งสภาพพื้นที่ปลูกส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ดอน ร้อยละ 66.67 และพื้นที่ลุ่ม ร้อยละ 33.33 (ตารางที่ 9) มีลักษณะเป็นดินเหนียว ร้อยละ 88.88 และเป็นดินร่วนปนทราย ร้อยละ 11.12 (ตารางที่ 8)

โดยจากการสำรวจพันธุ์อ้อยที่ปลูกพบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ปลูก พันธุ์ขอนแก่น 3 พันธุ์ LK92-11กับพันธุ์ขอนแก่น3 LK92-11และ อุทอง กับ k9972 หรือร้อยละ 85.19, 7.41 และ 3.70 (ตารางที่ 11) เป็นอ้อยต่อ 3 ร้อยละ 25.92 รองลงมาคือ อ้อยต่อ 2 และต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 14.81 (ตารางที่ 10) เกษตรกรเริ่มปลูกอ้อยมากที่สุดในเดือน กุมภาพันธ์ มกราคม พฤษภาคม มีนาคม และ เมษายน หรือคิดเป็นร้อยละ 29.63, 18.52, 14.82 และ 11.11 ตามลำดับ (ตารางที่ 13) โดยอาศัยน้ำฝนจำนวน 11 ราย หรือ ร้อยละ 40.74 โดยให้น้ำเป็นระบบน้ำหยด จำนวน 16 ราย หรือ ร้อยละ 59.26 (ตารางที่ 12) และปริมาณน้ำตาล (CCS) ที่ได้หลังจากเก็บเกี่ยว พบว่า ค่า CCS เท่ากับ 12 หรือคิดเป็นร้อยละ 37.05 รองลงมาคือ ค่า CCS เท่ากับ 11 และ 13 คิดเป็นร้อยละ 29.62 (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 7 ประเภทเอกสารสิทธิ์ถือครองที่ดิน

เอกสารสิทธิ์ถือครองที่ดิน	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
โฉนด			6	22.22
ส.ค.๑			1	3.70
น.ส.๓			5	18.53
น.ส.๕	1	3.70		
ภ.บ.ท.5	11	40.74	2	7.41
ส.ป.ก.	1	3.70		
รวม	13		14	

ตารางที่ 8 ลักษณะดินปลูกอ้อย

ลักษณะดินที่เกษตรกรปลูกอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ดินเหนียว	12	44.44	12	44.44
ดินทราย				
ดินร่วน	1	3.70	2	7.42
ดินร่วนปนทราย				
อื่นๆ				
รวม	13		14	

ตารางที่ 9 สภาพพื้นที่ปลูกอ้อย

สภาพพื้นที่ที่เกษตรกรใช้ปลูกอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
พื้นที่ดอน	8	29.63	10	37.04
พื้นที่ลุ่ม	5	18.52	4	14.81
อื่นๆ				
รวม	13		14	

ตารางที่ 10 ชนิดอ้อยที่ปลูก

ชนิดอ้อยที่ปลูก	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
อ้อยต่อ 2			4	14.81
อ้อยต่อ 3	3	11.11	4	14.81
อ้อยต่อ 4			2	7.42
อ้อยต่อ 5	3	11.11	1	3.70
อ้อยปลูกใหม่กับอ้อยต่อ 1	1	3.70	1	3.70
อ้อยปลูกใหม่กับอ้อยต่อ 2	2	7.42	1	3.70
อ้อยปลูกใหม่กับอ้อยต่อที่ 3	2	7.42		
อ้อยปลูกใหม่กับอ้อยต่อที่ 4			1	3.70
อ้อยปลูกใหม่กับอ้อยต่อที่ 5	1	3.70		
อ้อยปลูกใหม่กับอ้อยต่อที่ 8	1	3.70		
รวม	13		14	

ตารางที่ 11 พันธุ์อ้อยปลูก

พันธุ์อ้อยที่เกษตรกรปลูก	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
พันธุ์ขอนแก่น 3	9	33.33	14	51.86
LK92-11	1	3.70		
LK92-11 กับ พันธุ์ขอนแก่น 3	2	7.41		
อุททอง กับ k9972	1	3.70		
รวม	13		14	

ตารางที่ 12 ระบบการให้น้ำการปลูกอ้อย

ระบบการให้น้ำของเกษตรกร	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
อาศัยน้ำฝน	6	22.22	5	18.52
ระบบน้ำหยด	7	25.93	9	33.33
รวม	13		14	

ตารางที่ 13 ช่วงเดือนปลูกอ้อย

ช่วงระยะเวลาการปลูกอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ธันวาคม	1	3.70	3	11.11
มกราคม	3	11.11	2	7.41
กุมภาพันธ์	2	7.41	6	22.22
มีนาคม	2	7.41	1	3.70
เมษายน	1	3.70	2	7.41
พฤษภาคม	4	14.82		
รวม	13		14	

ตารางที่ 14 ค่า CCS

ค่า CCS หลังจากตัดครั้งแรก	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
10 CCS	1	3.70		
11 CCS	5	18.52	3	11.11
12 CCS	3	11.11	7	25.94
13 CCS	4	14.81	4	14.81
รวม	13		14	

ตารางที่ 15 น้ำหนักผลผลิต

น้ำหนักผลผลิตตัดครั้งแรก(ตัน/ไร่)	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ผลผลิตเฉลี่ย 9 ตันไร่/			1	3.70
ผลผลิตเฉลี่ย 10 ตันไร่/	6	22.23		
ผลผลิตเฉลี่ย 11 ตันไร่/	1	3.70		
ผลผลิตเฉลี่ย 12 ตันไร่/	4	14.82	8	29.64
ผลผลิตเฉลี่ย 13 ตันไร่/	1	3.70	1	3.70
ผลผลิตเฉลี่ย 14 ตันไร่/			1	3.70
ผลผลิตเฉลี่ย 15 ตันไร่/	1	3.70	3	11.11
รวม	13		14	

ตอนที่ 3 ผลการวิเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ของเกษตรกรผู้ปลูกอ้อย

การสำรวจแบบสอบถามเครื่องมือและอุปกรณ์ต่อพ่วงที่เกษตรกรผู้ปลูกอ้อยใช้ตั้งแต่การเตรียมดินจนถึงการเก็บเกี่ยว โดยจำแนกตามยี่ห้อรถ จำนวนรถที่ใช้อายุของรถ ประเภทอุปกรณ์ต่อพ่วง เป็นต้น พบว่าเกษตรกรไม่มีรถแทรกเตอร์จำนวน 4 ราย คิดเป็นร้อยละ 14.81 และรถแทรกเตอร์ที่เกษตรกรมีครอบครองจำนวน 1-2 คัน มากที่สุด จำนวน 12 ราย หรือร้อยละ 44.46 รองลงมาคือ มีจำนวนรถแทรกเตอร์ 3-4 คัน จำนวน 5 ราย หรือร้อยละ 18.52 (ตารางที่ 16) รถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Ford กับ Kubota เป็นยี่ห้อรถที่เกษตรกรนิยมใช้งานมากที่สุด จำนวน 8 ราย คิดเป็นร้อยละ 29.64 รองลงมาคือ ยี่ห้อ Hinomoto จำนวน 4 ราย หรือร้อยละ 14.82 (ตารางที่ 17) โดยน้ำหนักรถแทรกเตอร์ขนาด 24 แรงม้า มีน้ำหนัก 800 -900 กิโลกรัม รถแทรกเตอร์ขนาด 75 แรงม้าขึ้นไป มีน้ำหนัก 2480-3580 กิโลกรัม อายุของรถแทรกเตอร์มีอายุระหว่าง 9-12 ปี จำนวน 14 ราย อายุรถระหว่าง 5-8 ปี จำนวน 4 ราย อายุรถมากกว่า 18 ปี จำนวน 4 ราย และ อายุรถระหว่าง 0-4 ปี จำนวน 1 ราย หรือร้อยละ 51.86, 14.82, 14.82 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 18)

ส่วนอุปกรณ์ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ เช่น ฝาลพรวน 3, 7 หรือ 20 จาน รีปเปอร์ระเบิดดินดาน, โรตารี, เครื่องผ่ากออ้อย คราดสปริง เครื่องปลูกอ้อย และ เครื่องพ่นสารกำจัดศัตรูพืช(ดีดรถแทรกเตอร์) เป็นต้น โดยอุปกรณ์หว่านพ่วงเตรียมดินมีน้ำหนัก 590-1,000 กิโลกรัม อุปกรณ์หว่านพ่วงบำรุงรักษาดูแลอ้อย มีน้ำหนัก 280-320 กิโลกรัม จากการสำรวจพบว่าเกษตรกรจะมีอุปกรณ์ต่อพ่วงมากกว่า 5 ชนิด จำนวน 9 ราย มีอุปกรณ์ต่อพ่วงมากกว่า 2 แต่ไม่เกิน 4 ชนิด จำนวน 8 ราย อุปกรณ์ต่อพ่วง 1-2 ชนิด จำนวน 8 ราย หรือร้อยละ 33.34, 29.63, 18.52 และ 18.52 ตามลำดับ (ตารางที่ 19)

การเก็บเกี่ยวผลผลิตอ้อยโดยปกติจะมีวิธีการ คือ 1).ใช้รถตัดอ้อย 2).ใช้แรงงานคนตัดพร้อมทั้งใช้รถคืบอ้อย แต่จากการสำรวจแบบสอบถามพบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ไม่มีรถตัดอ้อย จำนวน 22 ราย หรือร้อยละ 81.48 ส่วนเกษตรกรที่ใช้รถตัดอ้อย มีรถตัดจำนวน 1 คัน 5 ราย คิดเป็นร้อยละ 18.52 (ตารางที่ 20)

ผลจากการสำรวจ พบว่า เกษตรกร จำนวน 18 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 66.67 ไม่มีรถคืบอ้อยเป็นของตนเอง ส่วนเกษตรกรที่มีรถคืบอ้อยจำนวน 1คัน จำนวน 5 ราย ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 18.52 (ตารางที่ 20) อายุรถคืบอ้อยอยู่ในช่วง 6-10 ปี มากที่สุด จำนวน 7 ราย รองลงมา อยู่ในช่วง 1-5 ปี และอายุมากกว่า 16 ปีขึ้นไป จำนวน 1 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 25.93 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 23)

ในส่วนของการขนส่งอ้อยจากแปลงปลูกไปสู่โรงงานรับซื้ออ้อย เกษตรกรใช้รถบรรทุก 6 ล้อ 10 ล้อ และรถพ่วง พบว่า เกษตรกรไม่มีรถบรรทุก จำนวน 18 ราย คิดเป็นร้อยละ 66.67 ส่วนเกษตรกรที่ใช้รถบรรทุกขนาด 10 ล้อ 2 คัน จำนวน 4 ราย คิดเป็นร้อยละ 14.81 (ตารางที่ 25) และอายุของรถอยู่ในช่วง 6-10 ปี คิดเป็นร้อยละ 25.93 (ตารางที่ 26)

ตารางที่ 16 จำนวนรถแทรกเตอร์ของเกษตรกร

จำนวนรถแทรกเตอร์ที่เกษตรกรใช้	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ไม่มีรถ	1	3.70	3	11.11
มีรถ 1-คัน 2	5	18.52	7	25.94
มีรถ 3-คัน 4	3	11.11	2	7.41
มีรถ 5-คัน 6	2	7.41	1	3.70
มีรถ 7-คัน 8	1	3.70		
มีรถ 9-คัน 10	1	3.70	1	3.70
รวม	13		14	

ตารางที่ 17 ยี่ห้อรถแทรกเตอร์

ยี่ห้อรถแทรกเตอร์	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ยี่ห้อ Ford	1	3.70	1	3.70
ยี่ห้อ Kubota	1	3.70	1	3.70
ยี่ห้อ Massey			1	3.70
ยี่ห้อ Hinomoto	1	3.70	3	11.12
ยี่ห้อ Ford กับ ยี่ห้อ Kubota	6	22.22	2	7.42
ยี่ห้อ Ford กับ ยี่ห้อ Hinomoto	2	7.42		
ยี่ห้อ Ford กับ Yanma, Kubota			1	3.70
ยี่ห้อ Isaki	1	3.70	1	3.70
ยี่ห้อ Yanma			1	3.70
ไม่มีรถเป็นของตัวเอง	1	3.70	3	11.12
รวม	13		14	

ตารางที่ 18 อายุรถแทรกเตอร์

อายุรถแทรกเตอร์	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
อายุรถ 0-4 ปี			1	3.70
อายุรถ 5-8 ปี	2	7.41	2	7.41
อายุรถ 9-12 ปี	9	33.33	5	18.53
อายุรถมากกว่า ปี 18	1	3.70	3	11.11
ไม่มีรถแทรกเตอร์	1	3.70	3	11.11
รวม	13		14	

ตารางที่ 19 อุปกรณ์ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์

อุปกรณ์ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
เครื่องพ่นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืช	1	3.70		
อุปกรณ์ต่อพ่วง 1-2 ชนิด	2	7.41	3	11.11
อุปกรณ์ต่อพ่วง มากกว่า 2 แต่ไม่เกิน 4 ชนิด	5	18.52	3	11.11
อุปกรณ์ต่อพ่วงมากกว่า 5 ชนิด	4	14.82	5	18.52
ไม่มีรถแทรกเตอร์	1	3.70	3	11.11
รวม	13		14	

ตารางที่ 20 จำนวนรถตัดอ้อย

จำนวนรถตัดอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ไม่มีรถตัดอ้อย	11	40.74	11	40.74
รถตัดอ้อย คัน 1	2	7.41	3	11.11
รถตัดอ้อย คัน 2				
รถตัดอ้อย คัน 4				
รวม	13		14	

ตารางที่ 21 ยี่ห้อรถตัดอ้อย

ยี่ห้อรถตัดอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ยี่ห้อ Austoft	1	3.70	2	7.42
สามารถเกษตรยนต์	1	3.70	1	3.70
ไม่มีรถตัดอ้อย	11	40.74	11	40.74
รวม	13		14	

ตารางที่ 22 จำนวนรถคืบอ้อย

จำนวนรถคืบอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
รถคืบอ้อย คัน 1	4	14.81	1	3.70
รถคืบอ้อย คัน 2	2	7.41		
รถคืบอ้อย คัน 3			2	7.41
ไม่มีรถคืบอ้อย	7	25.93	11	40.74
รวม	13		14	

ตารางที่ 23 อายุรถคืบอ้อย

อายุรถคืบอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
อายุ 1-5 ปี	1	3.70		
อายุ 6-10 ปี	4	14.82	3	11.11
อายุมากกว่า 16 ปี ขึ้นไป	1	3.70		
ไม่มีรถคืบ	7	25.93	11	40.74
รวม	13		14	

ตารางที่ 24 ยี่ห้อรถคืบอ้อย

ยี่ห้อของรถคืบอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
Ford	5	18.53	1	3.70
Massey			1	3.70
สามารถเกษตรยนต์			1	3.70
กลกิจ	1	3.70		
ไม่มี	7	25.93	11	40.74
รวม	13		14	

ตารางที่ 25 จำนวนรถบรรทุกอ้อย

จำนวนรถบรรทุกอ้อย (10 ล้อ)	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
จำนวน .คัน 1				
จำนวน คัน 2	3	11.11	1	3.70
จำนวน คัน 3				
จำนวน คัน 4	2	7.42		
จำนวน คัน 5				
จำนวน คัน 6				
จำนวน คัน 7	1	3.70	1	3.70
จำนวน คัน 8			1	3.70
ไม่มีรถบรรทุก	7	25.93	11	40.74
รวม	13		14	

ตารางที่ 26 อายุรณบรรทุกอ้อยขนาด 10 ล้อ

อายุรณบรรทุกอ้อยขนาด ล้อ 10	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
อายุ 0- ปี 5				
อายุ 6-ปี 10	6	22.22	2	7.41
อายุ 11-ปี 15				
อายุ 16- ปี 20			1	3.70
อายุ 21- ปี 25				
อายุ 26- ปี 30				
ไม่มีรถ	7	25.93	11	40.74
รวม	13		14	

ตอนที่ 4 ผลการวิเคราะห์การจัดการอ้อยปลูกจนถึงระยะเก็บเกี่ยว

การเตรียมดินครั้งที่ 1 เกษตรกรใช้ใช้ทางพ่วงที่เป็นผาล 2, 3 หรือ ผาล 4 มากที่สุด รองลงมาคือ ผาล 7 และรีปเปอร์ระเบิดดินดาน จำนวน 24, 2 และ 1 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 88.88, 7.40 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 27)

การเตรียมดินครั้งที่ 2 เกษตรกรส่วนใหญ่ใช้ผาล 2, 3 หรือ ผาล 4 มากที่สุด รองลงมาคือผาล 7 จำนวน 15 และ 12 หรือคิดเป็นร้อยละ 55.56 และ 44.44 ตามลำดับ (ตารางที่ 28)

การเตรียมดินครั้งที่ 3 พบว่า เกษตรกรไม่มีการเตรียมดินครั้งที่ 3 จำนวน 7 ราย คิดเป็นร้อยละ 25.92 ส่วนเกษตรกรที่เตรียมดินในครั้งที่ 3 พบว่า เกษตรกรใช้ผาล 7 มากที่สุด รองลงมาคือผาลยกร่อง และมินิคอมไบ จำนวน 11, 8 และ 1 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 40.74, 29.64 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 29)

การเตรียมดินครั้งที่ 4 พบว่า เกษตรกรไม่มีการเตรียมดินครั้งที่ 4 จำนวน 23 ราย คิดเป็นร้อยละ 85.19 ส่วนเกษตรกรที่มีการเตรียมดินครั้งที่ 4 พบว่า การใช้ผาลยกร่อง มากที่สุด รองลงมา คือ มินิคอมไบ จำนวน 3 และ 1 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 11.11 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 30)

ตารางที่ 27 เครื่องมือเตรียมดินครั้งที่ 1

การใช้เครื่องมือการเตรียมดิน	ครั้งที่ 1			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ผาล 2, 3 หรือผาล 4	11	40.75	13	48.15
ผาล 7	1	3.70	1	3.70
ริปเปอร์ระเบิดดินดาน	1	3.70		
รวม	13		14	

ตารางที่ 28 เครื่องมือเตรียมดินครั้งที่ 2

การใช้เครื่องมือการเตรียมดิน	ครั้งที่ 2			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ผาล 2, หรือ ผาล 4 3	7	25.93	8	29.63
ผาล 7	6	22.22	6	22.22
ริปเปอร์ระเบิดดินดาน				
รวม	13		14	

ตารางที่ 29 เครื่องมือเตรียมดินครั้งที่ 3

การใช้เครื่องมือการเตรียมดิน	ครั้งที่ 3			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ผาล 2, หรือ ผาล 4 3				
ผาล 7	7	25.93	4	14.81
ผาลยกร่อง	3	11.11	5	18.53
มินิคอมไบ			1	3.70
ไม่เตรียมดิน	3	11.11	4	14.81
รวม	13		14	

ตารางที่ 30 เครื่องมือเตรียมดินครั้งที่ 4

การใช้เครื่องมือการเตรียมดิน	ครั้งที่ 4			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ผาล 2, หรือ ผาล 4 3				
ผาล 7				
ผาลยกร่อง	2	7.41	1	3.70
มินิคอมไบ	1	3.70		
ไม่เตรียมดิน	10	37.04	13	48.15
รวม	13		14	

ระบบการปลูกอ้อย พบว่าอัตราท่อนพันธุ์ที่เกษตรกรใช้ปลูกมากที่สุด คือ อัตรา 2 ต้นต่อไร่ รองลงมาคือ อัตรา 1.5 ต้นต่อไร่ 1.2 ต้นต่อไร่ และ 2.5 ต้นต่อไร่ จำนวน 13, 9, 3 และ 2 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 48.15, 33.33, 11.11 และ 7.41 ตามลำดับ (ตารางที่ 34) โดยเกษตรกรปลูกเป็นร่องเดี่ยว และร่องคู่ จำนวน 17 และ 10 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 62.96 และ 37.04 ตามลำดับ (ตารางที่ 32) ระยะระหว่างร่องอ้อยมีขนาดตั้งแต่ 120 เซนติเมตร จนถึงระยะ 175 เซนติเมตร พบว่า ระยะห่างระหว่างร่องอ้อยขนาด 150 เซนติเมตร เกษตรกรปลูกมากที่สุด รองลงมาคือ ขนาด 120 เซนติเมตร ขนาด 160 เซนติเมตร ขนาด 130 เซนติเมตร และ 170 เซนติเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 33.33, 22.23, 22.23, 7.41 และ 7.41 ตามลำดับ (ตารางที่ 33) วิธีการปลูกของเกษตรกรจะใช้แรงงานคน เครื่องปลูก และ แรงงานคนร่วมกับ เครื่องปลูก จำนวน 13, 12 และ 2 ราย หรือร้อยละ 48.15, 44.44 และ 7.41 (ตารางที่ 31)

ตารางที่ 31 ระบบการปลูกอ้อย

วิธีการปลูกอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แรงงานคน	7	25.93	6	22.22
เครื่องปลูก	6	22.22	6	22.22
แรงงานคนร่วมกับเครื่องปลูก			2	7.41
รวม	13		14	

ตารางที่ 32 ระบบแถวการปลูกอ้อย

ระบบแถวการปลูกอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ปลูกร่องเดี่ยว	8	29.63	9	33.33
ปลูกร่องคู่	5	18.52	5	18.52
รวม	13		14	

ตารางที่ 33 ระยะห่างระหว่างร่องอ้อย

ระยะห่างระหว่างร่องอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ขนาด 120 ซม.	6	22.22		
ขนาด 130 ซม.	2	7.41		
ขนาด 140 ซม.	1	3.70		
ขนาด 150 ซม.	3	11.11	6	22.22
ขนาด 160 ซม.	1	3.70	5	18.53
ขนาด 170 ซม.			2	7.41
ขนาด 175 ซม.			1	3.70
รวม	13		14	

ตารางที่ 34 อัตราท่อนพันธุ์

อัตราท่อนพันธุ์	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
1.2 ตัน ต่อไร่	1	3.70	2	7.41
1.5 ตัน ต่อไร่	2	7.41	7	25.92
2 ตัน ต่อไร่	8	29.63	5	18.52
2.5 ตัน ต่อไร่	2	7.41		
รวม	13		14	

การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 เกษตรกรใช้ซีโก มากที่สุด รองลงมาคือ ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 จำนวน 7, 6 และ 4 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 25.94, 22.22 และ 14.82 ตามลำดับ (ตารางที่ 35) โดยใช้เครื่องจักรใส่ปุ๋ย มากที่สุด รองลงมา คือ แรงงานคน คิดเป็นร้อยละ 74.08 และ 18.52 ตามลำดับ (ตารางที่ 38)

การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 เกษตรกรใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 มากที่สุด จำนวน 9 ราย หรือร้อยละ 33.33 รองลงมาคือ ปุ๋ยเคมีสูตร 27-12-6 และ ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 จำนวน 4 ราย และ 2 หรือคิดเป็นร้อยละ 14.82 และ 7.41 ตามลำดับ (ตารางที่ 36) โดยใช้เครื่องจักรใส่ปุ๋ย มากที่สุด รองลงมา คือ แรงงานคน คิดเป็นร้อยละ 55.56 และ 18.52 ตามลำดับ (ตารางที่ 39)

การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 3 พบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ไม่ใส่ปุ๋ยครั้งที่ 3 ร้อยละ 66.67 ส่วนเกษตรกรที่ใส่ปุ๋ย ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 27-12-6 มากที่สุด รองลงมาคือ ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 และ ปุ๋ยชีวภาพ ร้อยละ 14.82, 11.11, 3.70 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 37) โดยใช้เครื่องจักรใส่ปุ๋ย มากที่สุด รองลงมา คือ แรงงาน คิดเป็นร้อยละ 22.22 และ 11.11 ตามลำดับ (ตารางที่ 40)

ตารางที่ 35 การใส่ปุ๋ยเคมี ครั้งที่ 1

สูตรปุ๋ย	ครั้งที่ 1			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ปุ๋ยชีวภาพ			1	3.70
ซีไค	7	25.94		
ฟิวเตอร์เค็ก	3	11.11		
ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15			6	22.22
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0			4	14.82
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16			3	11.11
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-8-8				
ปุ๋ยเคมีสูตร 18-18-18	1	3.70		
ปุ๋ยเคมีสูตร 21-7-18				
ปุ๋ยเคมีสูตร 22-8-8				
ปุ๋ยเคมีสูตร 25-7-7	1	3.70		
ปุ๋ยเคมีสูตร 27-12-6	1	3.70		
ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0				
ไม่ใส่ปุ๋ย				
รวม	13		14	

ตารางที่ 36 การใส่ปุ๋ยเคมี ครั้งที่ 2

สูตรปุ๋ย	ครั้งที่ 2			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ปุ๋ยชีวภาพ				
ซีโก้				
ฟิวเตอร์เค็ก				
ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15			2	7.42
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0				
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16			1	3.70
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-8-8			1	3.70
ปุ๋ยเคมีสูตร 18-18-18			1	3.70
ปุ๋ยเคมีสูตร 21-7-18			1	3.70
ปุ๋ยเคมีสูตร 22-8-8			1	3.70
ปุ๋ยเคมีสูตร 25-7-7				
ปุ๋ยเคมีสูตร 27-12-6	4	14.82		
ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0	6	22.22	3	11.11
ไม่ใส่ปุ๋ย	3	11.11	4	14.82
รวม	13		14	

ตารางที่ 37 การใส่ปุ๋ยเคมี ครั้งที่ 3

สูตรปุ๋ย	ครั้งที่ 3			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ปุ๋ยชีวภาพ	1	3.70		
ซีโก้				
ฟิวเตอร์เค็ก				
ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15			3	11.11
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0				
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16				
ปุ๋ยเคมีสูตร 16-8-8				
ปุ๋ยเคมีสูตร 18-18-18				
ปุ๋ยเคมีสูตร 21-7-18				
ปุ๋ยเคมีสูตร 22-8-8				
ปุ๋ยเคมีสูตร 25-7-7				
ปุ๋ยเคมีสูตร 27-12-6	4	14.82		
ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0	1	3.70		
ไม่ใส่ปุ๋ย	7	25.93	11	40.74
รวม	13		14	

ตารางที่ 38 วิธีการใส่ปุ๋ย ครั้งที่ 1

วิธีการใส่ปุ๋ย	ครั้งที่ 1			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แรงงานคน	2	7.41	3	11.11
เครื่องจักร	10	37.04	10	37.04
โรงงานจัดการ				
แรงงานคนร่วมกับเครื่องจักร	1	3.70	1	3.70
ไม่ใส่ปุ๋ย				
รวม	13		14	

ตารางที่ 39 วิธีการใส่ปุ๋ย ครั้งที่ 2

วิธีการใส่ปุ๋ย	ครั้งที่ 2			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แรงงานคน	2	7.41	3	11.11
เครื่องจักร	8	29.63	7	25.93
โรงงานจัดการ				
แรงงานคนร่วมกับเครื่องจักร				
ไม่ใส่ปุ๋ย	3	11.11	4	14.81
รวม	13		14	

ตารางที่ 40 วิธีการใส่ปุ๋ย ครั้งที่ 3

วิธีการใส่ปุ๋ย	ครั้งที่ 3			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แรงงานคน			3	11.11
เครื่องจักร	6	22.22		
โรงงานจัดการ				
แรงงานคนร่วมกับเครื่องจักร				
ไม่ใส่ปุ๋ย	7	25.93	11	40.74
รวม	13		14	

การฉีดยาควบคุมกำจัดศัตรูพืชครั้งที่ 1 เกษตรกรจะฉีดสารกำจัดวัชพืชมากที่สุด ร้อยละ 92.6 โดยใช้สารกำจัดศัตรูพืชมากกว่า 1 ชนิดสาร มากที่สุด รองลงมา คือ ใช้สารกำจัดศัตรูพืชมากกว่า 2 ชนิดสาร และ ไดยูรอน ร้อยละ 37.04, 18.52 และ 11.11 ตามลำดับ (ตารางที่ 44)

การฉีดยาควบคุมกำจัดศัตรูพืชครั้งที่ 2 เกษตรกรไม่มีการฉีดยาควบคุมกำจัดศัตรูพืชจำนวน 8 ราย หรือ ร้อยละ 29.63 ส่วนเกษตรกรที่มีการฉีดยา พบว่าจะฉีดสารกำจัดวัชพืชมากที่สุด ร้อยละ 70.37 โดยใช้วิธีการอื่นๆ มากที่สุด จำนวน 9 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 (ตารางที่ 45)

การฉีดยาควบคุมกำจัดศัตรูพืชครั้งที่ 3 พบว่า เกษตรกรจำนวน 26 ราย ไม่มีการควบคุมกำจัดศัตรูครั้งที่ 3 คิดเป็นร้อยละ 96.30 ส่วนเกษตรกรที่มีการฉีดยาควบคุมกำจัดศัตรูพืชจะเน้นกำจัดวัชพืช ร้อยละ 3.70 สารเคมีที่เกษตรกรใช้พบว่า ใช้สารมากกว่า 2 ชนิดสาร มากที่สุด เป็นร้อยละ 3.70 (ตารางที่ 46)

ตารางที่ 41 การควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 1

ชนิดการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 1			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
วัชพืช	12	44.44	13	48.16
วัชพืชร่วมกับแมลง				
วัชพืชร่วมกับโรคพืช			1	3.70
โรคพืชร่วมกับแมลง				
ไม่ฉีดพ่น	1	3.70		
รวม	13		14	

ตารางที่ 42 การควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 2

ชนิดการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 2			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
วัชพืช	10	37.04	9	33.33
วัชพืชร่วมกับแมลง				
วัชพืชร่วมกับโรคพืช				
โรคพืชร่วมกับแมลง				
ไม่ฉีดพ่น	3	11.11	5	18.52
รวม	13		14	

ตารางที่ 43 การควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 3

ชนิดการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 3			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
วัชพืช	1	3.70		
วัชพืชร่วมกับแมลง				
วัชพืชร่วมกับโรคพืช				
โรคพืชร่วมกับแมลง				
ไม่ฉีดพ่น	12	44.44	14	51.86
รวม	13		14	

ตารางที่ 44 สารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 1

ชื่อสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 1			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ไดยูรอน	3	11.11		
อะเมทริน			2	7.41
พาราควอต				
2,4-D			1	3.70
ใช้สารมากกว่า 1 สาร	2	7.41	8	29.63
ใช้สารมากกว่า 2 สาร	5	18.52		
ไม่มีการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	1	3.70	1	3.70
อื่นๆ	2	7.41	2	7.41
รวม	13		14	

ตารางที่ 45 สารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 2

ชื่อสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 2			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ไดยูรอน			1	3.70
อะเมทริน	1	3.70		
พาราควอต			1	3.70
2,4-D	1	3.70		
ใช้สารมากกว่า 1 สาร				
ใช้สารมากกว่า 2 สาร			1	3.70
ไม่มีการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	2	7.42	11	40.75
อื่นๆ	9	33.33		
รวม	13		14	

ตารางที่ 46 สารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 3

ชื่อสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 3			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ไดยูรอน				
อะเมทริน				
พาราควอต				
2,4-D				
ใช้สารมากกว่า 1 สาร				
ใช้สารมากกว่า 2 สาร			1	3.70
ไม่มีการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	12	44.44	13	48.16
อื่นๆ	1	3.70		
รวม	13		14	

ตารางที่ 47 วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 1

วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 1			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แรงงานคน	5	18.52	1	3.70
เครื่องพ่นติดท้ายรถแทรกเตอร์	7	25.93	13	48.15
ไม่มีการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	1	3.70		
รวม	13		14	

ตารางที่ 48 วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 2

วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 2			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แรงงานคน	9	33.33		
เครื่องพ่นติดท้ายรถแทรกเตอร์	2	7.41	3	11.11
ไม่มีการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	2	7.41	11	40.74
รวม	13		14	

ตารางที่ 49 วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช ครั้งที่ 3

วิธีการฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช	ครั้งที่ 3			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แรงงานคน	1	3.70		
เครื่องพ่นติดท้ายรถแทรกเตอร์			1	3.70
ไม่มีการควบคุมกำจัดศัตรูพืช	12	44.44	13	48.16
รวม	13		14	

วิธีการเก็บเกี่ยวผลผลิตอ้อย ซึ่งจะมีทั้งวิธีใช้รถตัดอ้อย และใช้แรงงานคน ซึ่งการใช้แรงงานคน เกษตรกรจะดำเนินการเผาอ้อยก่อนตัดเก็บเกี่ยว รวมถึงการใช้รถคีบอ้อยและรถบรรทุกเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจากการสำรวจพบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ ร้อยละ 55.56 จะไม่เผาอ้อยก่อนการตัดเก็บเกี่ยว และร้อยละ 44.44 จะเผาอ้อยก่อนการตัดเก็บเกี่ยว

(ตารางที่ 49) ซึ่งสอดคล้องกับการใช้รถตัดอ้อยและรถตะกร้า ซึ่งมีจำนวน 8 รายและ 7 ราย ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 29.64 และ 25.92 ตามลำดับ การขนส่งของเกษตรกรจะใช้รถบรรทุกขนาด 10 ล้อ มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 100 (ตารางที่ 51) ส่วนเรื่องระยะทางการขนส่ง พบว่าแปลงของเกษตรกรส่วนมากจะอยู่ห่างจากโรงงาน 50-60 กิโลเมตร รองลงมา คือ มากกว่า 60 กิโลเมตร 40-50 กิโลเมตร 10-20 กิโลเมตร จำนวน 11, 9, 3 และ 2 ราย คิดเป็นร้อยละ 40.74, 33.34, 11.11 และ 7.41 ตามลำดับ (ตารางที่ 52)

ตารางที่ 50 การจัดการแปลงอ้อยก่อนเก็บเกี่ยวผลผลิต

วิธีการเก็บเกี่ยวผลผลิต	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
เผา	6	22.22	6	22.22
ไม่เผา	7	25.93	8	29.63
รวม	13		14	

ตารางที่ 51 รูปแบบการเก็บเกี่ยวผลผลิต

วิธีการตัดอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
แรงงานคนร่วมกับรถคีบ	6	22.22	6	22.22
รถตัดอ้อย	1	3.70	7	25.94
รถตะกร้า	6	22.22	1	3.70
รวม	13		14	

ตารางที่ 52 ชนิดรถบรรทุกอ้อย

ชนิดรถบรรทุกขนส่งอ้อย	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
รถขนาด 6 ล้อ				
รถขนาด 10 ล้อ	13	48.15	14	51.85
อื่นๆ				
รวม	13		14	

ตารางที่ 53 ระยะทางขนส่งอ้อย

ระยะทางขนส่งอ้อยเข้าสู่โรงงาน	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ต่ำกว่า 10 กิโลเมตร				
10-20 กิโลเมตร			2	7.41
20-30 กิโลเมตร	1	3.70		
30-40 กิโลเมตร			1	3.70
40-50 กิโลเมตร	3	11.11		
50-60 กิโลเมตร	7	25.93	4	14.81
มากกว่า 60 กิโลเมตร	2	7.41	7	25.93
รวม	13		14	

ตอนที่ 5 ผลการวิเคราะห์การจัดการอ้อยต่อ

หลังจากที่เก็บเกี่ยวผลผลิตของอ้อยปลูกไปแล้ว การบำรุงรักษาอ้อยต่อก็เป็นสิ่งสำคัญมากไม่แตกต่างกับการปลูกอ้อยใหม่ เกษตรกรจะมีวิธีการปฏิบัติงานที่แตกต่างกันไป เช่น การจัดการดิน 1-2 ครั้ง การใส่ปุ๋ย การควบคุมกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น จากการสำรวจแบบสอบถามพบว่า

การจัดการดิน ครั้งที่ 1 เกษตรกรใช้รถแทรกเตอร์ต่อห่างพ่วงด้วยอุปกรณ์ ริปเปอร์ระเบิดดินดาน 2 ขา และพรวนอเนกประสงค์ จำนวน 24 และ 1 ราย หรือร้อยละ 88.89 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 54)

การจัดการดินครั้งที่ 2 พบว่า ร้อยละ 85.16 เกษตรกรไม่มีการจัดการดินครั้งที่ 2 ส่วนเกษตรกรที่มีการจัดการดินครั้งที่ 2 ใช้อุปกรณ์ต่อพ่วง ริปเปอร์ระเบิดดินดาน 2 ขา และ MPI จำนวน 3 ราย และ 1 ราย หรือร้อยละ 11.11 และ 3.70 ตามลำดับ (ตารางที่ 55)

ตารางที่ 54 การเตรียมดินอ้อยต่อครั้งที่ 1

การเตรียมดินอ้อยต่อ	ครั้งที่ 1			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ริปเปอร์ 2 ขา	11	40.74	13	48.15
พรวนอเนกประสงค์			1	3.70
ไม่มีการจัดการดิน	2	7.41		
รวม	13		14	

ตารางที่ 55 การเตรียมดินอ้อยต่อครั้งที่ 2

การเตรียมดินอ้อยต่อ	ครั้งที่ 2			
	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
รีปเปอร์ 2 ขา	3	11.11		
ไม่มีการจัดการดิน	9	33.33	14	51.86
MPI	1	3.70		
รวม	13		14	

ตอนที่ 6 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

การผลิตอ้อยตั้งแต่ปลูก การดูแลรักษา การเก็บเกี่ยว ทุกขั้นตอนจะมีต้นทุนที่แตกต่างกัน การปฏิบัติงานในแปลงของเกษตรกรจึงแตกต่างกันด้วย เช่น การเตรียมดิน เกษตรกรบางรายไถ่แค่ผาล 3 และ ผาล 7 จำนวน 1-2 ครั้ง แต่บางราย เตรียมดินถึง 3-4 ครั้ง ที่ให้ต้นทุนก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากการสำรวจพบว่า

อ้อยปลูกใหม่ ร้อยละ 55.57 มีต้นทุนเตรียมดินต่ำกว่า 500 บาทต่อไร่ รองลงมา ร้อยละ 11.11 มีต้นทุนเตรียมดินต่ำกว่า 700 บาทต่อไร่ ส่วนการเตรียมดินในอ้อยต่อ โดยเกษตรกรจะใช้ รีปเปอร์ระเบิดดินดาน หรือพรวนเอนกประสงค์มากที่สุด มีต้นทุนไม่เกิน 450 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 100 รองลงมา ต้นทุนไร่

ต้นทุนการใส่ปุ๋ยและค่าแรง พบว่า เกษตรกร ร้อยละ 100 มีต้นทุนใส่ปุ๋ยมากกว่า 1,000 บาท ต้นทุนสารเคมีและแรงงาน พบว่า การฉีดพ่นสารควบคุมกำจัดศัตรูพืช เกษตรส่วนใหญ่ร้อยละ 100 หรือจำนวน 27 ราย มีต้นทุนไร่ละ 301-500 บาท และเกษตรกร ร้อยละ 100 มีต้นทุนค่าตัดและขนส่ง ไร่ละ 301-500 บาท

ตารางที่ 56 ต้นทุนการผลิตอ้อย

ค่าเตรียมดินอ้อยปลูกใหม่ (บาทต่อไร่)	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ราคาต่ำกว่า 500 บาท	8	29.63	7	25.94
ราคาต่ำกว่า 700 บาท	1	3.70	2	7.41
ราคาต่ำกว่า 900 บาท	1	3.70	1	3.70
ราคาต่ำกว่า 1100 บาท				
ราคาต่ำกว่า 1300 บาท	1	3.70		
ราคาต่ำกว่า 1500 บาท	2	7.41		
ราคาต่ำกว่า 1600 บาท			1	3.70
ราคาต่ำกว่า 1700 บาท			1	3.70
ราคาต่ำกว่า 1800 บาท			2	7.41
รวม	13		14	

ตารางที่ 57 ต้นทุนการเตรียมดินอ้อยต่อ

ค่าเตรียมดินอ้อยต่อ (บาทต่อไร่)	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ต่ำกว่า 150 บาท				
ไม่เกิน 250 บาท				
ไม่เกิน 350 บาท				
ไม่เกิน 450 บาท	13	48.15	14	51.85
ไม่เกิน 550 บาท				
ไม่เกิน 750 บาท				
ไม่เกิน 850 บาท				
มากกว่า 851 บาท				
รวม	13		14	

ตารางที่ 58 ต้นทุนการใส่ปุ๋ยและแรงงาน

ค่าใส่ปุ๋ยและแรงงาน	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ต่ำกว่า 300 บาท				
301-400 บาท				
401-500 บาท				
501-600 บาท				
601-700 บาท				
701-800 บาท				
801-900 บาท				
901-1000 บาท				
มากกว่า 1000 บาท	13	48.15	14	51.85
รวม	13		14	

ตารางที่ 59 ต้นทุนสารเคมีและแรงงาน

ค่าสารเคมีและค่าแรง	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ต่ำกว่า 300 บาท				
301-500 บาท	13	48.15	14	51.85
รวม	13		14	

ตารางที่ 60 ต้นทุนค่าเก็บเกี่ยวผลผลิต

ค่าตัดอ้อยรวมกับค่าขนส่ง	ท่าหลวง		หนองม่วง	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
ต่ำกว่า 300 บาท				
301-500 บาท	13	48.15	14	51.85
501-700 บาท				
701-900 บาท				
รวม	13		14	

3. คัดเลือกเกษตรกรเข้าร่วมการทดลองกับโครงการวิจัย

จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยในพื้นที่จังหวัดลพบุรี พบว่า คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกตัวแทนเกษตรกรที่มีการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ โดยได้เกษตรกร จำนวน 2 ราย ในพื้นที่อำเภอหนองม่วง และเกษตรกรจำนวน 2 ราย ในพื้นที่อำเภอท่าหลวง เพื่อใช้เป็นแปลงทดลองสำหรับเก็บข้อมูลผลกระทบของเครื่องจักรกลที่มีต่อคุณสมบัติของดิน (ภาพผนวกที่ 1-4)

4. ผลการทดลอง

4.1 ข้อมูลดินในแปลงทดลองที่อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

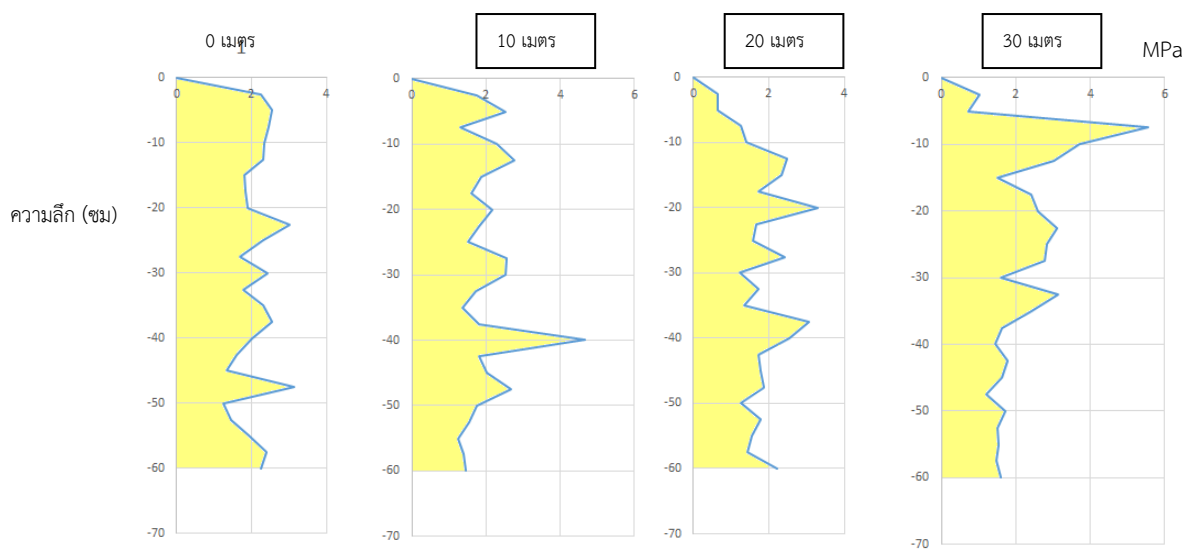
4.1.1 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน (penetration resistance)

4.1.1.1 ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน)

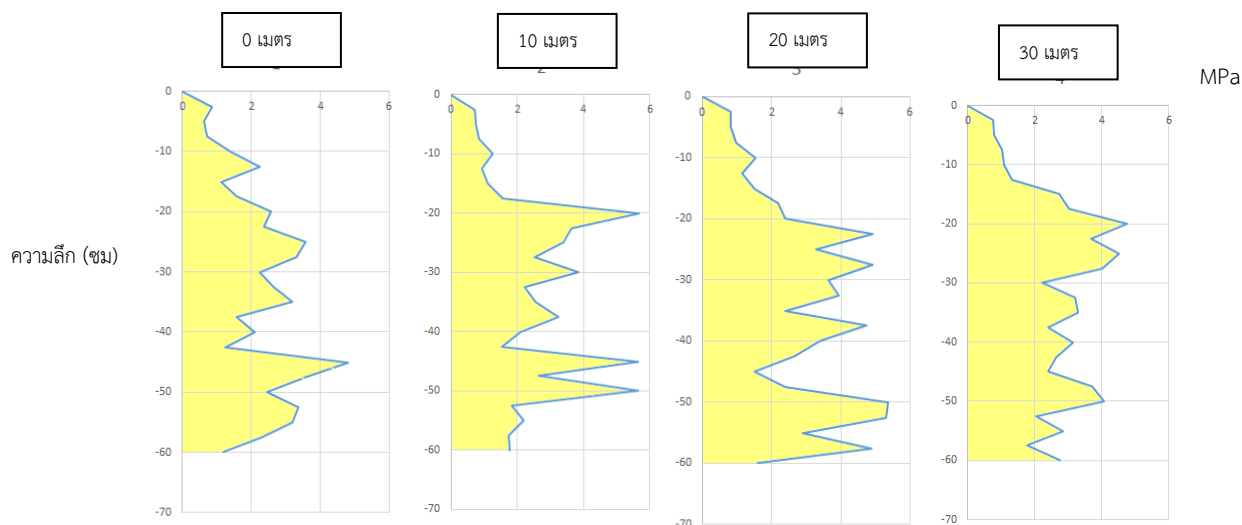
แปลงอ้อยตอมีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุมากกว่าแปลงอ้อยปลูกในแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้ามีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินทั้งในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยตอ (ภาพที่ 4-9)

4.1.1.1.1 แปลงอ้อยปลูก

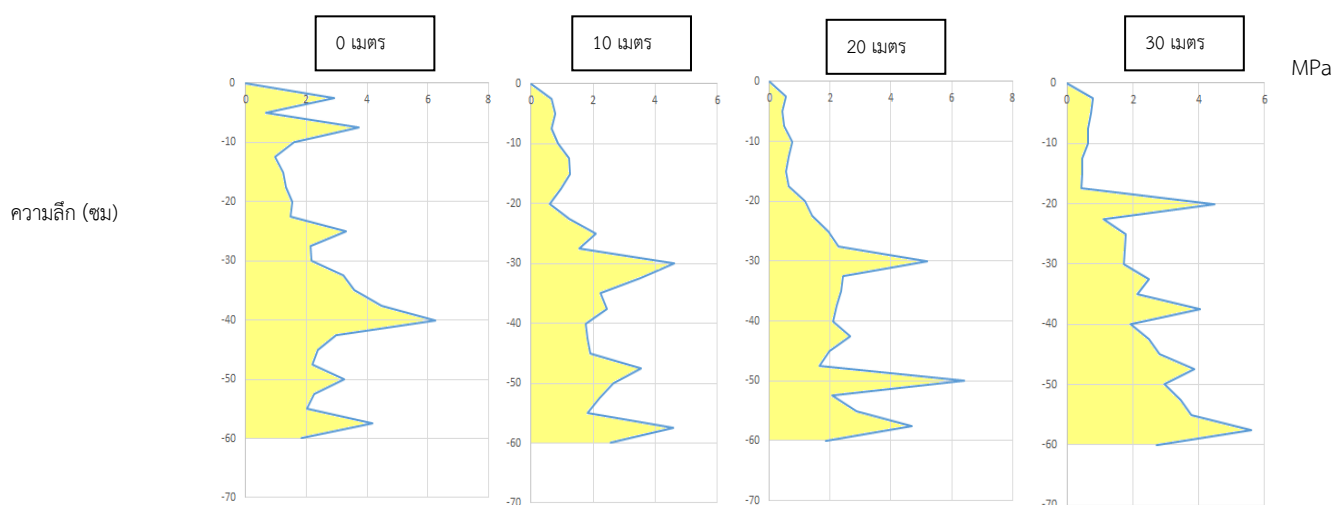
ในช่วงเวลาก่อนปลูก (0 เดือน) แปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก โดยมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ตั้งแต่ที่ระดับความลึกประมาณ 30-60 เซนติเมตร ขณะที่แปลงอ้อยปลูกที่มีเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 20 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงตั้งแต่ระดับดินชั้น โดยมีความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร เป็นต้นไป แต่พบว่ามีความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับการจัดการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่น (ภาพที่ 4-6)



ภาพที่ 4 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 5 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลา ก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี



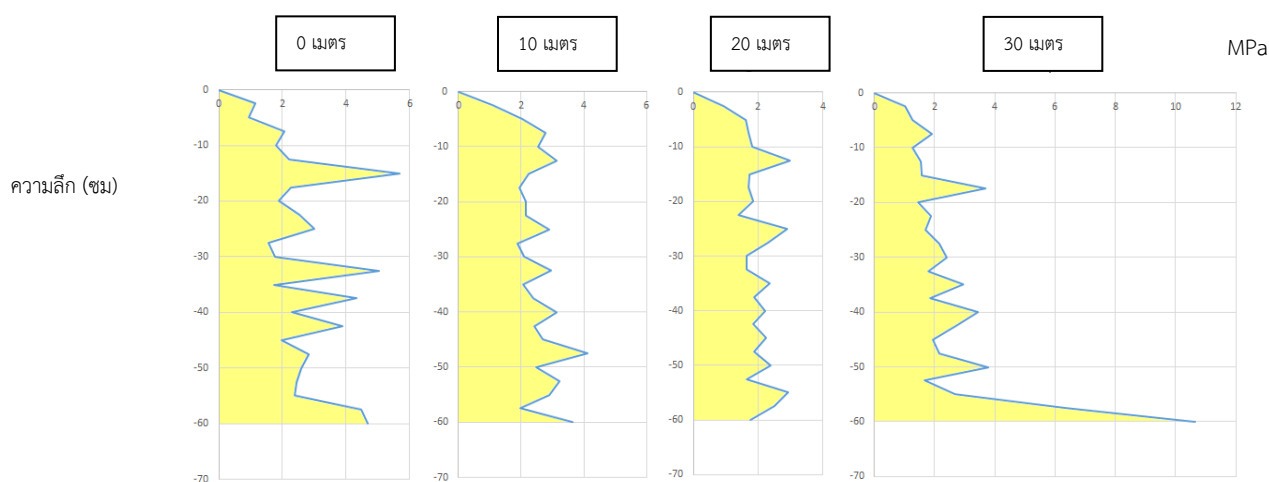
ภาพที่ 6 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลา ก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคิปอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

4.1.1.1.2 แปลงอ้อยต่อ

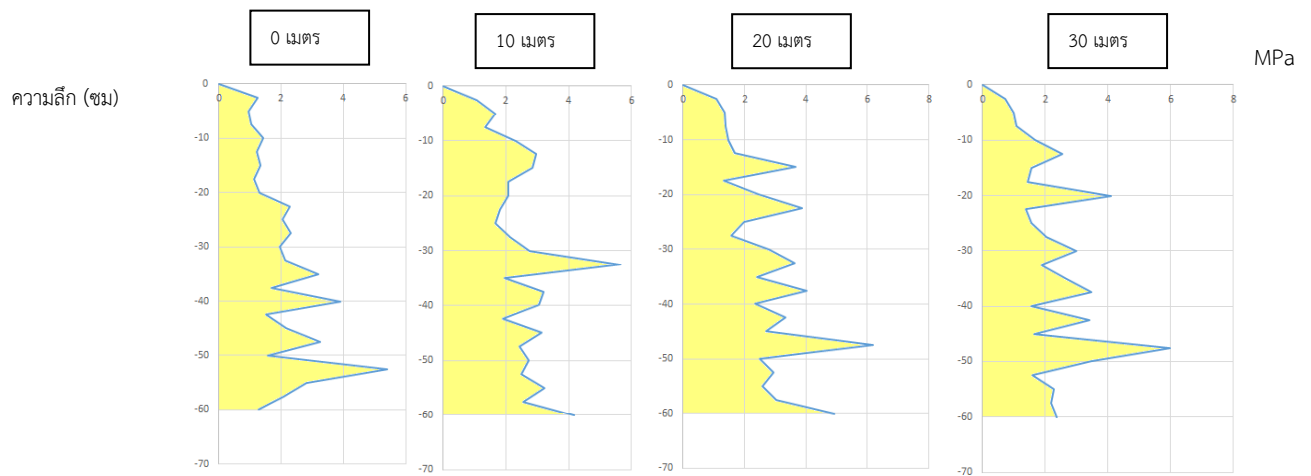
ในช่วงเวลาหลังตัดในแปลงอ้อยต่อ (0 เดือน) แปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงตั้งแต่ระดับดินขึ้น โดยมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ตั้งแต่ที่ระดับความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 10 เซนติเมตร และ

พบว่ามีความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถสีบอ้อย มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่น โดยมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 10 เซนติเมตร และที่ระดับความลึกตั้งแต่ 30 เซนติเมตร มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล (ภาพที่ 7-9)

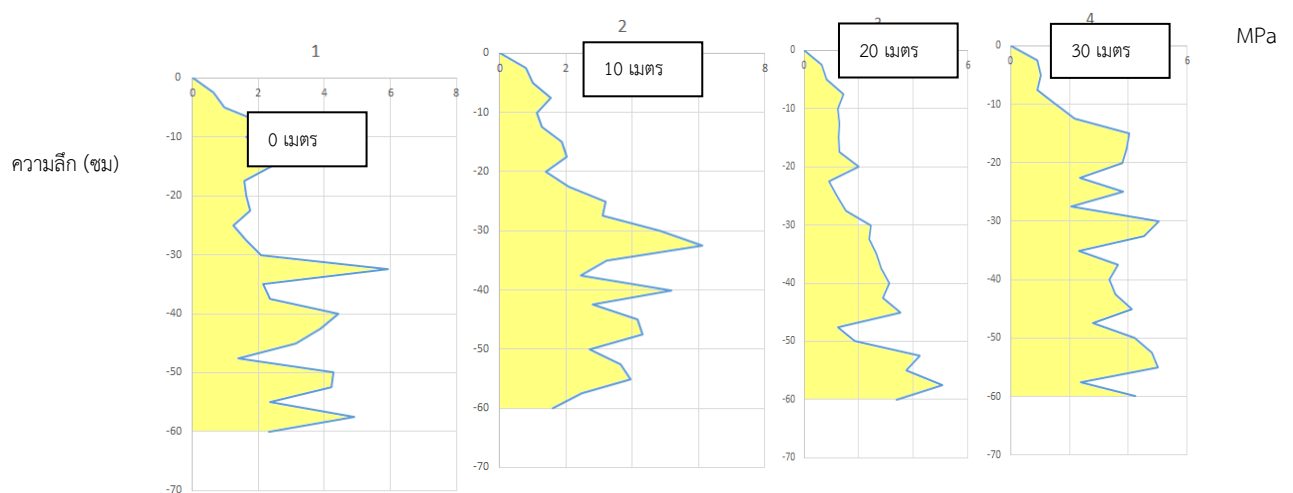
ในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) พบว่าค่าความต้านทานการแทงทะลุดิน จากการสำรวจพื้นที่จริงและเก็บข้อมูลค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินโดยตรง ที่ระดับความลึกประมาณ 40-50 เซนติเมตร หากค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล และตั้งแต่ 2 เมกะปาสคาล แสดงว่าชั้นดินนั้นเริ่มอัดตัวแน่นและมีผลทำให้การเจริญเติบโตของรากพืชลดลงครั้งหนึ่ง นอกจากนั้น พื้นที่เหล่านี้อาจจะพบการท่วมขังของน้ำที่ผิวดินหลังจากการฝนตกใหม่ๆ เนื่องจากน้ำไม่สามารถซึมผ่านชั้นดินดานลงสู่ส่วนลึกภายในหน้าตัดดินได้ (ปิยนันท์ และคณะ, 2559)



ภาพที่ 7 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 8 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี



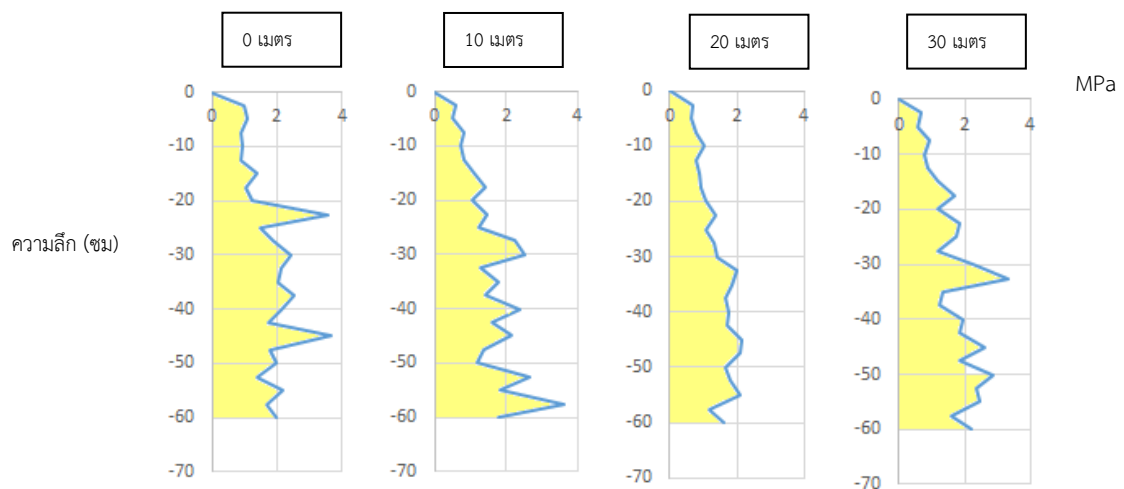
ภาพที่ 9 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

4.1.1.2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน)

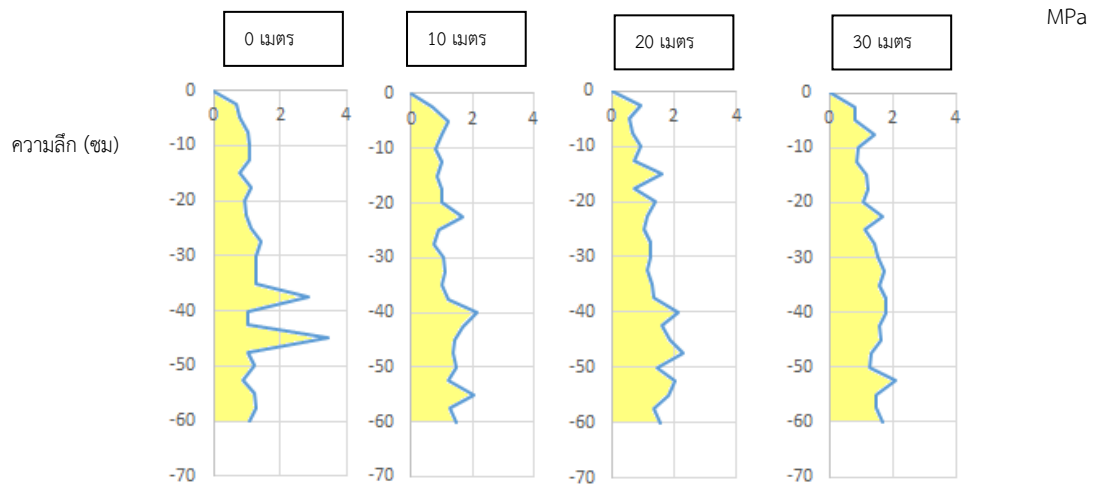
ในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 ที่ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) แปลงอ้อยยังคงมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าแปลงอ้อยปลูก โดยเฉพาะแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ซึ่งที่ระดับความลึกกว่า 30 เซนติเมตร มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 2 เมกะปาสคาล และมากกว่า 6 เมกะปาสคาลในบางพื้นที่ (ภาพที่ 10-15)

4.1.1.2.1 แปลงอ้อยปลูก

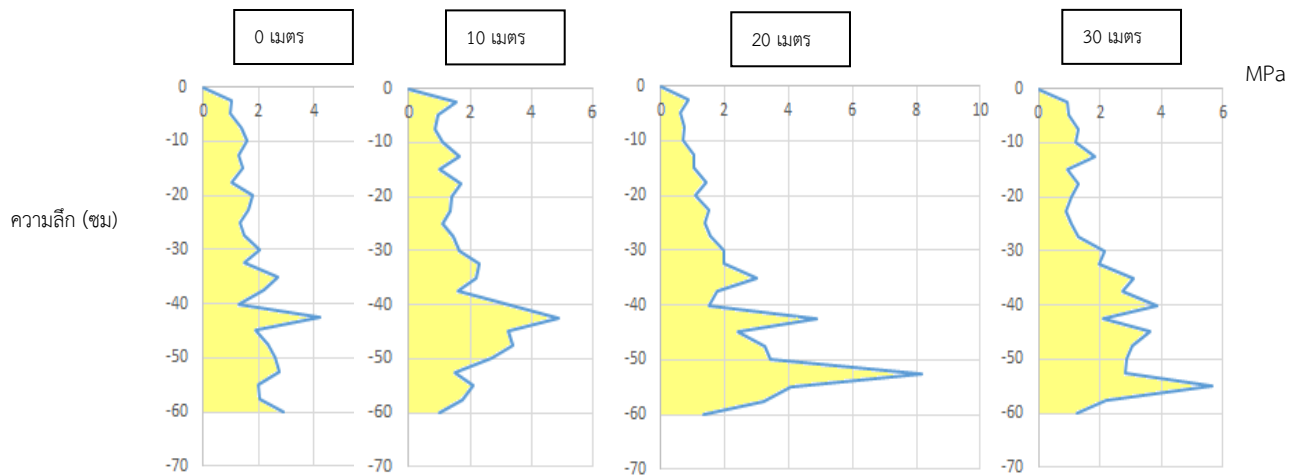
ในแปลงอ้อยปลูกที่มีการจัดการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินลดลงเมื่อเทียบกับการเก็บข้อมูลที่ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) โดยที่พบว่าดินส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินต่ำกว่า 2 เมกะปาสคาล มีเพียงบางจุดเท่านั้นที่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 2 เมกะปาสคาล แต่ไม่เกิน 4 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับการเก็บข้อมูลที่ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าที่ให้ผลคล้ายกัน คือ มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินลดลงเมื่อเทียบกับการเก็บข้อมูลที่ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) โดยพบว่าส่วนใหญ่ดินมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 2 เมกะปาสคาล แต่ไม่เกิน 4 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับการเก็บข้อมูลที่ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ขณะที่แปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยยังคงมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่น โดยยังคงมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 4 เมกะปาสคาล (ภาพที่ 10-12)



ภาพที่ 10 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 11 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

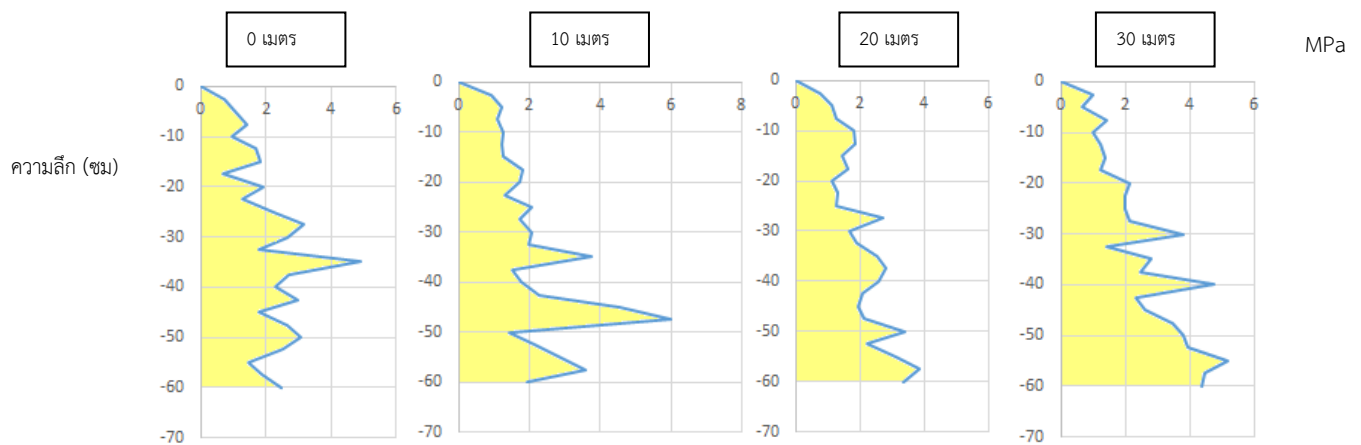


ภาพที่ 12 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

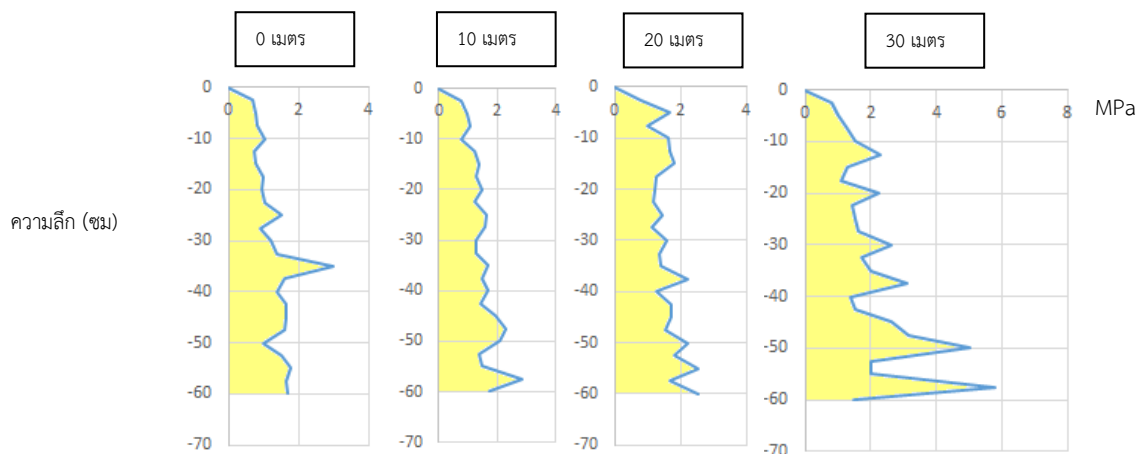
4.1.1.2.2 แปลงอ้อยต่อ

ดินส่วนใหญ่ในแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสกาล โดยเฉพาะที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ขณะที่ดินในแปลงอ้อยต่อที่มี

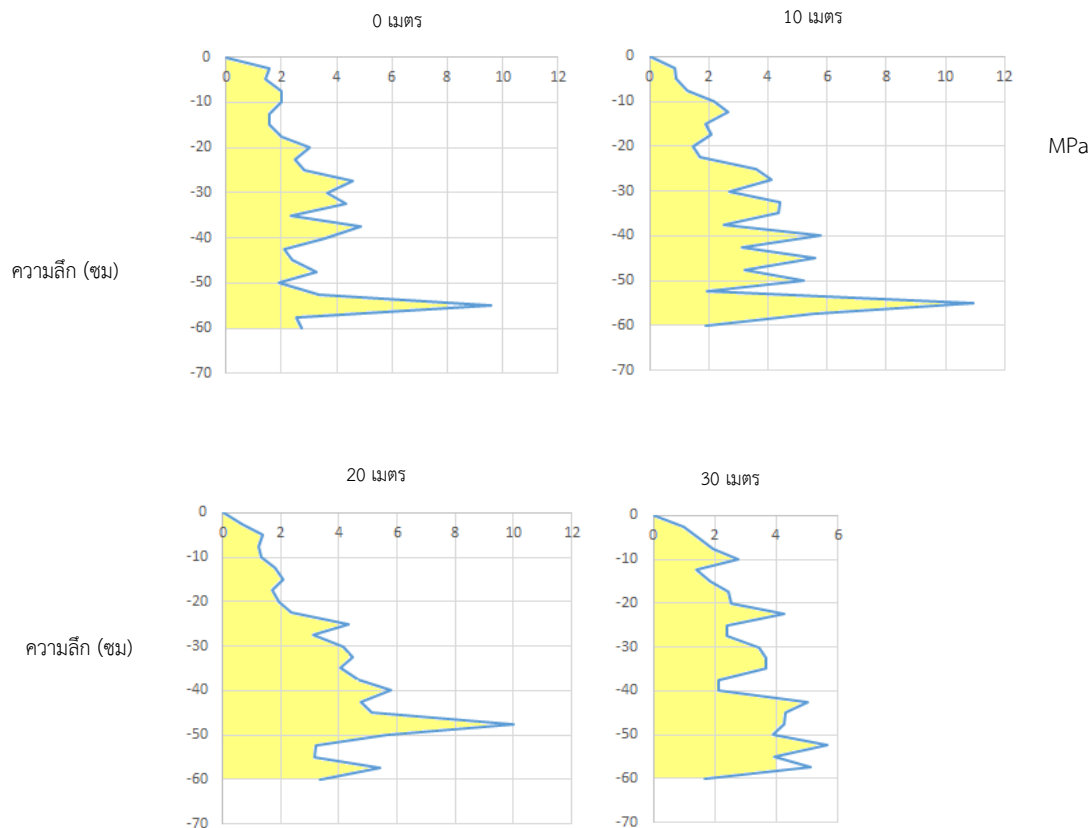
การใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินไม่เกิน 2 เมกะปาสคาล และมีบางบริเวณที่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 4 เมกะปาสคาล ขณะที่แปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงมาก โดยส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 4 เมกะปาสคาล และมากกว่า 6 เมกะปาสคาล โดยเฉพาะที่ระดับความลึกตั้งแต่ 30-60 เซนติเมตร



ภาพที่ 13 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 14 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 15 ค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

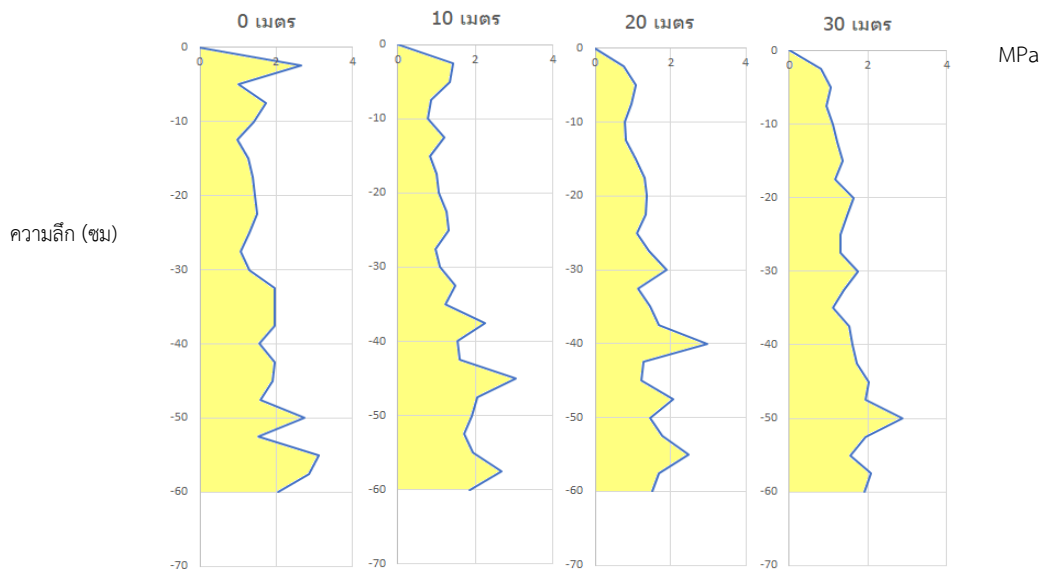
4.1.1.3 ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)

ในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 3 ที่ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) โดยในภาพรวมแปลงอ้อยตอยังคงมีแนวโน้มมีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินมากกว่าแปลงอ้อยปลูก โดยเฉพาะแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในการเก็บเกี่ยว

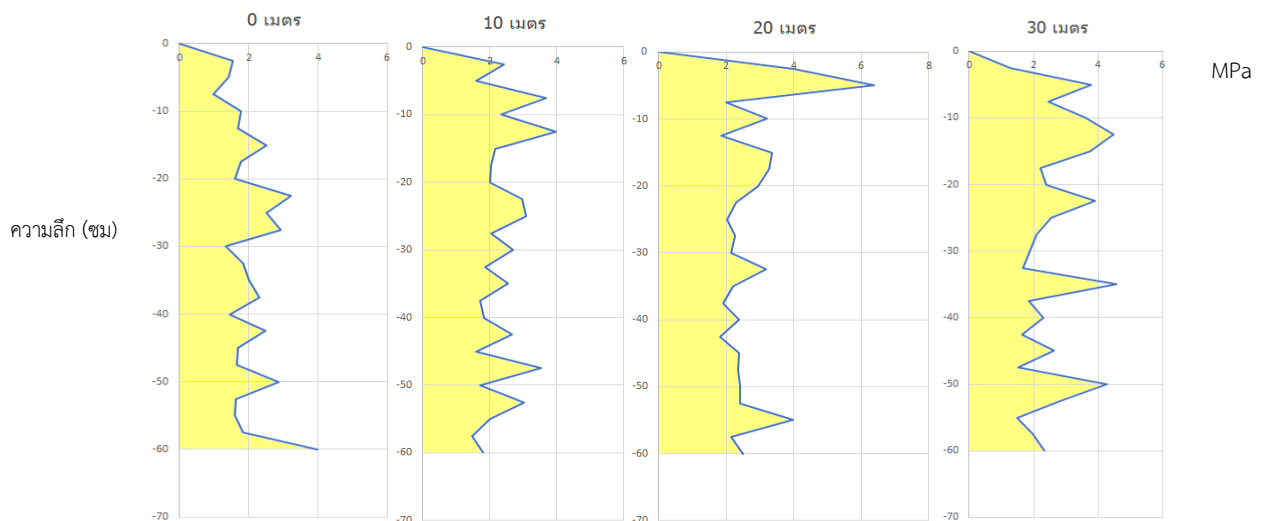
4.1.1.3.1 แปลงอ้อยปลูก

ในช่วงก่อนเก็บเกี่ยว 8 เดือน ดินส่วนใหญ่ในแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินคล้ายคลึงกับในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) คือ มีค่ามากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร และมีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินคล้ายกันในช่วงระยะจากหัวแปลงเข้าไปในแปลง 0-30 เมตร ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้า พบว่าในช่วงระยะ 0-10 เมตร มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินมากกว่า 2 แต่ไม่เกิน 4 เมกะปาสคาล กระจายอยู่ตั้งแต่ระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร ในขณะที่ระยะ 20-30 เมตร เริ่มมีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ตั้งแต่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร โดยที่ระยะ 30 เซนติเมตร พบว่ามีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล กระจายอยู่ตั้งแต่ระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+

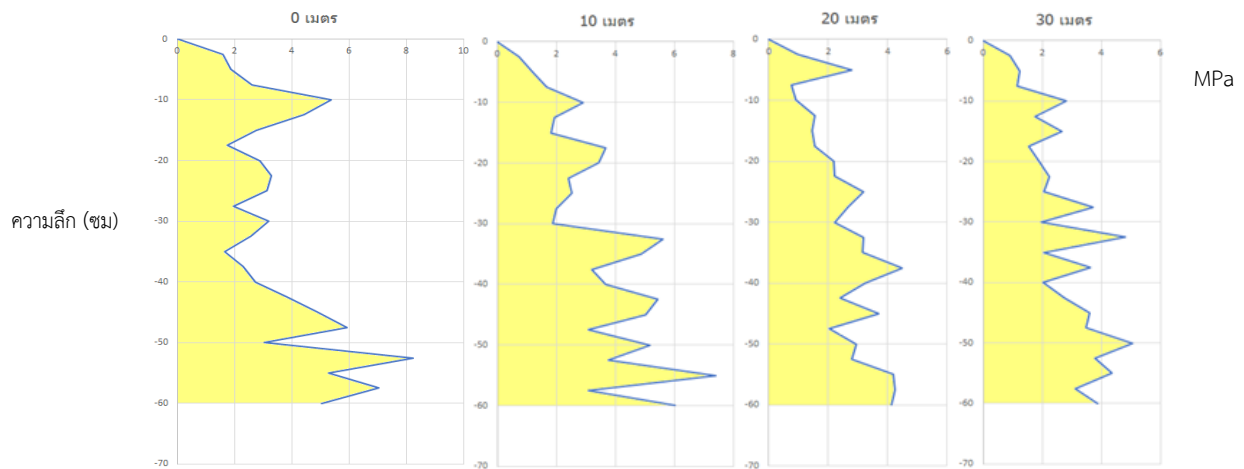
รถคืบอ้อยมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่น โดยพบว่ามีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ตั้งแต่ที่ระยะ 0-10 เมตรจากหัวแปลง แต่พบว่าที่ระยะ 20-30 เมตร ส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินลดลงเหลือ 2-4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร



ภาพที่ 16 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี



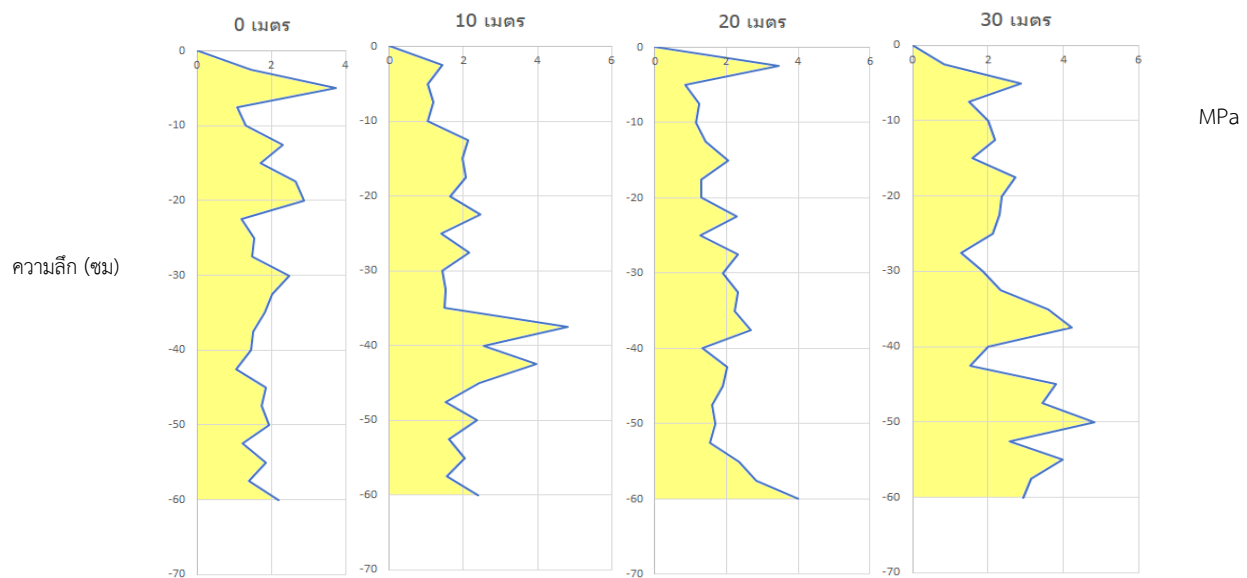
ภาพที่ 17 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี



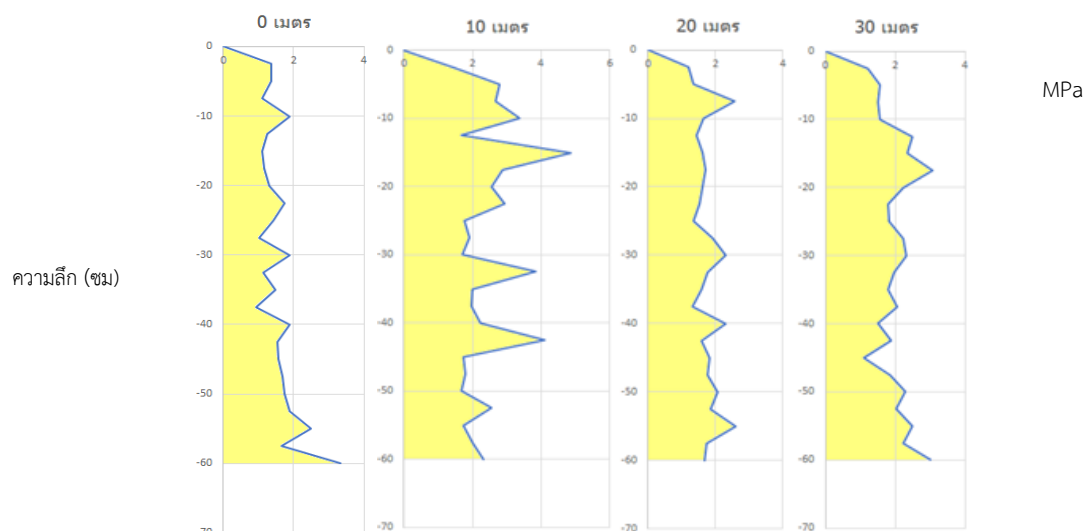
ภาพที่ 18 ค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

4.1.1.3.2 แปลงอ้อยต่อ

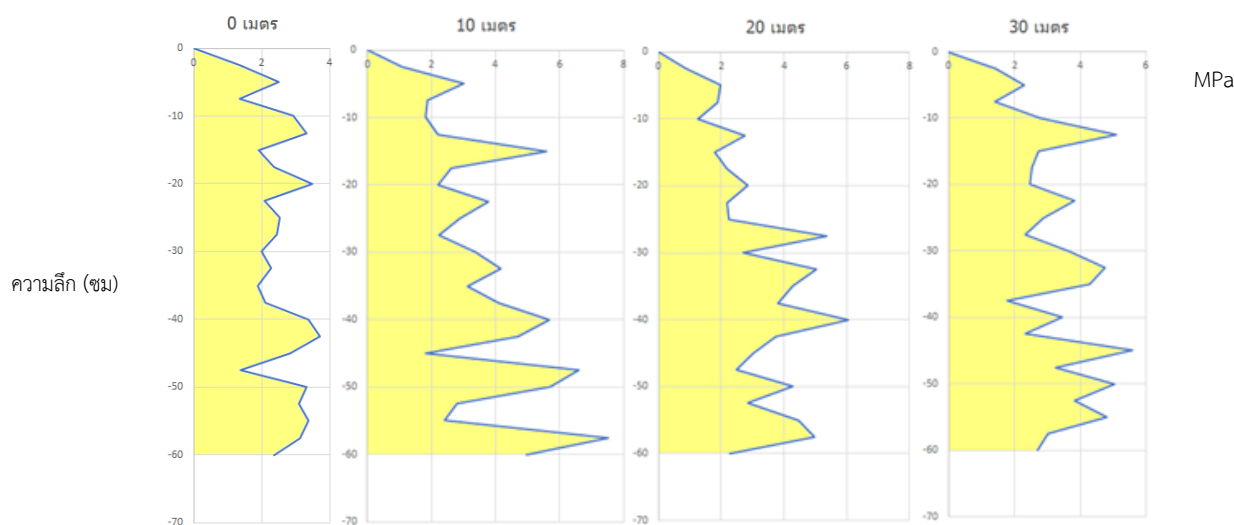
ในช่วงก่อนเก็บเกี่ยว 8 เดือน ดินส่วนใหญ่ในแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินคล้ายคลึงกับในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) และในช่วง 0-30 เมตร จากหัวแปลง ส่วนใหญ่ดินมีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุอยู่ระหว่าง 2-4 เมกะปาสกาล ที่ระดับ 0-10 และ 30-60 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้า มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินอยู่ระหว่าง 2-4 เมกะปาสกาลเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นที่ระยะ 10 เมตร จากหัวแปลง ที่มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินเกิน 4 เมกะปาสกาล ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินมากกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่น เช่นเดียวกับแปลงอ้อยปลูก โดยพบว่าค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสกาลตั้งแต่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร เป็นต้นไป โดยเฉพาะระยะ 10-30 เมตรจากหัวแปลง



ภาพที่ 19 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยโตที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 20 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยโตที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



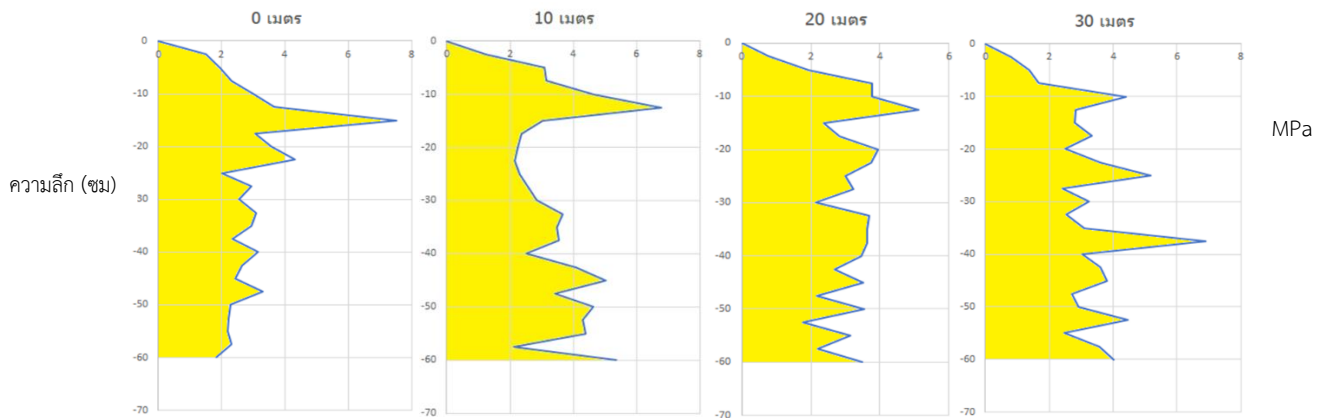
ภาพที่ 21 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลา ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

4.1.1.4 ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)

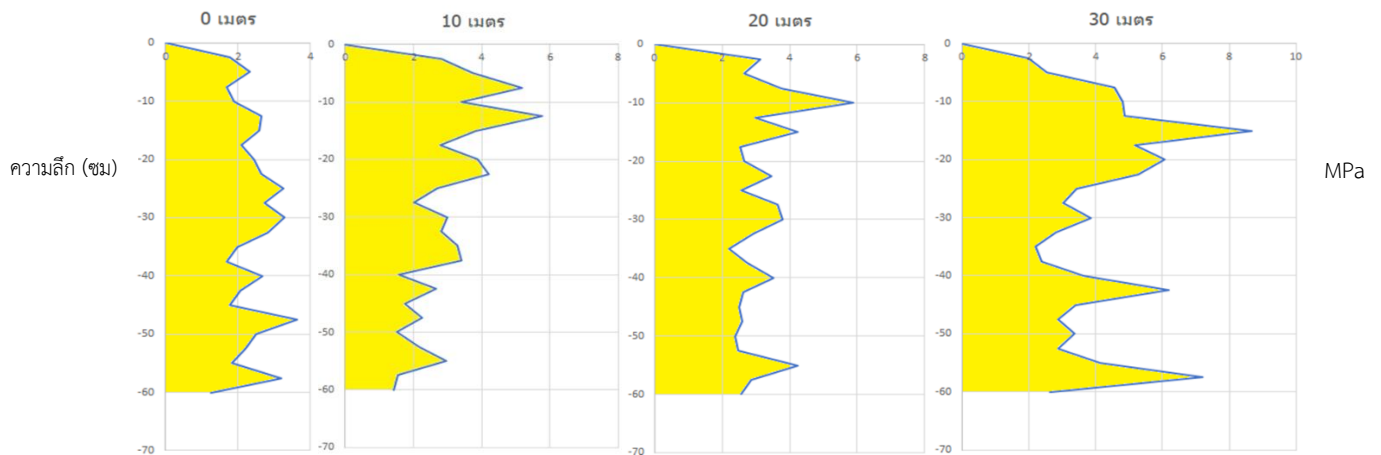
ในภาพรวมพบว่าช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าทุกช่วงที่มีการเก็บข้อมูลทั้งในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ เนื่องจากการเก็บข้อมูลภายหลังจากเครื่องจักรกลหนักที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวเข้าทำงานแล้ว โดยเฉพาะแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้รถตะกร้า ที่พบว่าค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย

4.1.1.4.1 แปลงอ้อยปลูก

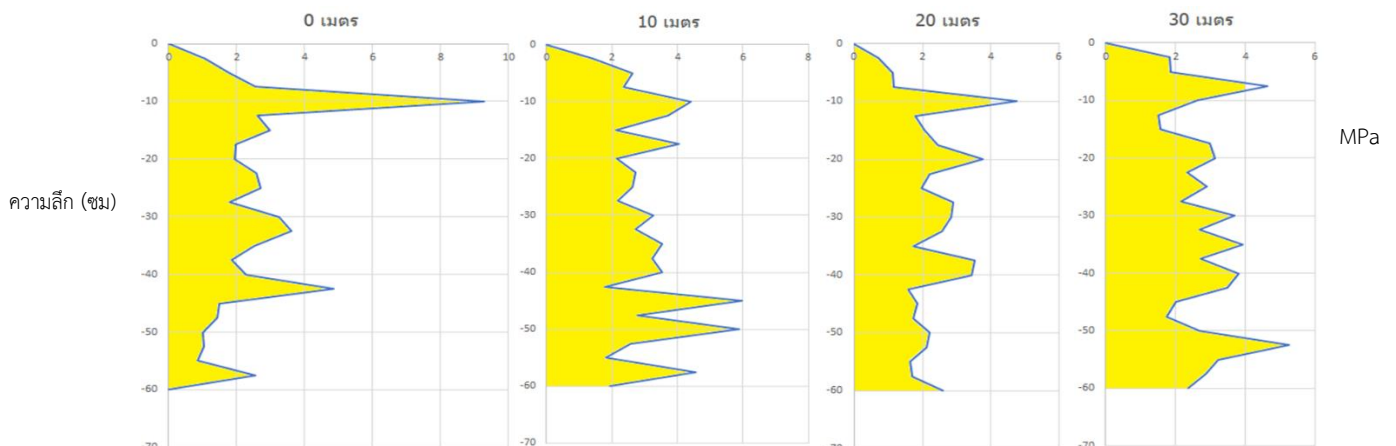
แปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 6 เมกะปาสกาล ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ตั้งแต่ระยะ 0-10 เมตร จากหัวแปลง และตั้งแต่ระยะ 10-30 เมตร จากหัวแปลง ส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินลดลงเหลือ 2-4 เมกะปาสกาล ยกเว้นที่ระยะ 30 เมตร ที่พบค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสกาลที่ระดับความลึก 10-40 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้า มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากขึ้นจากบริเวณหัวแปลง (0 เมตร) เข้าไปในแปลง โดยที่ระยะ 10-30 เมตร จากหัวแปลง พบว่ามีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสกาล โดยเฉพาะที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร และที่ระยะ 30 เมตร มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 6 เมกะปาสกาล ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ที่ระยะ 10-30 เมตร จากหัวแปลง ส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินระหว่าง 2-4 เมกะปาสกาล ตั้งแต่ระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร ยกเว้นที่บริเวณหัวแปลง (0 เมตร) มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงมากกว่า 8 เมกะปาสกาล ที่ระดับความลึก 0-10 เมตร



ภาพที่ 22 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



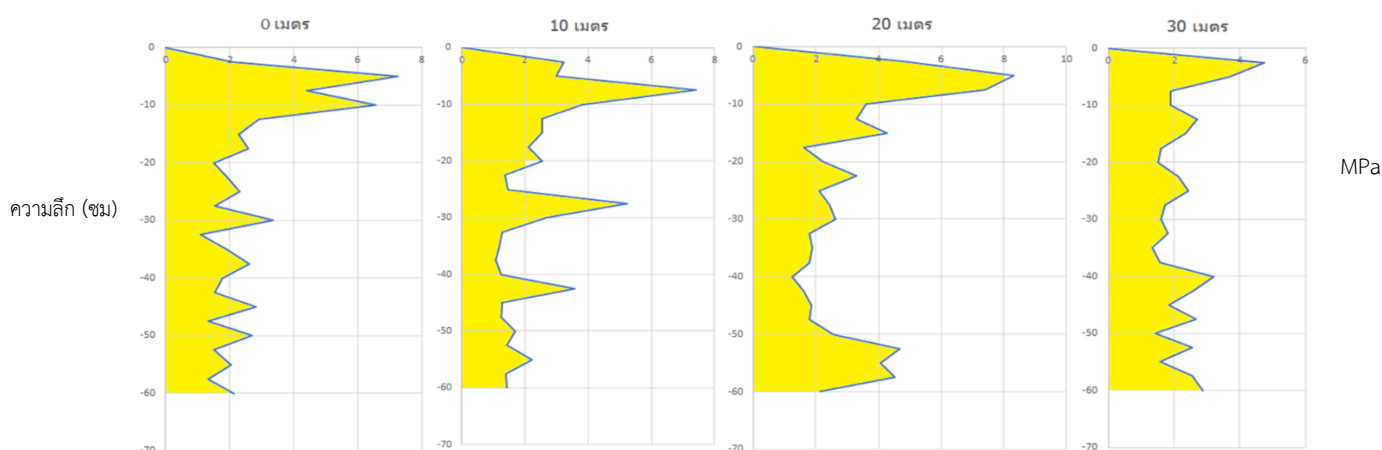
ภาพที่ 23 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



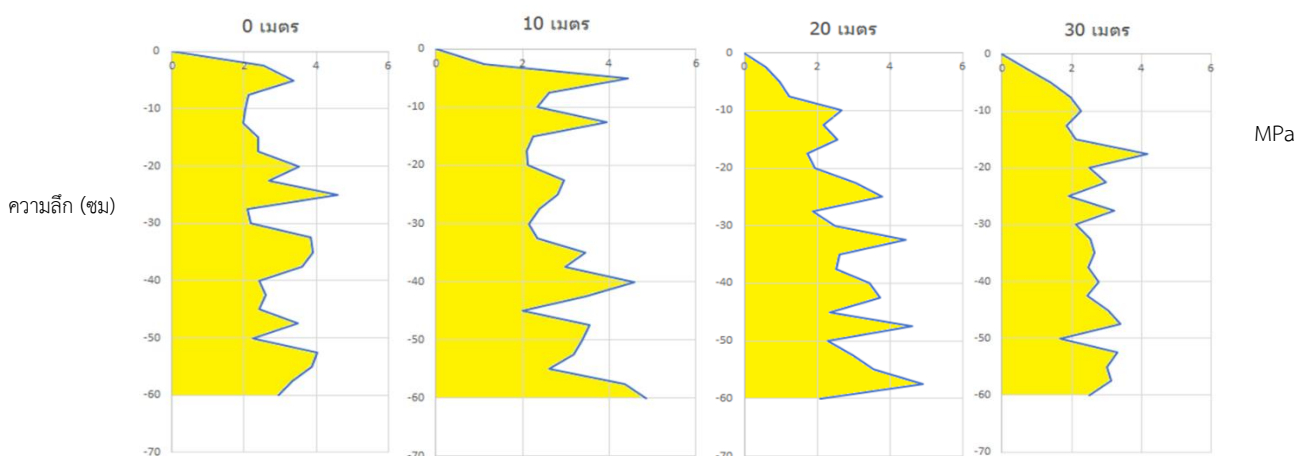
ภาพที่ 24 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี

4.1.1.4.2 แปลงอ้อยตอ

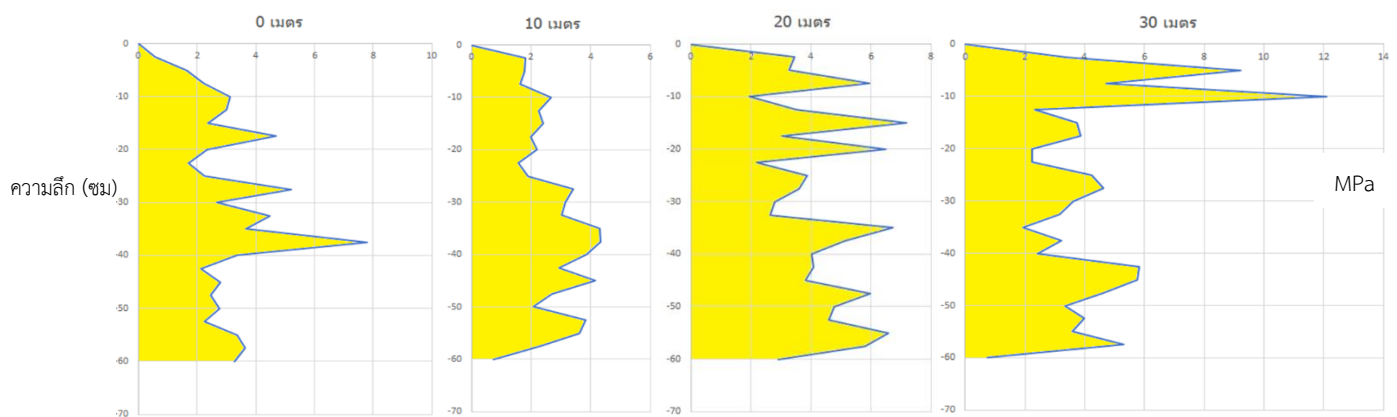
แปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเพิ่มขึ้นจากการเก็บข้อมูลก่อนหน้านี้ทั้ง 3 ครั้ง อย่างชัดเจน โดยพบว่าที่ระยะ 0-30 เมตร ส่วนใหญ่ดินมีค่าความต้านทานการแทงทะลุมากกว่า 6 เมกะปาสคาล และพบอยู่ระดับตื้น 0-10 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้า มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินระหว่าง 2-4 เมกะปาสคาล กระจายอยู่ที่ระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร ตั้งแต่ระยะ 0-30 เมตร จากหัวแปลง ส่วนแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ยกเว้นที่ระยะ 10 เมตร จากหัวแปลง และพบว่าที่ระยะ 20-30 เมตร จากหัวแปลง มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินที่ระดับ 0-20 เซนติเมตร มีค่ามากกว่า 6 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 25 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 26 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 27 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยโตที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 28 การเก็บค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน

4.1.2 ปริมาณความชื้นของดิน

4.1.2.1 ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน)

โดยในแปลงทดลองอำเภอหนองม่วง พบว่าแปลงอ้อยปลูกและอ้อยโตมีปริมาณความชื้นในดินใกล้เคียงกัน ยกเว้นแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย

แปลงอ้อยปลูกมีปริมาณความชื้นในดินที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร อยู่ระหว่าง 9.12-21.22% ส่วนที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร มีปริมาณความชื้นระหว่าง 17.93-20.45% และพบว่าการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบในแปลงอ้อยปลูก มีปริมาณความชื้นในดินใกล้เคียงกันทั้งสองระดับความลึกในดิน ขณะที่แปลงอ้อยโต พบว่าที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร มีปริมาณความชื้นระหว่าง 15.51-29.61% และที่ระดับความชื้น 30-60

เซนติเมตร มีปริมาณความชื้นระหว่าง 18.31-26.87% ส่วนแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีปริมาณความชื้นในดินมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุ และรถตัดอ้อยแบบตะกร้าทั้งสองระดับความลึกในดิน

จากตารางที่ 61 พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อมีความชื้น (22.56 %) มากกว่าแปลงอ้อยปลูก (16.42 %) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุ ให้ค่าความชื้นของดิน (12.31 %) น้อยกว่าแปลงที่เก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าและแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย (21.88 และ 24.27 % ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงที่มีการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ ให้ความชื้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 19.22 – 22.40 % ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุ ให้ความชื้นของดิน (9.12 %) น้อยกว่าแปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย (29.61 %) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อยมีความชื้นมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุ และแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวทั้ง 3 รูปแบบ

4.1.2.2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน)

เนื่องจากมีฝนตกในช่วงที่มีการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 จึงทำให้ในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ดินที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร มีความชื้นมากกว่าในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) เกือบสองเท่า ในแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุ และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าทั้งในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ ยกเว้นแปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย ที่พบว่ามีค่าความชื้นของดินใกล้เคียงกันในการเก็บข้อมูลทั้งสองครั้ง ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการเก็บเกี่ยวแบบเผาอ้อย (ใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย) ส่งผลต่อปริมาณความชื้นในดินที่ระดับ 0-60 เซนติเมตร

จากตารางที่ 1 พบว่าดินในแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร มีระดับความชื้นใกล้เคียงกัน (35.99 – 36.64 % และ 28.64 – 29.55 %) ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย ให้ความชื้นของดิน (26.66 %) น้อยกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุ และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า (40.13 และ 42.15 % ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้ามีความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุ และการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย (28.63 และ 24.87 % ตามลำดับ) ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุและแปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีความชื้นของดิน (37.06 %) มากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุและการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย

4.1.2.3 ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)

ในช่วงการเก็บข้อมูลก่อนการเก็บเกี่ยวที่อายุ 8 เดือน พบว่าช่วงนี้จะมีความชื้นในดินที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร มีแนวโน้มมากกว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร โดยพบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูก มีความชื้นใกล้เคียงกันทั้งที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าในแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีความชื้นของดินมากกว่าการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยทั้งที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร (26.15 % กับ 27.77 % vs 16.62 % และ 29.17 % กับ 30.70 % vs 19.54 % ที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ) ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าเก็บเกี่ยวมีความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร เช่นเดียวกัน พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีความชื้นของดินมากกว่าแปลงแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย อาจเนื่องจากการเผาใบอ้อยในรูปแบบการเก็บเกี่ยวที่ใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ทำให้ไม่มีใบอ้อยคลุมหน้าดิน ซึ่งช่วยรักษาความชื้นในดินให้ยาวนานขึ้น โดยเฉพาะในช่วงแล้ง

4.1.2.4 ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)

ในช่วงการเก็บข้อมูลหลังการเก็บเกี่ยวที่อายุ 13 เดือน พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกมีความชื้นของดินใกล้เคียงกัน ขณะที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยปลูกมีความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อ ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าในแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีความชื้นของดินทั้งที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร น้อยกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าและแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีความชื้นของดินน้อยที่สุด

ตารางที่ 61 ปริมาณความชื้นของดิน (%) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

แปลงหนองม่วง	0 เดือน		4 เดือน		8 เดือน		13 เดือน	
	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม
ชนิดแปลงย่อย (A)								
อ้อยตอ (A1)	22.56a	22.21	35.99	29.55	23.10	25.65	20.46	20.74b
อ้อยปลูก (A2)	16.42b	19.50	36.64	28.64	23.93	27.29	19.62	25.08a
รูปแบบการเก็บเกี่ยว (B)								
รถตัด (B1)	12.31b	19.22	40.13a	28.63b	26.15a	29.17a	26.02a	25.51a
รถตะกร้า (B2)	21.88a	20.96	42.15a	33.89a	27.77a	30.70a	25.72a	24.86a
รถคืบ (B3)	24.27a	22.40	26.66b	24.78b	16.62b	19.54b	8.38b	18.35b
Interaction A x B								
อ้อยตอ x รถตัด (A1B1)	15.51bc	18.31b	37.63ab	26.78bc	22.52abc	25.85ab	20.48ab	23.86a
อ้อยตอ x รถตะกร้า (A1B2)	22.54ab	21.46ab	44.02a	37.06a	33.99a	34.63a	31.33a	24.53a
อ้อยตอ x รถคืบ (A1B3)	29.61a	26.87a	26.32b	22.10c	12.79c	16.46c	9.57bc	13.84b
อ้อยปลูก x รถตัด (A2B1)	9.12c	20.12b	42.63a	30.48ab	29.78ab	32.49a	31.56a	27.16a
อ้อยปลูก x รถตะกร้า (A2B2)	21.22b	20.45b	40.28a	30.72ab	21.56abc	26.77ab	20.11ab	25.20a
อ้อยปลูก x รถคืบ (A2B3)	18.93b	17.93b	27.01b	27.46bc	20.45bc	22.61bc	7.20c	22.87a
CV. (%) A	21.41	21.22	12.39	7.66	11.69	12.03	31.53	13.55
CV. (%) B	25.09	18.99	20.26	11.62	25.61	15.57	19.96	17.39
CV. (%) AxB	25.09	18.99	20.26	11.62	25.61	15.57	19.96	17.39
LSD A	5.42 [*]	5.75 ^{ns}	5.8 ^{ns}	2.86 ^{ns}	3.57	4.14	8.21	4.03 [*]
LSD B	5.33 [*]	4.32 ^{ns}	11.23 ^{**}	5.16 ^{**}	9.20 ^{**}	8.90 ^{**}	8.64 ^{**}	6.08 ^{**}
LSD AxB	7.53 [*]	6.10 [*]	11.33 [*]	7.30 ^{**}	13.01 ^{**}	8.90 ^{**}	12.21 ^{**}	6.14 ^{**}

, ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และ ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ a มากกว่า b, c และ d ตามลำดับ



ภาพที่ 29 การเก็บตัวอย่างดินในแปลงอ้อย

4.1.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

4.1.3.1 ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน)

ในพื้นที่แปลงทดลองอำเภอหนองม่วงมีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าแปลงทดลองอำเภอท่าหลวง (1.58-2.38 % vs 1.77-3.33%) โดยในช่วงเวลาก่อนปลูกในแปลงอ้อยปลูก และหลังตัดในแปลงอ้อยต่อ (0 เดือน) แปลงทดลองอำเภอหนองม่วง พบว่าแปลงอ้อยต่อมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยปลูก การจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบในแปลงอ้อยปลูก มีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกันระหว่าง 1.58-1.92% ส่วนแปลงอ้อยต่อ แปลงที่มีการเก็บเกี่ยวด้วยแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 2.38% ขณะที่การเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 2.15 และ 1.92% ตามลำดับ (ตารางที่ 62)

4.1.3.2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน)

ในพื้นที่แปลงทดลองอำเภอหนองม่วงมีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าแปลงทดลองอำเภอท่าหลวง (1.04-2.35 % vs 2.78-3.31%) โดยในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) แปลงทดลองอำเภอหนองม่วง พบว่าแปลงอ้อยต่อยังคงมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยปลูก การจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าและการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 2.35 และ 2.20% มากกว่าแปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 1.33% และมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการจัดการเก็บเกี่ยวทั้ง 3 รูปแบบ (ตารางที่ 62)

4.1.3.3 ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)

ในพื้นที่แปลงทดลองอำเภอหนองม่วงมีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าแปลงทดลองอำเภอท่าหลวง โดยในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) แปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกยังคงมีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากช่วงอายุ 4 เดือน การจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า

4.1.3.4 ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)

ในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกยังคงมีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากช่วงอายุ 4 และ 8 เดือน การจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่น้อยที่สุด ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก

ตารางที่ 62 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

แปลงหนองม่วง	0 เดือน	4 เดือน	8 เดือน	13 เดือน
ชนิดแปลงอ้อย (A)				
อ้อยต่อ (A1)	2.15	1.96a	2.07	2.21
อ้อยปลูก (A2)	1.77	1.36b	1.90	2.12
รูปแบบการเก็บเกี่ยว (B)				
รถตัด (B1)	1.87	1.47b	1.79b	2.49a
รถตะกร้า (B2)	1.98	1.69a	1.83b	2.26a
รถคืบ (B3)	2.04	1.82a	2.34a	1.74b
Interaction A x B				
อ้อยต่อ x รถตัด (A1B1)	1.92	1.33c	2.05ab	1.82bc
อ้อยต่อ x รถตะกร้า (A1B2)	2.38	2.35a	2.06ab	2.43ab
อ้อยต่อ x รถคืบ (A1B3)	2.15	2.20a	2.10ab	2.38abc
อ้อยปลูก x รถตัด (A2B1)	1.81	1.61b	1.53b	1.66c
อ้อยปลูก x รถตะกร้า (A2B2)	1.58	1.04d	1.60b	2.10abc

อ้อยปลูก x รถคืบ (A2B3)	1.92	1.43bc	2.57a	2.60a
CV. (%) A	-	7.98	19.13	24.36
CV. (%) B	-	7.58	20.99	21.86
CV. (%) AxB	-	7.58	20.99	21.86
LSD A	-	0.32 ^{**}	0.49	0.68
LSD B	-	0.14 [*]	0.45 [*]	0.52 [*]
LSD AxB	-	0.27 ^{**}	0.64 [*]	0.73 ^{**}

^{**}, ^{*} ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และ ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ a มากกว่า b, c และ d ตามลำดับ

4.1.4 เนื้อดิน

ดินในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วงเป็นชุดดินลพบุรี ซึ่งถูกจัดกลุ่มชุดดินที่ 28 โดยการจำแนกดิน Very-fine, smectitic, isohyperthermic Typic Haplusterts การกำเนิดเกิดจากตะกอนน้ำพาที่มีแร่ดินเหนียวส่วนใหญ่เป็นพวกมอนต์มอริลโลไนต์ หับลมอยู่บนชั้นปูนมาร์ล หรือตะกักเขาหินปูนสภาพพื้นที่ราบเรียบถึงค่อนข้างราบเรียบ มีความลาดชัน 1-5 %การระบายน้ำดี การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินเข้าถึงปานกลาง การซึมผ่านได้ของน้ำช้า พืชพรรณธรรมชาติและการใช้ประโยชน์ที่ดิน ป่าเบญจพรรณ ปลูกพืชไร่ เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ถั่วต่างๆ และข้าวการแพร่กระจาย พบส่วนใหญ่ทางด้านเหนือของที่ราบลุ่มภาคกลางหรือที่สูงตอนกลางการจัดเรียงชั้นดิน Ap-Bss-BCK ลักษณะและสมบัติของดิน เป็นดินลึก ดินบนเป็นดินเหนียว สีดำหรือสีเทาเข้ม ปฏิกริยาดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงด่างปานกลาง (pH 6.5-8.0) ดินบนตอนล่างเป็นดินเหนียว สีดำหรือสีเทาเข้มมาก พบชั้นปูนมาร์ลในระดับลึก 80 ซม. ลงไป ในฤดูแล้งจะแตกแหว่งเป็นร่อง กว้างกว่า 1 ซม. หรือมากกว่า ที่ความลึก 50 ซม. และรอยแตกนี้จะคงอยู่นาน จะพบรอยไถและหน้าตัดดินมีมวลก้อนกลมปูนสะสมอยู่ทั่วไป ปฏิกริยาดินเป็นด่างปานกลางถึงด่างจัด (pH 8.0-9.0) ดินล่างตอนล่างเป็นดินเหนียว สีดำหรือสีน้ำตาลปนเทา ปฏิกริยาดินเป็นด่างปานกลาง (pH 8.0) ชุดดินที่คล้ายคลึงกัน ชุดดินตากลิ ชุดดินบุรีรัมย์ และชุดดินบ้านหมี่ ข้อจำกัดการใช้ประโยชน์ เป็นดินเหนียวจัด เมื่อแห้งจะแข็งมากแต่พอเปียกน้ำจะแฉะ ถ้าไถพรวนไม่ถูกวิธีจะทำให้การไถพรวนยากลำบากและทำให้โครงสร้างของดินเสีย ข้อเสนอแนะในการใช้ประโยชน์ โดยทั่วไปเหมาะในการปลูกพืชไร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฝ้ายหรือข้าวโพด แต่ควรไถพรวนดินในขณะที่ดินมีความชื้นเหมาะสมและควรใช้ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยเคมี เพื่อเพิ่มผลผลิต จากผลการวิเคราะห์ดินในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วง พบว่าแปลงอ้อยต่อมีเปอร์เซ็นต์ดินทรายและทรายแป้งเท่ากับ 27.83 และ 27.33% มากกว่าแปลงอ้อยปลูกทั้งที่ระดับความลึกของดิน 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร ขณะที่เปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมีปริมาณใกล้เคียงกันทั้ง 2 ระดับความลึก

ส่วนรูปแบบการเก็บเกี่ยว พบว่าที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีเปอร์เซ็นต์ดินทรายมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ขณะที่แปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีเปอร์เซ็นต์ทรายแป้งมากที่สุด ส่วนแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และรถตัดแบบตะกร้า มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบ

อ้อย ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และรถตัดแบบตะกร้า มีเปอร์เซ็นต์ดินทรายมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ขณะที่แปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีเปอร์เซ็นต์ทรายแบ่งมากที่สุด ส่วนแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และรถตัดแบบตะกร้า มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย

ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีเปอร์เซ็นต์ดินทรายมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีเปอร์เซ็นต์ทรายแบ่งมากที่สุด แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตะกร้าและการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีเปอร์เซ็นต์ดินทรายน้อยที่สุด แต่มีเปอร์เซ็นต์ทรายแบ่งมากที่สุด ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย

โดยภาพรวมดินของแปลงทดลองในพื้นที่อำเภอนองม่วงและอำเภอลำทะเมนชัย มีเนื้อดินคล้ายกัน คือ ดินเหนียว ยกเว้นแปลงอ้อยปลูกในแปลงทดสอบอำเภอนองม่วงที่เป็นดินเหนียวปนตะกอน ซึ่งดินแปลงทดลองอำเภอนองม่วงมีเปอร์เซ็นต์ดินทรายระหว่าง 18-36% มากกว่าแปลงอำเภอลำทะเมนชัยมีเปอร์เซ็นต์ดินทราย 12-22% ซึ่งดินที่มีโอกาสในการเกิดดินดานสูงเป็นดินเนื้อปานกลางและค่อนข้างหยาบ มีปริมาณทรายแบ่งในเนื้อดินสูง โครงสร้างดินเป็นแบบแน่นทึบและความคงทนของโครงสร้างน้อย ง่ายต่อการถูกทำลาย และมีผลทำให้ความหนาแน่นรวมของดินสูงขึ้น จึงมีโอกาสเกิดดินดานสูง (ตารางที่ 63)

ตารางที่ 63 เนื้อดินในแปลงทดลองอำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี

แปลงนองม่วง	ความลึก 0-30 เซนติเมตร			ความลึก 30-60 เซนติเมตร		
	ทราย	ทรายแบ่ง	เหนียว	ทราย	ทรายแบ่ง	เหนียว
ชนิดแปลงอ้อย (A)						
อ้อยต่อ (A1)	27.83a	24.33b	47.33	27.33	21.67	51
อ้อยปลูก (A2)	22.83b	27.93a	49.33	24.67	26.33	49
รูปแบบการเก็บเกี่ยว (B)						
รถตัด (B1)	28a	19.5b	52.5a	28.25a	16b	55.75a
รถตะกร้า (B2)	26.25ab	20.25b	53.5a	27.25a	20.25b	52.5a
รถคืบ (B3)	21.75b	38.5a	39.75b	22.5b	35.75a	41.75b
Interaction A x B						
อ้อยต่อ x รถตัด (A1B1)	31.5a	22.5c	46bcd	28a	19cd	53ab
อ้อยต่อ x รถตะกร้า (A1B2)	26b	18cd	56ab	26.5a	19.5cd	54a

อ้อยตอ x รถคืบ (A1B3)	26b	32.5b	41.5cd	27.5a	26.5b	46b
อ้อยปลูก x รถตัด (A2B1)	24.5b	16.5d	59a	28.5a	13d	58.5a
อ้อยปลูก x รถตะกร้า (A2B2)	26.5b	22.5c	51abc	28a	21bc	51ab
อ้อยปลูก x รถคืบ (A2B3)	17.5c	44.5a	38d	17.5b	45a	37.5c
CV. (%) A	6.71	7.83	6.04	9.93	18	5.50
CV. (%) B	12.17	7.37	7.62	4.97	9.22	5.25
CV. (%) AxB	12.17	7.37	7.62	4.97	9.22	5.25
LSD A	4.05 ^{**}	2.65 [*]	3.81 ^{ns}	3.36 ^{ns}	5.61 ^{ns}	3.57 ^{ns}
LSD B	4.71 ^{**}	4.15 ^{**}	7.99 ^{**}	2.79 ^{**}	4.78 ^{**}	5.67 ^{**}
LSD AxB	4.75 [*]	5.87 ^{**}	11.30 ^{**}	3.95 ^{**}	6.76 ^{**}	8.02 ^{**}

^{**}, ^{*} ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และ ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ a มากกว่า b, c และ d ตามลำดับ

4.1.5 ค่าความหนาแน่นรวมของดิน

4.1.5.1 ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน)

จากการเก็บดินในช่วงก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน) พบว่าในพื้นที่แปลงทดลองอำเภอหนองม่วง ดินบริเวณหัวแปลงมีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าบริเวณภายในแปลงทั้งแปลงอ้อยปลูกและอ้อยตอ โดยค่าความหนาแน่นรวมของดินมีแนวโน้มลดลงจากหัวแปลงไปภายในแปลงอ้อย และยังพบว่าส่วนใหญ่ดินในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยตอมีค่าความหนาแน่นรวมของดินที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร น้อยกว่าที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร

ในการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าในแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และรถตัดแบบตะกร้า เนื่องจากพบว่าเนื้อดินมีทราย (sand) น้อย แต่มีทรายแป้ง (silt) มากกว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และรถตัดอ้อยแบบตะกร้า (42-48% vs 10-24%) ซึ่งอาจมีผลทำให้ดินแน่นที่บดได้ง่ายกว่า และส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินสูงกว่าแปลงอื่น ขณะที่ในแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และรถตัดอ้อยแบบตะกร้ามีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงอ้อยใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ในทั้งระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร

จากตารางที่ 64 พบว่าความหนาแน่นดินรวมที่ระดับ 30 และ 60 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง (1.15-1.16, 1.30 – 1.41 g/cm³ ตามลำดับ) ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าแปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีความหนาแน่นดินรวมเท่ากับ 1.24 และ 1.40 g/cm³ ตามลำดับ ที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ มากกว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบ

ใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแปลงอ้อยปลูกที่ใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีความหนาแน่นของดินรวมที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร เท่ากับ 1.25 และ 1.35 g/cm³ ตามลำดับ มากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า (0.99 และ 0.93 g/cm³ ตามลำดับ) อย่างนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และที่ระดับ 60 เซนติเมตร แปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีความหนาแน่นของดินรวมเท่ากับ 1.55 g/cm³ มากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวทั้ง 3 รูปแบบ

4.1.5.2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน)

จากตารางที่ 64 ในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) พบว่าความหนาแน่นรวมของดินในแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง (0.92 - 0.93 และ 1.26 g/cm³ ตามลำดับ) ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าความหนาแน่นรวมของดินที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร แปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความหนาแน่นรวมของดินเท่ากับ 1.12 g/cm³ มากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า (0.85 และ 0.79 g/cm³ ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร ชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ มีความหนาแน่นรวมของดินไม่แตกต่างกัน ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยมีความหนาแน่นรวมของดินเท่ากับ 1.23 g/cm³ มากกว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวอ้อยทุกรูปแบบ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร ชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ มีความหนาแน่นรวมของดินไม่แตกต่างกัน

4.1.5.3 ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)

ในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) พบว่าความหนาแน่นรวมของดินในแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร รูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความหนาแน่นรวมของดินเท่ากับ 1.40 g/cm³ มากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก

4.1.5.4 ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)

ในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) พบว่าความหนาแน่นรวมของดินในแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่ระดับความลึก 30 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยปลูกมีความหนาแน่นรวมของดินน้อยกว่าแปลงอ้อยต่อ ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีความหนาแน่นรวมของดินมากที่สุด ขณะที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร รูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกและการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า

ตารางที่ 64 ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (g/cm³) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี

แปลงหนองม่วง	0 เดือน		4 เดือน		8 เดือน		13 เดือน	
	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม
ชนิดแปลงอ้อย (A)								
อ้อยตอ (A1)	1.15	1.41	0.92	1.26	1.06	1.31	1.25	1.42a
อ้อยปลูก (A2)	1.16	1.30	0.93	1.26	1.02	1.25	1.22	1.22b
รูปแบบการเก็บเกี่ยว (B)								
รถตัด (B1)	1.24 a	1.40a	0.85b	1.27	1.07	1.22b	1.33a	1.31
รถตะกร้า (B2)	1.07ab	1.36ab	0.79b	1.26	1.04	1.22b	1.17b	1.23
รถคืบ (B3)	1.17b	1.31c	1.12a	1.26	1.01	1.40a	1.20b	1.41
Interaction A x B								
อ้อยตอ x รถตัด (A1B1)	1.25a	1.55a	0.88bc	1.35	1.07ab	1.33ab	1.47a	1.45a
อ้อยตอ x รถตะกร้า (A1B2)	1.21ab	1.43ab	0.85bc	1.20	0.93b	1.12b	1.04b	1.29ab
อ้อยตอ x รถคืบ (A1B3)	0.99bc	1.25c	1.02b	1.24	1.18a	1.48a	1.24ab	1.52a
อ้อยปลูก x รถตัด (A2B1)	1.22ab	1.26c	0.82bc	1.19	1.01ab	1.12b	1.20ab	1.17b
อ้อยปลูก x รถตะกร้า (A2B2)	0.93c	1.29c	0.74c	1.32	1.09ab	1.32ab	1.29ab	1.18b
อ้อยปลูก x รถคืบ (A2B3)	1.35a	1.36bc	1.23a	1.28	0.96b	1.32ab	1.17b	1.30ab
CV. (%) A	8.75	8.38	26.14	4.73	7.40	6.93	13.73	4.50
CV. (%) B	10.08	5.81	14.75	8.54	12.71	6.76	7.96	12.31
CV. (%) AxB	10.08	5.81	14.75	8.54	12.71	6.76	7.96	12.31
LSD A	0.13	0.27	0.31	0.08	0.10	0.12	0.22	0.14 ^{**}
LSD B	0.13 [*]	0.09 [*]	0.21 ^{**}	0.12	0.14	0.13 ^{**}	0.11 [*]	0.18
LSD AxB	0.25 ^{**}	0.12 [*]	0.21 [*]	0.17	0.20 [*]	0.26 ^{***}	0.30 ^{**}	0.25 ^{**}

^{**},^{*} ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และ ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ a มากกว่า b, c และ d ตามลำดับ

4.2 ข้อมูลดินในแปลงทดลองที่อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

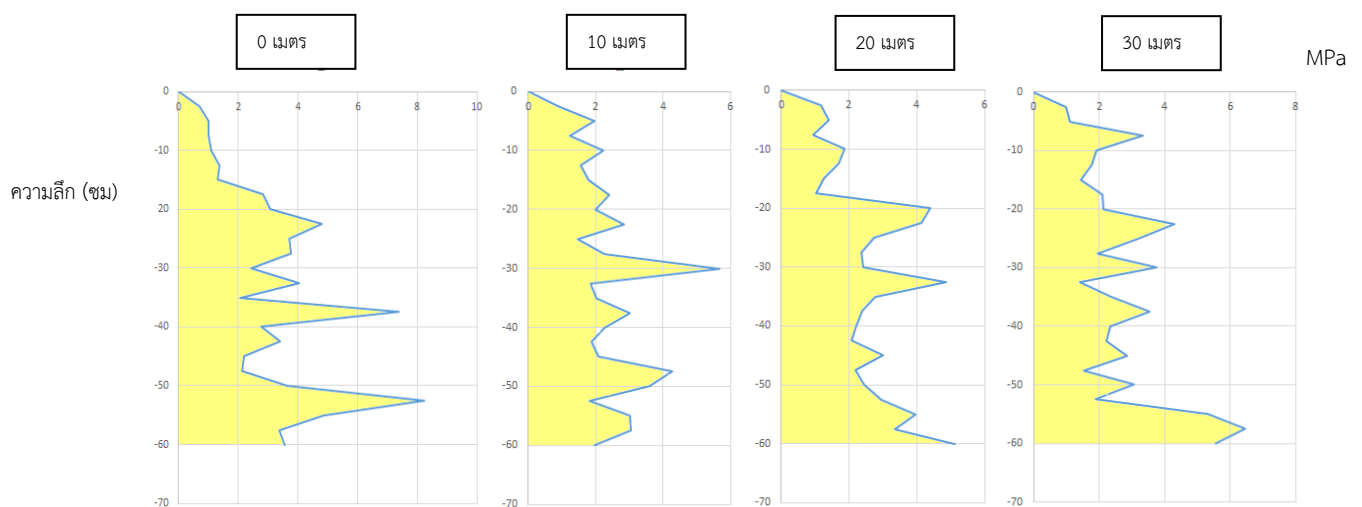
4.2.1 ค่าความต้านทานการแทงทะลุดิน

4.2.1.1 ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน)

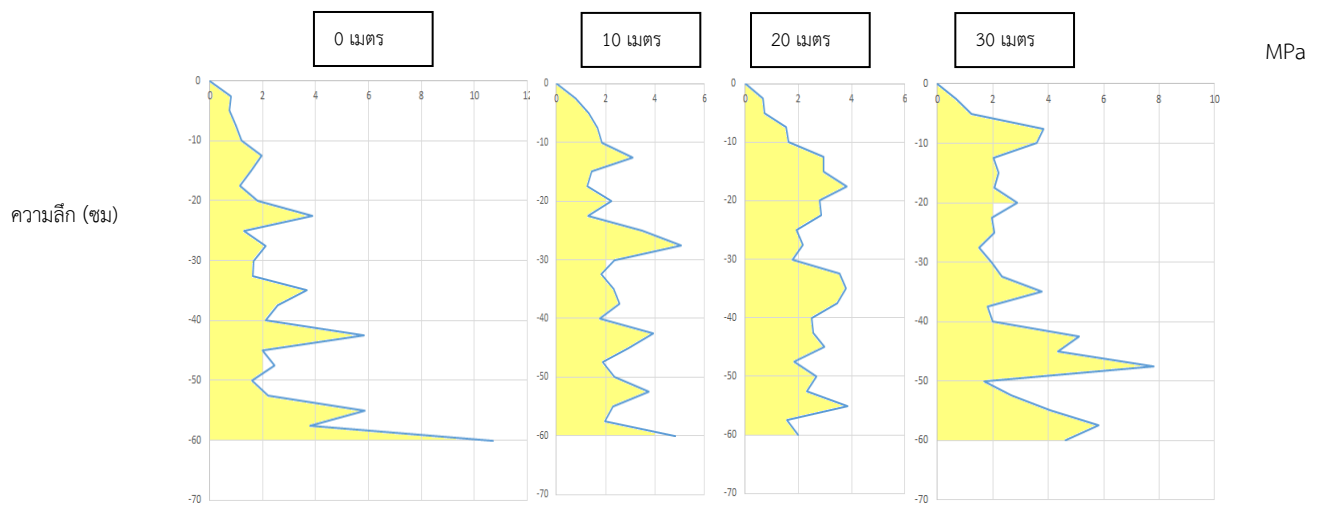
แปลงอ้อยปลูกมีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อ โดยเฉพาะแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ซึ่งที่ระดับความลึกของดินตั้งแต่ 30-60 เซนติเมตร มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 6 เมกะปาสคาล ขณะที่แปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินใกล้เคียงกันทั้งในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ (ภาพที่ 30-35)

4.2.1.1.1 แปลงอ้อยปลูก

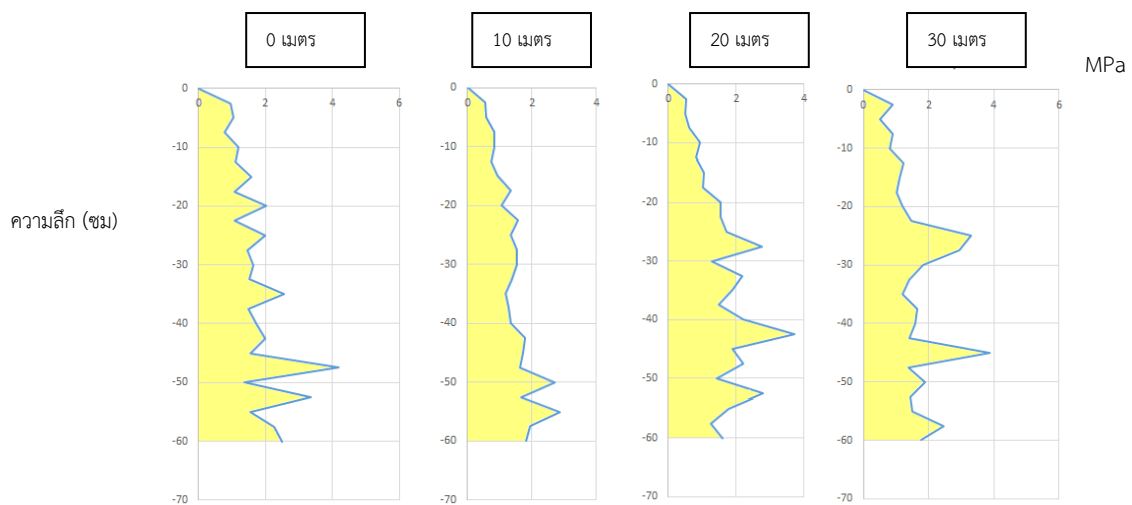
แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินคล้ายกัน โดยที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร และมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล และที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร บางพื้นที่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 6 เมกะปาสคาล ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินส่วนใหญ่ไม่เกิน 2 เมกะปาสคาลที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร แต่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 20-60 เซนติเมตร (ภาพที่ 30-32)



ภาพที่ 30 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 31 ค่าความต้านทานการเฉือนของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

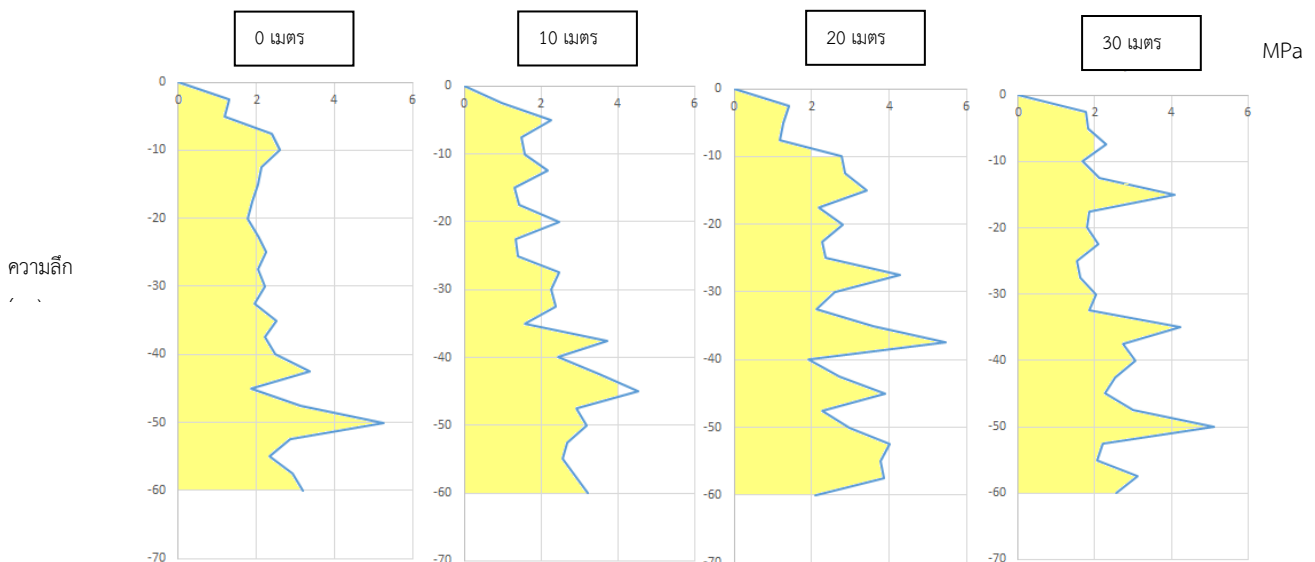


ภาพที่ 32 ค่าความต้านทานการเฉือนของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถสีอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

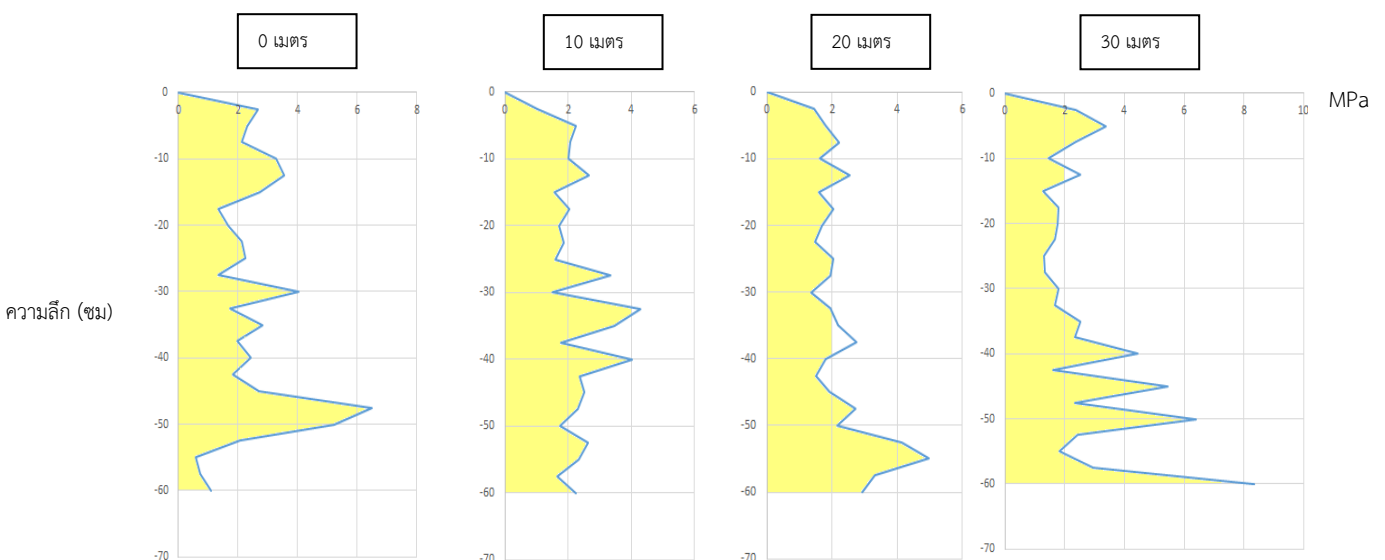
4.2.1.1.2 แปลงอ้อยต่อ

แปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความต้านทานการเฉือนของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล โดยเฉพาะที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร และ

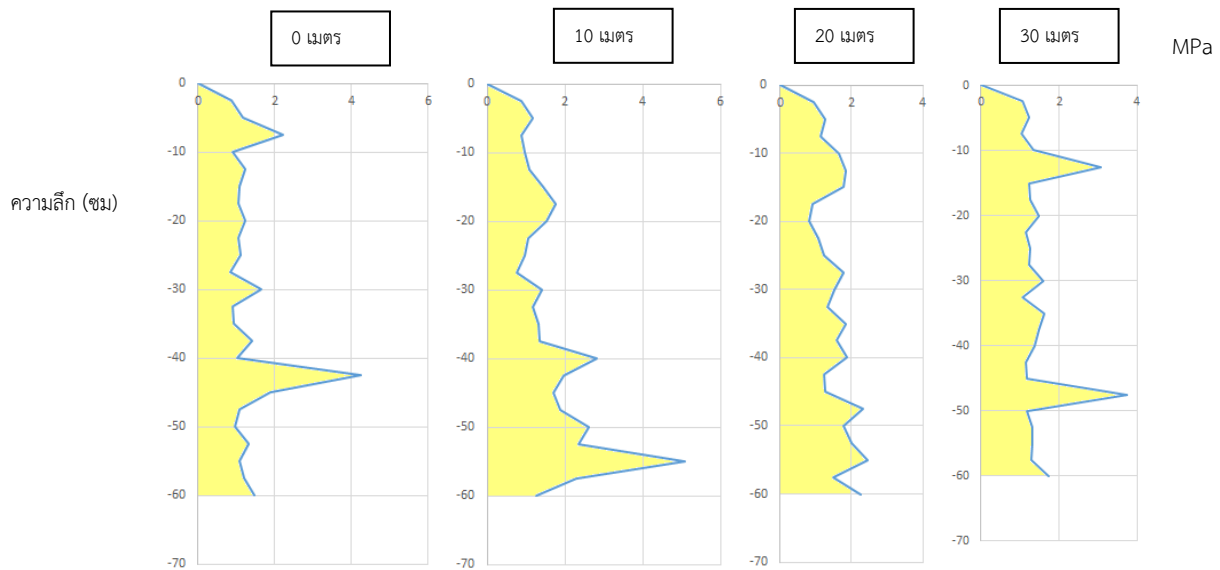
มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 4 เมกะปาสคาล โดยเฉพาะที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถสีบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินส่วนใหญ่ไม่เกิน 2 เมกะปาสคาลที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร แต่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร (ภาพที่ 33-35)



ภาพที่ 33 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 34 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



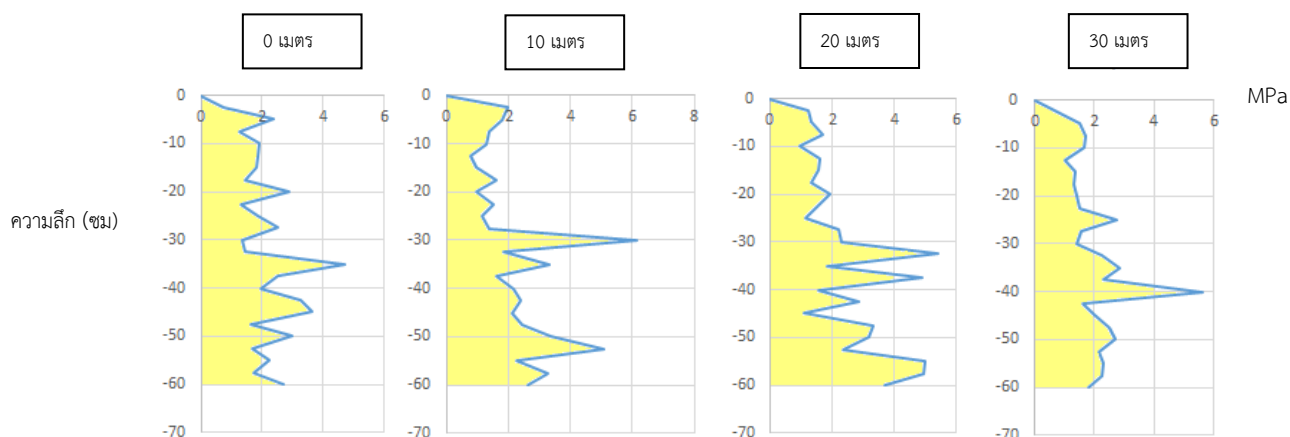
ภาพที่ 35 ค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

4.2.1.2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน)

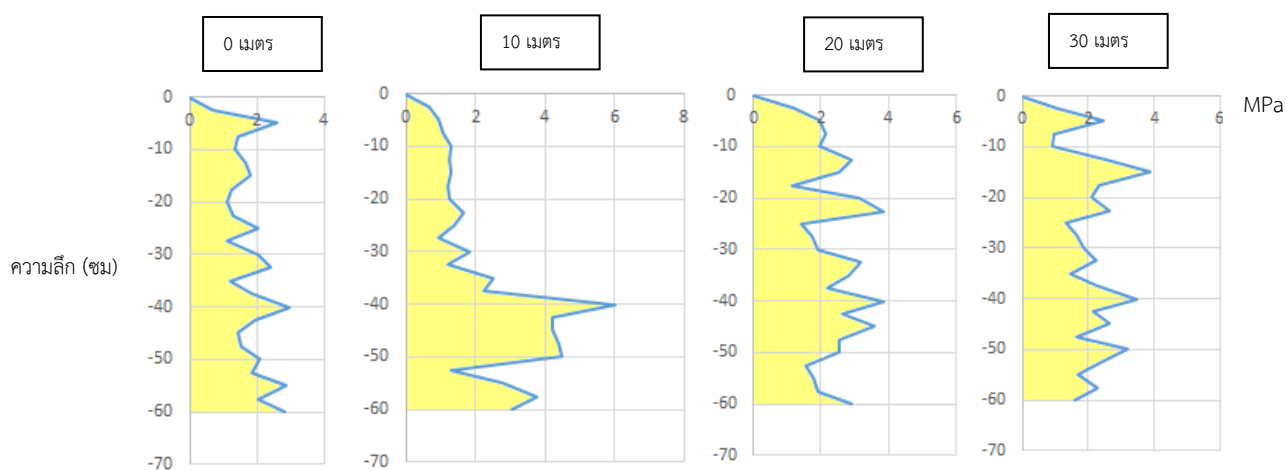
ในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 ที่ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) แปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูก มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินใกล้เคียงกัน ยกเว้นแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ซึ่งที่ระดับความลึกกว่า 30 เซนติเมตร มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุมากกว่า 2 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับแปลงอ้อยต่อที่มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุไม่เกิน 2 เมกะปาสคาล (ภาพที่ 36-41)

4.2.1.2.1 แปลงอ้อยปลูก

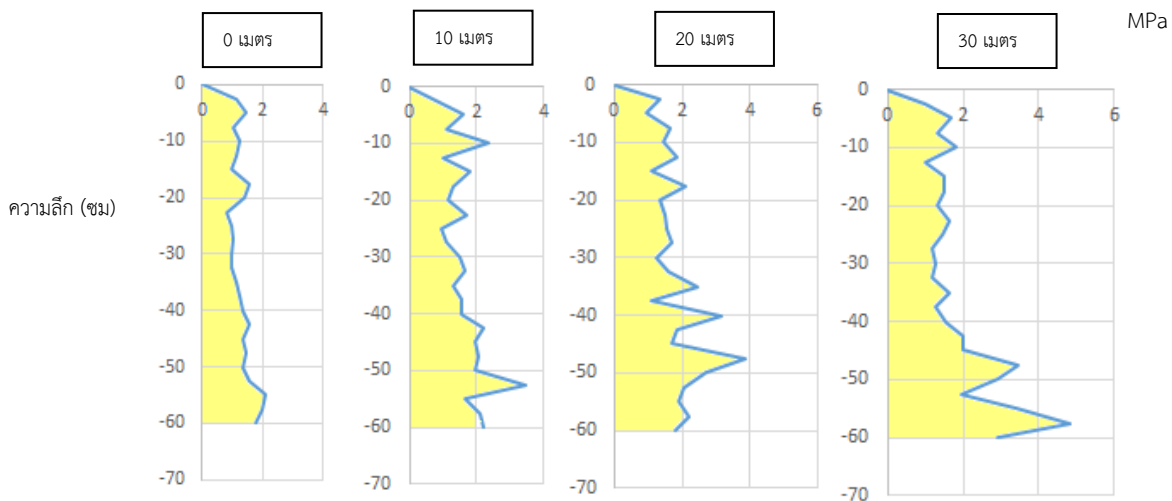
ในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินไม่เกิน 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร แต่ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 และ 4 เมกะปาสคาล แปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล แต่ไม่เกิน 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร เช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 (ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน)) ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินส่วนใหญ่ไม่เกิน 2 เมกะปาสคาลที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร แต่มีค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 20-60 เซนติเมตร เช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 (ภาพที่ 36-38)



ภาพที่ 36 ค่าความต้านทานการแรงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



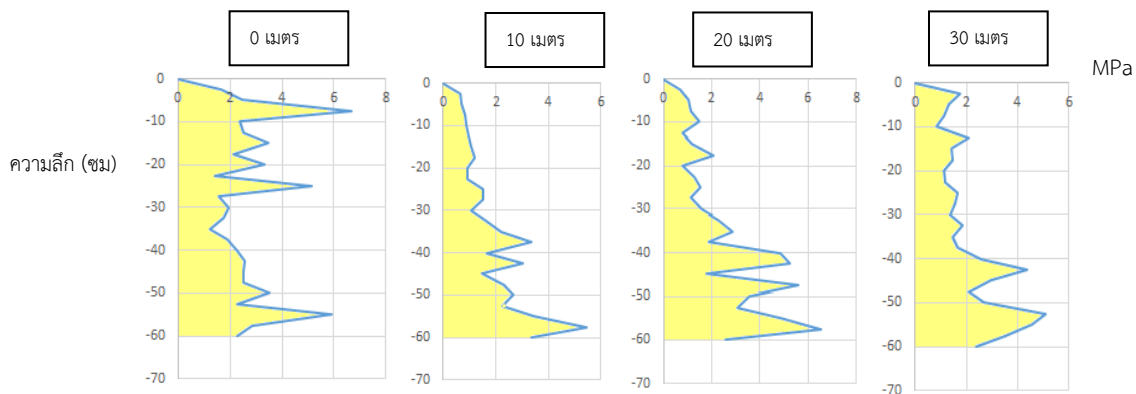
ภาพที่ 37 ค่าความต้านทานการแรงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



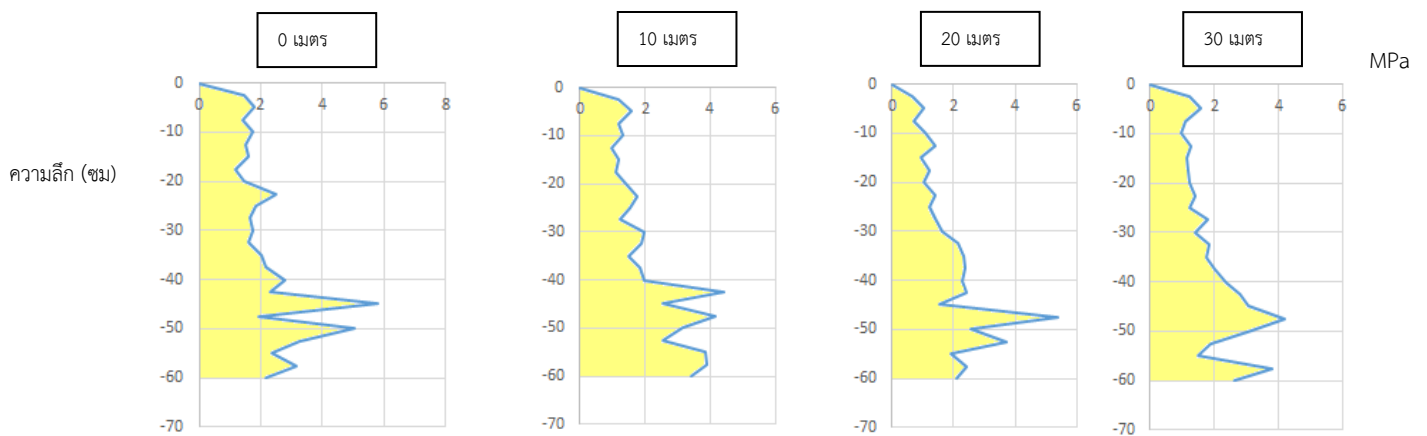
ภาพที่ 38 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการ เก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

4.2.1.2.2 แปลงอ้อยต่อ

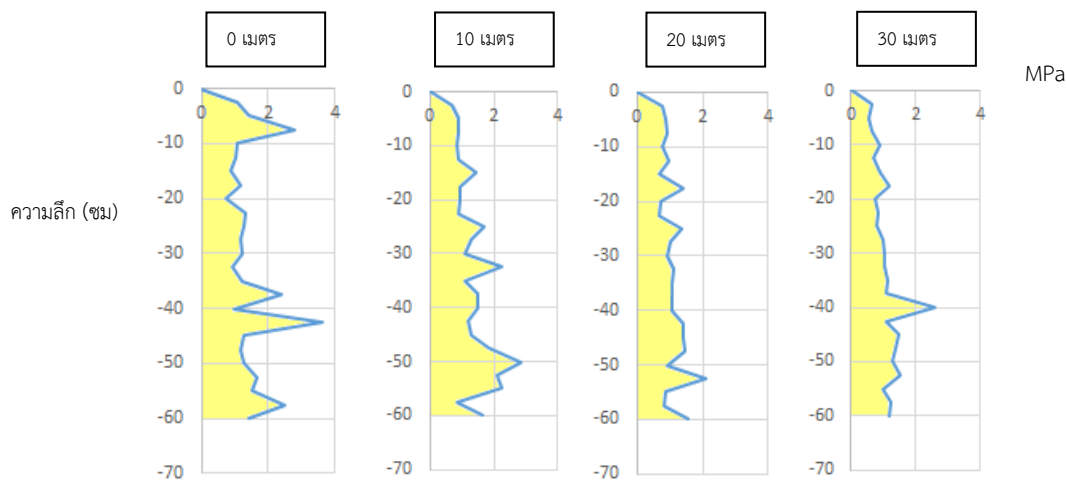
ในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินน้อยกว่าช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน) โดยที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินไม่เกิน 2 เมกะปาสคาล และมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร แต่ยังคงพบว่ามีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 2 เมกะปาสคาล ในช่วงบริเวณหัวแปลง ส่วนแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้ามีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินน้อยกว่าช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน) โดยมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล โดยเฉพาะที่ระดับความลึกตั้งแต่ 30 เซนติเมตร และพบว่ามีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 4 เมกะปาสคาล โดยเฉพาะที่ระดับความลึก 40-60 เซนติเมตร ขณะที่แปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินใกล้เคียงกับครั้งที่ 1 (ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน) โดยมีค่าไม่เกิน 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร และมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเพิ่มขึ้น ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร (ภาพที่ 39-41)



ภาพที่ 39 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยโตที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 40 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยโตที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



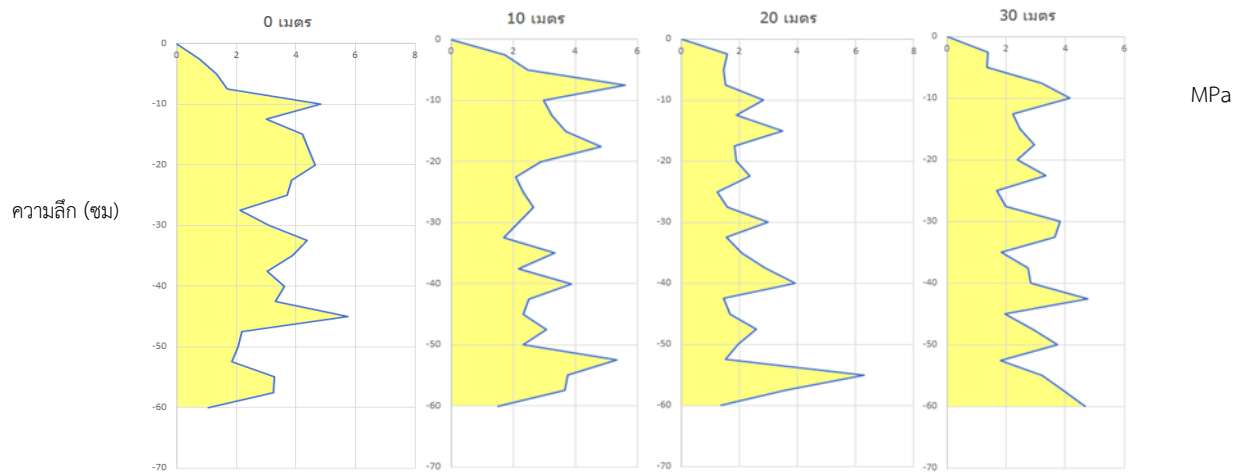
ภาพที่ 41 ค่าความต้านทานการแรงทะลุดินในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

4.2.1.3 ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)

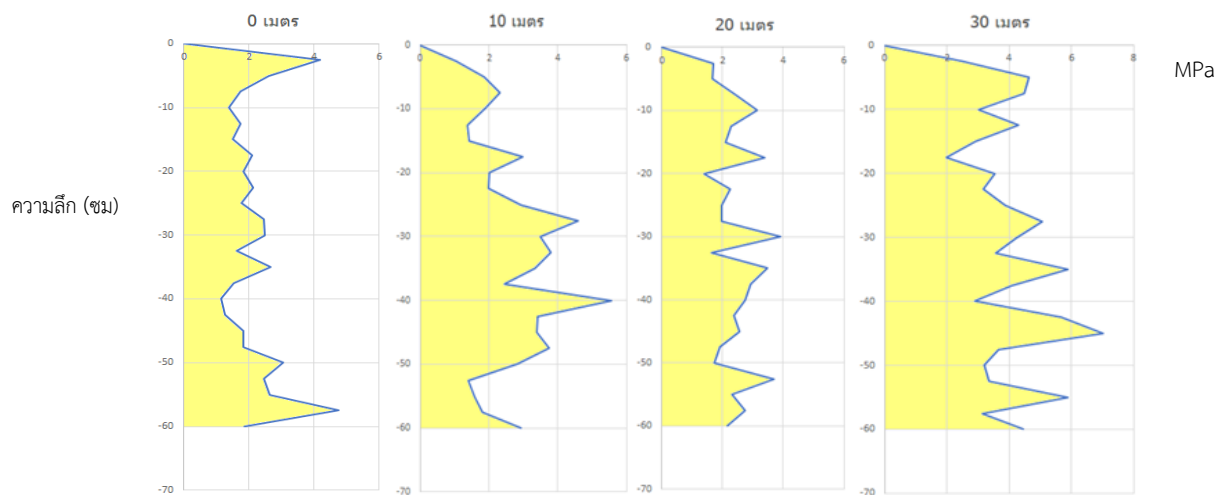
ในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) แปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูก มีค่าความต้านทานการแรงทะลุดินใกล้เคียงกับการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) โดยเฉพาะในแปลงอ้อยต่อ

4.2.1.3.1 แปลงอ้อยปลูก

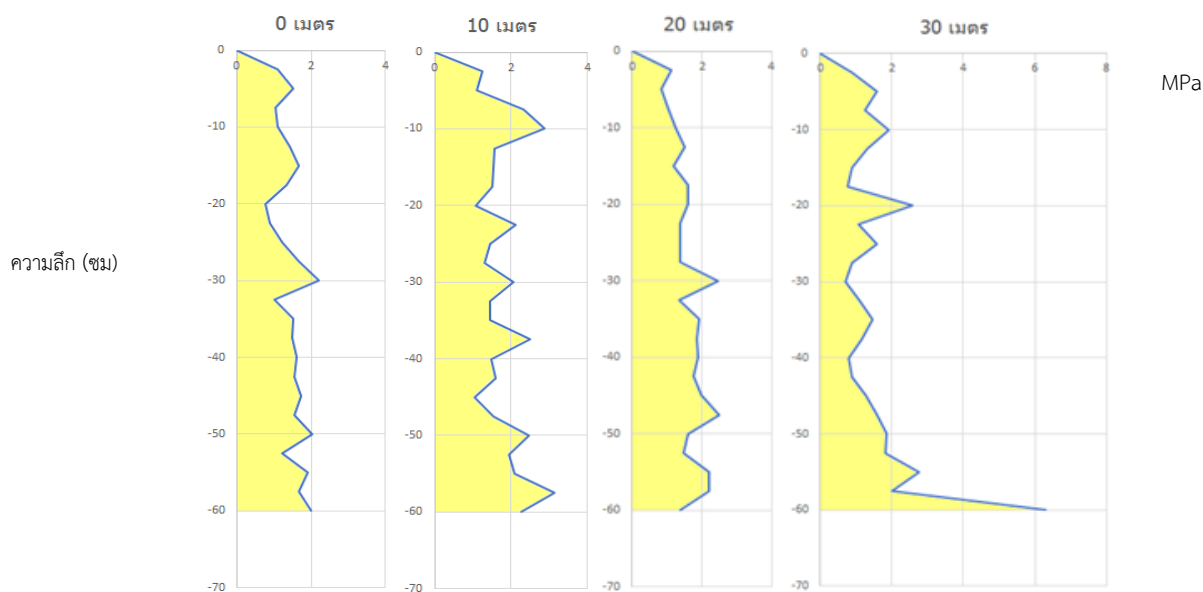
แปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการแรงทะลุดินอยู่ระหว่าง 2-4 เมกะปาสคาล แต่พบวาระยะ 0-10 เมตร จากบริเวณหัวแปลง มีค่าความต้านทานการแรงทะลุดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล กระจายอยู่ระดับความลึกตั้งแต่ 0-60 เซนติเมตร ขณะที่ระยะ 20-30 เมตร จากหัวแปลง มีความต้านทานการแรงทะลุดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 40-60 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า พบว่าส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการแรงทะลุดินอยู่ระหว่าง 2-4 เมกะปาสคาล ยกเว้นที่ระยะ 30-60 เซนติเมตร ที่มีค่าความต้านทานการแรงทะลุดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย พบว่าที่บริเวณหัวแปลง (0 เมตร) มีค่าความต้านทานการแรงทะลุดินไม่เกิน 2 เมกะปาสคาล ขณะที่ระยะ 10-30 เมตร จากหัวแปลง มีค่าความต้านทานการแรงทะลุดินระหว่าง 2-4 เมกะปาสคาล และยังพบว่าที่ระยะ 30 เมตร จากหัวแปลง มีค่าความต้านทานการแรงทะลุดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร



ภาพที่ 42 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



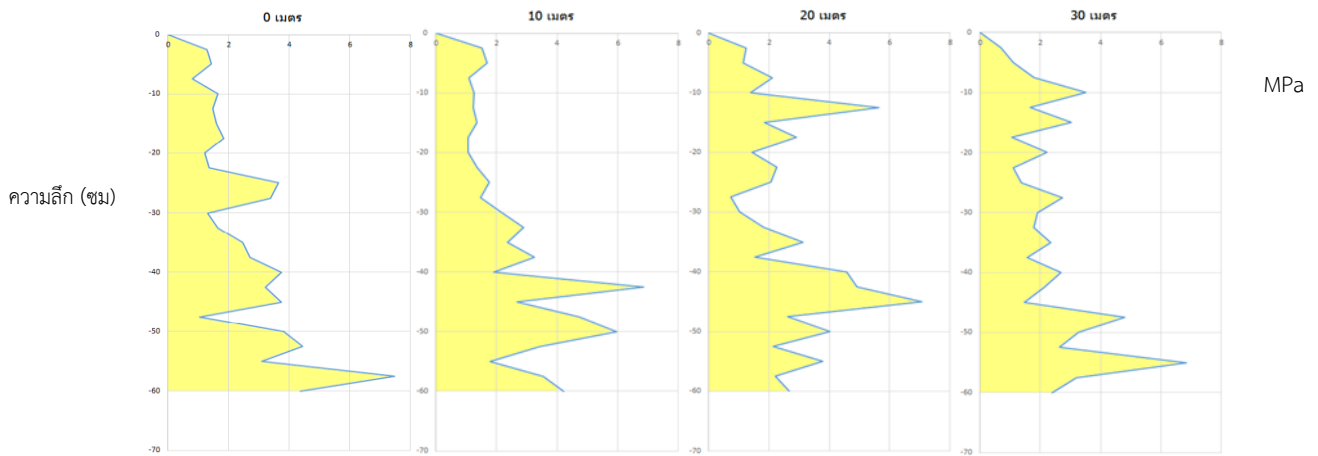
ภาพที่ 43 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



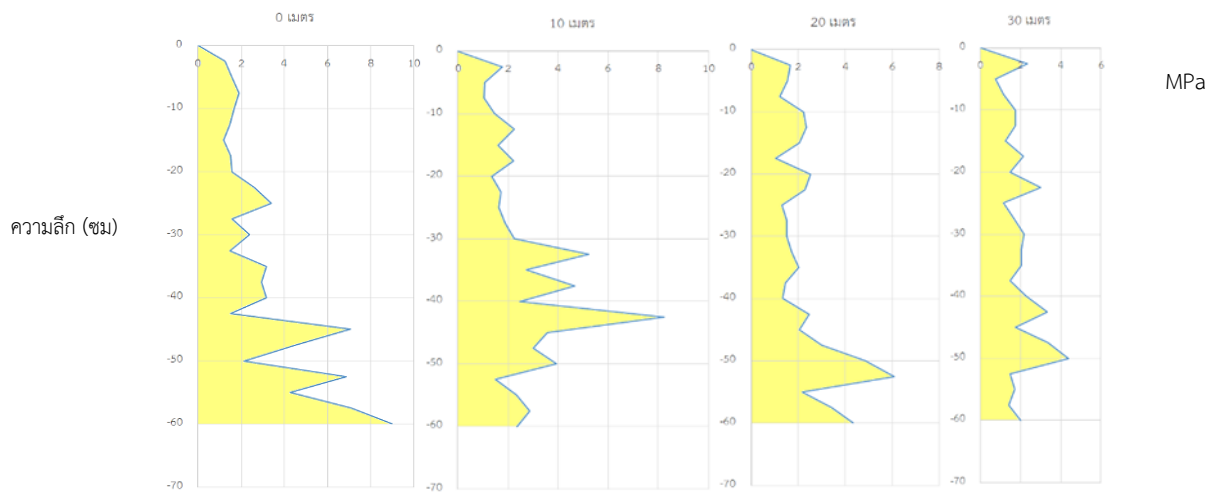
ภาพที่ 44 ค่าความต้านทานการเฉือนของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

4.2.1.3.2 แปลงอ้อยต่อ

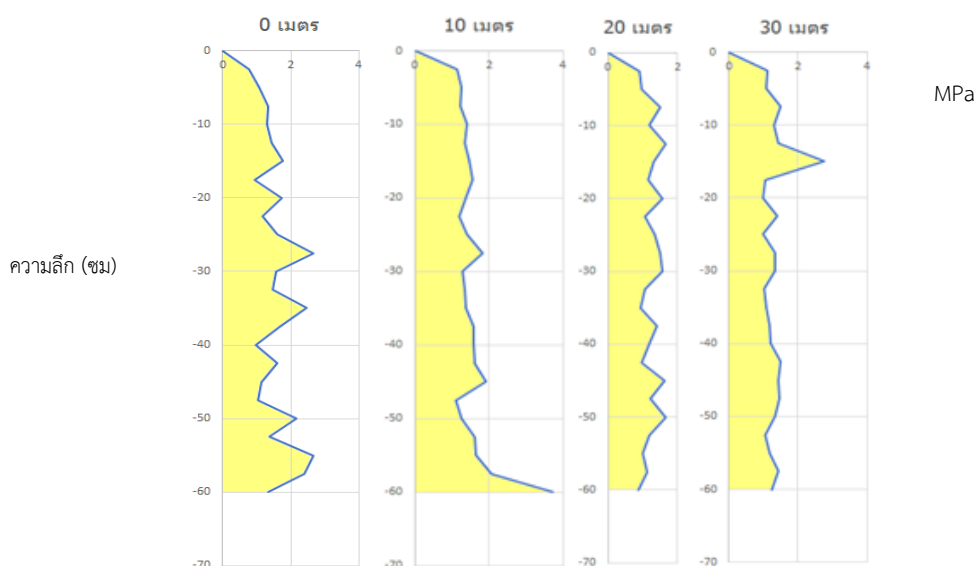
ในแปลงอ้อยต่อในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าความต้านทานการเฉือนของดินที่ระดับความลึกของดินคล้ายกับการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) โดยแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการเฉือนของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ที่ระยะ 0-10 เมตร จากหัวแปลง และพบว่าค่าความต้านทานการเฉือนของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึกของดินตื้นขึ้น (0-30 เซนติเมตร) ที่ระยะ 20-30 เมตร จากหัวแปลง และที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร พบว่ามีค่าความต้านทานการเฉือนของดินที่ระดับความลึกของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 4 เมกะปาสคาล เช่นเดียวกับส่วนแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า พบว่ามีค่าความต้านทานการเฉือนของดินระหว่าง 2-8 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ที่ระยะ 0-10 เมตร แต่ค่าความต้านทานการเฉือนของดินลดลงเหลือ 2-4 เมกะปาสคาล เมื่อเข้าสู่ระยะ 20-30 เมตร จากหัวแปลง ส่วนแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการเฉือนของดินน้อยกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่นอย่างชัดเจน โดยส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการเฉือนของดินน้อยกว่า 2 เมกะปาสคาล ยกเว้นบางบริเวณ เช่น ที่ระยะหัวแปลง (0 เมตร) มีค่าความต้านทานการเฉือนของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล แต่ไม่ถึง 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึก 20-60 เซนติเมตร และที่ระยะ 10 และ 30 เมตร จากหัวแปลง



ภาพที่ 45 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยโตที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 46 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยโตที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 47 ค่าความต้านทานการเฉือนของดินในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) ของแปลงอ้อยโตที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

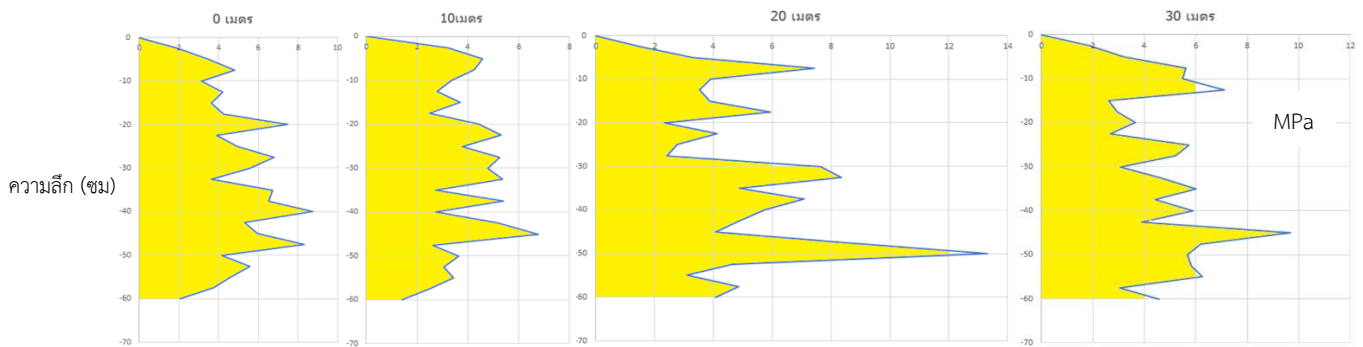
4.2.1.4 ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)

ในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) พบว่าค่าความต้านทานการเฉือนของดินของแปลงอ้อยปลูกและอ้อยโตเพิ่มขึ้นจากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในแปลงอ้อยโต และพบว่าค่าความต้านทานการเฉือนของดินจะเพิ่มมากขึ้นในแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกและการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า

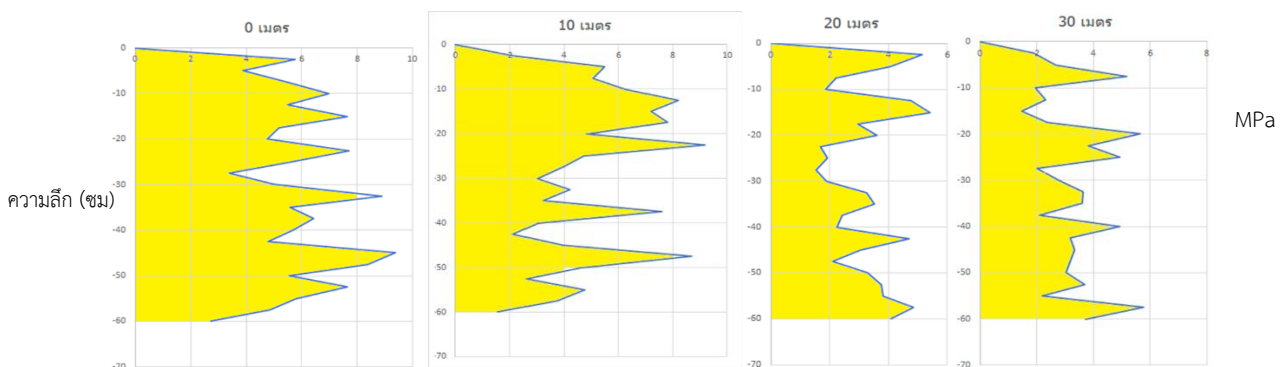
4.2.1.4.1 แปลงอ้อยปลูก

ในภาพรวมแปลงอ้อยปลูกในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการเฉือนของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาลในทุกระดับความลึกของดิน และตั้งแต่วัด 0- 30 เมตร จากหัวแปลง และค่าความต้านทานการเฉือนของดินมีแนวโน้มเพิ่มมากกว่า 2 เมกะปาสคาล เมื่อเข้ามาในแปลงปลูก โดยพบว่าดินมีค่าความต้านทานการเฉือนมากถึง 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับดินต้น 0-10 เซนติเมตร ที่ระยะ 10-30 เมตร จากหัวแปลง และเพิ่มมากกว่า 4 เมกะปาสคาล เมื่อเข้าสู่ระยะ 20- เมตร จากหัวแปลง ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าก็เช่นเดียวกัน พบว่ามีค่าความต้านทานการเฉือนของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ที่ระดับความลึกผิวดินต้น (0-10 เซนติเมตร) โดยภาพรวมยังคงมีค่าความต้านทานการเฉือนของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาลในทุกระดับความลึกของดินและตั้งแต่วัด 0-30 เมตร จากหัวแปลง แต่พบว่าค่าความต้านทานการเฉือนของดินบริเวณหัวแปลงที่ระยะ 0-10 เมตร มีแนวโน้มมากกว่าภายในแปลงที่ระยะ 20-30 เมตร ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีค่าความต้านทานการเฉือนของดินน้อยกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่น แต่โดยส่วนใหญ่มีค่าความต้านทานการเฉือนของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาล

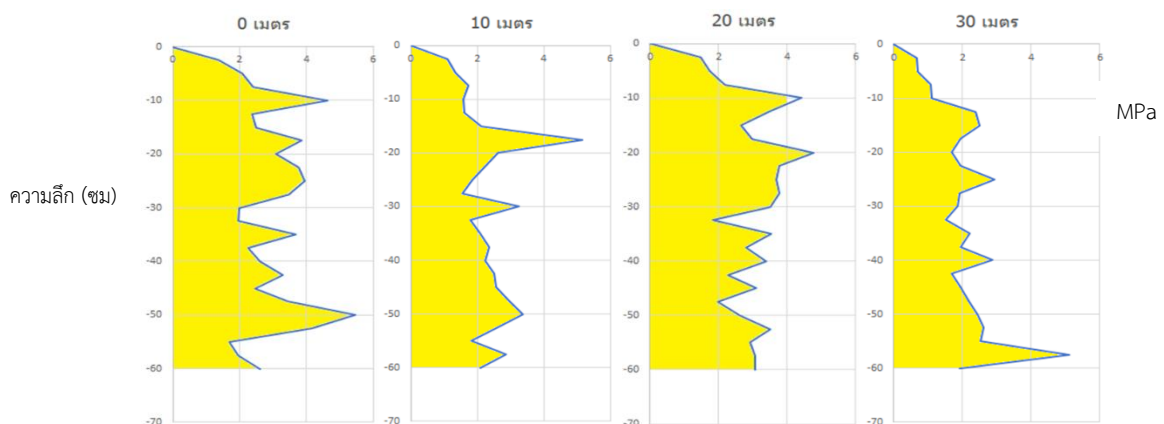
และพบว่าที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล ในช่วงระยะ 0-20 เมตร จากหัวแปลง



ภาพที่ 48 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดลพบุรี



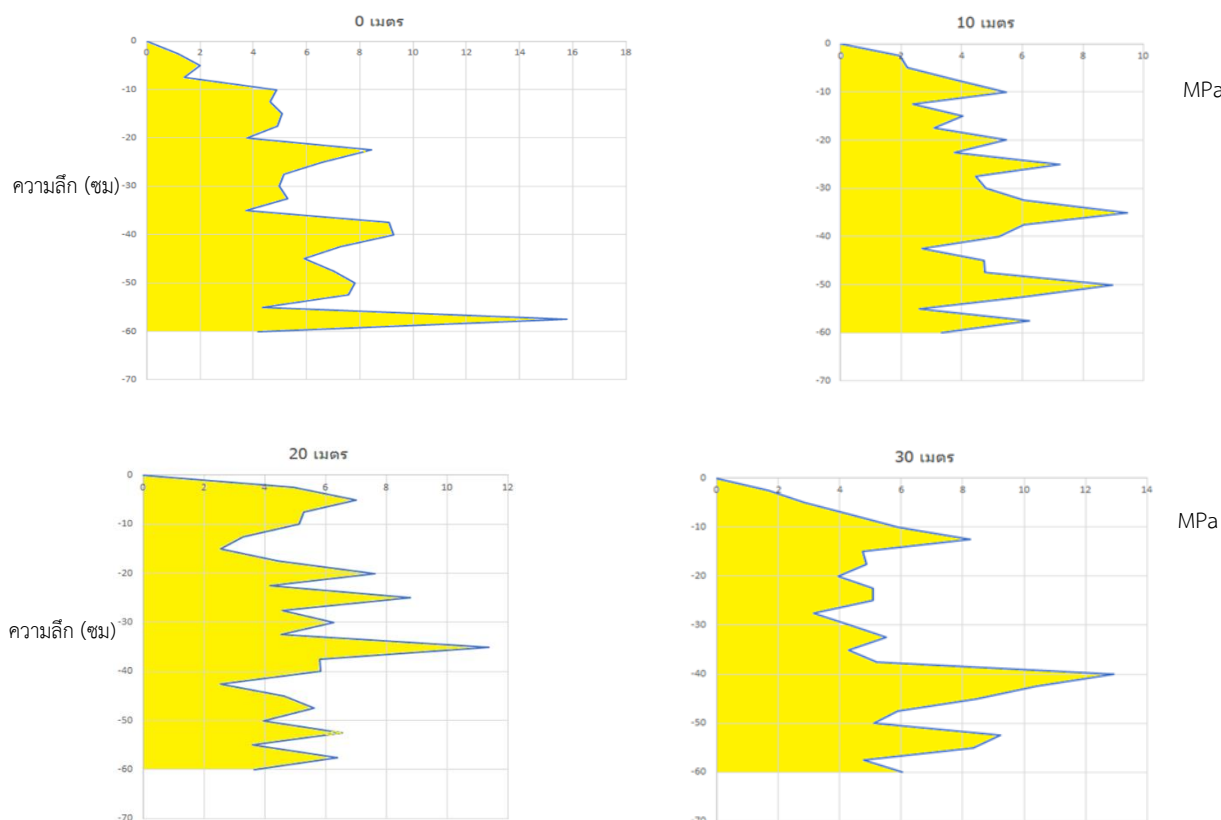
ภาพที่ 49 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดลพบุรี



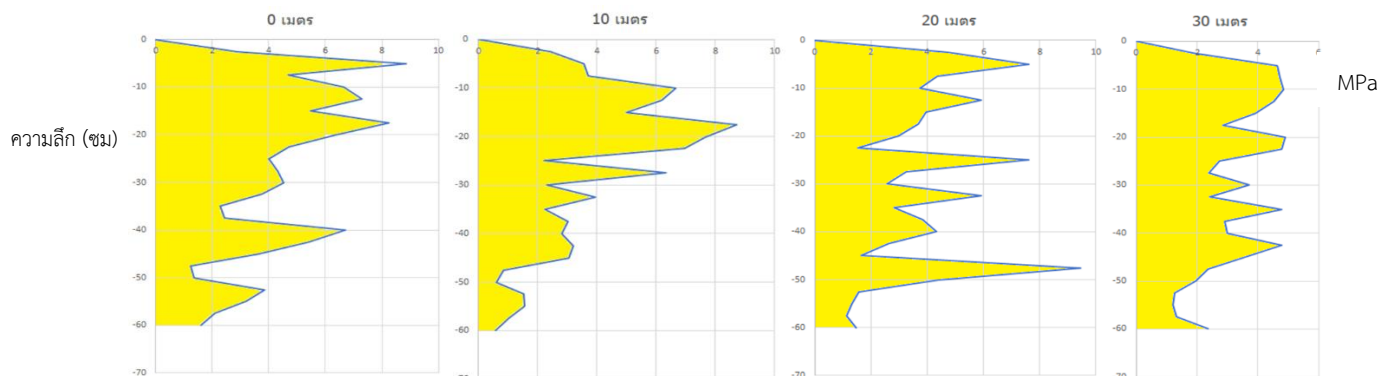
ภาพที่ 50 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคี่อ้อยในแปลงทดสอบอำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดลพบุรี

4.2.1.4.2 แปลงอ้อยตอ

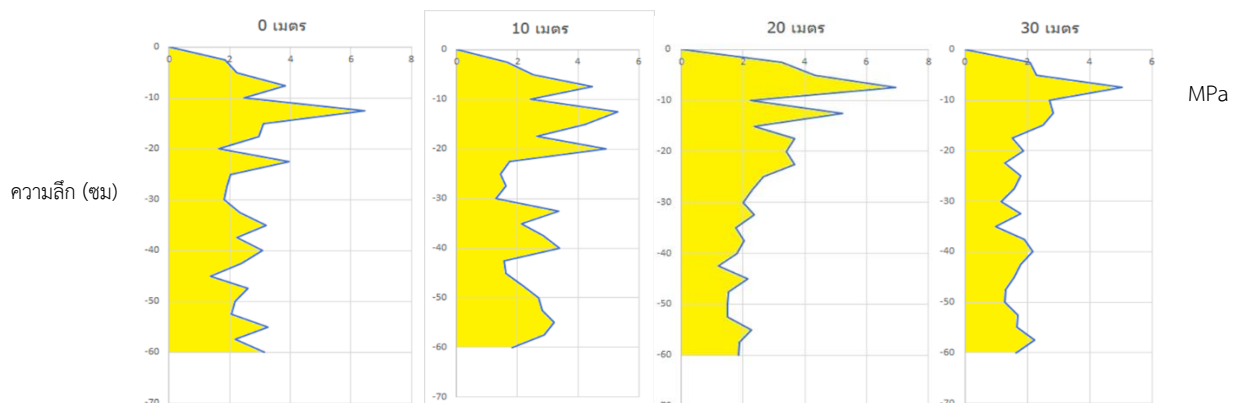
ความต้านทานการแทงทะลุของดินของแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกและแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่ามากกว่าแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย โดยแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากขึ้นในบริเวณผิวดินที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร โดยมีค่าระหว่าง 4-6 เมกะปาสคาล และพบว่าค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร จะเพิ่มมากขึ้น (จาก 4 เป็น 8 เมกะปาสคาล) เมื่อเข้าไปในแปลง (10-30 เมตร) ส่วนแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าเช่นเดียวกัน พบว่าที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร ดินมีค่าความต้านทานการแทงทะลุมากกว่า 4 เมกะปาสคาล และตั้งแต่ระยะ 0-30 เมตร จากหัวแปลง แม้จะมีแนวโน้มลดลงที่ระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น แต่ในภาพรวม ยังคงมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาลในหลายบริเวณกระจายอยู่ในระดับความลึก 20-50 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยมีรูปแบบการกระจายตัวของค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินแตกต่างจากแปลงอ้อยปลูก คือ มีความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาลในชั้นดินตั้งแต่ระดับ 0-20 เซนติเมตร ที่ระยะ 0-30 เมตร จากหัวแปลง แต่ภาพรวมยังคงมีความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 2 เมกะปาสคาลในทุกระดับความลึกของดิน และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร มีแนวโน้มเมื่อเข้าไปในแปลงที่ระยะ 20-30 เมตร จากหัวแปลง



ภาพที่ 51 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกในแปลงทดสอบอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 52 ค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าในแปลงทดสอบอำเภอนาทอง จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 53 ค่าความต้านทานการแหว่งทะลุของดินในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ของแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในแปลงทดสอบอำเภอนาทอง จังหวัดลพบุรี

4.2.2 ปริมาณความชื้นของดิน

4.2.2.1 ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน)

แปลงทดลองในพื้นที่อำเภอนาทองมีปริมาณความชื้นในดินมากกว่าพื้นที่อำเภอนองม่วงทั้งระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร (ตารางที่ 65) ในแปลงทดลองอำเภอนาทอง พบว่าแปลงอ้อยปลูกมีปริมาณความชื้นในดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อทั้งระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร ในแปลงอ้อยปลูก พบว่าการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบในแปลงอ้อยปลูก มีปริมาณความชื้นในดินใกล้เคียงกันทั้งสองระดับความลึก ส่วนในแปลงอ้อยต่อ พบว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อยแบบตะกร้ามีปริมาณความชื้นในดินมากกว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ทั้งระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร

จากตารางที่ 65 พบว่าที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร แปลงอ้อยปลูกมีความชื้น (26.87 และ 25.67 % ตามลำดับ) น้อยกว่าอ้อยต่อ (36.87 และ 37.53 % ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวทั้ง 3 รูปแบบ มีความชื้นที่ระดับความลึก 30

เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีความชื้นมากกว่าแปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า (28.68 และ 28.5 % ตามลำดับ) ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวทั้ง 3 รูปแบบ และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีความชื้นมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าทั้งในระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร

4.2.2.2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน)

จากตารางที่ 65 ในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกมีความชื้นใกล้เคียงกันทั้งที่ระดับความลึกของดิน 30 และ 60 เซนติเมตร ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึกของดิน 30 และ 60 เซนติเมตร มีความชื้นของดินไม่แตกต่างกันทางสถิติ (อยู่ระหว่าง 33.31 – 40.38 % และ 36.81 – 39.44 %) ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร มีความชื้นของดินไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 31.67 – 40.72 % และ 36.50 – 40.56 %

4.2.2.3 ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)

จากตารางที่ 65 ในช่วงช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกมีความชื้นของดินใกล้เคียงกันทั้งที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีความชื้นของดินมากกว่าแปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า (34.12 และ 34.22 % ตามลำดับ) ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีความชื้นของดินมากกว่าแปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า (31.87 %) ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีความชื้นมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า

4.2.2.4 ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)

ในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยปลูกมีความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร ที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกมีความชื้นของดินใกล้เคียงกัน ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีความชื้นของดินมากกว่าแปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ มีความชื้นของดินใกล้เคียงกัน ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบ

อ้อย มีความชื้นของดินมากที่สุด ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่ามีความชื้นของดินไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 21.34 – 26.97 %

ตารางที่ 65 ปริมาณความชื้นของดิน (%) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอลำปาง จังหวัดลพบุรี

แปลงทำหลาง	0 เดือน		4 เดือน		8 เดือน		13 เดือน	
	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม
ชนิดแปลงย่อย (A)								
อ้อยตอ (A1)	36.87a	37.53a	37.14	38.55	41.03	34.26	20.73b	26.39
อ้อยปลูก (A2)	26.87b	25.67b	35.96	37.11	32.83	35.02	27.52a	23.69
รูปแบบการเก็บเกี่ยว (B)								
รถตัด (B1)	30.44	28.68b	33.31	36.81	34.12b	34.23ab	23.45ab	25.35
รถตะกร้า (B2)	29.55	28.5b	40.38	37.25	34.22b	31.87b	19.38b	24.16
รถคืบ (B3)	35.63	37.62a	35.96	39.44	42.44a	37.81a	29.54a	25.61
Interaction A x B								
อ้อยตอ x รถตัด (A1B1)	37.06a	38.15a	34.95	37.10	35.89bc	31.49c	21.53b	26.09
อ้อยตอ x รถตะกร้า (A1B2)	36.31a	35.13a	40.03	38.01	42.02ab	33.83bc	23.70b	26.97
อ้อยตอ x รถคืบ (A1B3)	37.26a	39.31a	36.44	40.56	45.19a	37.47ab	16.95b	26.10
อ้อยปลูก x รถตัด (A2B1)	23.83b	19.21b	31.67	36.51	32.36cd	36.98ab	25.37b	24.62
อ้อยปลูก x รถตะกร้า (A2B2)	23.83b	21.87b	40.72	36.50	26.42d	29.92c	15.06b	21.34
อ้อยปลูก x รถคืบ (A2B3)	34.01a	35.93a	35.49	38.33	39.70abc	38.16a	42.14a	25.12
CV. (%) A	14.48	6.64	29.09	10.40	21.95	10.82	14.61	17.61
CV. (%) B	20.68	13.50	18.50	19.95	16.14	5.55	14.48	15.04
CV. (%) AxB	20.68	13.50	18.50	19.95	16.14	5.55	14.48	15.04
LSD A	5.10	5.00	13.81	5.11	10.53	4.87	4.58	5.73
LSD B	7.18 ^{ns}	6.52 ^{**}	7.37	8.22	6.49 [*]	4.15 ^{**}	7.54 ^{**}	4.10
LSD AxB	10.15 [*]	9.21 ^{**}	10.42	11.63	9.18 [*]	4.15 ^{**}	10.66 ^{**}	5.80

**, * ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และ ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ a มากกว่า b, c และ d ตามลำดับ

4.2.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

4.2.3.1 ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน)

ในพื้นที่แปลงทดลองอำเภอนาทอง พบว่าในช่วงเวลาก่อนปลูกในแปลงอ้อยปลูก และหลังตัดในแปลงอ้อยต่อ (0 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยปลูกและแปลงอ้อยต่อมีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกัน และพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ โดยการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบในแปลงอ้อยปลูก พบว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ในแปลงอ้อยต่อ พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนแปลงอ้อยปลูก พบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีแรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย (ตารางที่ 66)

4.2.3.2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน)

ในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยปลูกและแปลงอ้อยต่อมีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกัน ส่วนการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกันระหว่าง 3.03-3.06% ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย พบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างชนิดแปลงอ้อยและรูปแบบการเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 66)

4.2.3.3 ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)

ในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยปลูกและแปลงอ้อยต่อยังมีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกัน แต่แปลงอ้อยต่อมีแนวโน้มมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงขึ้น ส่วนการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกันระหว่าง 2.96-3.19% ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย

4.2.3.4 ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)

ในช่วงหลังก่อนเก็บเกี่ยว (13 เดือน) พบว่าอ้อยปลูกและแปลงอ้อยต่อยังมีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกัน ส่วนการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าและการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย

ตารางที่ 66 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงทดลองอำเภอลำปาง จังหวัดลพบุรี

แปลงทำหลวง	0 เดือน	4 เดือน	8 เดือน	13 เดือน
ชนิดแปลงอ้อย (A)				
อ้อยตอ (A1)	2.81	3.07	3.27	3.14
อ้อยปลูก (A2)	2.80	3.02	2.93	3.08
รูปแบบการเก็บเกี่ยว (B)				
รถตัด (B1)	3.09	3.06	3.19	3.13ab
รถตะกร้า (B2)	3.33	3.05	3.15	2.90b
รถคืบ (B3)	2.01	3.03	2.96	3.31a
Interaction A x B				
อ้อยตอ x รถตัด (A1B1)	3.33	3.01	3.24ab	3.12ab
อ้อยตอ x รถตะกร้า (A1B2)	3.33	2.89	3.16abc	2.75b
อ้อยตอ x รถคืบ (A1B3)	1.77	3.32	3.41a	3.56a
อ้อยปลูก x รถตัด (A2B1)	2.85	3.11	3.14abc	3.14ab
อ้อยปลูก x รถตะกร้า (A2B2)	3.33	3.17	2.77c	3.04b
อ้อยปลูก x รถคืบ (A2B3)	2.24	2.78	2.90bc	3.06b
CV. (%) A	-	9.05	23.20	8.89
CV. (%) B	-	13.12	9.31	10.07
CV. (%) AxB	-	13.12	9.31	10.07
LSD A	-	0.36 ^{ns}	0.93	0.36
LSD B	-	0.44 ^{ns}	0.31	0.34 [*]
LSD AxB	-	0.62 ^{ns}	0.45 [*]	0.48 [*]

**, * ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และ ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ a มากกว่า b, c และ d ตามลำดับ

4.2.4 เนื้อดิน

ดินในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วงเป็นชุดดินวังไผ่ จัดอยู่ในกลุ่มชุดดินที่ 31 การจำแนกดิน Fine, mixed, active, isohyperthermic Oxyaquic (Ultic) Paleustalfs การกำเนิดเกิดจากการผุพังสลายตัวของหินตะกอนเนื้อละเอียดและหินที่แปรสภาพ เช่น หินดินดาน หินทรายแป้ง หินโคลน หินชนวน หินฟิลไลต์ เป็นต้น บริเวณ

ภูเขา และรวมถึงที่เกิดจากวัสดุหินหรือหินที่เคลื่อนย้ายมาเป็นระยะทางใกล้ๆ โดยแรงโน้มถ่วงบริเวณเชิงเขาสภาพพื้นที่ ลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อยถึงลูกคลื่นลอนลาด ความลาดชัน 2-12 %การระบายน้ำ ดีการไหลบ่าของน้ำบนผิวดิน ช้ำถึงเร็ว การซึมผ่านได้ของน้ำ ปานกลางพืชพรรณธรรมชาติและการใช้ประโยชน์ที่ดิน ป่าเบญจพรรณ พืชไร่ เช่น ข้าวโพด ข้าวไร่ ถั่วต่างๆ และสวนผลไม้ เช่น มะม่วง มะขาม ลำไย การแพร่กระจาย ภาคเหนือตอนบนและที่สูงตอนกลางของประเทศการจัดเรียงชั้นดิน Ap(A)-Bt-BCลักษณะและสมบัติดิน เป็นดินสีมาก ดินบนเป็นดินร่วนปนดินเหนียวหรือดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง สีน้ำตาลเข้มถึงสีน้ำตาลปนแดงเข้ม ปฏิกริยาดินเป็นกรดปานกลางถึงเป็นกลาง (pH 6.0-7.0) ดินล่างตอนบนเป็นดินเหนียว สีแดงปนเหลืองถึงสีแดง ปฏิกริยาดินเป็นกรดจัดมากถึงเป็นกรดจัด (pH 4.5-5.5) ดินล่างตอนล่างเป็นดินเหนียว สีแดง มีจุดประสีน้ำตาลปนเหลืองและสีน้ำตาล ปฏิกริยาดินเป็นกรดจัดมากถึงเป็นกรดจัด (pH 4.5-5.5) ชุดดินที่คล้ายคลึงกัน ชุดดินบ้านจ้อง ข้อจำกัดการใช้ประโยชน์ สภาพพื้นที่ที่มีความลาดชันสูง ดินเกิดการชะล้างพังทลายได้ง่าย ข้อเสนอแนะในการใช้ประโยชน์ ปรับปรุงบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุและใช้ปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยชีวภาพ ร่วมกับปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น จัดระบบการปลูกพืชและระบบอนุรักษ์ดินและน้ำให้เหมาะสมกับสภาพความลาดชันของพื้นที่

เนื้อดินในแปลงทดลองอำเภอลำปาง พบว่าทั้งแปลงอ้อยตอ และอ้อยปลูก มีเปอร์เซ็นต์ดินทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ใกล้เคียงกันที่ระดับความลึกของดิน 0-30 เซนติเมตร ส่วนที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยตอ และอ้อยปลูก มีเปอร์เซ็นต์ดินทราย และทรายแป้งใกล้เคียงกัน แต่แปลงอ้อยตอมีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากกว่าแปลงอ้อยปลูก ส่วนรูปแบบการเก็บเกี่ยว พบว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวทั้ง 3 รูปแบบ มีเปอร์เซ็นต์ดินทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ใกล้เคียงกันทั้งที่ระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร (ตารางที่ 67)

ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร พบว่าเปอร์เซ็นต์ดินทรายและดินเหนียวไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ขณะที่แปลงอ้อยตอที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีเปอร์เซ็นต์ทรายแป้งมากกว่าแปลงอ้อยตอที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ส่วนที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดแบบตะกร้า และการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีเปอร์เซ็นต์ดินทรายมากกว่าแปลงอ้อยตอที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า แปลงอ้อยตอที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีเปอร์เซ็นต์ทรายแป้งใกล้เคียงกับแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 67)

โดยภาพรวมดินของแปลงทดลองในพื้นที่อำเภอลำปางจะมีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวอยู่ระหว่าง 40-82% มากกว่าแปลงหนองม่วงที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวอยู่ระหว่าง 36-60% การเกิดดินดานระดับ 3 มีโอกาสในการเกิดดินดานสูง เป็นดินเนื้อปานกลางและค่อนข้างหยาบ มีปริมาณทรายแป้งในเนื้อดินสูง โครงสร้างดินเป็นแบบแน่นทึบและมีความคงทนของโครงสร้างน้อย ง่ายต่อการถูกทำลาย และมีผลทำให้ความหนาแน่นรวมของดินสูงขึ้น จึงมีโอกาสเกิดดินดานสูง

ตารางที่ 67 เนื้อดินในแปลงทดลองอำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี

แปลงท่าหลวง	ความลึก 0-30 เซนติเมตร			ความลึก 30-60 เซนติเมตร		
	ทราย	ทรายแป้ง	เหนียว	ทราย	ทรายแป้ง	เหนียว
ชนิดแปลงย่อย (A)						
อ้อยตอ (A1)	18	19.33	62.67	16	16.33	67.67
อ้อยปลูก (A2)	19.83	18.33	61.83	19.67	14.33	65.50
รูปแบบการเก็บเกี่ยว (B)						
รถตัด (B1)	19	21	60	16.5b	17.5	66
รถตะกร้า (B2)	19.25	18.75	62	18ab	14.5	67.5
รถคืบ (B3)	18.5	16.75	64.75	19a	14.75	66.25
Interaction A x B						
อ้อยตอ x รถตัด (A1B1)	17.5	21ab	61.5	15.5c	21.5a	63ab
อ้อยตอ x รถตะกร้า (A1B2)	18	22.5a	59.5	15.5c	15ab	69.5ab
อ้อยตอ x รถคืบ (A1B3)	18.5	14.5b	67	17c	12.5b	70.5a
อ้อยปลูก x รถตัด (A2B1)	20.5	21ab	58.5	17.5bc	13.5b	69ab
อ้อยปลูก x รถตะกร้า (A2B2)	20.5	15ab	64.5	20.5ab	14b	65.5ab
อ้อยปลูก x รถคืบ (A2B3)	18.5	19ab	62.5	21a	17ab	62b
CV. (%) A	18.44	7.51	6.09	16.92	37.14	7.65
CV. (%) B	21.62	27.39	11.97	11.21	30.02	8.06
CV. (%) AxB	21.62	27.39	11.97	11.21	30.02	8.06
LSD A	4.53 ^{ns}	1.84 ^{ns}	4.93 ^{ns}	3.92 ^{ns}	7.52 ^{ns}	6.62 ^{ns}
LSD B	4.45 ^{ns}	5.62 ^{ns}	8.12 ^{ns}	2.18 [*]	5.10 ^{ns}	5.84 ^{ns}
LSD AxB	6.30 ^{ns}	7.95 [*]	11.48 ^{ns}	3.08 [*]	7.21 [*]	8.27 [*]

**, * ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และ ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ a มากกว่า b, c และ d ตามลำดับ

4.2.5 ค่าหนาแน่นรวมของดิน

4.2.5.1 ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน)

ส่วนในพื้นที่แปลงทดลองอำเภอท่าหลวง พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของดินบริเวณหัวแปลงและภายในแปลงอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทั้งในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยตอ แต่พบว่าดินที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร

มีค่าดินที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร มากกว่าที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร น้อยกว่าที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ทั้งในแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อ (ตารางที่ 68)

ในการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าในแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ในทั้งระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยต่อ พบว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ในทั้งระดับความลึก 0-30 และ 30-60 เซนติเมตร ยกเว้นที่ระยะ 20 เมตรจากหัวแปลง

จากตารางที่ 68 พบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกมีความหนาแน่นดินที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (อยู่ระหว่าง 0.92-0.96, 1.11- 1.28 g/cm³) ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวอ้อยทั้ง 3 รูปแบบ มีความหนาแน่นของดินรวมที่ระดับ 30 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (0.91-0.99 g/cm³) ส่วนที่ระดับ 60 เซนติเมตร แปลงที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีความหนาแน่นของดินรวม (1.24 g/cm³) มากกว่าแปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย (1.13 g/cm³) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร การเก็บเกี่ยวทุกรูปแบบมีความหนาแน่นของดินรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติ (อยู่ระหว่าง 0.79 -1.01 g/cm³) และที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีความหนาแน่นของดินรวมเท่ากับ 1.42 g/cm³ มากกว่าทุกกรรมวิธี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า

4.2.5.2 ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน)

จากตารางที่ 68 ในช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกมีความหนาแน่นดินที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร มีค่าความหนาแน่นรวมของดินไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.93 – 1.01 g/cm³ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยต่อมีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงอ้อยปลูก ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัด มีความหนาแน่นรวมของดิน (1.03 g/cm³) มากกว่าแปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย (0.90 g/cm³) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนความหนาแน่นรวมของดินที่ระดับ 60 เซนติเมตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (อยู่ระหว่าง 1.05- 1.12 g/cm³) ด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความหนาแน่นรวมของดิน (1.08 g/cm³) มากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าและการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย (0.87 และ 0.89 g/cm³ ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร ทุกกรรมวิธีมีความหนาแน่นรวมของดินไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.03 – 1.17 g/cm³ โดยสาเหตุมาจากล้อแทรกเตอร์ที่ปฏิบัติงานในไร่ไถกดอัดดินในระหว่างปฏิบัติงานทำให้ดินส่วนนั้นอัดตัวกันแน่นมากกว่าส่วนอื่นๆ ซึ่งการอัดตัวของดินจะเกิดขึ้นตั้งแต่ผิวดินจนถึง

ชั้นดินส่วนล่างดินที่อัดตัวกันส่วนบนจะถูกไถพรวนจนร่วนแต่ดินส่วนล่างซึ่งอยู่ลึกเกินกว่าผานไถจะปฏิบัติการถึงจะเป็นบริเวณที่เกิดชั้นดาน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

4.2.5.3 ช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)

ในช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยวที่อายุ 8 เดือน พบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกมีความหนาแน่นรวมของดินที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร มีค่าความหนาแน่นรวมของดินไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีความหนาแน่นของดินรวมเท่ากับ 1.04 g/cm^3 มากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความหนาแน่นของดินรวมมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ส่วนด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความหนาแน่นรวมของดิน (1.12 g/cm^3) มากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าและการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความหนาแน่นของดินรวมมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย

4.2.5.4 ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)

ในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) พบว่าแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกมีความหนาแน่นรวมของดินที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร มีค่าความหนาแน่นรวมของดินไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากที่สุด ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความหนาแน่นรวมของดินมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ส่วนด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแปลงอ้อยและรูปแบบการจัดการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร แปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความหนาแน่นของดินรวมมากกว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ส่วนที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร พบว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และแปลงอ้อยปลูกที่มีการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีค่าความหนาแน่นของดินรวมมากกว่าแปลงอ้อยต่อที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก



ตารางที่ 68 ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (g/cm³) ของช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังตัด (0 เดือน), หลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน), ก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน) และหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ในแปลงอำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดลพบุรี

แปลงทำหลาง	0 เดือน		4 เดือน		8 เดือน		13 เดือน	
	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม	30 ซม	60 ซม
ชนิดแปลงย่อย (A)								
ย่อยต่อ (A1)	0.92	1.11	1.01	1.13a	0.94	1.16	1.10	1.21
ย่อยปลูก (A2)	0.96	1.28	0.93	1.05b	1.02	1.08	1.08	1.28
รูปแบบการเก็บเกี่ยว (B)								
รถตัด (B1)	0.91	1.22ab	1.03a	1.12	1.04a	1.04b	1.05b	1.13b
รถตะกร้า (B2)	0.99	1.24a	0.98ab	1.10	1.01ab	1.20a	1.21a	1.26ab
รถคืบ (B3)	0.92	1.13b	0.90c	1.05	0.88b	1.11ab	1.01b	1.34a
Interaction A x B								
ย่อยต่อ x รถตัด (A1B1)	0.79	1.01c	1.03ab	1.17	1.03ab	1.15ab	1.00bc	1.06b
ย่อยต่อ x รถตะกร้า (A1B2)	1.01	1.19bc	1.08a	1.16	0.91b	1.16ab	1.12ab	1.20ab
ย่อยต่อ x รถคืบ (A1B3)	0.95	1.14bc	0.91ab	1.06	0.88b	1.16ab	1.19ab	1.36a
ย่อยปลูก x รถตัด (A2B1)	1.03	1.42a	1.04ab	1.07	1.05ab	0.93c	1.11ab	1.20ab
ย่อยปลูก x รถตะกร้า (A2B2)	0.97	1.30ab	0.87b	1.04	1.12a	1.24a	1.31a	1.32a
ย่อยปลูก x รถคืบ (A2B3)	0.88	1.13bc	0.89b	1.03	0.89b	1.06b	0.82c	1.31ab
CV. (%) A	6.67	10.28	24.29	3.38	12.27	11.10	22.69	15.57
CV. (%) B	16.72	8.14	11.20	10.74	12.52	7.97	12.13	13.49
CV. (%) AxB	16.72	8.14	11.20	10.74	12.52	7.97	12.13	13.49
LSD A	0.08 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.31	0.05 [*]	0.16	0.16	0.32	0.25
LSD B	0.17 ^{ns}	0.11 [*]	0.12 [*]	0.13 ^{ns}	0.13 [*]	0.10 [*]	0.14 [*]	0.18 [*]
LSD AxB	0.24 ^{ns}	0.21 ^{**}	0.17 [*]	0.18 ^{ns}	0.19 [*]	0.14 [*]	0.29 ^{**}	0.05 ^{**}

**, * ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และ ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ a มากกว่า b, c และ d ตามลำดับ

4.2 อภิปรายผล

ปริมาณความชื้นของดิน

แปลงทดสอบทั้งสองพื้นที่แม้ว่าสภาพรวมจะมีเนื้อดินที่เหมือนกัน คือ เป็นดินเหนียว แต่ปริมาณความชื้นของดินในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วง มีปริมาณความชื้นในดินน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง อาจเนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวงเกือบเท่าตัว ซึ่งจากการสัมภาษณ์เกษตรกรในพื้นที่อำเภอนองม่วง จะพบว่าไม่มีการใส่ซี้เค้กเพื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อย ขณะที่แปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง เกษตรกรมีการใส่ซี้เค้กเพื่อช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อย ซึ่งปริมาณความชื้นของดินมีผลกระทบทั้งต่อความหนาแน่นและความต้านทานการแทงทะลุของดินอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลอง พบว่าแปลงอ้อยต่อมีปริมาณความชื้นในช่วงเวลาหลังตัด (0 เดือน) ในปีแรก มากกว่าแปลงอ้อยปลูกในทั้งสองพื้นที่ทดสอบ เนื่องจากยังมีเศษซากอ้อยที่ช่วยปกคลุมผิวดิน ขณะที่แปลงอ้อยปลูกจะมีความชื้นน้อยกว่า เนื่องจากมีการไถพรวนแล้ว อย่างไรก็ตาม หลังการเก็บข้อมูลตลอดการทดลองทั้ง 4 ช่วงเวลา พบว่าแปลงอ้อยในพื้นที่อำเภอท่าหลวง มีความชื้นลดลงภายหลังการเก็บเกี่ยว ขณะที่แปลงอ้อยในพื้นที่อำเภอนองม่วง มีความชื้นของดินใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง

ในกรณีของรูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่าในพื้นที่อำเภอนองม่วง แปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า มีความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในตลอดการเก็บข้อมูลทั้ง 4 ครั้ง อาจเนื่องจากปริมาณใบอ้อยที่คลุมหน้าดินน้อยกว่า ขณะที่ในพื้นที่อำเภอท่าหลวงให้ผลตรงกันข้าม โดยพบว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีแนวโน้มทำให้ความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ซึ่งจากผลการทดลองปริมาณอินทรีย์วัตถุและความชื้นในดินที่ได้จากการเก็บข้อมูลในช่วง 0-8 เดือน จะไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่ที่การเก็บข้อมูลครั้งสุดท้าย (13 เดือน) จะพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุมากจะทำให้มีปริมาณความชื้นในดินมากด้วยเช่นกัน ปริมาณความชื้นในดินที่ระดับ 60 เซนติเมตร มีแนวโน้มมากกว่าที่ระดับ 30 เซนติเมตร โดยเฉพาะในช่วงหลังการเก็บเกี่ยว ความชื้นในดินที่ระดับชั้นไถพรวน 0-30 เซนติเมตร จะมีค่าน้อยกว่าที่ความลึก 30-60 เซนติเมตร โดยเฉพาะแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย เนื่องจากมีการเผาอ้อย ทำให้ดินสูญเสียความชื้นระหว่างการเผา และเมื่อไม่มีใบอ้อยปกคลุมผิวดินจะทำให้ดินบนมีปริมาณความชื้นน้อยมาก อย่างไรก็ตาม ในแปลงพื้นที่อำเภอท่าหลวง จะพบว่าในแปลงอ้อยที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ยังคงมีปริมาณความชื้นของดินสูง เนื่องมาจากช่วงเก็บเกี่ยวยังคงมีฝนตก (ตารางผนวกที่ 1) ทำให้ความชื้นยังคงมีมากกว่าแปลงในพื้นที่อำเภอนองม่วง ในสภาพที่ดินมีความชื้นน้อย และหากมีการเก็บเกี่ยวอ้อยแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ซึ่งมีการเผาใบอ้อยในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว จะส่งผลให้ความชื้นในดินลดลงมากยิ่งขึ้น ขณะที่แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยในพื้นที่อำเภอท่าหลวง มีความชื้นของดินมากกว่า เนื่องจากสภาพเนื้อดินที่มีสัดส่วนดินเหนียวมาก ช่วยเก็บรักษาความชื้นได้ ประกอบกับค่าความหนาแน่นรวมของดินมีค่าน้อยกว่าแปลงอ้อยในพื้นที่อำเภอนองม่วง ซึ่งปริมาณความชื้นของดินสูงบ่งบอกถึงการมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมาก มีความโปร่ง และช่องว่างมาก แสดงว่ามีค่าความหนาแน่นรวมของดินต่ำ

ดังนั้น ในสภาพแปลงอ้อยที่เป็นดินเหนียว หรือดินเหนียวปนทรายแป้ง และมีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ภายใต้สภาพที่ดินมีปริมาณความชื้นมาก และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินน้อย การใช้เครื่องจักรหนักเก็บเกี่ยว

อ้อยจะทำให้มีความหนาแน่นรวมของดินมาก และส่งผลให้ปริมาณความชื้นในดินลดลงจากการอัดแน่นของดิน เช่นเดียวกับดินเนื้อปานกลางและค่อนข้างหยาบ มีปริมาณทรายแบ่งในเนื้อดินสูง โครงสร้างดินเป็นแบบแน่นทึบและมีความคงทนของโครงสร้างน้อย ง่ายต่อการถูกทำลาย และมีผลทำให้ความหนาแน่นรวมของดินสูงขึ้น จึงมีโอกาสเกิดดินดานสูงเช่นกัน และเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของรากพืช ประเทือง และธัญญา (2547) รายงานว่า เครื่องจักรกลควรเข้าไปปฏิบัติงานในแปลงไร้อ้อยในช่วงที่ความชื้นในดินไม่เกิน 18.74 % สำหรับดินร่วนปนทราย และในช่วงความชื้นของดินไม่เกิน 17.88 % สำหรับดินร่วนเหนียวปนทรายแบ่งและช่วงความชื้นของดินไม่เกิน 20.27 % สำหรับดินร่วน และเมื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุลงในดิน ทำให้ความชื้นที่เครื่องจักรสามารถเข้าไปทำงานได้เพิ่มขึ้นเป็น 23.65 % สำหรับดินร่วนปนทรายแบ่ง และในช่วงความชื้นของดินไม่เกิน 19.43 % สำหรับดินร่วนเหนียวปนทรายแบ่ง และช่วงความชื้นของดินไม่เกิน 21.97 % สำหรับดินร่วน และเมื่อลดภาระกระทำของดินลงจาก 200 กิโลปาสกาล เป็น 170 กิโลปาสกาล และ 150 กิโลปาสกาล ทำให้การทำงานของเครื่องจักรสามารถทำงานได้ที่ความชื้นในดินร่วนปนทรายเพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิน 19.60% และ 20.65 % ตามลำดับ

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ในภาพรวมปริมาณอินทรีย์วัตถุในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วงมีน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง เนื่องจากแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วงไม่มีการใส่ปุ๋ยคอกเพิ่มอินทรีย์วัตถุ ส่วนแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง มีการใส่ปุ๋ยคอกจากฟาร์มเพื่อช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อย ในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วง ซึ่งเกษตรกรไม่มีการใส่ปุ๋ยคอก แม้ว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และการใช้รถตะกร้าในช่วงการเก็บข้อมูล 3 ครั้งแรก (ช่วงเวลาก่อนปลูก/หลังการตัด (0 เดือน), ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) และช่วงเวลาก่อนเก็บเกี่ยว (8 เดือน)) แต่พบว่าในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 4 (ช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีการเผาอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว ในขณะที่แปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง พบว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวทั้ง 3 รูปแบบ มีปริมาณอินทรีย์วัตถุใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองจะเห็นว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าแปลงที่เก็บเกี่ยวด้วยรูปแบบอื่นในช่วง 0-8 เดือน แม้จะมีอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นภายหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ดังนั้น ในสภาพแปลงอ้อยที่เป็นดินเหนียวและไม่มีการใส่อินทรีย์วัตถุ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก เนื่องจากจะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินเพิ่มขึ้นที่ระดับชั้นไทรพอร์ความลึก 0-30 เซนติเมตร ภายหลังการเก็บเกี่ยว ขณะที่แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่นที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าจะสามารถช่วยลดค่าความหนาแน่นของดินชั้นไทรพอร์ลงได้ (บริเวณชั้น 0-30 เซนติเมตร) แสดงให้เห็นว่าเกษตรกรในพื้นที่ดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายแบ่งที่มีอินทรีย์วัตถุน้อย และมีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ควรต้องเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อยให้มากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีอ้อยต่อที่ดินมีโอกาสเกิดความหนาแน่นของดินมากขึ้นเรื่องการใส่ปุ๋ยคอกต่างๆ ซึ่งชนิดของดินยังมีผลต่อความหนาแน่นของดิน โดยความหนาแน่นของดินจะสูงขึ้นเรียงตามลำดับชนิดดินคือ ดินร่วน ดินร่วนปนทรายแบ่ง และดินร่วนเหนียวปนทรายแบ่ง (ประเทือง และธัญญา, 2547) อย่างไรก็ตาม แปลงอ้อยต่อที่มีอายุหลายปี และมีการสะสมปริมาณ

อินทรีย์วัตถุในระยะยาว อาจจะสามารถช่วยชะลอหรือลดค่าความหนาแน่นของดินได้ Puttaso *et al.* (2011) รายงานว่า ในบางพื้นที่ที่ปลูกอ้อย แต่มีค่าความหนาแน่นรวมของดินต่ำ ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการจัดการซากอ้อยที่ดีโดยปราศจากการเผาและมีการคลุมหรือสับกลบส่งผลทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นส่งผลต่อเนื่องให้ดินมีโครงสร้างดีขึ้น เห็นได้จากการเกิดเม็ดดิน (soil aggregate) ทำให้ดินมีค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลงได้ อย่างไรก็ตาม แปลงอ้อยของเกษตรกรในพื้นที่ทั้งสองแห่งส่วนใหญ่ มีการไถต่อเฉลี่ยประมาณไม่เกิน 3 ปี ซึ่งอาจเป็นระยะที่มียังสะสมปริมาณอินทรีย์วัตถุไม่เพียงพอที่ช่วยลดการอัดแน่นของดิน

ความหนาแน่นของดินรวม

ในช่วงที่มีการเก็บเกี่ยว แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย จะมีรถบรรทุกอ้อยสัญจรในแปลง และน้ำหนักของรถบรรทุกอ้อยมีปริมาณใกล้เคียงกัน (น้ำหนักรถ+อ้อยประมาณ 30 ตัน) อย่างไรก็ตาม ในแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุกจะยังมีน้ำหนักของรถตัดอ้อยด้วย แต่ขณะที่แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย แม้จะไม่มีรถตัดอ้อยที่มีน้ำหนักมากสัญจรในแปลง แต่การเผาใบอ้อยก่อนเก็บเกี่ยวส่งผลความชื้นบริเวณหน้าดินลดลงมาก นอกจากนี้ยังทำให้มีอินทรีย์วัตถุย่อยลง และไม่มีวัสดุคลุมดิน ซึ่งในขั้นตอนการตัดที่มีรถบรรทุกสัญจรในแปลง น้ำหนักของรถจะกดทับทำให้ง่ายต่อเพิ่มความหนาแน่นของดินรวม ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง โดยพบว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีความหนาแน่นของดินรวมมากกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่นในทั้งแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูก ในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอแปลงหนองม่วง แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีความหนาแน่นของดินรวมเท่ากับ 1.34 g/cm^3 มากกว่าแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก สอดคล้องกับ Bot and Benites (2005) ที่พบว่าการใช้เครื่องจักรในพื้นที่ปลูกอ้อยทำให้ดินอัดตัวแน่นหรือบางพื้นที่มีการเผาเศษซากอ้อย ส่วนแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง ทุกรูปแบบการเก็บเกี่ยว มีความหนาแน่นของดินรวมใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง $1.23\text{-}1.41 \text{ g/cm}^3$ ขณะที่ Usaborisut (2011) ได้ศึกษาผลกระทบการใช้เครื่องจักรกลเกษตรที่มีต่อการบดอัดดินโดยใช้พารามิเตอร์ความต้านทานการแทงทะลุและความหนาแน่นในไร่อ้อยที่ใช้เครื่องจักรกลเกษตรและไร่อ้อยที่ใช้แรงงานเป็นหลักพบว่าความหนาแน่นมากที่สุดคือ $1.78 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$ กับไร่อ้อยที่ใช้เครื่องจักรกลเกษตรในขณะที่ ไร่อ้อยที่ใช้แรงงานเป็นหลักมีความหนาแน่นดิน $1.24 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$

ชนิดของดินยังมีผลต่อความหนาแน่นของดินจะสูงขึ้นเรียงตามลำดับชนิดดินคือ ดินร่วน ดินร่วนปนทรายแป้ง และดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (ประเทือง และธัญญา, 2547) โดยทั้งสองพื้นที่แปลงทดสอบเป็นดินเหนียว และดินเหนียวปนทรายแป้ง ซึ่งง่ายต่อการอัดแน่นของดิน แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของดิน มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ใช้ปลูกอ้อย ซึ่งดินที่ใช้ประโยชน์ในการปลูกอ้อยมีช่วงค่าความหนาแน่นรวมของดินต่ำสุด ($1.37\text{-}1.51 \text{ g/cm}^3$) โดยเฉพาะบริเวณชั้นไผ่พรวนที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร แต่ชั้นดานที่เกิดดินตะกอนลมหอย (loess) จะมีค่าอยู่ระหว่าง $1.44\text{-}1.65 \text{ g/cm}^3$ (Roth, 1996) ค่าความหนาแน่นรวมของดินที่ชี้ว่าดินนั้นเกิดภาวะอัดแน่นของดินชนิดหนึ่งก็อาจจะเป็นภาวะที่ดินอยู่ในสภาพเกาะตัวกันหลวมๆ (loose state) ของดินอีกชนิดหนึ่ง (Hakansson, 1990) โดยทั่วไปความหนาแน่นรวมของดินที่เป็นชั้นดาน (crust) ก็จะมีค่าอยู่ในช่วง $1.78\text{-}1.91 \text{ g/cm}^3$ สำหรับดินในกลุ่มที่มีเนื้อดินเป็นดินทรายปนทรายแป้ง

ทรายปนร่วน และร่วนปนทราย ซึ่งจากผลการทดลองนี้ แม้แปลงทดลองทั้งสองพื้นที่มีสภาพเป็นดินเหนียวและดินเหนียวปนทรายบ้างบางแห่ง ยังคงมีความหนาแน่นรวมของดินต่ำกว่ารายงานข้างต้น นอกจากนี้ การอัดตัวแน่นของดินส่งผลทำให้ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำที่แตกต่างกันโดยดินที่มีการอัดตัวแน่นมากจะทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินมีค่าสูงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำ อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน มีกับความหนาแน่นรวมของดินดิน แต่พบว่ามีความหนาแน่นรวมของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นภายหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) เมื่อเปรียบเทียบกับ การเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 (การใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย) และครั้งที่ 3 (ก่อนการเก็บเกี่ยว) โดยที่ระดับความลึกชั้นไถพรวน 0-30 เซนติเมตร จะมีแนวโน้มให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินน้อยกว่าที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร

ความต้านทานการแทงทะลุของดิน

แปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วง

จากผลการทดลองพบว่าเครื่องจักรกลที่ทำงานในแปลงอ้อย มีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน โดยเฉพาะเครื่องจักรกลที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวอ้อย ในพื้นที่แปลงทดสอบอำเภอนองม่วง พบว่าแปลงอ้อยปลูกและอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า แต่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในระดับความลึกของดินในแปลงอ้อยปลูกจะกระจายอยู่ตลอดตั้งแต่ระดับผิวดินลึกไปจนถึงระดับ 60 เซนติเมตร ส่วนแปลงอ้อยต่อจะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงอยู่ที่ระดับดินชั้นไถพรวน (0-30 เซนติเมตร) แปลงอ้อยปลูกมีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ตั้งแต่การเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 คือ การช่วงเวลาก่อนการปลูกอ้อย (0 เดือน) เมื่อเทียบกับแปลงอ้อยต่อ เนื่องจากมีการใช้เครื่องจักรในการเตรียมพื้นที่ปลูกอ้อย และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะเพิ่มมากขึ้นในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 คือ ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ยกเว้นในแปลงอ้อยปลูกที่มีเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะเพิ่มสูงสุดในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลครั้งสุดท้ายภายหลังเครื่องจักรกลเก็บเกี่ยวอ้อยในแปลง โดยแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงสุดเกิน 8 เมกะปาสคาลในช่วงระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร จากบริเวณหัวแปลง (0-5 เมตร) และมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะลดลงเหลือ 2-4 เมกะปาสคาลเมื่อเข้าไปในแปลง ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตะกร้าจะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินส่วนใหญ่มากกว่า 4 เมกะปาสคาลกระจายอยู่ในช่วงระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินยังคงสูงแม้จะลึกเข้าไปในแปลง ส่วนแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินส่วนใหญ่มากกว่า 6 เมกะปาสคาล กระจายอยู่ในช่วงระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินยังคงสูงแม้จะลึกเข้าไปในแปลง ดังนั้น จะพบว่าแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงสุด (เกิน 8 เมกะปาสคาล) เมื่อเทียบกับแปลงที่มีการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่น อาจเนื่องจากรถบรรทุกที่วิ่งในแปลงอ้อยมีน้ำหนักมาก ทำให้เพิ่มค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน โดยเฉพาะในสภาพ

ที่ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ เนื่องจากมีการเผาใบอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว ซึ่ง Perumpral (1987) รายงานว่าความชื้นของดินที่สูงจะลดค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน ซึ่งจากสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณความชื้นของดินที่พบว่าในแปลงอ้อยที่มีแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้รถตะกร้า มีปริมาณความชื้นของดินมากกว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วง 8 เดือนก่อนเก็บเกี่ยว แม้ว่าแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อยจะมีอินทรีย์วัตถุสูงกว่าก็ตาม แสดงให้เห็นว่าในสภาพที่ดินมีอินทรีย์วัตถุสูง แต่หากความชื้นในดินต่ำเมื่อมีการเผาอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว (มีความชื้นเหลือไม่ถึง 10% ในแปลงอ้อยต่อและอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย) การใช้เครื่องจักรกลหนักเข้าไปเก็บเกี่ยวก็จะทำให้มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงได้เช่นกัน

ในแปลงอ้อยต่อพื้นที่อำเภอหนองม่วง ในแปลงอ้อยต่อจะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงตั้งแต่หลังการเก็บเกี่ยว (0 เดือน) เมื่อเทียบกับแปลงอ้อยปลูก เนื่องจากการเก็บข้อมูลภายหลังการเก็บเกี่ยวในปีแรก (เครื่องจักรลงเก็บเกี่ยวในปีก่อนหน้า) โดยเฉพาะในแปลงอ้อยที่มีแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย ยังมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงในบางบริเวณ เนื่องจากทั้งสองแปลงพบหินกรวดปนอยู่ในชั้นดินลึกลงไป หลังจากนั้นเกษตรกรจะมีการไถระเบิดดินดานพร้อมกับการใส่ปุ๋ยบำรุงต่ออ้อยในช่วงอายุไม่เกิน 4 เดือน (ก่อนการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 (4 เดือน) และ 3 (8 เดือน) จึงทำให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงครั้งที่ 2 และ 3 ที่ระดับชั้นไถพรวน 0-30 เซนติเมตร มีค่าลดลงไม่เกิน 2 เมกะปาสคาล แม้ในช่วงนี้ เกษตรกรจะมีการใช้รถแทรกเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงเข้าไปจัดการดูแลรักษาแปลงอ้อย หลังจากนั้นเมื่อมีการเก็บเกี่ยวอ้อย ในช่วงการเก็บข้อมูลครั้งที่ 4 (ในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) เป็นช่วงที่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงสุด โดยเฉพาะในแปลงอ้อยที่มีแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 6 เมกะปาสคาล ที่ระดับดินตื้น (ระดับความลึก 0-10) โดยภาพรวมพบว่าเครื่องจักรกลที่ใช้ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวส่งผลอย่างมากต่อค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าเครื่องจักรที่ใช้ในการปลูกและการเตรียมดิน และในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว แปลงอ้อยต่อที่มีแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่ามีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ส่วน Usaborisut (2011) ได้ศึกษาผลกระทบการใช้เครื่องจักรกลเกษตรที่มีต่อการบดอัดดิน โดยทำการวัดค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในไร่อ้อยที่ใช้เครื่องจักรกลเกษตรและไร่อ้อยที่ใช้แรงงานเป็นหลัก พบว่าค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในแนวระหว่างร่องอ้อยที่ชั้นที่ลึก 45 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ยของต้านทานการแทงทะลุในพื้นที่ใช้เครื่องจักรกลเกษตรสูงกว่าที่ใช้แรงงานเป็นหลัก 23.3 % และมีค่าความต้านทานการแทงทะลุเกิน 2 เมกะปาสคาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในไร่อ้อยที่เป็นอ้อยต่อหลายปี

แปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง

ในแปลงอ้อยต่อในพื้นที่อำเภอท่าหลวงมีรูปแบบค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินคล้ายกับแปลงทดสอบในพื้นที่อำเภอหนองม่วง โดยจะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงมากกว่า 2 เมกะปาสคาลตั้งแต่หลังการเก็บเกี่ยว (0 เดือน) เมื่อเทียบกับแปลงอ้อยปลูก เนื่องจากการเก็บข้อมูลภายหลังการเก็บเกี่ยวในปีแรก (เครื่องจักรลงเก็บเกี่ยวในปีก่อนหน้า) หลังจากนั้นเกษตรกรจะมีการไถระเบิดดินดานพร้อมกับการใส่ปุ๋ยบำรุงต่ออ้อยในช่วงอายุไม่เกิน 4 เดือน (ก่อน

การเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 (4 เดือน) และ 3 (8 เดือน) จึงทำให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงครั้งที่ 2 และ 3 ที่ระดับชั้นไพรวน 0-30 เซนติเมตร มีค่าลดลงต่ำกว่า 2 เมกะปาสคาล แต่ที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร ยังคงมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูง แม้ในช่วงนี้เกษตรกรจะมีการใช้รถแทรกเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงเข้าไปจัดการดูแลรักษาแปลงอ้อย หลังจากนั้นเมื่อมีการเก็บเกี่ยวอ้อย ในช่วงการเก็บข้อมูลครั้งที่ 4 (ในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) จะเป็นช่วงที่มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงสุด แปลงอ้อยต่อมีรูปแบบการกระจายของค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินแตกต่างกันไปตามรูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อย โดยแปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูง (มากกว่า 4 เมกะปาสคาล) ในช่วงดินชั้นไพรวน 0-30 เซนติเมตร และลดลงเมื่อลึกลงไป 30-60 เซนติเมตร ขณะที่แปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่า 4 เมกะปาสคาล กระจายอยู่ตั้งแต่ 10 เซนติเมตร ลงไป และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นที่ระดับความลึกลงไปจากชั้นไพรวน ซึ่งบางบริเวณมีค่ามากกว่า 8 เมกะปาสคาล

ในแปลงอ้อยปลูก พบว่าในช่วงก่อนปลูก แปลงอ้อยปลูกที่ผ่านการเตรียมดินด้วยรถแทรกเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงเช่นเดียวกับแปลงอ้อยต่อ แต่มีความต้านทานการแทงทะลุของดินเกิน 2 เมกะปาสคาล กระจายอยู่เป็นช่วงที่ระดับความลึกตั้งแต่ 20 เซนติเมตรลงไป และเมื่อมีการปลูกอ้อย และใส่ปุ๋ยแล้ว พบว่ามีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ซึ่งเป็นแปลงที่มีการที่มีการปลูกอ้อยมาอย่างต่อเนื่อง ขณะที่แปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย และแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า เป็นแปลงที่เคยปลูกมันสำปะหลังและข้าวโพดมาก่อน ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าช่วงแรกของการเตรียมดิน ปลูก และทำร่นในช่วงก่อนปลูกและหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินค่อนข้างน้อยกว่าแปลงปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงหลังการเก็บเกี่ยว (4-6 เมกะปาสคาล) ที่ระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร โดยเฉพาะแปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า ในขณะที่แปลงอ้อยปลูกที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินน้อยกว่า ดังนั้น จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะแปรผันไปตามการเข้าทำงานของเครื่องจักรกลอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเครื่องจักรที่ใช้ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว ซึ่งการจัดการเครื่องจักรกับเกี่ยวให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ โดยภาพรวม แปลงทดสอบทั้งอ้อยต่อและอ้อยปลูกในพื้นที่อำเภอท่าหลวงเป็นดินเหนียว ทำให้ภายหลังการเก็บเกี่ยว จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินมากกว่าแปลงทดสอบในพื้นที่อำเภอหนองม่วง โดยเฉพาะแปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. แปลงทดสอบทั้งสองพื้นที่แม้ว่าภาพรวมจะมีเนื้อดินที่เหมือนกัน คือ เป็นดินเหนียว แต่ปริมาณความชื้นของดินในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วง มีปริมาณความชื้นในดินน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวง อาจเนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีน้อยกว่าแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอท่าหลวงเกือบเท่าตัว
2. การเผาอ้อยในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวในแปลงที่มีการใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย จะทำให้ปริมาณความชื้นในดินในชั้นไผ่พรวนที่ระดับ 0-30 เซนติเมตร ลดลงอย่างมากในดินเหนียวที่มีทรายและทรายแป้งผสมมากในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วง
3. ในแปลงทดสอบพื้นที่อำเภอนองม่วงที่เกษตรกรไม่มีการใส่อินทรีย์วัตถุ แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคีบอ้อย มีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าการเก็บเกี่ยวรูปแบบอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีการเผาอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว
4. ค่าความหนาแน่นรวมของดินทั้งสองพื้นที่และทั้ง 3 รูปแบบการเก็บเกี่ยว มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ใช้ปลูกอ้อย และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะแปรผันไปตามการเข้าทำงานของเครื่องจักรกลอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเครื่องจักรที่ใช้ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว
5. แปลงอ้อยที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก และแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้าแปลงทดสอบทั้งอ้อยต่อและอ้อยปลูกในพื้นที่อำเภอท่าหลวงเป็นดินเหนียว จะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินให้ภายหลังการเก็บเกี่ยวมากกว่าแปลงทดสอบในพื้นที่อำเภอนองม่วง
6. แปลงอ้อยปลูกมีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงมากกว่า 2 เมกะปาสคาล ตั้งแต่การเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 คือ การช่วงเวลาก่อนการปลูกอ้อย (0 เดือน) เมื่อเทียบกับแปลงอ้อยต่อ เนื่องจากการใช้เครื่องจักรในการเตรียมพื้นที่ปลูกอ้อย และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะเพิ่มมากขึ้นในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 คือ ช่วงเวลาหลังการใส่ปุ๋ยครั้งสุดท้าย (4 เดือน) ยกเว้นในแปลงอ้อยปลูกที่มีเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินจะเพิ่มสูงสุดในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน) ขณะที่แปลงอ้อยต่อ
7. ในแปลงอ้อยต่อจะมีค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินสูงตั้งแต่หลังการเก็บเกี่ยว (0 เดือน) เมื่อเทียบกับแปลงอ้อยปลูก เนื่องจากการเก็บข้อมูลภายหลังการเก็บเกี่ยวในปีแรก หลังจากนั้นเกษตรกรจะมีการไถระเบิดดินดาน (ก่อนการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 (4 เดือน) และ 3 (8 เดือน)) จึงทำให้ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดินในช่วงครั้งที่ 2 และ 3 ที่ระดับชั้นไผ่พรวน 0-30 เซนติเมตร มีค่าลดลงไม่เกิน 2 เมกะปาสคาล

และในช่วงการเก็บข้อมูลครั้งที่ 4 (ในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (13 เดือน)) เป็นช่วงที่มีค่าความต้านทานการ
แทงทะลุของดินสูงสุด โดยเฉพาะในแปลงอ้อยที่มีแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก

8. แปลงอ้อยต่อที่มีการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อยแบบตะกร้า และแบบใช้แรงงานคนตัดอ้อย+รถคืบอ้อย มีค่า
ความต้านทานการแทงทะลุของดินสูง (มากกว่า 4 เมกะปาสคาล) ในช่วงดินชั้นไผ่พรวน 0-30 เซนติเมตร
และลดลงเมื่อลึกลงไป 30-60 เซนติเมตร

ข้อเสนอแนะ

1. การเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+รถบรรทุก จำเป็นต้องพิจารณาเนื้อดินและความชื้นในแปลงด้วย ควรต้องเพิ่ม
ปริมาณอินทรีย์วัตถุในแปลงอ้อยให้มากขึ้น การเพิ่มอินทรีย์วัตถุก็สำคัญในการช่วยลดความรุนแรง
ของการอัดแน่นของดินได้ในระยะยาว โดยเฉพาะในกรณีอ้อยต่อ
2. ในสภาพแปลงอ้อยที่เป็นดินเหนียวและไม่มีการใส่อินทรีย์วัตถุ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บเกี่ยวแบบใช้รถตัดอ้อย+
รถบรรทุก เนื่องจากจะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินเพิ่มขึ้นที่ระดับชั้นไผ่พรวนความลึก 0-30
เซนติเมตร ภายหลังการเก็บเกี่ยว
3. เกษตรกรส่วนใหญ่มีการไถระเบิดดินดานที่ระดับเพียง 0-30 เซนติเมตร ทำให้ที่ระดับความลึกลงไปจากจาก
30 เซนติเมตร ยังคงมีค่าความต้านทานการแทงทะลุสูง ซึ่งส่งผลต่อรากอ้อยที่ยังลึกลงไปใต้ดิน โดยเฉพาะ
แปลงอ้อยต่อที่มีอายุหลายปี ดังนั้น หากเป็นไปได้ควรเพิ่มความลึกในการระเบิดดินดานให้มากขึ้น

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณน้ำฝนรวม (มม.) ของแปลงทดสอบในพื้นที่อำเภอนองม่วงและท่าหลวง จังหวัดลพบุรี ระหว่างปี 2561-2562

เดือน	ปริมาณน้ำฝนรวม (มม.)		การเก็บข้อมูล (ครั้งที่)
	อำเภอนองม่วง	อำเภอท่าหลวง	
ปี 2561			
กุมภาพันธ์	21.0	19.5	0 เดือน (ก่อนปลูก)
มีนาคม	10.0	6.5	0 เดือน (ก่อนปลูก)
เมษายน	149.0	60.5	0 เดือน (ก่อนปลูก)
พฤษภาคม	264.54	49.0	4 เดือน (หลังทำรุ่น)
มิถุนายน	82.5	76.5	4 เดือน (หลังทำรุ่น)
กรกฎาคม	88.0	126.0	4 เดือน (หลังทำรุ่น)
สิงหาคม	0	47.5	8 เดือน (ก่อนเก็บเกี่ยว)
กันยายน	0	4.5	8 เดือน (ก่อนเก็บเกี่ยว)
ตุลาคม	54.5	58.0	8 เดือน (ก่อนเก็บเกี่ยว)
พฤศจิกายน	10.5	10.5	8 เดือน (ก่อนเก็บเกี่ยว)
ธันวาคม	6.5	19.0	13 เดือน (หลังเก็บเกี่ยว)
ปี 2562			
มกราคม	0	0	13 เดือน (หลังเก็บเกี่ยว)
กุมภาพันธ์	24.0	15.5	13 เดือน (หลังเก็บเกี่ยว)
มีนาคม	0	54.0	13 เดือน (หลังเก็บเกี่ยว)
เมษายน	0	13.0	13 เดือน (หลังเก็บเกี่ยว)
พฤษภาคม	0	109.0	13 เดือน (หลังเก็บเกี่ยว)

ตารางผนวกที่ 2 รายชื่อและที่อยู่เกษตรกรในพื้นที่ทำการทดลองของจังหวัดลพบุรี

ชื่อ	ที่อยู่	เบอร์โทร
นายประเสริฐ มหาวัน	59/6 หมู่ 5 ตำบลบ่อทอง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	089-9056600
นายอำนาจ แซ่ฮุน	129 หมู่ 2 ตำบลโนนดินแดง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	081-5872791
นายณรงค์ชัย สะอาด	97 หมู่ 7 ตำบลโนนดินแดง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	081-9473185
นางสกุณา แซ่ห่าน	35 หมู่ 5 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	081-8514558
นายกมล สมพันธุ์	18/1 หมู่ 7 ตำบลหนองผักแว่น อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	086-1295702
นายธนาศักดิ์ เกษมพงษ์ขลิต	222 หมู่ 5 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	081-8532345
นางสาวสมพร จันทรรอด	8/1 หมู่ 4 ตำบลดงดิน อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	083-6984557
นายวินิต หงษ์ษา	30 หมู่ 1 ตำบลโคกเจริญ อำเภอโคกเจริญ จังหวัดลพบุรี	092-9609811
นายเกียรติพงษ์ แซ่ฮุน	88 หมู่ 2 ตำบลดงดินแดง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	089-8679142
นายรุ่งอรุณ ยิ้มแซม	66 หมู่ 1 ตำบลโคกเจริญ อำเภอโคกเจริญ จังหวัดลพบุรี	080-6906988
ร้อยตรีทวีป ทองรินทร์	507/4 หมู่ 5 ตำบลบ่อทอง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	087-3107918
นายสุรศักดิ์ มหาวันสวัสดิ์	99/9 หมู่ 5 ตำบลบ่อทอง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	089-9055420
นายเกษม รัตนดี	11/1 หมู่ 5 ตำบลบ่อทอง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	084-3588275
นายถวิล โมกสีลา	31 หมู่ 1 ตำบลโคกเจริญ อำเภอโคกเจริญ จังหวัดลพบุรี	084-7216127
นางละเอียด ดวงมา	129 หมู่ 2 ตำบลดงดินแดง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	082-1695835
นางสมคิด ทองดี	19/3 หมู่ 5 ตำบลบ่อทอง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	081-6743745
นายสุรพล บัวผัน	32 หมู่ 5 ตำบลบ่อทอง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี	-
นายทองใบ กุลรักษา	44/1 หมู่ 4 ตำบลหนองผักแว่น อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	081-9465211
นายวิชัย ทำนา	11/1 หมู่ 5 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	084-3413832
นายทด ได้ด้วยเพียร	127 หมู่ 2 ตำบลหัวไร่ อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	086-0005659
นายสมิตร พิงดี	218 หมู่ 5 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	092-7121477
นายนิสิต สุรามাত্র	66 หมู่ 5 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	089-0802421
นายสุรศักดิ์ วังพูล	115 หมู่ 2 ตำบลหัวไร่ อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	087-9276147
นางบังอร เลื่อนไพร	2 หมู่ 2 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	-
นางยุพิน รังสันเทีย	117 หมู่ 2 ตำบลหัวไร่ อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	089-2415093
นางชมพู่ บุญเมือง	238 หมู่ 2 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	089-0856678
นางณอมจิตร คงสุชี	262 หมู่ 2 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าหลวง จังหวัดลพบุรี	081-2997075



ภาพผนวกที่ 1 สัมภาษณ์เกษตรกรในพื้นที่จังหวัดลพบุรี



ภาพผนวกที่ 2 เครื่องจักรกลที่ใช้ในการจัดการแปลงอ้อย



ภาพผนวกที่ 3 รถตัดอ้อยของเกษตรกรในพื้นที่อำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี



ภาพผนวกที่ 4 สภาพแปลงอ้อยของเกษตรกรในพื้นที่อำเภอนองม่วง จังหวัดลพบุรี

ตัวอย่างแบบสอบถามเกษตรกร

ส่วนที่ 1

ข้อมูลทั่วไปของเกษตรกร

1. ชื่อ-สกุล**..... เพศ () ชาย () หญิง อายุ..... ปี
2. อยู่บ้านเลขที่.....หมู่ที่..... ถนน..... ตำบล..... อำเภอ.....
จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์..... โทร**
3. ท่านมีพื้นที่ที่ใช้ในการเพาะปลูกอ้อยจำนวน.....แปลง
รวมเป็นพื้นที่.....ไร่ (ไม่รวมของลูกไร่)
ท่านมีลูกไร่กี่ราย.....ราย
รวมเป็นพื้นที่กี่ไร่.....ไร่
หรือเป็นโคกตาจำนวน.....ตัน

ส่วนที่ 2 ข้อมูลทั่วไป การใช้ประโยชน์ที่ดินในการเพาะปลูกอ้อย ระยะทางการขนส่งและการขาย

หัวเรื่อง	แปลงที่ 1	แปลงที่ 2	แปลงที่ 3
1. เนื้อที่ (ไร่)			
2. เอกสารสิทธิ์	☐ โฉนด ☐ ส.ค.๑ ☐ น.ส.๒ ☐ น.ส.๓ ☐ น.ส.๓ ก ☐ น.ส.๓ ข ☐ น.ส.๕ ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ โฉนด ☐ ส.ค.๑ ☐ น.ส.๒ ☐ น.ส.๓ ☐ น.ส.๓ ก ☐ น.ส.๓ ข ☐ น.ส.๕ ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ โฉนด ☐ ส.ค.๑ ☐ น.ส.๒ ☐ น.ส.๓ ☐ น.ส.๓ ก ☐ น.ส.๓ ข ☐ น.ส.๕ ☐ อื่นๆ ระบุ.....
3. ระบุตำบลที่ตั้งที่ดินแปลงนี้	ตำบล..... อำเภอ.....	ตำบล..... อำเภอ.....	ตำบล..... อำเภอ.....
4. ลักษณะของดิน	☐ ดินเหนียว ☐ ดินทราย ☐ ดินร่วน ☐ ดินร่วนปนทราย ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ ดินเหนียว ☐ ดินทราย ☐ ดินร่วน ☐ ดินร่วนปนทราย ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ ดินเหนียว ☐ ดินทราย ☐ ดินร่วน ☐ ดินร่วนปนทราย ☐ อื่นๆ ระบุ.....
5. สภาพพื้นที่	☐ ดอน ☐ ลุ่ม ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ ดอน ☐ ลุ่ม ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ ดอน ☐ ลุ่ม ☐ อื่นๆ ระบุ.....
6. ระบุชนิดอ้อย	☐ อ้อยปลูก (อ้อยใหม่) ☐ อ้อยต่อ 1 ☐ อ้อยต่อ 2 ☐ อ้อยต่อ 3 ☐ อ้อยต่อ.....	☐ อ้อยปลูก (อ้อยใหม่) ☐ อ้อยต่อ 1 ☐ อ้อยต่อ 2 ☐ อ้อยต่อ 3 ☐ อ้อยต่อ.....	☐ อ้อยปลูก (อ้อยใหม่) ☐ อ้อยต่อ 1 ☐ อ้อยต่อ 2 ☐ อ้อยต่อ 3 ☐ อ้อยต่อ.....
7. ระบุชนิดพันธุ์	☐ ขอนแก่น 3 ☐ LK92-11 ☐ อู๋ทอง.....	☐ ขอนแก่น 3 ☐ LK92-11 ☐ อู๋ทอง.....	☐ ขอนแก่น 3 ☐ LK92-11 ☐ อู๋ทอง.....

	☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ อื่นๆ ระบุ.....
หัวข้อเรื่อง	แปลงที่ 1	แปลงที่ 2	แปลงที่ 3
8. ระบบการให้น้ำ	☐ น้ำฝน ☐ ระบบน้ำหยด ☐ น้ำบาดาล ☐ น้ำคลอง ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ น้ำฝน ☐ ระบบน้ำหยด ☐ น้ำบาดาล ☐ น้ำคลอง ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ น้ำฝน ☐ ระบบน้ำหยด ☐ น้ำบาดาล ☐ น้ำคลอง ☐ อื่นๆ ระบุ.....
9. ช่วงเวลาเริ่มปลูกอ้อย	☐ พฤศจิกายน ปี..... ☐ ธันวาคม ปี..... ☐ มกราคม ปี..... ☐ กุมภาพันธ์ ปี..... ☐ มีนาคม ปี..... ☐ พฤษภาคม ปี..... ☐ มิถุนายน ปี..... ☐ อื่นๆ ระบุ.....ปี.....	☐ พฤศจิกายน ปี..... ☐ ธันวาคม ปี..... ☐ มกราคม ปี..... ☐ กุมภาพันธ์ ปี..... ☐ มีนาคม ปี..... ☐ พฤษภาคม ปี..... ☐ มิถุนายน ปี..... ☐ อื่นๆ ระบุ.....ปี.....	☐ พฤศจิกายน ปี..... ☐ ธันวาคม ปี..... ☐ มกราคม ปี..... ☐ กุมภาพันธ์ ปี..... ☐ มีนาคม ปี..... ☐ พฤษภาคม ปี..... ☐ มิถุนายน ปี..... ☐ อื่นๆ ระบุ.....ปี.....
10. ช่วงเวลาเก็บเกี่ยว ผลผลิต และค่าความ หวาน (CCS)	● ตัดครั้งแรก เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 2 (อ้อยต่อ1) เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 3 (อ้อยต่อ2) เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 4 (อ้อยต่อ3) เดือน.....ปี.....	● ตัดครั้งแรก เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 2 (อ้อยต่อ1) เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 3 (อ้อยต่อ2) เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 4 (อ้อยต่อ3) เดือน.....ปี.....	● ตัดครั้งแรก เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 2 (อ้อยต่อ1) เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 3 (อ้อยต่อ2) เดือน.....ปี..... ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS..... ● ตัดครั้งที่ 4 (อ้อยต่อ3) เดือน.....ปี.....

	ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS.....	ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS.....	ผลผลิต.....ตัน/ไร่ ค่า CCS.....
--	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

- จำนวนชุด
- ☐ รถตัดอ้อย จำนวนคัน
- คันที่ 1แรงแม่/อายุรถ.....ปี ยี่ห้อ
- คันที่ 2แรงแม่/อายุรถ.....ปี ยี่ห้อ
- ☐ รถคืบอ้อย จำนวนคัน
- คันที่ 1แรงแม่/อายุรถ.....ปี ยี่ห้อ
- คันที่ 2แรงแม่/อายุรถ.....ปี ยี่ห้อ
- ☐ รถบรรทุกขนส่งอ้อย
- ☐ รถบรรทุก 10 ล้อ จำนวนคัน

ส่วนที่ 3 ข้อมูลการปลูก การจัดการ และการเก็บเกี่ยวอ้อย

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำไร่อ้อยที่ตนเองมีอยู่

- ☐ รถฟาร์มแทรกเตอร์ จำนวน..... คัน
- คันที่ 1แรงแม่/อายุรถ.....ปี ยี่ห้อ.....
- คันที่ 2แรงแม่/อายุรถ.....ปี ยี่ห้อ.....
- คันที่ 3แรงแม่/อายุรถ.....ปี ยี่ห้อ.....
- คันที่ 4แรงแม่/อายุรถ.....ปี ยี่ห้อ.....
- ☐ ผลพรวน 3 หรือ 4 จาน จำนวนชุด
- ☐ ผลพรวน 7 จาน จำนวนชุด
- ☐ ผลพรวน 20 หรือ 24 จาน จำนวนชุด
- ☐ รีปเปอร์ระเบิดดินดาน จำนวนชุด
- ☐ รีปเปอร์ 2 ขา ติดถ่วงปุ๋ย จำนวนชุด
- ☐ MPI จำนวนชุด
- ☐ เพาเวอร์แฮโรว์/โรตารี จำนวนชุด
- ☐ มินิคอมบาย จำนวนชุด
- ☐ เครื่องผ่ากออ้อย จำนวนชุด
- ☐ คราดสปริง /คราดสปริงติดถ่วงปุ๋ยจำนวนชุด
- ☐ รีปเปอร์ติดถ่วงปุ๋ย จำนวนชุด
- ☐ เครื่องปลูกอ้อย
- ☐ ร่องเดี่ยว จำนวนชุด
- ☐ ร่องคู่ จำนวนชุด
- ☐ บิลเลียด จำนวนชุด
- ☐ เครื่องพ่นยากำจัดวัชพืช (ติดแทรกเตอร์) จำนวนชุด
- ☐ รถบรรทุก 6 ล้อ จำนวนคัน
- คันที่ 1 อายุรถ.....ปี
- คันที่ 2 อายุรถ.....ปี
- คันที่ 3 อายุรถ.....ปี
- ☐ รถบรรทุกชนิดอื่นๆ (ระบุ).....
- จำนวน.....คัน
- ☐ อุปกรณ์อื่นๆ (ระบุ).....
- จำนวนชุด
- ☐ อุปกรณ์อื่นๆ (ระบุ).....
- จำนวนชุด
- ☐ อุปกรณ์อื่นๆ (ระบุ).....
- จำนวนชุด

☐ อุปกรณ์อื่นๆ (ระบุ).....

จำนวนชุด

2. การจัดการอ้อย

**** กรณีที่ท่านมีหลายแปลง แต่ทุกแปลงมีลักษณะการเตรียมดินที่เหมือนกัน โปรดระบุเพียงแปลงเดียว**

2.1. การเตรียมดิน (ตั้งแต่เริ่มปลูก)

หัวเรื่อง	แปลงที่.....		แปลงที่...	
	เครื่องมือ	ระบุรถแทรกเตอร์ ที่ใช้พ่วง	เครื่องมือ	ระบุรถแทรกเตอร์ ที่ใช้พ่วง
ไถครั้งที่ 1	☐ ผาล 3/4 ☐ ผาล 7 ☐ ริปเปอร์ระเบิดดิน ดาน ☐ อื่นๆ ระบุ..... ☐ รถโรงงาน	แรงม้า หรือ.....CC. ยี่ห้อ..... ☐ รถโรงงาน	☐ ผาล 3/4 ☐ ผาล 7 ☐ ริปเปอร์ระเบิดดิน ดาน ☐ อื่นๆ ระบุ..... ☐ รถโรงงาน	แรงม้า หรือ.....CC. ยี่ห้อ..... ☐ รถโรงงาน
ไถครั้งที่ 2	☐ ผาล 3/4 ☐ ผาล 7 ☐ ริปเปอร์ระเบิดดิน ดาน ☐ อื่นๆ ระบุ..... ☐ รถโรงงาน	แรงม้า หรือ.....CC. ยี่ห้อ..... ☐ รถโรงงาน	☐ ผาล 3/4 ☐ ผาล 7 ☐ ริปเปอร์ระเบิดดิน ดาน ☐ อื่นๆ ระบุ..... ☐ รถโรงงาน	แรงม้า หรือ.....CC. ยี่ห้อ..... ☐ รถโรงงาน
ไถครั้งที่ 3	☐ ผาล 3/4 ☐ ผาล 7 ☐ ผาลพรวน 20/24 จาน ☐ อื่นๆ ระบุ..... ☐ รถโรงงาน	แรงม้า หรือ.....CC. ยี่ห้อ..... ☐ รถโรงงาน	☐ ผาล 3/4 ☐ ผาล 7 ☐ ผาลพรวน 20/24 จาน ☐ อื่นๆ ระบุ..... ☐ รถโรงงาน	แรงม้า หรือ.....CC. ยี่ห้อ..... ☐ รถโรงงาน
ไถครั้งที่ 4	☐ ผาล 3/4 ☐ ผาล 7 ☐ ผาลพรวน 20/24 จาน ☐ อื่นๆ ระบุ ☐ รถโรงงาน	 แรงม้า หรือ..... CC. ยี่ห้อ ☐ รถโรงงาน	☐ ผาล 3/4 ☐ ผาล 7 ☐ ริปเปอร์ระเบิดดิน ดาน ☐ อื่นๆ ระบุ ☐ รถโรงงาน	 แรงม้า หรือ..... CC. ยี่ห้อ ☐ รถโรงงาน
ไถครั้งที่ 5				

ไถครั้งที่ 6				

2.2 การปลูกอ้อย (ตั้งแต่เริ่มปลูก)

หัวเรื่อง	แปลงที่.....	แปลงที่.....
1. วิธีการปลูก	☐ คนปลูก ☐ เครื่องปลูก รุ่น..... (ยี่ห้อ.....) กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่องปลูกแรงม้า หรือ.....CC ยี่ห้อ..... ☐ รถโรงงาน	☐ คนปลูก ☐ เครื่องปลูก รุ่น..... (ยี่ห้อ.....) กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่องปลูกแรงม้า หรือ.....CC ยี่ห้อ..... ☐ รถโรงงาน
2. ระบบแถวปลูก	☐ ร่องเดี่ยว ☐ ร่องคู่ ☐ อื่นๆ ระบุ..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ ร่องเดี่ยว ☐ ร่องคู่ ☐ อื่นๆ ระบุ..... ☐ โรงงานจัดการ
3. ระยะปลูก	☐ 80 เซนติเมตร ☐ 90 เซนติเมตร ☐ 100 เซนติเมตร ☐ 120 เซนติเมตร ☐ 130 เซนติเมตร ☐ 140 เซนติเมตร ☐ 150 เซนติเมตร ☐ 160 เซนติเมตร ☐ 180 เซนติเมตร ☐ อื่นๆ ระบุ.....	☐ 80 เซนติเมตร ☐ 90 เซนติเมตร ☐ 100 เซนติเมตร ☐ 120 เซนติเมตร ☐ 130 เซนติเมตร ☐ 140 เซนติเมตร ☐ 150 เซนติเมตร ☐ 160 เซนติเมตร ☐ 180 เซนติเมตร ☐ อื่นๆ ระบุ.....

	☐ โรงงานจัดการ	☐ โรงงานจัดการ
4. อัตราท่อนพันธุ์	☐ 1 ต้น/ไร่ ☐ 1.5 ต้น/ไร่ ☐ 2 ต้น/ไร่ ☐ 2.5 ต้น/ไร่ ☐ อื่นๆ ...ต้น/ไร่ ☐ โรงงาน จัดการ	☐ 1 ต้น/ไร่ ☐ 1.5 ต้น/ไร่ ☐ 2 ต้น/ไร่ ☐ 2.5 ต้น/ไร่ ☐ อื่นๆ ...ต้น/ไร่ ☐ โรงงาน จัดการ

2.3 การใส่ปุ๋ยอ้อย (ตั้งแต่เริ่มปลูก)

หัวเรื่อง		แปลงที่.....	แปลงที่.....
ครั้งที่ 1	สูตร ปุ๋ย	☐ ☐ โรงงาน	☐ ☐ โรงงาน
	อัตรา	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุ่น กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่องปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุ่น กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ ใส่	☐ รองพื้น พร้อมปลูก หรือ ☐ อ้อยอายุ.....เดือน ระบุเดือน	☐ รองพื้น พร้อมปลูก หรือ ☐ อ้อยอายุ.....เดือน ระบุเดือน
ครั้งที่ 2	สูตร ปุ๋ย	☐ ☐ โรงงาน	☐ ☐ โรงงาน
	อัตรา	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุ่น กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่องปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุ่น กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ ใส่	☐ อ้อยอายุ.....เดือน..ระบุเดือน.....	☐ อ้อยอายุ.....เดือน..ระบุเดือน.....

ครั้งที่ 3	สูตร ปุ๋ย	☐ ☐ โรงงาน	☐ ☐
	อัตรา	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุน กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่องปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุน กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ ใส่	☐ อ้อยอายุ.....เดือน..ระบุเดือน.....	☐ อ้อยอายุ.....เดือน..ระบุเดือน.....
ครั้งที่ 4	สูตร ปุ๋ย		
	อัตรา		
	วิธีการ		
	เวลาที่ ใส่		

2.4 การควบคุมศัตรูพืช (ตั้งแต่เริ่มปลูก)

หัวเรื่อง		แปลงที่.....	แปลงที่.....
ครั้งที่ 1	ศัตรูพืช	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง
	ชื่อ	☐ ปีเค ☐ ไดยรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น	☐ ปีเค ☐ ไดยรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือ CC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือ CC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ ใส่	☐ พร้อมปลูก ☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....	☐ พร้อมปลูก ☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....
ครั้งที่ 2	ศัตรูพืช	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง
	ชื่อ	☐ ปีเค ☐ ไดยรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น	☐ ปีเค ☐ ไดยรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือ..... CC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือ CC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ ใส่	☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....	☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....

ครั้งที่ 3	ศัตรูพืช	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง
	ชื่อ	☐ ปีเค ☐ ไดยรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น	☐ ปีเค ☐ ไดยรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ใส่	☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....	☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....

2.5 การเก็บเกี่ยวและขนส่งอ้อย

หัวเรื่อง	แปลงที่.....	แปลงที่.....
1. การเผา	☐ เผา ☐ ไม่เผา	☐ เผา ☐ ไม่เผา
2. การตัด	☐ คนตัด ☐ รถคืบ ร่น ☐ เครื่องตัด ยี่ห้อ/รุ่น แรงม้า ☐ โรงงานจัดการ	☐ คนตัด ☐ รถคืบ ร่น ☐ เครื่องตัด ยี่ห้อ/รุ่น แรงม้า ☐ โรงงานจัดการ
3. รถบรรทุก	☐ 6 ล้อ ☐ 10 ล้อ ☐ อื่นๆ	☐ 6 ล้อ ☐ 10 ล้อ ☐ อื่นๆ
4. การขนส่งระยะทางจากแปลงปลูกถึงโรงงาน	☐ ต่ำกว่า 10 กิโลเมตร ☐ 10 - 20 กิโลเมตร ☐ 20 - 30 กิโลเมตร ☐ 30 - 40 กิโลเมตร	☐ ต่ำกว่า 10 กิโลเมตร ☐ 10 - 20 กิโลเมตร ☐ 20 - 30 กิโลเมตร ☐ 30 - 40 กิโลเมตร

	☐ 40 - 50 กิโลเมตร ☐ 50 - 60 กิโลเมตร ☐ มากกว่า 60 กิโลเมตร	☐ 40 - 50 กิโลเมตร ☐ 50 - 60 กิโลเมตร ☐ มากกว่า 60 กิโลเมตร
--	--	--

3. การบำรุงต่ออ้อย

3.1 การจัดการดินและพื้นที่

หัวเรื่อง	แปลงที่.....		แปลงที่.....	
	เครื่องมือ	ระบุรถ แทรกเตอร์ ที่ใช้พ่วง	เครื่องมือ	ระบุรถแทรกเตอร์ ที่ใช้พ่วง
ครั้งที่ 1	☐ ริปเปอร์ 2 ขา ☐ พรวนเอนกประสงค์ ☐ สับใบอ้อย ☐ อื่นๆ ระบุ.....	 แรงม้า หรือ..... CC. ยี่ห้อ ☐ รถโรงงาน	☐ ริปเปอร์ 2 ขา ☐ พรวนเอนกประสงค์ ☐ สับใบอ้อย ☐ อื่นๆ ระบุ.....	 แรงม้า หรือ..... CC. ยี่ห้อ ☐ รถโรงงาน
ครั้งที่ 2	☐ ริปเปอร์ 2 ขา ☐ พรวนเอนกประสงค์ ☐ สับใบอ้อย ☐ อื่นๆ ระบุ.....	 แรงม้า หรือ..... CC. ยี่ห้อ ☐ รถโรงงาน	☐ ริปเปอร์ 2 ขา ☐ พรวนเอนกประสงค์ ☐ สับใบอ้อย ☐ อื่นๆ ระบุ.....	 แรงม้า หรือ..... CC. ยี่ห้อ ☐ รถโรงงาน
ครั้งที่ 3 (ถ้ามี)				

3.2 การใส่ปุ๋ยอ้อยตอ

หัวเรื่อง		แปลงที่.....	แปลงที่.....
ครั้งที่ 1	สูตร ปุ๋ย		
	อัตรา	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุน กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุน กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ ใส่	☐ ร่องพื้น พร้อมรีปเปอร์ ☐ อ้อยอายุ.....เดือน	☐ ร่องพื้น พร้อมรีปเปอร์ ☐ อ้อยอายุ.....เดือน
ครั้งที่ 2	สูตร ปุ๋ย		
	อัตรา	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุน กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุน กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ ใส่	☐ อ้อยอายุ.....เดือน..ระบุเดือน.....	☐ อ้อยอายุ.....เดือน..ระบุเดือน.....
	สูตร		

ครั้งที่ 3	ป่วย		
	อัตรา	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่	☐ ½ ลูก/ไร่ ☐ 1 ลูก/ไร่ ☐/ไร่
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุ่น กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่อง รุ่น กรณีใช้เครื่องปลูก ขนาดรถที่พ่วงเครื่อง ปลูก แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ ใส่	☐ อ้อยอายุ.....เดือน..ระบุเดือน..... 	☐ อ้อยอายุ.....เดือน..ระบุเดือน.....

3.4 การควบคุมศัตรูพืช (อ้อยตอ)

หัวเรื่อง		แปลงที่.....	แปลงที่.....
ครั้งที่ 1	ศัตรูพืช	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง
	ชื่อ	☐ บีเค ☐ ไดยูรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น	☐ บีเค ☐ ไดยูรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ใส่	☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....	☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....
ครั้งที่ 2	ศัตรูพืช	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง	☐ วัชพืช ☐ โรคพืช ☐ แมลง
	ชื่อ	☐ บีเค ☐ ไดยูรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น	☐ บีเค ☐ ไดยูรอน ☐ อะเมทริน ☐ อะทราซีน ☐ พาราควอต ☐ 2,4-D ☐ โรงงาน ☐ อื่น
	วิธีการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ	☐ แรงงาน ☐ เครื่องพ่น ร่น กรณีใช้เครื่องพ่น ขนาดรถที่พ่วงเครื่องพ่น แรงม้า หรือCC ยี่ห้อ/รุ่น..... ☐ โรงงานจัดการ
	เวลาที่ใส่	☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....	☐ อ้อยอายุ.....เดือนระบุเดือน.....

ส่วนที่ 3 ต้นทุนการผลิต

หัวเรื่อง	รายละเอียด
1. ค่าเตรียมพื้นที่	(อ้อยปลูก) ค่าไถครั้งแรก.....บาท/ไร่ ค่าไถครั้งที่ 2.....บาท/ไร่ ค่าไถครั้งที่ 3.....บาท/ไร่ ค่าไถครั้งที่ 4.....บาท/ไร่ หรือ ☐ เหมาค่าไถ.....บาท/ไร่ หรือ ☐ เหมารองงาน.....บาท/ไร่
2. บำรุงต่อ	(อ้อยต่อ) ☐ ค่ารีปเปอร์.....บาท/ไร่ ☐ อื่นๆ.....บาท/ไร่ หรือ ☐ เหมารองงาน.....บาท/ไร่
3. ค่าปลูก	☐ ค่าพันธุ์.....บาท/ไร่ ☐ ค่าแรง..... บาท/ไร่ ☐ อื่นๆ.....บาท/ไร่ ☐ เหมากำจ่าย..... บาท/ไร่
3. ค่าปุ๋ย อ้อยปลูก	อ้อยปลูก ครั้งแรกบาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... ครั้งที่ 2บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... ครั้งที่ 3บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... ครั้งที่ 4บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... ----- อ้อยต่อ ครั้งแรกบาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... (ถ้ามี) ครั้งที่ 2บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... ครั้งที่ 3บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง.....
5. สารเคมี	อ้อยปลูก พ่นยาครั้งแรกบาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... พ่นยาครั้งที่ 2บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... พ่นยาครั้งที่ 3บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... พ่นยาครั้งที่ 4บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... อ้อยต่อ พ่นยาครั้งแรกบาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... (ถ้ามี) พ่นยาครั้งที่ 2บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง..... พ่นยาครั้งที่ 3บาท/ไร่ ค่าแรง/จ้าง.....
5. ค่าตัด	☐ ค่าแรงบาท/..... ☐ รถคืบ บาท/.....

	☐ รถตัดบาท/..... ☐ ขนส่ง บาท/..... หรือ ☐ เหมาก้าย.....บาท/.....
6. ต้นทุนอื่นๆ ระบุ.....	



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการย่อยที่ 2

การทดสอบระบบการควบคุมจลาจรในการผลิตอ้อยพื้นที่ภาคเหนือ
ตอนล่าง

โดย

ผศ.ดร. รัชต์สัทพ์ พูนไพบูลย์พิพัฒน์

เดือน ธันวาคม ปี 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองใช้ระบบการควบคุมจราจรในฟาร์มในการปลูกอ้อย โดยเปรียบเทียบระบบที่มีการเปิดสัญญาณนำทาง (GPS guidance) และ ปิดระบบสัญญาณนำทาง (without GPS guidance) เปรียบเทียบกับวิธีที่เกษตรกรปฏิบัติกันเป็นประจำ เพื่อประเมินดูความแม่นยำของระบบ การเกิด soil compaction การเจริญเติบโตและผลผลิต รวมทั้งความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ ดำเนินงานวิจัยที่แปลงบริษัท น้ำตาลพิษณุโลก จำกัด ต.สระเกษรัฐ อ.บางกระทุ่ม จ.พิษณุโลก ระหว่างเดือน มกราคม ถึง มิถุนายน 2562 เตรียมด้วยผาลพรวน 24 จาน 1 รอบ ไถระเบิดดินดานแบบตราหมากรุก 1 รอบ และ พาวเวอร์แฮร์โรวอีก 2 รอบ ปลูกอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 ที่ระยะปลูก 1.8 เมตร ของระบบการควบคุมจราจรในฟาร์ม และระยะ 1.5 เมตร ของวิธีเกษตรกร ที่อย่างไรก็ตาม หลังการให้น้ำที่ระยะ 15 วันหลังปลูก 1 ครั้งแล้ว จากนั้นเกิดสภาวะภัยแล้งระหว่างเดือน กุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม 2562 ของจังหวัดพิษณุโลก ทำให้พื้นที่เก็บน้ำของแปลงบริษัทไม่มีน้ำสำรองพอที่จะให้แก่อ้อย จึงทำให้อ้อยส่วนใหญ่ตายไปมากกว่า 50% จึงทำให้ผลการทดลองล้มเหลว

สารบัญ

กิจกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญภาพ.....	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของแผนวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พื้นที่การปลูกอ้อย และปริมาณอ้อย ในประเทศไทย	4
2.2 การอัดแน่นของดิน	6
2.3 การควบคุมการจราจรในฟาร์ม	8
2.4 สมมติฐานงานวิจัย.....	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	11
3.1 สถานที่ดำเนินงาน	11
3.2 วิธีการดำเนินการ	12
3.3 การบันทึกข้อมูลผลการวิจัย	17
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล.....	20
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	26
เอกสารอ้างอิง	27

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 รายงานการผลิตอ้อย ปีการผลิต 2560-2561.....	3
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานการใช้เครื่องจักรกลของชาวไร่อ้อยจังหวัดพิษณุโลก.....	9
ตารางที่ 3.2 กิจกรรมต่าง ๆ ของการปลูกอ้อย.....	14

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยและปริมาณอ้อยเข้าหีบ ปีการผลิต 2551/52 – 2560/61.....	4
ภาพที่ 2.2 แผนผังที่แสดงให้เห็นถึงเหตุของการเกิดการอัดแน่นของดิน และทางเลือกในการลดการเกิด การอัดแน่นของดินที่สัมพันธ์กับปัจจัยในระบบการปลูกพืชโดยใช้เครื่องจักรกลเกษตร.....	6
ภาพที่ 2.3 แสดงบริเวณเจริญเติบโตของพืช (root bed) และโซนการเดินรถ (traffic lanes).....	7
ภาพที่ 3.1 อ้างอิงระยะห่างระหว่างล้อรถแทรกเตอร์ รถบรรทุก และรถตัดอ้อย.....	10
ภาพที่ 3.2 ผังแปลงที่วางแผนไว้.....	11
ภาพที่ 3.3 (ก) การใช้ผลพลรวม 24 จานเพื่อรื้อต่อ (ข) สภาพแปลงหลังการเตรียมดินก่อนปลูก.....	11
ภาพที่ 3.4 (ก) ไถระเบิดดินดานเฉพาะร่องปลูกอ้อย (ข) งานยกร่องปลูกอ้อย.....	12
(ค) เครื่องปลูกแบบแถวเดี่ยว	
ภาพที่ 3.5 (ก) รถฟาร์มแทรกเตอร์ของเกษตรกรที่ใช้ปลูกขนาด 108 แรงม้า.....	13
(ข) การฉีดยาฆ่าวัชพืชของแปลงเกษตร	
ภาพที่ 4.1 อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของแต่ละกรรมวิธี.....	17
ภาพที่ 4.2 สภาพแปลงปลูก ณ วันที่ 7 พฤษภาคม 2562 เห็นได้ว่า อ้อยส่วนใหญ่แห้งตาย.....	18
ภาพที่ 4.3 สภาพอ้อย รวมทั้งวัชพืชส่วนใหญ่แห้งตาย 7 พฤษภาคม 2562.....	20
ภาพที่ 4.4 น้ำในสระเก็บน้ำ แห้งจนไม่สามารถใช้ได้ 7 พฤษภาคม 2562.....	21
ภาพที่ 4.5 เครื่องวัดแรงต้านทานการแทงทะลุของดินชนิดติดท้ายรถแทรกเตอร์.....	22

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันการผลิตอ้อยโรงงานของประเทศไทยเกือบทั้งหมดใช้เครื่องจักรกลเกษตรในการบริหารจัดการการผลิตอ้อย ได้แก่ การเตรียมดิน การปลูก การบำรุงรักษา และการเก็บเกี่ยว เพื่อให้ได้อ้อยที่มีคุณภาพเข้าสู่อุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องจักรกลการเกษตรขนาดใหญ่ของระบบการผลิตอ้อยนั้น ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพดิน เช่น การกดทับของชั้นดิน การกดทับของดินมีสาเหตุใหญ่มาจากล้อรถเครื่องจักรกล เช่น รถฟาร์มแทรกเตอร์ รถบรรทุก และรถเก็บเกี่ยว เป็นต้น ซึ่งการกดทับนี้เป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มความหนาแน่นของกองดิน (soil bulk density) (Hamza and Anderson, 2005) ผลของความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้การแพร่ของก๊าซต่างๆ และน้ำได้ลดลง เป็นผลทำให้ดินเกิดการแข็งตัว ซึ่งต้องเพิ่มขนาดแรงม้าของเครื่องจักรกล (Arvidsson and Hakansson, 1991; Bhandral et al., 2007; Horn et al., 1995) การอัดแน่นของดินที่เกิดขึ้นนี้เป็นจำกัดการเจริญของรากพืชทำให้ผลผลิตลดลง (Chan et al., 2006; Hakansson and Nevens and Reheul, 2003) นอกจากนี้การอัดแน่นของดินทำให้เกิดสถานะ soil greenhouse gases (GHGs) ทำให้เกิดสูญเสียธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ และทำให้สารกำจัดวัชพืชไหลบ่าออกไป (run off) (Soane and van Ouwerkerk, 1995)

อย่างที่กล่าวมาข้างต้น ปัญหาที่เกิดจากการใช้เครื่องจักรกลขนาดใหญ่ในพื้นที่อย่างต่อเนื่องนั้น จึงมีแนวคิดการควบคุมการจราจรในฟาร์ม (controlled traffic farming) ซึ่งการควบคุมนี้เป็นการจัดแนวการไถพรวน ระยะปลูกของพืช การบำรุงรักษา และการเก็บเกี่ยวให้สอดคล้องกับขนาดของเครื่องจักร เช่น ขนาดล้อรถ ขนาดความกว้างของตัวรถ โดยลดการวิ่งข้ามพื้นที่ เพื่อไม่ให้พื้นที่ปลูกพืชเกิดการกดทับจากน้ำหนักของเครื่องจักรกล (Braunack and McGarry, 2006) นอกจากนี้ การควบคุมการจราจรในฟาร์ม ยังสามารถลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงและลดต้นทุนผลิตอีกด้วย

การควบคุมจราจรในฟาร์มเป็นการผสมผสานเทคโนโลยีทางด้านภูมิสารสนเทศกับเครื่องจักรกลเกษตร ต่างประเทศ เช่น ออสเตรเลีย จีน สหรัฐอเมริกา นิยมใช้การระบุตำแหน่งบนโลก (global positioning system: GPS) เพื่อกำหนดแนวการเดินรถและแถวปลูกของอ้อย ระบบดังกล่าวนี้ยังมีราคาที่ค่อนข้างแพง ซึ่งอาจจะเหมาะสมสำหรับชาวไร่หรือบริษัทที่มีพื้นที่ปลูกที่มากหลายร้อยหลายพันไร่ อย่างไรก็ตามชาวไร่อ้อยพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างส่วนใหญ่แล้วเป็นชาวไร่ขนาดกลางและขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดของแปลงปลูก 10 -30 ไร่ ด้วยขนาดแปลงดังกล่าวนี้ จึงมีแนวคิดที่จะทดสอบระบบการควบคุม

จรรยาในฟาร์มโดยใช้เทคโนโลยีที่ชาวไร่มีอยู่บนพื้นที่ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการจัดการระบบดังกล่าวโดยไม่อาศัย GPS

การผลิตอ้อยในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างได้แก่ จังหวัดพิษณุโลก จังหวัดสุโขทัย จังหวัดกำแพงเพชร และจังหวัดนครสวรรค์ จากโครงการวิจัยเรื่อง การประเมินการผลิตอ้อยและการใช้เครื่องจักรกลพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง ซึ่งได้รับงบประมาณจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เลขที่สัญญา RDG5950145 ประจำปีงบประมาณ 2559 นั้น ได้ผลการวิจัยออกมาว่า เกษตรกรโดยส่วนใหญ่นิยมใช้เครื่องจักรกลประเภทรถพ่วงแทรกเตอร์ขนาดกลางถึงใหญ่ (75 – 135 แรงม้า) ในการปลูกและบำรุงรักษาอ้อย ซึ่งรถพ่วงแทรกเตอร์ขนาดดังกล่าว มีระยะระหว่างจุดกึ่งกลางล้อประมาณ 1.5 – 1.8 เมตร ส่วนการใช้รถตัดอ้อยขนาดใหญ่ (200 แรงม้า) และรถบรรทุก 10 ล้อ เข้าไปในแปลงอ้อย ซึ่งเครื่องจักรกลทั้งสอง มีระยะระหว่างจุดกึ่งกลางล้อประมาณ 1.8 – 1.9 เมตร ในขณะที่ระยะปลูกอ้อยที่ใช้นิยมใช้ระยะ 1.5 – 1.65 เมตร ทำให้การใช้เครื่องจักรกลทั้งหมดดังกล่าว ไม่สัมพันธ์กับการทำระบบการควบคุมจรรยาในฟาร์ม ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดการอัดแน่นของดิน โดยเฉพาะบริเวณ root zone ของอ้อย

ดังนั้นเพื่อให้เกิดข้อมูลที่แท้จริงของการเกิดการอัดแน่นของดิน และเพื่อเป็นการยืนยันการวางระบบการควบคุมจรรยาในฟาร์มของการผลิตอ้อย จึงทำการเปรียบเทียบการทำระบบการควบคุมจรรยาในฟาร์มโดยใช้ระบบ GPS guidance และไม่มี GPS guidance เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำรวมถึงเปรียบเทียบกับวิธีที่เกษตรกรปฏิบัติกันเป็นประจำ

1.2 วัตถุประสงค์ของแผนวิจัย

เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบการผลิตอ้อยด้วยระบบการควบคุมการจรรยาในฟาร์มและระบบผลิตอ้อยแบบปกติ ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตอ้อย คุณสมบัติของดิน และความคุ้มค่าเศรษฐศาสตร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทดสอบระบบการควบคุมจรรยาในฟาร์มโดยใช้ GPS guidance และไม่มี GPS guidance เปรียบเทียบกับการผลิตอ้อยตามแบบของเกษตรกร เป็นการทดสอบในแปลงขนาดใหญ่ (field trial) ขนาดพื้นที่ 60 ไร่ ทดลองระบบ ณ แปลงผลิตอ้อย บริษัท น้ำตาลพิษณุโลก จำกัด ตำบลสระเศรษฐี อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประเมินผลความเป็นไปได้ของการทดสอบการผลิตอ้อยด้วยการควบคุมจรรยาบรรณ
เปรียบเทียบกับ การปลูกความระบบทั่วไปหรือที่เกษตรกรปฏิบัติ

บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นที่การปลูกอ้อย และปริมาณอ้อย ในประเทศไทย

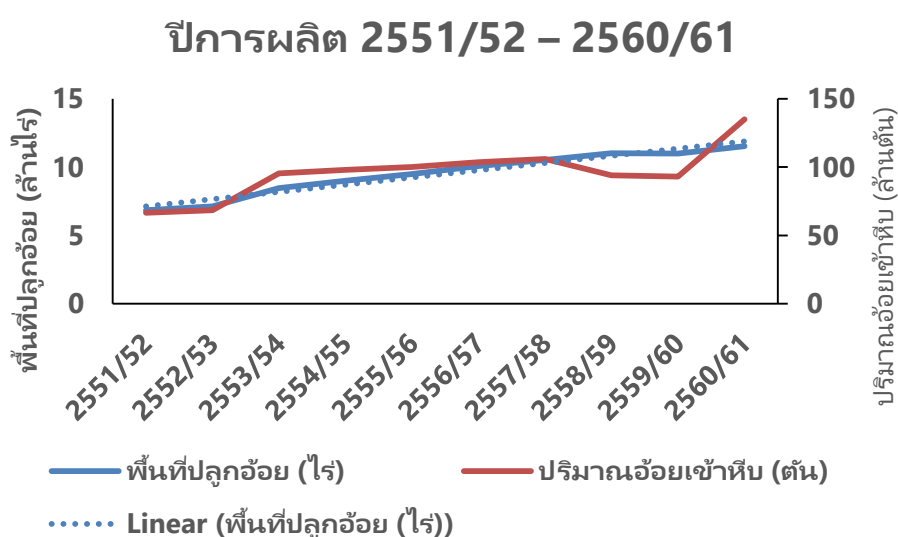
อ้อยเป็นพืชสำคัญที่ใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมน้ำตาลของประเทศไทย ในปัจจุบันประเทศไทยส่งออกน้ำตาลมากในอันดับสองของโลก (11.5 ล้านตัน) รองจากประเทศบราซิล (19.6 ล้านตัน) (Statista, 2019) สร้างรายได้เข้าประเทศปีละมากกว่า 80,000 ล้านบาท (SCB Economic Intelligence Center, 2019) ในปีการผลิต พ.ศ. 2560-2561 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยโรงงานทั้งหมด 11,542,550 ไร่ เมื่อพิจารณาตามภูมิภาคพบว่า พื้นที่ปลูกอ้อยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สูงสุด คือ 5,044,952 ไร่ รองมาได้แก่ ภาคกลาง 3,118,925 ไร่ ภาคเหนือ 2,719,424 ไร่ และภาคตะวันออก 659,249 ไร่ ตามลำดับ ทั้งประเทศมีปริมาณผลผลิตอ้อยประมาณ 136 ล้านตัน และมีผลผลิตอยู่ในช่วง 11.07 – 12.15 ตัน/ไร่ หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 11.68 ตัน/ไร่ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายงานการผลิตอ้อย ปีการผลิต 2560-2561 (ดัดแปลงจาก รายงานพื้นที่ปลูกอ้อย ปีการผลิต 2560/61)

ปีการผลิต	ภาคเหนือ	ภาคกลาง	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	ภาคตะวันออก	รวมทั้งประเทศ
2560/61					
พื้นที่ปลูกอ้อย	2,719,424	3,118,925	5,044,952	659,249	11,542,550
ปริมาณอ้อย	32,281,176	37,136,615	59,099,043	7,380,321	135,897,154
ผลผลิตเฉลี่ย	11.86	11.95	11.72	11.21	11.68

จากรายงานพื้นที่ปลูกอ้อยในระยะเวลา 10 ปีการผลิตที่ผ่านมา (2551/52-2560/61) (ภาพที่ 1) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มากกว่า 48% หรือ 4,705,525 ไร่ แต่ปริมาณผลผลิตอ้อยยังคงไม่เสถียรภาพในแต่ละปีการผลิต ถึงแม้จะมีพื้นที่ปลูกเพิ่มขึ้น จึงแสดงให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดจากกระบวนการผลิตอ้อย ได้แก่ สภาพพื้นที่ปลูกบางแห่งไม่เหมาะสม ปริมาณน้ำฝนไม่เพียงพอ การระบาดของโรคและแมลง การจัดการลักษณะพื้นที่ปลูกทำได้ไม่ดี เป็นต้น ซึ่งข้อจำกัดของปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ส่งผลให้ผลผลิตอ้อยต่อไร่ต่ำกว่าที่ควรจะได้รับ อย่างไรก็ตามหลายปัจจัยไม่สามารถกำหนดหรือจัดการได้ แต่ยังมีอีกบางปัจจัยที่สามารถควบคุมและจัดการได้ เช่น การจัดการลักษณะพื้นที่ปลูก การจัดการ

วิธีการปลูก ดูแลรักษา เป็นต้น ปัจจุบันในต่างประเทศ เช่น ออสเตรเลีย ได้มีการนำเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาช่วยพัฒนาวิธีการจัดการเหล่านี้มากขึ้น ทำให้สะดวกในกระบวนการจัดการและได้ผลผลิตอ้อยที่เพิ่มขึ้น การจัดระเบียบการจราจรในแถวอ้อยเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการผลิตอ้อย เนื่องจากปัจจุบันกระบวนการผลิตอ้อยในขั้นตอนต่างๆ ตั้งแต่การเตรียมดิน การปลูก การดูแลรักษา จนกระทั่งการเก็บเกี่ยว ได้มีการนำเครื่องจักรกลเกษตรขนาดใหญ่เข้ามาจัดการทั้งหมด ซึ่งเครื่องจักรกลเกษตรขนาดใหญ่เหล่านี้ถ้าไม่มีการจัดการให้เป็นระบบจะส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตและการสร้างผลผลิตของต้นอ้อย



ภาพที่ 2.1 รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยและปริมาณอ้อยเข้าหีบ ปีการผลิต 2551/52 – 2560/61 (ดัดแปลงจาก รายงานพื้นที่ปลูกอ้อย ปีการผลิต 2560/61)

พันธุ์อ้อยเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในการผลิตอ้อยให้มีประสิทธิภาพ การเลือกใช้พันธุ์อ้อยให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ปลูก ทั้งในด้านชนิดและกายภาพของดิน แหล่งน้ำและปริมาณน้ำฝน เป็นต้น จะส่งเสริมให้ได้รับผลผลิตได้อย่างเต็มศักยภาพ โดยมีหลักการของการคัดเลือกพันธุ์อ้อยให้เหมาะสมกับพื้นที่ดังนี้ (อ้างอิงจาก สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล, 2562)

1. เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตต่อไร่และคุณภาพความหวานสูง
2. เป็นพันธุ์อ้อยที่มีความต้านทานต่อโรคและแมลงศัตรูอ้อยที่สำคัญในพื้นที่ปลูก เช่น การต้านทานต่อโรคเหี่ยวเน่าแดง โรคเส้ดำ การเข้าทำลายของหนอนกออ้อย เป็นต้น
3. เหมาะสมกับพฤติกรรมความชอบ วิธีการปฏิบัติในการปลูกและดูแลรักษาอ้อย และความพร้อมทางด้านเครื่องจักรกลทางเกษตรและแรงงาน ของเกษตรกรในแต่ละพื้นที่

4. เลือกพันธุ์อ้อยให้เหมาะสมกับสภาพดินในพื้นที่ปลูกอ้อย แหล่งน้ำหรือปริมาณน้ำฝนของแต่ละท้องถิ่น

5. พิจารณาความสามารถในการไวต่อของอ้อย ควรเลือกใช้พันธุ์ที่สามารถไวต่อได้ดีและนานหลายปีโดยไม่แต่ละรอบผลผลิตอ้อยอาจลดลงได้แต่ไม่ควรเกินร้อยละ 20 ของอ้อยปลูก

6. อายุการเก็บเกี่ยวอ้อย เนื่องจากสายพันธุ์อ้อยในประเทศไทยมีอายุการเจริญเติบโต และการสะสมน้ำตาลที่แตกต่างกันไป สามารถจำแนกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

6.1 อ้อยพันธุ์เบา คืออ้อยที่มีการสะสมน้ำตาลเร็วและมีอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 8-10 เดือน อาจเก็บเกี่ยวช่วงต้นฤดูหีบ (พฤศจิกายน – ธันวาคม) เช่น K84-69 K90-77 อีเหี่ยว อุ้มทอง 2 อุ้มทอง 5 อุ้มทอง 6 KU50 KU60-2 และ KU60-3 เป็นต้น

6.2 อ้อยพันธุ์กลาง คืออ้อยที่มีการสะสมน้ำตาลเร็วปานกลาง อายุการเก็บเกี่ยวระหว่าง 10-12 เดือน เหมาะสำหรับการเก็บเกี่ยวช่วงกลางหีบ (มกราคม – กุมภาพันธ์) เช่น K88-65 K88-87 K92-80 K97-27 K9972 อุ้มทอง 3 อุ้มทอง 8 และขอนแก่น 3 เป็นต้น

6.3 อ้อยพันธุ์หนัก คืออ้อยที่มีการสะสมน้ำตาลช้าอายุการเก็บเกี่ยวมากกว่า 12 เดือน เหมาะสำหรับการเก็บเกี่ยวปลายฤดู เช่น K84-200 K88-92 K92-213 K90-54 อุ้มทอง 1 และอุ้มทอง 7 เป็นต้น

2.2 การอัดแน่นของดิน

การอัดแน่นของดิน (soil compaction) เป็นผลที่มีมาจากการกดทับของเครื่องจักรกลเกษตรภายในฟาร์มหรือพื้นที่เพาะปลูก (Vermeulen and Mosquera, 2009) การอัดแน่นของดินนี้ทำให้ลดความสามารถในการแทรกซึมของดิน (soil infiltrability) ลดค่า hydraulic conductivity ลดรูพรุน (porosity) ลดการเติมอากาศ (aeration) และเพิ่มค่าความหนาแน่นของมวลดิน (bulk density) ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการแผ่ขยายของรากพืช (root exploration) (Masek et al., 2010) ผลกระทบเหล่านี้ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ทำให้พื้นที่ใบ คุณภาพของรากพืช และทำให้ผลผลิตลดลง (Marinello et al., 2017)

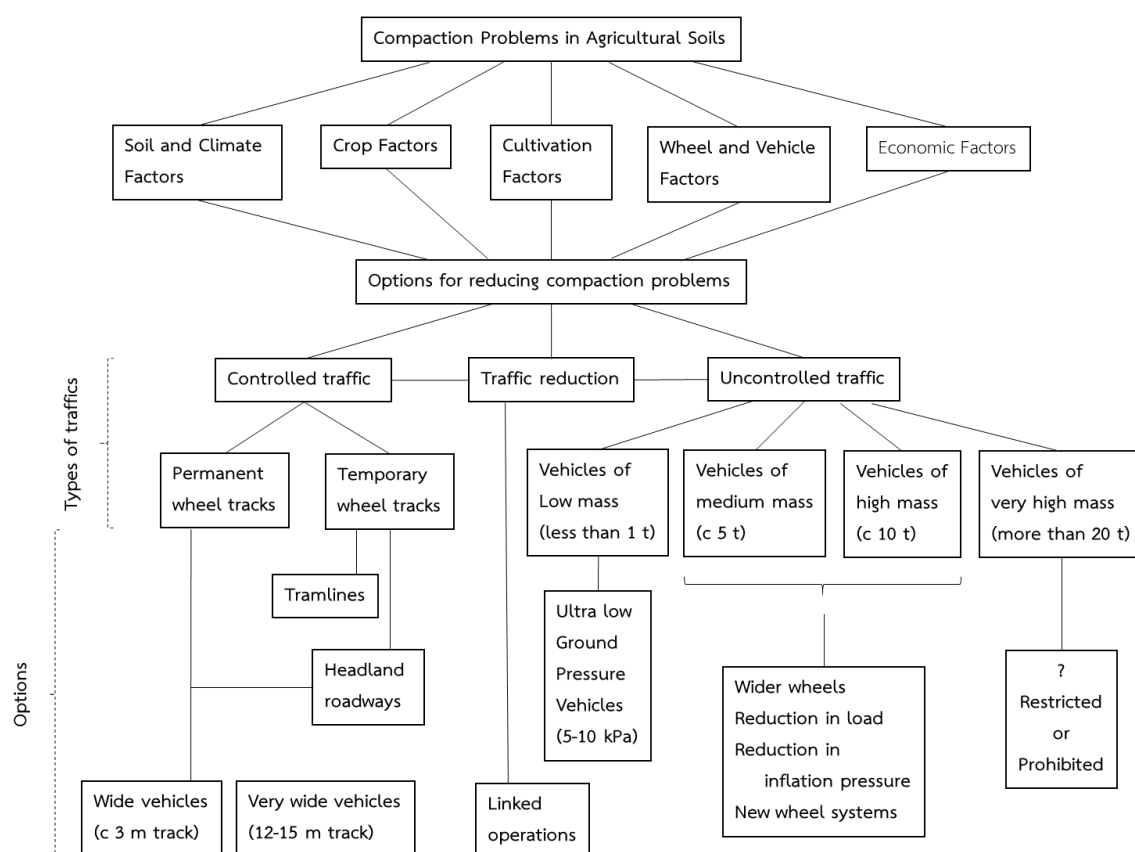
การเกิด soil compaction ขึ้นอยู่กับหลายสาเหตุ เช่น ชนิดของดิน สภาพความชื้นของดิน ขณะปฏิบัติงาน ระดับน้ำใต้ดิน ขนาดของเครื่องจักรกลที่ใช้ ชนิดของล้อที่ใช้ ชนิดของพืชปลูก สภาพภูมิอากาศ เป็นต้น (ภาพที่ 2.2)

ผลกระทบของการอัดแน่นของดินต่อผลผลิตและการเจริญเติบโตของพืช หน่วยวัดของการอัดแน่นของดินอีกหน่วยที่นิยมใช้กันคือ การใช้ cone penetrometer วัดค่าความต้านทานการแทงทะลุ

ของดิน มีหน่วยเป็นกิโลปาสคาล (kPa) โดยที่ถ้าค่าวัดการต้านทานการแทงทะลุดังกล่าวมีมากกว่า 200 kPa จะทำให้เกิดผลกระทบกับการเจริญเติบโตของพืช Petelkau และ Dannowski (1990) ได้สำรวจการเข้าไปทำกิจกรรมของเครื่องจักรกลในแปลงปลูกข้าวโอ๊ต พบว่า ตลอดช่วงปี 1982-1983 มีการเข้าไปทำกิจกรรมทั้งหมด 26 ครั้ง ทำให้ดินเกิด soil compaction บริเวณไชนล้อรถ มีค่าความต้านทานดิน 100 – 500 kPa ดังนั้นพวกเขาจึงได้เปรียบเทียบระดับความต้านทานดิน 3 ระดับบริเวณไชนล้อรถ คือ 100, 300 และ 500 kPa ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโอ๊ต พบว่า ผลผลิตลดลง 3.6, 26.0 และ 28.3% เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณปลูกพืช ในขณะที่ยังพบว่า การดูดธาตุอาหารของ N, P, K, Ca และ Mg ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

2.3 การควบคุมการจราจรในฟาร์ม

แนวทางในการลดการเกิด soil compaction นั้นมีหลายรูปแบบ Soane et al. (1979) ได้เสนอแผนผังทางเลือกในการแก้ปัญหา soil compaction ในภาพที่ 2.2 ทางเลือกในการแก้ปัญหา มี 3 แนวทาง คือ 1) การทำ controlled traffic 2) การลดกิจกรรมของเครื่องจักรกล (traffic reduction) และ 3) ไม่ทำ controlled traffic แต่เป็นการลดขนาดของเครื่องจักรให้เหมาะสมกับสภาพแปลงปลูกพืช



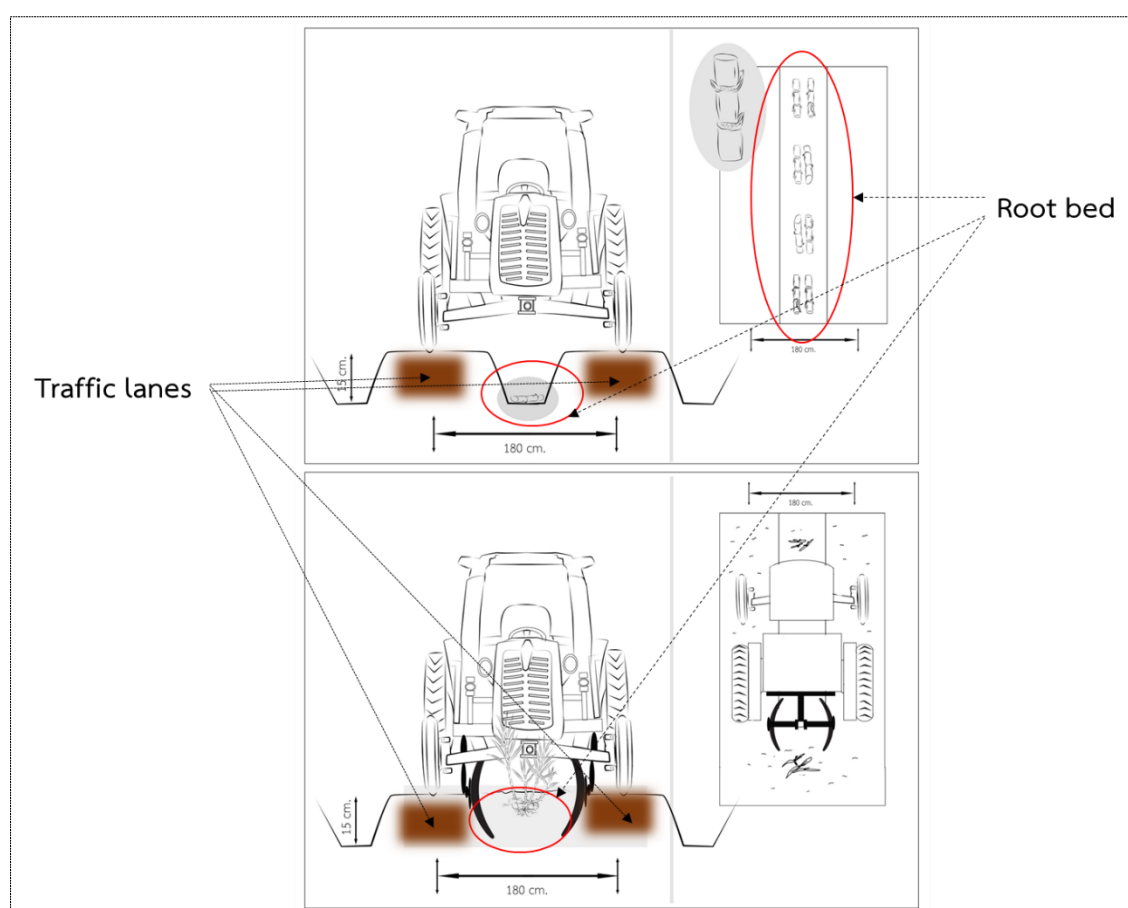
ภาพที่ 2.2 แผนผังที่แสดงให้เห็นถึงเหตุของการเกิดการอัดแน่นของดิน และทางเลือกในการลดการเกิดการอัดแน่นของดินที่สัมพันธ์กับปัจจัยในระบบการปลูกพืชโดยใช้เครื่องจักรกลเกษตร (ดัดแปลงจาก Soane et al., 1979)

การควบคุมจราจรในฟาร์ม (controlled traffic farming: CTF) เป็นการควบคุมการปลูกพืช ร่วมกับการจัดการทางเดินรถของเครื่องจักรกลเกษตร ซึ่งถนนหรือทางเดินรถจะถูกกำหนดไว้อย่างถาวร และทำการปลูกพืชบริเวณที่ไม่ใช่ทางเดินรถ โดยวัตถุประสงค์หลักของการจัดการควบคุมการจราจรใน ฟาร์มนี้คือ การทำให้ดินมีสภาพที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชและลดการเกิดชั้นดินดานของดินบริเวณราก พืช (root zone) เนื่องจากวิธีการเดินรถของเครื่องจักรกลแบบเดิมเป็นการเดินรถแบบไร้ทิศทางที่

แน่นอน ทำให้เกิดการทับกันของทางเดินรถก่อให้เกิดการอัดแน่นของดิน (soil compaction) (Vermeulen and Mosquera, 2009) นอกจากนี้ยังลดการไหลบ่าของน้ำในแปลง การควบคุมระบบการจราจร ยังสามารถลดต้นทุนการผลิต และประหยัดเวลา ก่อให้เกิดความยั่งยืนทางการเกษตร (Mouazen and Palmqvist, 2015; Raper, 2005)

การจัดระบบการควบคุมการจราจรในฟาร์ม สามารถแบ่งโซนของพื้นที่เป็น 2 โซน (ภาพที่ 2.1) ได้แก่

- 1) โซนการเจริญเติบโตของพืช (root bed) เป็นโซนที่ปราศจากการกดทับของดิน
- 2) โซนแนวการเดินรถ (permanent traffic lanes or wheel tracks) ซึ่งเป็นโซนที่ล้อรถวิ่งกดทับอย่างต่อเนื่อง เกิดการอัดแน่นเฉพาะ



ภาพที่ 2.3 แสดงบริเวณเจริญเติบโตของพืช (root bed) และโซนการเดินรถ (traffic lanes)

Gasso et al. (2013) รายงานว่า การทำ controlled traffic สามารถลดการเกิด nitrous oxide ได้ 21–45% ลดก๊าซมีเทน 372–2100% ลดการไหลบ่าของน้ำ (runoff) ได้ 27–42% ลดการ

เกิดฝุ่นละอองจากการไถพรวนได้ 23% และ ผลกระทบทางอ้อม เช่น ลดการใช้ปุ๋ยได้ 1–26% ลดสารกำจัดศัตรูพืช 1–26% ลดเมล็ดพันธุ์ 11–36% และลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิง 23% (Chen et al., 2016) รายงานว่า การทำ controlled traffic ในการผลิตข้าวสาลีและข้าวโพด สามารถประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 30%

Lu et al. (2016) ศึกษาเปรียบเทียบการทำ controlled traffic แบบไม่ไถพรวน แปลง random traffic แบบไม่ไถพรวน และแปลงไถพรวนตามปกติ ในการปลูกข้าวโพด โดยทำการศึกษาค้นคว้าต่อเนื่อง 5 ปี พบว่า ที่ระดับความลึกดิน 0-10 เซนติเมตร แปลง controlled traffic แบบไม่ไถพรวน ทำให้ค่าอินทรีย์วัตถุ ค่าไนโตรเจนและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ และค่าความหนาแน่นของดิน (soil bulk density) มากกว่าแปลง random traffic แบบไม่ไถพรวน และแปลงไถพรวนตามปกติอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับ (Qingjie et al., 2009) ที่รายงานว่าการปลูกข้าวสาลีด้วยระบบ controlled traffic ลดความหนาแน่นของมวลดินได้อย่างมีนัยสำคัญ และยังเพิ่มความจุของน้ำได้ 9.3% เมื่อเปรียบเทียบกับแปลงไถพรวนตามปกติ

หลักการทำการ Controlled Traffic Farming นั้นมีหัวใจหลักคือ 1) การสำรวจสภาพพื้นที่ของแปลงปลูก ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ อากาศยานไร้คนขับ หรือ drone บินเพื่อสำรวจพื้นที่ 2) การออกแบบการเดินรถหรือเครื่องจักรกลในแปลง (guidance) โดยกำหนดแนวทางการเดินรถ การไถพรวน การเก็บเกี่ยว และพื้นที่ที่กลับรถหัวแปลงท้ายแปลง เป็นต้น และ 3) เครื่องมือที่ใช้กำหนดทิศทางการเดินรถ โดยทั่วไปนิยมใช้ GPS โดยใช้ GPS ติดกับรถ และ เสาส่งสัญญาณ GPS ที่เป็น Base station เพื่อขยายสัญญาณจากดาวเทียมถึงตัวรถฟาร์มแทรกเตอร์

อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความรู้ขั้นสูงที่ใช้ควบคุมแนวถนนของรถฟาร์มแทรกเตอร์ เทคโนโลยีดังกล่าวก็คือ GPS ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการควบคุมแนวการเดินรถดังกล่าว GPS นั้นมีหลากหลายรุ่นขึ้นอยู่กับระดับความละเอียดของการส่งข้อมูล ยิ่งละเอียดมากก็ยิ่งมีราคาที่สูงมาก ระดับ GPS ดังกล่าวนั้นอาจจะเหมาะสำหรับการทำฟาร์มในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มีความยากลำบากในการควบคุมการเดินรถ อย่างไรก็ตาม ในประเทศไทยนั้น เกษตรกรชาวไร่อยู่ส่วนใหญ่น้อยในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างนั้นมักเป็นเกษตรกรรายเล็กถึงรายกลาง ซึ่งแปลงปลูกแต่ละแปลงมีพื้นที่ไม่มากนัก

2.4 สมมติฐานงานวิจัย

การควบคุมการจราจรฟาร์ม เป็นวิธีการจัดการปลูกพืชโดยควบคุมการเดินรถของเครื่องจักรกลเกษตร เพื่อลดการกดทับของชั้นดิน และลดการเกิดชั้นดินดาน ทำให้ผลผลิตของพืชเพิ่มขึ้น ลดการใช้พลังงานของเครื่องจักรกล ลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตของอ้อย ลดการเกิดชั้นดินดาน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สถานที่ดำเนินงาน

แปลงปลูกอ้อย บริษัท น้ำตาลพิษณุโลก จำกัด ณ ตำบลสระเศรษฐี อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก

สภาพดินเป็นดินเหนียวบนทราย โดยบริเวณหน้าดินมีเกล็ดดำปกคลุมประมาณ 2- 5 เซนติเมตร ซึ่งเกิดจากบริษัทฯ ได้นำมาลงไว้เพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดิน

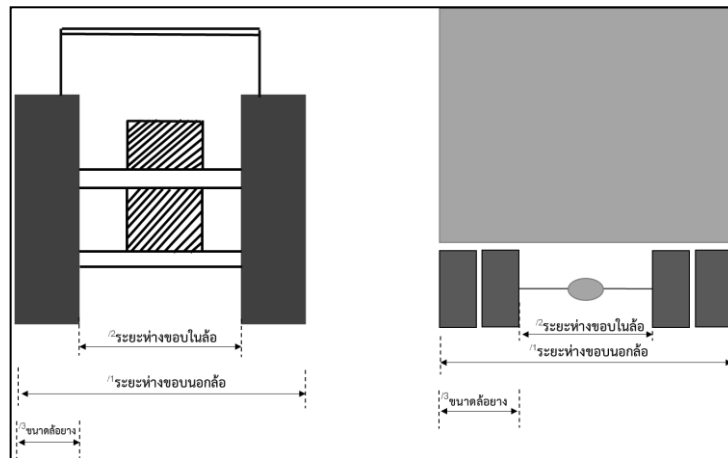
ระยะเวลาการดำเนินงาน มกราคม 2562 - มิถุนายน 2562

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญด้านการผลิตอ้อยของพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานการใช้เครื่องจักรกลของชาวไร่อ้อยจังหวัดพิษณุโลก

ชนิด เครื่องจักรกล	รุ่น/ยี่ห้อ	ขนาด แรงม้า	^{/1} ระยะห่างขอบ นอกล้อหลัง	^{/2} ระยะห่าง ขอบในล้อ (ล้อหลัง)	^{/3} ขนาดล้อยาง (ล้อหลัง)	หน้า ตัด
1) รถ แทรกเตอร์	FORD 6600- 6610s	85- 95	210 ซม.	120 ซม.	45 ซม.	-
	KUBOTA M8540 -9540	85 -95	201 ซม.	107.52 ซม.	46.74 ซม.	-
2) รถตัดอ้อย	AUSTOFT	200	215 ซม.	115 ซม.	50 ซม.	130 ซม.
	AUSTOFT	290	249 ซม.	129 ซม.	60 ซม.	140 ซม.
	AUSTOFT	300	233 ซม.	137 ซม.	ตีนตะขาบ 47 ซม.	140 ซม.
3) รถบรรทุก	6 ล้อ		187 ซม.	97 ซม.	45 ซม.	-
	10 ล้อ		240 ซม.	130 ซม.	55 ซม.	-
4) รถคืบ	Bell	46	232 ซม.	136 ซม.	48 ซม.	-

(อ้างอิงจากผลการสำรวจจากโครงการวิจัย เรื่อง การประเมินการผลิตอ้อยและการใช้เครื่องจักรกลพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ปีงบประมาณ 2559)



ภาพที่ 3.1 อ้างอิงระยะห่างระหว่างล้อรถแทรกเตอร์ รถบรรทุก และรถตัดอ้อย

3.2 วิธีการดำเนินการ

วางแผนการทดลองแบบ RBCD จำนวน 3 กรรมวิธีการทดลอง แบบแปลงใหญ่ (ภาพที่ 3.2) ได้แก่ กรรมวิธีที่ 1 การผลิตอ้อยด้วยวิธีควบคุมการจราจรด้วยระบบ GPS (controlled traffic) ที่ระยะปลูก 1.8 เมตร

กรรมวิธีที่ 2 การผลิตอ้อยด้วยวิธีควบคุมการจราจรที่ไม่มีระบบ GPS (ระบบสมัยก่อนที่ไม่มีเครื่องมือ แต่อาศัยการออกแบบ และกำหนดแนวปลูกโดยวางแผนการไถแรกเป็นแนวการเดินรถ) ที่ระยะปลูก 1.8 เมตร

กรรมวิธีที่ 3 แปลงที่เกษตรกรปฏิบัติเป็นประจำ (conventional practice) หรือการจราจรแบบไร้ทิศทาง (random traffic) ที่ระยะปลูก 1.5 เมตร

การดำเนินงานกิจกรรม

แปลงทดลองขนาดประมาณ 60 ไร่ ซึ่งเป็นแปลงผลิตอ้อยของบริษัท น้ำตาลพิษณุโลก จำกัด เดิมเป็นอ้อยต่อ 2 พันธุ์ขอนแก่น 3 เก็บเกี่ยวเมื่อวันที่ 10 - 15 ธันวาคม 2561 ด้วยรถตัด จากนั้นเตรียมดินก่อนการทดลองดังนี้

- 1) การไถด้วยพลาพรวน 24 จาน จำนวน 2 รอบ ด้วยรถแทรกเตอร์ขนาด 135 แรงม้า
- 2) ไถระเบิดดินดานแบบตราหมากรุก จำนวน 1 รอบ

3) ใช้ Power harrow เพื่อให้หน้าดินละเอียด จำนวน 1 รอบ

เมื่อเตรียมดินเสร็จ แบ่งพื้นที่แปลงทดลองเป็น 3 แปลงย่อย กว้าง 54 เมตร ยาว 360 เมตร
(ระยะปลูก 1.8 เมตร จำนวน 30 แถว)



ภาพที่ 3.2 ผังแปลงที่วางแผนไว้



ภาพที่ 3.3 (ก) การใช้ฉาบลพรวน 24 จานเพื่อรื้อตอ (ข) สภาพแปลงหลังการเตรียมดินก่อนปลูก

สำหรับแปลงของกรรมวิธีการทดลองที่ 1 และ 2 มีการปฏิบัติงานที่เหมือนกัน (ภาพที่ 3.4) ได้แก่

- 1) การไถระเบิดดินดานเฉพาะร่อง
- 2) การใช้ผาลยกร่องปลูก โดยใช้รถวิ่งจำนวน 2 รอบ
- 3) การปลูกอ้อยแบบแถวเดี่ยว
- 4) หลังปลูกอ้อย 1 เดือน มีการใช้คราดสปริงเพื่อกำจัดวัชพืช
- 5) การใส่ปุ๋ยอ้อย อายุ 2 เดือน
- 6) หลังการคราดสปริง ใช้ผาลยกร่องอีกปลูก 1 รอบ หลังการใส่ปุ๋ยอ้อย 2 เดือน



ก



ข



ค

ภาพที่ 3.4 (ก) ไถระเบิดดินดานเฉพาะร่องปลูกอ้อย (ข) งานยกร่องปลูกอ้อย
(ค) เครื่องปลูกแบบแถวเดี่ยว

สำหรับแปลงกรรมวิธีที่ 3 ที่เป็นวิธีของเกษตรกร มีขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ ดังนี้

- 1) ปลุกอ้อยด้วยเครื่องปลูกแบบแถวเดี่ยว ดังภาพที่ 3.5 (ก) โดยไม่มีการเตรียมดินเพิ่มเติม
- 2) ฉีดพ่นสารกำจัดวัชพืช pendimethalin+imazapic ที่ 7 วัน หลังปลุกอ้อย (ภาพที่ 3.5 ข)
- 3) ใส่ปุ๋ยอ้อยรอบสองที่อ้อยอายุ 2 เดือน



ภาพที่ 3.5 (ก) รถฟาร์มแทรกเตอร์ของเกษตรกรที่ใช้ปลูกขนาด 108 แรงม้า

(ข) การฉีดพ่นสารกำจัดวัชพืชของแปลงเกษตรกร

สามารถสรุปกิจกรรมของแต่ละกรรมวิธีได้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 กิจกรรมต่าง ๆ ของการปลูกอ้อย

กิจกรรม	แปลงที่ 1 With GPS	แปลงที่ 2 Without GPS	แปลงที่ 3 Farmer practice
ระเบิดดินดานเฉพาะร่อง	✓	✓	✗
ยกร่องปลูก (Row cultivator)	✓	✓	✗
ปลูก (วันที่ 19 - 22 ม.ค. 62)	1.8 m.	1.8 m	1.5 – 1.6 m
จำนวนแถว	30 แถว	30 แถว	32 แถว
อัตราท่อนพันธุ์	1.22 kg/ไร่	1.08 kg/ไร่	1.64 kg/ไร่
อัตราปุ๋ยรองพื้น 15-15-15	35 kg/ไร่	35 kg/ไร่	49 kg/ไร่
ฉีดพ่นสารกำจัดวัชพืช pendimethalin + imazapic	✗	✗	✓
ให้น้ำ	st 1 น้ำหยด	st 1 น้ำหยด	st 1 น้ำหยด
คราดสปริง กำจัดวัชพืช ที่ 1 เดือนหลังปลูก	✓	✓	✗
ใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 สูตร 15-15-15	35 kg/ไร่	35 kg/ไร่	49 kg/ไร่
ยกร่อง (Row cultivator) ที่ 2-3 เดือนหลังปลูก	✓	✓	✗

การปฏิบัติและดูแลรักษาอ้อยนอกเหนือจากกรรมวิธีการทดลองที่แตกต่างกัน

- การให้น้ำด้วยน้ำหยด ครั้งแรก ที่ 14 วันหลังปลูก
- ให้น้ำครั้งที่ 2 มีกำหนดให้ ที่ 2 เดือนหลังปลูก แต่เกิดภาวะภัยแล้ง ทำให้แหล่งน้ำแห้ง ไม่มีน้ำที่เพียงพอ

3.3 การบันทึกข้อมูลผลการวิจัย

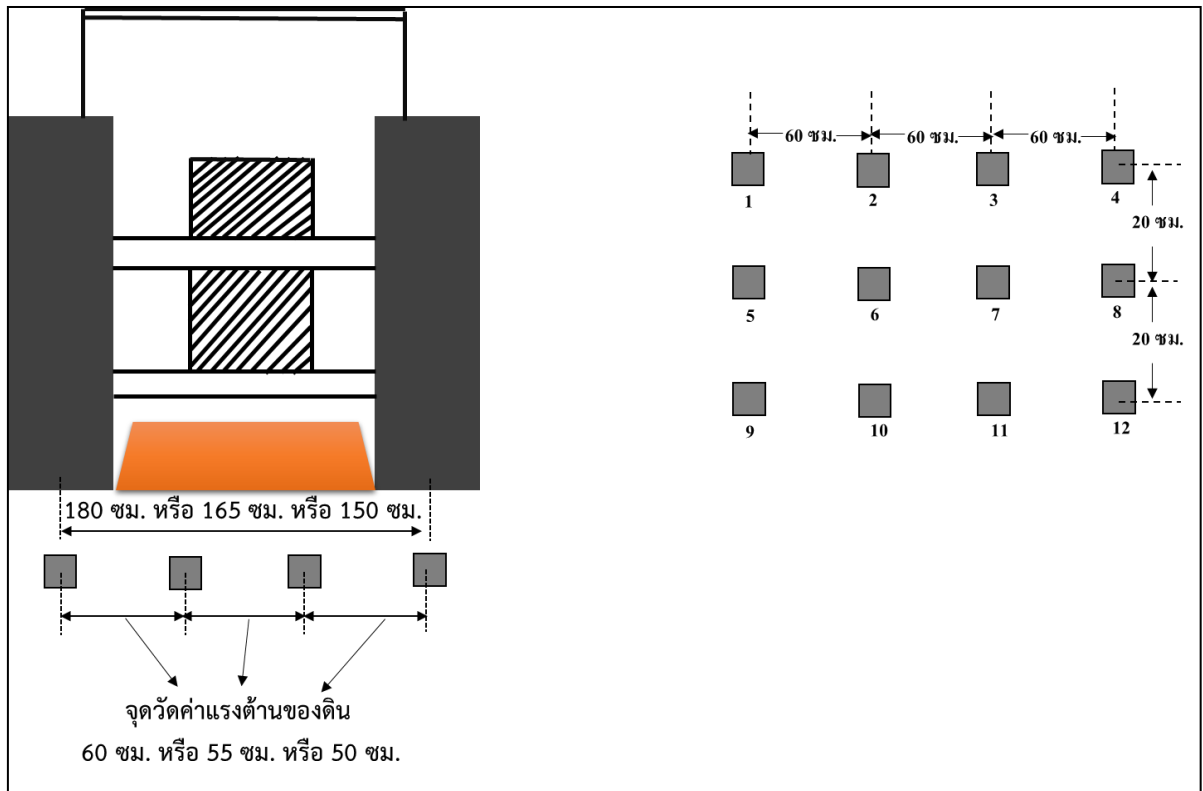
- 1) ก่อนเริ่มการทดลองตั้งแต่เริ่มการไถพรวนและระเบิดดินดาน ให้เก็บข้อมูลดิน ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่
 - 1.1) คุณสมบัติด้านเคมี ได้แก่ ปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ (N, P, K) อินทรีย์วัตถุ (OM) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (C.E.C)

1.2) ค่าความชื้น (soil moisture content; % d.b.) และความหนาแน่นของดิน (soil bulb density; g/m^3) โดยใช้ชุดเก็บตัวอย่างดิน (soil core sampling) เพื่อนำไปหาค่าความชื้น และความหนาแน่นของดิน ด้วยการอบกระป๋องเก็บตัวอย่างดินในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.3) แรงต้านทานของดินโดยวัดที่ระดับความลึก 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 เซนติเมตร จากผิวดิน

ประเมินจากค่าความต้านทานของดิน (soil resistance) ที่ตำแหน่งและระดับความลึกต่างๆ ซึ่งจะทำให้การวัดด้วย Cone penetrometer ตลอดหน้ากว้างการทำงานของอุปกรณ์และบริเวณที่มีการจราจร ทำการเก็บข้อมูลก่อนและหลังจากการจราจร โดยกำหนดให้ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลก่อนและหลังมีการจราจรมีระยะห่างถัดจากตำแหน่งเดิมไม่เกิน 20 เซนติเมตรในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของรถ แพลงละ 2 ตำแหน่ง (ภาพที่ 3)

1.4) ชนิดของดิน (% sand; % silt, % clay) โดยวิเคราะห์จาก Pipette Method Analysis



ภาพที่ 3.5 แสดงตัวอย่างจุดเก็บความต้านทานของดิน

2) การเจริญเติบโตของอ้อย ได้แก่

- ความงอก ที่ 1, 2 เดือนหลังปลูก
- ความสูง ที่ 4, 6, 8, 10 และ 12 เดือนหลังปลูก
- จำนวนลำ ที่ 4, 6, 8, 10 และ 12 เดือนหลังปลูก

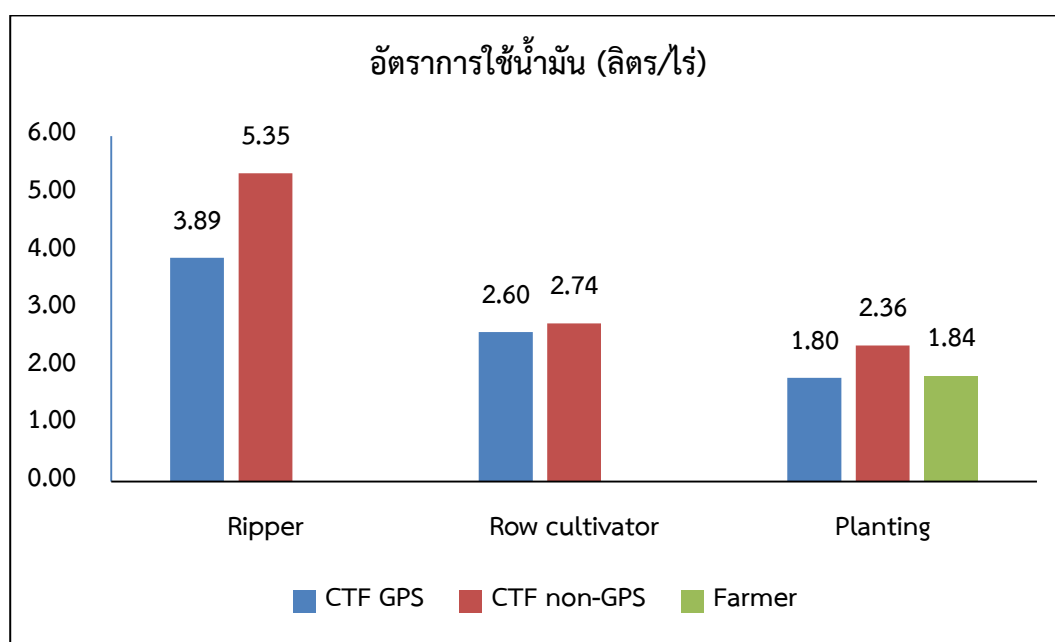
- ความหวาน (% brix) ที่ 10 และ 12 เดือนก่อนการเก็บเกี่ยว
- 3) สุ่มเก็บเกี่ยวอ้อย แปลงละ 20 กอ ที่เหลือ เก็บเกี่ยวโดยรถตัดอ้อย วัตถุประสงค์/ไร
 - ตัวอย่างลำอ้อย 20 กอ นำมาวัดคุณภาพอ้อย ได้แก่
 - เส้นผ่านศูนย์กลางลำ จำนวนปล้อง ความยาวปล้อง น้ำหนักลำเดี่ยว น้ำหนัก/กอ
 - ค่า Fiber, Brix 20 °C, Pol, CCS, Purity, Sugar yield
- 4) หลังการเก็บเกี่ยว เก็บข้อมูลดิน ได้แก่
 - 4.1) คุณสมบัติด้านเคมี ได้แก่ ปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ (N, P, K) อินทรีย์วัตถุ (OM) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (C.E.C)
 - 4.2) ค่าความชื้น (soil moisture content; % d.b.) และความหนาแน่นของดิน (soil bulb density; g/m²) โดยใช้ชุดเก็บตัวอย่างดิน (soil core sampling) เพื่อนำไปหาค่าความชื้นและความหนาแน่นของดิน ด้วยการอบกระป๋องเก็บตัวอย่างดินในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - 4.3) แรงต้านทานของดินโดยวัดที่ระดับความลึก 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 เซนติเมตร จากผิวดิน
- 5) การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
 - การวิเคราะห์แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งวิเคราะห์จากระดับแปลงทดลอง และส่วนที่สองวิเคราะห์จากความน่าจะเป็นของแปลงเกษตรกร
 - ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาต้นทุนและผลตอบแทน มีดังนี้
 - 1) ต้นทุน
 - 1.1 ต้นทุนคงที่
 - ค่าใช้ที่ดิน/ค่าเช่าที่ดิน
 - 1.2 ต้นทุนผันแปร
 - ค่าแรงงาน ประกอบด้วย ค่าแรงในการเตรียมพื้นที่ ค่าแรงในการเพาะปลูก ค่าแรงในการให้น้ำ ค่าแรงในการใส่ปุ๋ย ค่าแรงในการปราบศัตรูพืช/วัชพืช ค่าแรงในการเก็บเกี่ยว
 - ค่าวัสดุ ประกอบด้วย ค่าพันธุ์ ค่าปุ๋ย ค่าสารป้องกันกำจัดแมลง/วัชพืช/โรคพืช
 - ค่าใช้จ่ายอื่นๆ
 - 2) ผลตอบแทน
 - 2.1 รายได้จากผลผลิตอ้อย

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า การใช้ระเบิดดินดาน (ripper) และ การใช้ผาลยกร่องปลูก (row cultivator) อัตราการใช้น้ำมันของแปลงควบคุมการจราจรแบบมีระบบ GPS guidance (CTF GPS) ใช้น้ำมันที่น้อยกว่าแปลงที่เป็นการควบคุมการจราจรที่ปราศจาก GPS guidance (CTF non-GPS) ส่วนการใช้เครื่องปลูกแบบแถวเดี่ยว พบว่า แปลงเกษตรกร (farmer) มีอัตราการใช้น้ำมัน 1.84 ลิตร/ไร่ ขณะที่แปลง CTF GPS มีอัตราการใช้น้ำมัน 1.80 ลิตร/ไร่ ซึ่งดูเหมือนจะไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนแปลง CTF non-GPS มีอัตราการใช้น้ำมัน 2.36 ลิตร/ไร่ ซึ่งมากกว่าที่มี GPS แสดงให้เห็นว่า การมี GPS-guidance นั้นช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากกว่าการไม่มี GPS guidance อย่างไรก็ตาม สำหรับการใช้เครื่องปลูกแบบแถวเดี่ยว แปลงเกษตรกรมีอัตราการใช้น้ำมันที่ไม่แตกต่างกันอาจเกิดจาก กำลังแรงม้าของเครื่องปลูกของเกษตรกรและแปลง CTF ที่แตกต่างกัน เพราะแปลง CTF ใช้เครื่องยนต์ 150 แรงม้า ส่วนแปลงเกษตรกรใช้เครื่องยนต์ 108 แรงม้า (ภาพที่ 3.5)



ภาพที่ 4.1 อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของแต่ละกรรมวิธี

4.2 การงอกและการรอดชีวิตของอ้อย

เนื่องจากเกิดสภาวะภัยแล้งของพื้นที่แปลงปลูกอ้อยทำให้อ้อยส่วนใหญ่ยืนต้นตาย ทำให้ผล
งานวิจัยนี้เกิดความล้มเหลวระยะธรรมชาติที่ไม่สามารถควบคุมได้



ภาพที่ 4.2 สภาพแปลงปลูก ณ วันที่ 7 พฤษภาคม 2562 เห็นได้ว่า อ้อยส่วนใหญ่แห้งตาย



ภาพที่ 4.2 (ต่อ) สภาพแปลงส่วนใหญ่ อ้อยแห้งตาย ณ วันที่ 7 พฤษภาคม 2562



ภาพที่ 4.3 สภาพอ้อย รวมทั้งวัชพืชส่วนใหญ่แห้งตาย 7 พฤษภาคม 2562



ภาพที่ 4.4 น้ำในสระเก็บน้ำ แห่งจนไม่สามารถใช้ได้ 7 พฤษภาคม 2562

4.3 เครื่องวัดแรงต้านทานการแทงทะลุของดิน

การสร้างเครื่องวัดแรงต้านทานฯ ดังกล่าว มีคุณสมบัติของเครื่องดังนี้ (ภาพที่ 4.5)

- เก็บข้อมูลได้ลึกสูงสุด 70 cm
- ใช้กระบอกลิควาล์วไฮดรอลิกออกแรงกด
- ก้านวัดจะต้องเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็วคงที่ 30 mm/s ตามมาตรฐาน ASAE S313.3
- วัดและบันทึกค่าขนาดของแรงและความลึกตลอดการเคลื่อนที่ในการกด
- แสดงผลแบบดิจิตอล
- ชุดอุปกรณ์ต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์



ภาพที่ 4.5 เครื่องวัดแรงต้านทานการแทงทะลุของดินชนิดติดท้ายรถแทรกเตอร์

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินกิจกรรมของโครงการ พบอุปสรรคอย่างหนึ่ง คือ ภาวะภัยแล้งของพื้นที่แปลงดังกล่าว ทำให้อ้อยที่งอกขึ้นมาแห้งตาย

เอกสารอ้างอิง

- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล. 2562. การเลือกใช้พันธุ์อ้อยให้เหมาะสมกับพื้นที่. บทความออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 19 ธันวาคม 2562, https://www.kubotasolutions.com/knowledge/sugar_cane/detail/261)
- Arvidsson, J. and Hakansson, I. 1991. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. **Soil & Tillage Research** 20, 319–332.
- Bhandral, R., Saggar, S., Bolan, N.S. and Hedley, M.J., 2007. Transformation of nitrogen and nitrous oxide emission from grassland soils as affected by compaction. **Soil & Tillage Research** 94, 482–492.
- Braunack, M.V. and McGarry, D. 2006. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil and Tillage Research** 89: 86-102.
- Chan, K.Y., Oates, A., Swan, A.D., Hayes, R.C., Dear, B.S. and Peoples, M.B. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil & Tillage Research** 89, 13–21.
- Chen, H., Yang, Y., Wang, Y., Zhu, L., & Zhang, R. (2016). Effect of controlled traffic on energy use efficiency in wheat-maize production in North China Plain. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, 13(4), 2634-2638.
- Gasso, V., Sorensen, C. AG., Uodshoorn, F.W. and Green, O. 2013. Controlled traffic farming: a review of the environment impacts. **Europ. J. Agronomy** 48: 66-73.
- Hamza, M.A. and Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems – a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research** 82, 121–145.
- Horn, R., Domzal, H., Slowinskajurkiewicz, A. and Vanouwerkerk, C. 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research** 35, 23–36.
- Lu, C., Li, H., He, J., Wang, Q., Sarker, K. K., Li, W. and Chen, G. (2016). Effects of controlled traffic no-till system on soil chemical properties and crop yield in annual double-cropping area of the North China Plain. **Soil Research**, 54(6), 760-766.

- Marinello, F., Pezzuolo, A., Cillis, D., Chiumenti, A., & Sartori, L. (2017). Traffic effects on soil compaction and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) taproot quality parameters. **Spanish Journal of Agricultural Research**, 15(1). doi:10.5424/sjar/2017151-8935
- Masek, J., Kroulik, M. and Kumhala, F. (2010). Controlled traffic farming. **Engineering for Rural development** 27, 37-41.
- Mouazen, A. M. and Palmqvist, M. 2015. Development of a framework for the evaluation of the environmental benefits of controlled traffic farming. **Sustainability (Switzerland)** 7(7): 8684-8708.
- Nevens, F. and Reheul, D. 2003. The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. **Soil and Tillage Research** 70, 175–184.
- Qingjie, W., Hao, C., Hongwen, L., Wenying, L., Xiaoyan, W., McHugh, A. D., and Huanwen, G. (2009). Controlled traffic farming with no tillage for improved fallow water storage and crop yield on the Chinese Loess Plateau. **Soil and Tillage Research**, 104(1), 192-197.
- Petelkau, H. and Dannowski, M. 1990. Effect of repeated vehicle traffic lanes on soil physical properties, nutrient uptake and yield of oats. **Soil and Tillage Research** 15, 217-255.
- Raper, R.L. 2005. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics** 42: 25-280.
- SCB Economic Intelligence Center. 2019. AGRICULTURAL COMMODITY 2019: SUGAR. สืบค้นออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 19 ธันวาคม 2562, <https://www.scbeic.com/th/detail/product/5771>
- Soane, B.D., Dickson, J.W. and Blackwell, P.S. 1979. Some options for reducing compaction under wheels on loose soil. In Proceeding 8th Conference of International Soil and Tillage Research Organization, Stuttgart, 2, 347 – 352.
- Soane, B.D. and van Ouwerkerk, C. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. **Soil and Tillage Research** 35, 5–22.

- Statista. 2019. Principal sugar exporting countries in 2018/2019. สื่อออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 19 ธันวาคม 2562, <https://www.statista.com/statistics/273437/exported-amount-of-sugar-in-leading-countries/>
- Vermeulen G.D. and Mosquera, J. 2009. Soil, crop and emission responses to seasonal controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil. **Soil & Tillage Research** **102**, 126–134

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

สืบเนื่องจากการดำเนินโครงการวิจัยวิจัย เรื่อง “การพัฒนาระบบช่วยตัดสินใจในการนำทางรถแทรกเตอร์การเกษตรโดยใช้เทคโนโลยีเลเซอร์ระบุตำแหน่ง รหัส RDG5950145” แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้เลเซอร์ในการตรวจวัดระยะทางของตำแหน่งวัตถุในไร่อ้อย ซึ่งมีข้อได้เปรียบหลายจุด เช่น แสงเลเซอร์นั้นสามารถใช้งานได้ในสภาวะที่มีความเข้มแสงต่าง ๆ กัน ทั้งความละเอียดของข้อมูลที่ได้ ยังมีความคลาดเคลื่อนจากฝุ่นและความชื้นน้อย และเห็นถึงแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเลเซอร์แสดงสภาพในไร่อ้อยเพื่อใช้แสดงข้อมูลแนะนำผู้ขับขี่พาหนะต่าง ๆ ในไร่อ้อย Thanpattranon et al. (2015) พัฒนาอัลกอริทึม (algorithm) ที่ใช้ในการควบคุมรถแทรกเตอร์ที่สามารถเคลื่อนที่โดยไร้คนขับ โดยอาศัยการระบุระยะทางของหลักกำหนดการเคลื่อนที่ เพื่อประมวลผลตำแหน่งที่จะควบคุมให้รถเคลื่อนที่ไป พร้อมควบคุมพวงมาลัยรถแทรกเตอร์แบบอัตโนมัติ

ในปัจจุบันการเก็บเกี่ยวอ้อยด้วยรถตัดอ้อย พบว่าการควบคุมรถตัดอ้อยและพาหนะบรรทุกจำเป็นต้องอาศัยความชำนาญทั้งผู้ขับรถตัดอ้อยและผู้ขับพาหนะบรรทุกซึ่งต้องทำงานสอดประสานกันอย่างดี ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการส่งสัญญาณระหว่างผู้ขับรถตัดอ้อยและผู้ขับพาหนะบรรทุกอ้อยซึ่งส่งผลต่อความปลอดภัยต่อชีวิตผู้ปฏิบัติงานและทรัพย์สินในระหว่างการเก็บเกี่ยวอ้อย หากการควบคุมแนวการวิ่งของพาหนะบรรทุกไม่สอดคล้องกับการวิ่งของรถตัดอ้อยอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงในการสูญเสียอ้อยในระหว่างขั้นตอนการการลำเลียงท่อนอ้อยไปยังพาหนะบรรทุกอ้อยหรืออุบัติเหตุอื่น ๆ ในระหว่างการเก็บเกี่ยวอ้อย เพื่อลดข้อผิดพลาดดังกล่าวและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวอ้อยด้วยรถตัดอ้อยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบสนับสนุนการควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย ซึ่งถือเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีต้นแบบสำหรับประเทศไทยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวอ้อย และลดความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุขณะเก็บเกี่ยวอ้อยด้วยรถตัดอ้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาระบบสนับสนุนการควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย
- 1.2.2 ประเมินประสิทธิภาพระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย

1.3 ขอบเขตการทำวิจัย

1.3.1 ประเมินประสิทธิภาพระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยโดยพิจารณาความสามารถในการทำงานเชิงไร่ (effective field capacity)

1.3.2 ประเมินประสิทธิภาพเชิงไร่ในกรณีการเก็บเกี่ยวอ้อยด้วยรถตัดที่ใช้ระบบควบคุมพาหนะติดตามรถตัดอ้อยเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ระบบควบคุมที่พัฒนา

1.3.3 วัดประเมินปริมาณอ้อยที่สูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อยทั้งกรณีใช้ระบบควบคุมที่พัฒนาและกรณีไม่ใช้ระบบควบคุม

1.3.4 ประเมินความพึงพอใจของผู้ควบคุมรถตัดอ้อยและผู้ขับพาหนะบรรทุก

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สมรรถนะเชิงไร่ในการเก็บเกี่ยวอ้อยด้วยรถตัดอ้อยทั้งกรณีที่ใช้ระบบควบคุมที่พัฒนาและกรณีที่ไม่ใช้ระบบควบคุม กลุ่มเป้าหมาย: เกษตรกร

1.4.2 การขับพาหนะบรรทุกอ้อยที่สามารถวิ่งติดตามรถตัดอ้อยอย่างมีประสิทธิภาพ กลุ่มเป้าหมาย: เกษตรกร

1.4.3 บทความวิชาการระดับชาติ กลุ่มเป้าหมาย: นักวิจัย

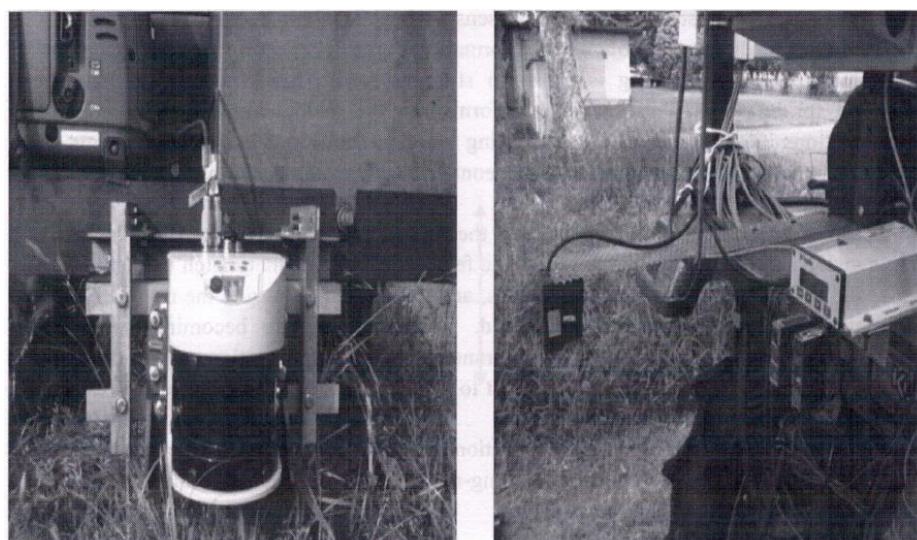
1.4.4 การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ กลุ่มเป้าหมาย: นักวิจัย

1.4.5 พัฒนาประสบการณ์การวิจัยของบุคลากรในหน่วยงานตลอดจนการผลิตนิสิตระดับปริญญาตรีและนิสิตระดับบัณฑิต กลุ่มเป้าหมาย: นักวิจัย

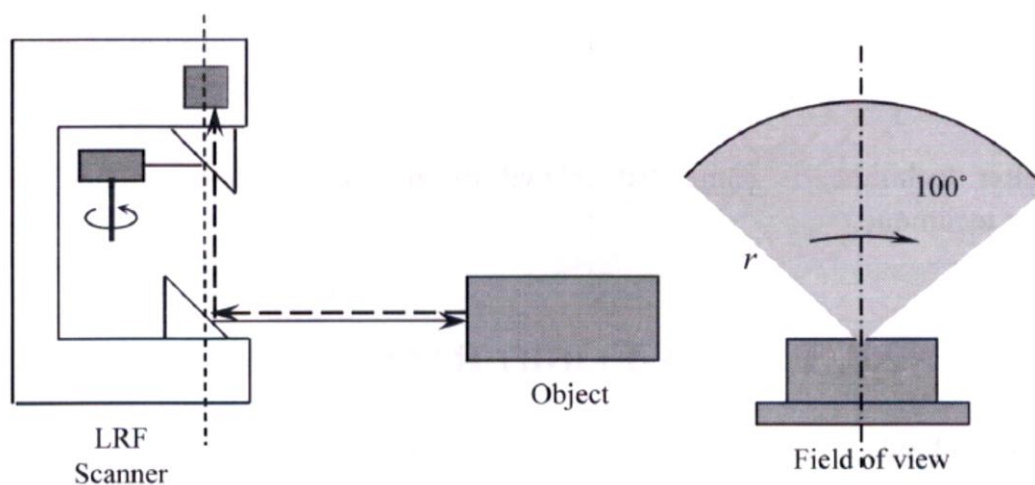
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การนำร่องรถแทรกเตอร์ด้วย Laser range finder

Ahamed et al. (2014) ได้อธิบายถึงหลักการนำร่องรถแทรกเตอร์ไว้หลายหลักการทั้งการใช้ GPS การนำร่องแบบ dead reckoning การใช้ machine vision และหนึ่งในนั้นคือหลักการของ Time-of-flight (TOF) ซึ่งหมายถึงการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ส่งออกไปในรูปของ pulse จนกระทบกับวัตถุและสะท้อนกลับมายังตัวรับ โดยสัญญาณพัลส์นี้จะถูกกำเนิดจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เช่น อัลตราโซนิก คลื่นวิทยุ หรือคลื่นแสง ซึ่งเซนเซอร์ที่นิยมใช้มากในทางการเกษตรชนิดหนึ่งคือ laser range finder ที่นำมาใช้ในการตรวจจับวัตถุและนำร่องรถแทรกเตอร์ทางการเกษตร (รูปที่ 1) ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบในการคำนวณก็คือความเร็วของเสียงในอากาศหรือความเร็วของแสงนั่นเอง ความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่น ความไม่แม่นยำในการตรวจจับสัญญาณ และลักษณะการกระทบของคลื่นกับผิววัตถุ อย่างไรก็ตามหลักการ TOF มีข้อดีคือแนวทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เป็นเส้นตรงและสะท้อนกลับในแนวเดียวกันเข้าสู่ตัวรับ (รูปที่ 2)

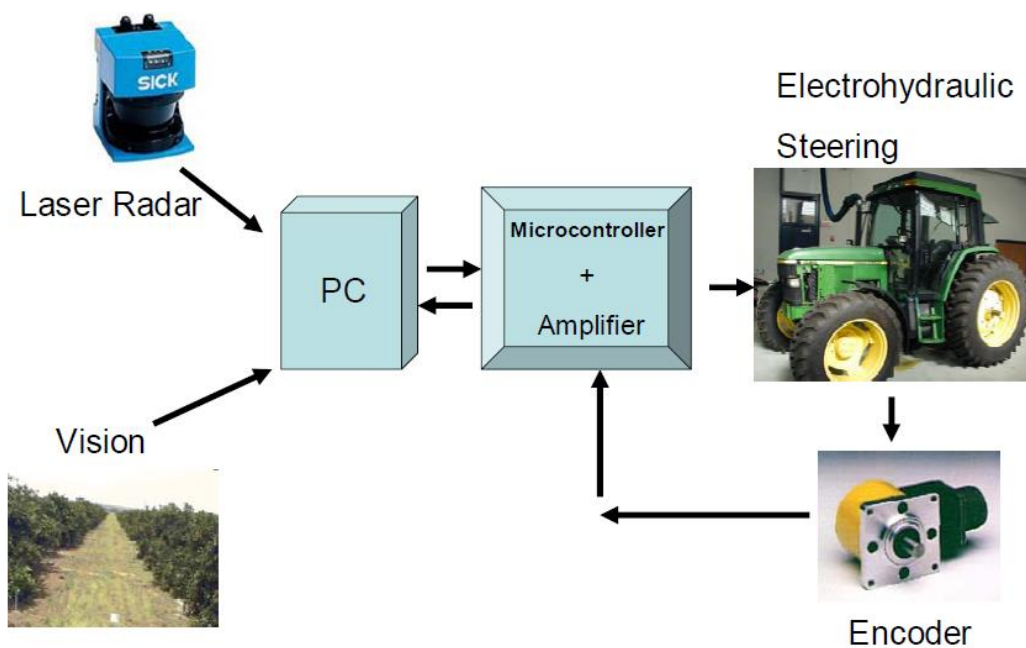


รูปที่ 1 Laser range finder (a) SICK LMS (b) URG 04-LX



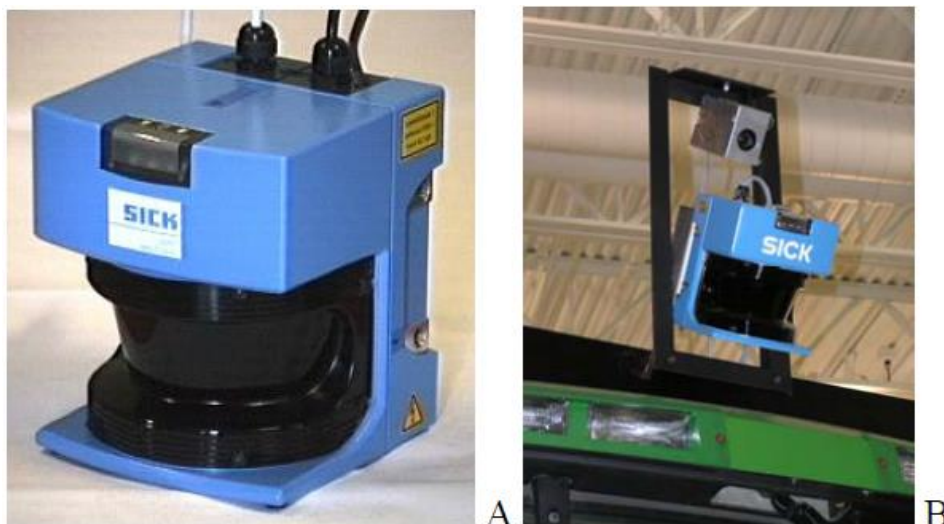
รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Laser range finder

Subramanian (2005) ได้พัฒนาระบบนำร่องรถแทรกเตอร์ John Deere 6410 โดยใช้ laser radar ร่วมกับเทคนิค machine vision ควบคุมด้วย PC คอมพิวเตอร์ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (รูปที่ 3) การโปรแกรมใช้ภาษา Visual C++ ซึ่งอาจมีความล่าช้าของสัญญาณเนื่องจากระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ประมาณ 10–15 ms



รูปที่ 3 ระบบนำร่องรถแทรกเตอร์ที่พัฒนาโดย Subramanian (2005)

Laser radar ที่ใช้เป็นรุ่น SICK LMS 200 (Sick AG, Waldkirch, Germany) ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะกวาดลำแสงเลเซอร์เป็นมุม 180° ในระนาบ ซึ่งสามารถกำหนดช่วงการกวาดมุมได้ที่ละ 1.0, 0.5, และ 0.25° ที่ระดับความแม่นยำของการวัดระยะ 10 mm โดยตัว Laser radar ดังกล่าวนี้นี้มีระยะในการตรวจจับไกล 80 m รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งเลเซอร์บนรถแทรกเตอร์



รูปที่ 4 (A) Sick LMS 200 laser radar (B) การติดตั้งเลเซอร์เซนเซอร์บนหลังการรถแทรกเตอร์

ส่วนเทคนิคในการทดลอง Subramanian (2005) ได้ทดลองให้รถแทรกเตอร์แล่นไปตามแนวกองฟาง โดยให้เลเซอร์เซนเซอร์และกล้องตรวจจับแนวของกองฟาง คอมพิวเตอร์จะประมวลผลภาพกองฟางจากกล้อง แล้วกำหนดแนวเส้นตรงขึ้นสำหรับการนำร่องรถแทรกเตอร์ (รูปที่ 5) ในการตรวจสอบความถูกต้องของการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จะใช้ marker ที่ติดอยู่ท้ายรถทำรอยขีดไปตามเส้นทางที่รถเคลื่อนที่ไป (รูปที่ 6) จากการทดสอบที่ความเร็วรถ 4, 7 และ 10 mph พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.0, 2.8 และ 2.8 cm ตามลำดับ

ในงานวิจัยทำนองเดียวกัน Ahamed et al. (2006a) ได้ใช้ laser range finder ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ต่อพ่วงเพื่อนำทางรถแทรกเตอร์ไปยังอุปกรณ์ที่วางอยู่นั้น ในขณะที่ยังงานวิจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกัน Ahamed et al. (2006b) ใช้ laser range finder ร่วมกับการวาง path การเคลื่อนที่ที่หลากหลายในการนำร่องรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่เข้าใกล้อุปกรณ์ต่อพ่วง และ Ahamed et al. (2009)

สามารถใช้ laser range finder นำร่องรถแทรกเตอร์ไปยังอุปกรณ์ต่อพ่วงและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์โดยอัตโนมัติได้สำเร็จ



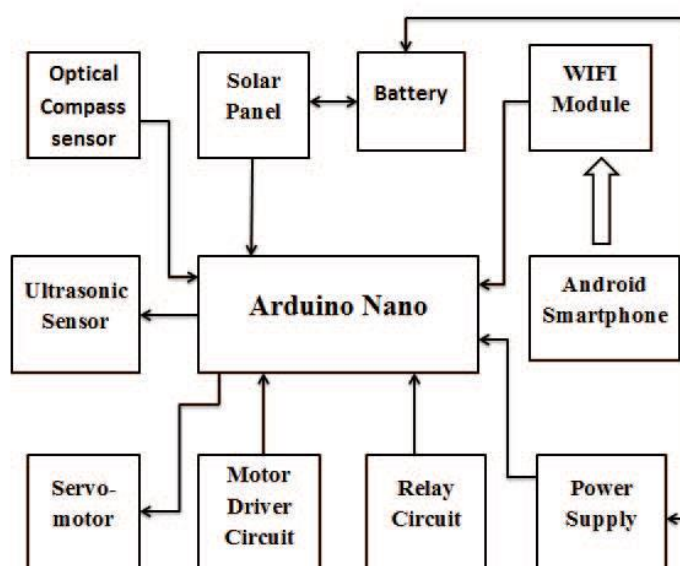
รูปที่ 5 แนวกองฟางสำหรับทดสอบการนำร่องรถแทรกเตอร์



รูปที่ 6 Marker สำหรับทำรอยขีดไปตามแนวการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

3. การใช้เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic sensor) ในการระบุตำแหน่งวัตถุ

Saurabh and Anil (2016) ใช้เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic sensor) และ Digital Compass Sensor ในการตรวจสอบสิ่งกีดขวางและระบุทิศทางของหุ่นยนต์ในแปลง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบของหุ่นยนต์ ซึ่งหุ่นยนต์สามารถถูกควบคุมระยะไกลผ่าน Wi-Fi จาก Android Application รูปที่ 7 แสดง Block Diagram ของระบบ



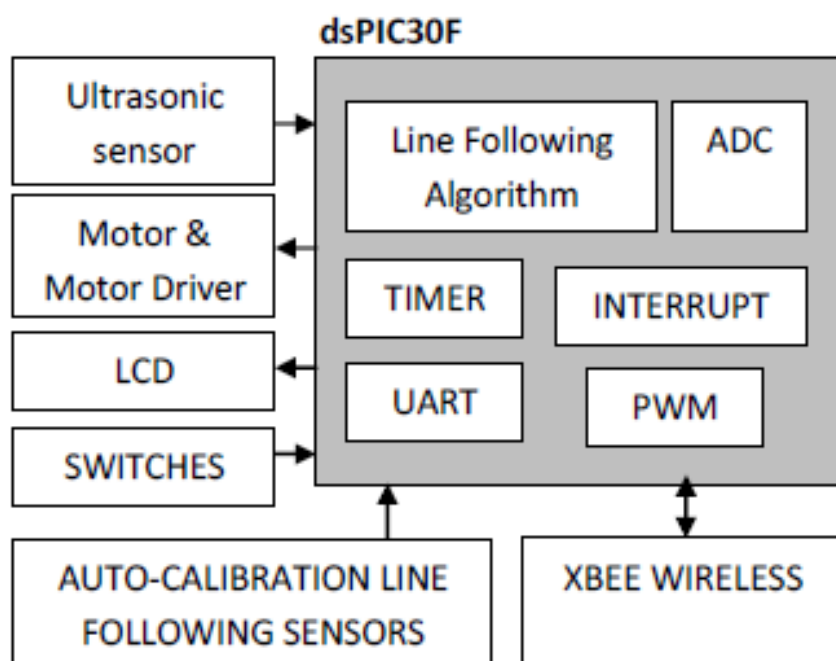
รูปที่ 7 แผนภาพบล็อกของตรวจสอบสิ่งกีดขวางและระบุทิศทางของหุ่นยนต์ในแปลง

Iida et al. (2000) พัฒนาระบบเคลื่อนที่ตามแบบอัตโนมัติของรถเก็บเกี่ยว เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง ถูกใช้วัดระยะทางสัมพัทธ์ระยะห่างระหว่างรถเก็บเกี่ยว ซึ่ง เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง ถูกติดตั้งไว้ที่ชุดเก็บเกี่ยว รูปที่ 8 แสดงการทดสอบวิ่งตามของรถเก็บเกี่ยว

Norashikin et al. (2013) ใช้ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง ในการตรวจจับต้นไม้ในแปลง และ รักษา ระยะห่างระหว่างต้นไม้กับหุ่นยนต์อัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบของหุ่นยนต์ ซึ่ง หุ่นยนต์สามารถถูกควบคุมระยะไกลผ่าน XBEE WIRELESS รูปที่ 9 แสดง Block Diagram ของระบบ



รูปที่ 8 การทดสอบวิ่งตามของรถเก็บเกี่ยว



รูปที่ 9 แผนภาพบล็อกแสดงระบบตรวจจับต้นไม้อัตโนมัติโดยใช้ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง

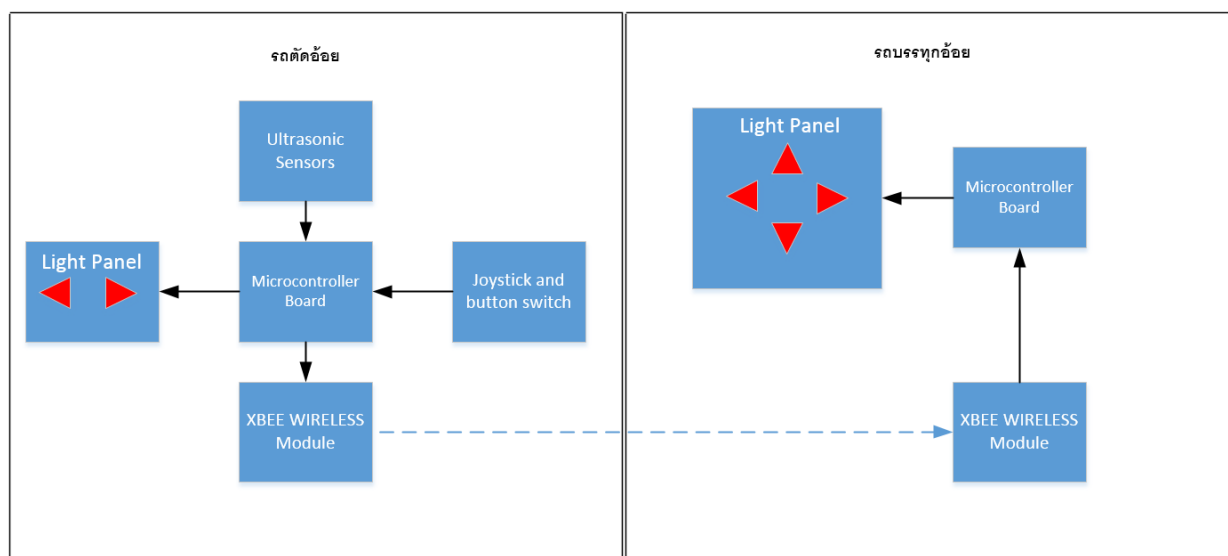
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

3.1.1 หลักการของระบบส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย

การดำเนินโครงการวิจัยแบ่งเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ **ส่วนที่ 1** การสร้างและพัฒนาระบบช่วยบอกทิศทางพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยและ รถตัดอ้อย โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวประมวลผลและแสดงข้อมูลแบบ light panel เพื่อแสดงถึงแนวการขับชี้และช่วยในการตัดสินใจของผู้ขับรถตัดอ้อยและรถบรรทุกอ้อย **ส่วนที่ 2** การทดสอบภาคสนามเพื่อประเมินศักยภาพระบบช่วยบอกทิศทางพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยและรถตัดอ้อย

ส่วนที่ 1 การสร้างและพัฒนาระบบช่วยบอกทิศทางพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยและรถตัดอ้อย รูปที่ 10 แสดงแผนผังบล็อกของระบบช่วยบอกทิศทางที่พัฒนา โดยมีหลักการทำงานของระบบมีหลักการดังนี้



รูปที่ 10 แผนผังบล็อกของระบบช่วยบอกทิศทางพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย และ รถตัดอ้อย

ฝังรถตัดอ้อย

เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูงจะถูกติดตั้ง 2 จุด จุดที่หนึ่ง เพื่อวัดระยะระหว่างโคนต้นอ้อยของแถวถัดไปกับรถตัด โดยข้อมูลนี้จะถูกประมวลผลและแสดงที่ light panel ในรถตัดอ้อย เพื่อที่จะช่วยบอกทิศทางคนขับของรถตัดอ้อยให้อยู่ในแนวร่องระหว่างแนวต้นอ้อย จุดที่สอง วัดระยะระหว่างรถบรรทุกและรถตัดอ้อย ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยข้อมูลนี้จะถูกประมวลผลและส่งผ่าน WIRELESS ไปยังฝังรถบรรทุกอ้อยและแสดงผลที่ light panel เพื่อช่วยกำกับทิศทางคนขับพาหนะบรรทุกให้ควบคุมพาหนะไปซ้ายหรือขวาเพื่อรักษาระยะห่างระหว่างรถบรรทุกและรถตัดอ้อย ซึ่งเซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง จะถูกติดตั้งทั้งสองข้างของรถตัดอ้อย เพื่อรองรับการลำเลียงท่อนอ้อยปล่อยสู่กระบะของพาหนะบรรทุกอ้อยทั้งทางด้านซ้ายและด้านขวา โดยตำแหน่งติดตั้งของเซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง ทั้งสองจุด แสดงในรูปที่ 12



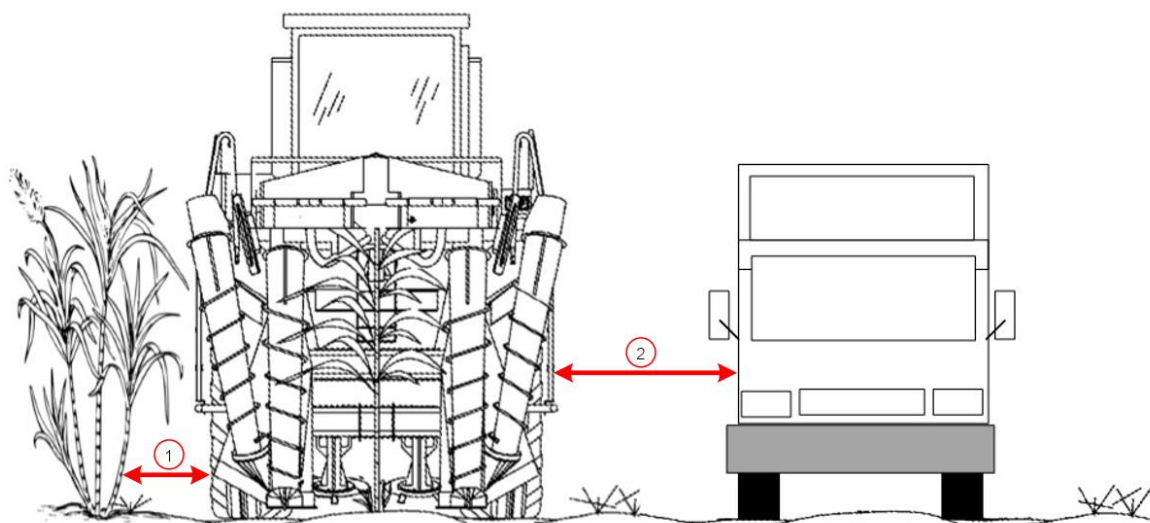
รูปที่ 11 ระยะระหว่างรถบรรทุกและรถตัดอ้อย



รูปที่ 12 ตำแหน่งติดตั้งของ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง ทั้งสองจุด

Joystick and button switch

Joystick จะถูกสั่งการโดยคนขับรถตัดอ้อยเพื่อที่จะส่งสัญญาณต่อไปแสดงที่ light panel ที่อยู่บนรถบรรทุกเพื่อให้คนขับรถบรรทุกขับเร็วขึ้นหรือช้าลง button switch จะมีสามปุ่ม และ ปุ่มแบบเลื่อนซ้าย-ขวา อีก 1 ปุ่ม โดยทั้งสามปุ่ม คนขับรถตัดอ้อยจะเป็นคนกำหนดเพื่อเลือกความกว้างของรถบรรทุก (3 ปุ่ม 3 ขนาด) เช่นกรณี ถ้ารถบรรทุกกว้างมากระยะระหว่างรถบรรทุกและรถตัดอ้อยจะน้อยกว่ารถบรรทุก แคบ ปุ่มแบบเลื่อนซ้าย-ขวา ใช้สำหรับ เลื่อนเพื่อจะเลือกใช้ Ultrasonic Sensor หมายเลข 2 วัดระยะระหว่างรถบรรทุกและรถตัดอ้อยทั้งในกรณีรับท่อนอ้อยทั้งทางด้านซ้ายหรือด้านขวา รูปที่ 13 แสดงการทำงานของ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง เมื่อปุ่มเลื่อนถูกเลื่อนไปทางด้านซ้าย เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง จุดที่สองทางด้านซ้าย จะทำงานเพื่อวัดระยะระหว่างรถบรรทุกทางด้านซ้าย และใช้ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง จุดที่หนึ่งทางด้านขวา เพื่อวัดระยะระหว่างโคนต้นอ้อยของแถวถัดไปกับรถตัด



รูปที่ 13 แสดงการทำงานของ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง กรณีรถบรรทุกอ้อยวิ่งอยู่ด้านซ้ายคนขับรถตัดอ้อย

ฝั่งรถบรรทุกอ้อย

ดำเนินการติดตั้ง light panel ในห้องผู้ขับขี่พาหนะบรรทุกอ้อย ผู้ขับขี่พาหนะบรรทุกอ้อย จะทำหน้าที่สังเกตลักษณะแสงที่ light panel ซึ่งเป็นสัญญาณแสงส่งมาจากผู้ควบคุมรถตัดอ้อย

3.1.2 การประเมินความสามารถในการทำงานเชิงไร่ (Effective field capacity)

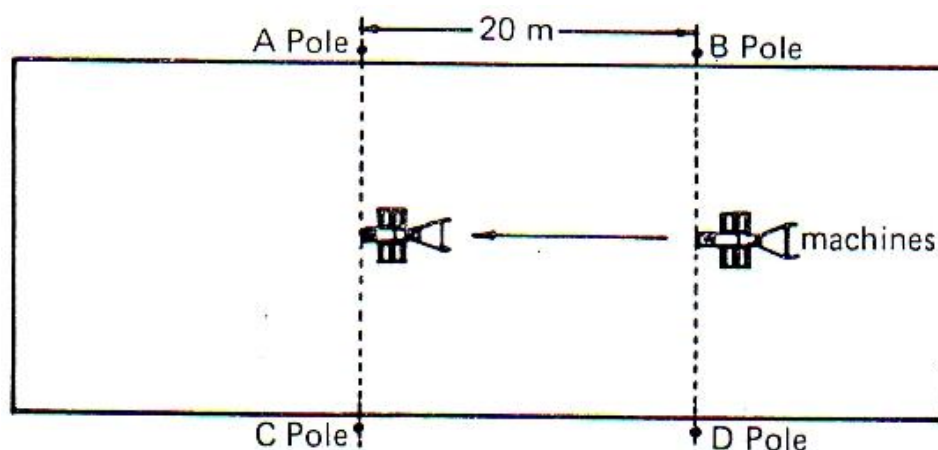
ความสามารถในการทำงานเชิงไร่คำนวณโดยใช้สมการที่ (1) (RNAM test codes, 1983)

$$C = \frac{A}{T_p + T_l} \quad \dots(1)$$

โดยที่ C หมายถึง ความสามารถในการทำงานเชิงไร่ หน่วย: ไร่ต่อชั่วโมง
 A หมายถึง พื้นที่ทดสอบ หน่วย: ไร่
 T_p หมายถึง เวลาที่ได้งาน (production time) หน่วย ชั่วโมง
 T_l หมายถึง เวลาที่ไม่ได้งาน (non-production time) หน่วย ชั่วโมงได้แก่ เวลาที่สูญเสียจากการกลับหัวงาน, เวลาในการปรับแต่งเครื่อง เป็นต้น

3.1.3 การวัดความเร็วการเดินทาง

การวัดความเร็วการทำงานของเครื่องจักรกลในแปลงทดสอบทำได้โดยวัดเวลาการทำงานของเครื่องจักรในช่วงระยะทาง 20 เมตร โดยที่เครื่องจักรเคลื่อนที่เป็นแนวตรงตามแนวแปลงทดสอบ ระยะทาง 20 เมตรจะถูกกำหนดในช่วงกึ่งกลางแปลงทดสอบ ระยะระยะทางด้วยการปักไม้ค้ำ A และ B บริเวณแนวขอบด้านหนึ่งของแปลง และปักไม้ค้ำ C และ D ไว้ที่ขอบแปลงอีกด้านหนึ่ง ไม้ค้ำทั้งสี่อันจะปักในลักษณะสี่เหลี่ยมมุมฉาก บันทึกเวลาที่เครื่องจักรเคลื่อนที่เป็นแนวตรงระยะทาง 20 เมตร จากนั้นคำนวณความเร็วของเครื่องจักร (รูปที่ 14)



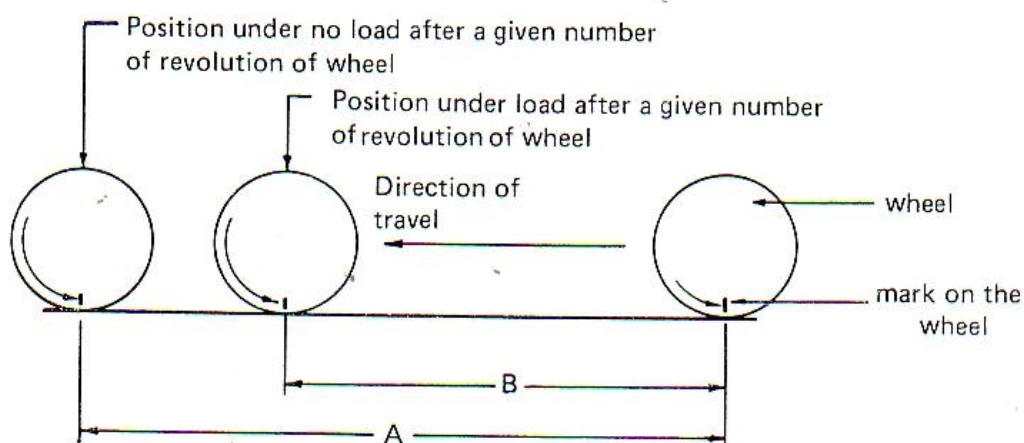
รูปที่ 14 การวัดความเร็วการเดินทาง

3.1.4 การวัดเปอร์เซ็นต์การสิ้นเปลือง

การสิ้นเปลืองของล้อขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์จะเกิดขึ้นในระหว่างการทำงานในแปลง ระยะทางที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าจะลดลง เปอร์เซ็นต์การสิ้นเปลือง บางครั้งถูกเรียกว่า อัตราการลดลงในการเคลื่อนที่ (travel reduction ratio) อย่างไรก็ตามในบางกรณีการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในจำนวนรอบที่กำหนด ระยะทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้น กรณีดังกล่าวปรากฏขึ้น ขณะที่รถแทรกเตอร์ต่อพ่วงกับเครื่องมือไถจอบหมุน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ผลักดันไปรถแทรกเตอร์ไปข้างหน้า เปอร์เซ็นต์การสิ้นเปลืองมีค่าเป็นลบ วิธีที่ใช้ในการวัดการสิ้นเปลืองทำได้โดยทำสัญลักษณ์บนล้อขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ด้วยเทปหรือสีและวัดระยะทางการเคลื่อนที่ วัดระยะทางที่ล้อรถแทรกเตอร์หมุน 5 รอบ ขณะไม่มีโหลดหรืออุปกรณ์ยังไม่ถูกใช้งาน

บนพื้นแปลงทดสอบ (ระยะ A ดังแสดงในรูปที่ 15) และวัดระยะทางที่ล้อรถแทรกเตอร์หมุน 5 รอบ ขณะมี โหลดหรือรถแทรกเตอร์เคลื่อนขณะอุปกรณ์ไถจอบหมุนกำลังไถพรวนดิน (ระยะ B) การระบุระยะทางที่ล้อรถแทรกเตอร์หมุนบนแปลงทดสอบทำได้โดยใช้หมุด (pin) สมการที่ (2) ใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลื่นไถลของล้อรถแทรกเตอร์ ภาพแสดงการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะอุปกรณ์ไถจอบหมุนพรวนดิน (ระยะ B) ถูกแสดงในรูปที่ 15 และรูปที่ 16

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลื่นไถลของล้อ (\%)} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad \dots(2)$$



รูปที่ 15 การวัดการลื่นไถลของล้อรถแทรกเตอร์



รูปที่ 16 การวัดระยะทางขณะอุปกรณ์ไถจอบหมุนพรวนดินในแปลงทดสอบ

3.1.5 ปริมาณการสูญเสียอ้อยในระหว่างการเก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อย

ปริมาณการสูญเสียอ้อยในระหว่างการเก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อยคำนวณได้จากอัตราส่วนน้ำหนักท่อนอ้อยที่สูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยวอ้อย (W_L) เทียบกับน้ำหนักท่อนอ้อยในพาหนะบรรทุก (W_T) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\text{ปริมาณอ้อยที่สูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยว (\%)} = \frac{W_L}{W_T} \times 100 \quad \dots(3)$$

3.1.6 สมรรถนะการทำงาน

คำนวณสมรรถนะการทำงานเชิงไร้สมการที่ (4) (RNAM test codes, 1983)

$$C = \frac{A}{T_p + T_l} \quad \dots(4)$$

โดยที่	C	หมายถึง ความสามารถในการทำงานเชิงไร่ หน่วย: ไร่ต่อชั่วโมง
	A	หมายถึง พื้นที่ทดสอบ หน่วย: ไร่
	T_p	หมายถึง เวลาที่ไถงาน (production time) หน่วย ชั่วโมง
	T_l	หมายถึง เวลาที่ไม่ไถงาน (non-production time) หน่วย ชั่วโมงได้แก่ เวลาที่สูง สูญเสียจากการกลับหัวงาน, เวลาในการปรับแต่งเครื่อง เป็นต้น

3.1.7 ความหนาแน่นสภาพแห้งของดิน (dry bulk density of soil)

สภาพดินในแปลงปลูกอ้อยก่อนการทดสอบสมรรถนะการกำจัดวัชพืชของอุปกรณ์พรวน
คราดสปริง SRT6 ถูกแสดงด้วยค่าความหนาแน่นสภาพแห้งของดินดังแสดงด้วยสมการที่ (5)

$$\rho_w = \frac{M_s}{V_s} \quad \dots(5)$$

โดยที่	ρ_w	หมายถึง ความหนาแน่นสภาพแห้งของดิน หน่วย: กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	M_s	หมายถึง มวลดิน หน่วย: กรัม
	V_s	หมายถึง ปริมาตรดิน หน่วย: ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

3.6 ความชื้นดิน (moisture content of soil: MC)

ปริมาณน้ำในดินในขณะทำการทดสอบสมรรถนะการพรวนกลบวัสดุอ้อยในไร่ แสดงถึงสภาพ
ดินในไร่อ้อย คำนวณด้วยสมการที่ (6)

$$MC = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad \dots(6)$$

โดยที่	MC	หมายถึง ความชื้นดิน หน่วย: % db
	M_s	หมายถึง มวลดิน หน่วย: กรัม
	M_w	หมายถึง มวลน้ำในตัวอย่างดิน หน่วย: กรัม

บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการวิจัย

4.1 ผลการติดต่อเกษตรกรขอความอนุเคราะห์ขอใช้แปลงปลูกอ้อยเพื่อการทดสอบ

คณะวิจัยดำเนินการติดต่อประสานงานกับเกษตรกรเพื่อขอความอนุเคราะห์ใช้แปลงปลูกอ้อยเพื่อการทดสอบอุปกรณ์พรวนกลบใบอ้อยแบบไถงานชนิดใช้กำลังขับเคลื่อนเป็นแปลงปลูกอ้อยที่เก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อย สรุปข้อมูลเบื้องต้นในการติดต่อประสานงานขอความอนุเคราะห์ใช้แปลงทดสอบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พื้นที่ปลูกอ้อยที่จะดำเนินการขอความอนุเคราะห์สำหรับการทดสอบ

ที่ตั้งแปลงปลูกอ้อย	รายละเอียด
1. อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม	- แปลงปลูกอ้อยของ ห้างหุ้นส่วนจำกัด ศรีกำแพงแสนมอเตอร์

4.2 การพัฒนาระบบส่งเสริมการควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย

การพัฒนาระบบส่งเสริมการควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย ได้ดำเนินการทดสอบขั้นต้นในไร่อ้อยพบว่าเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกสามารถตรวจวัดระยะทางระหว่างวัตถุของแข็งและเซ็นเซอร์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำโดยใช้หลักการสะท้อนของคลื่นเสียงกับวัตถุ ปัจจัยเรื่องความเข้มแสงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการวัดของเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้มี 2 รุ่น ได้แก่ รุ่น SICK UM30-213113 (รูปที่ 17ก) และรุ่น SICK UM30-215113 (รูปที่ 18ก) คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ทั้งสองรุ่นถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก ในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ รถตัดอ้อยจะถูกติดตั้งเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่บริเวณส่วนหน้าและสะพานลำเลียงอ้อย (รูปที่ 18)

4.2.1 ทดสอบเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก

ทดสอบเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์กับระยะทางที่วัดได้จริง ผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์รุ่น รุ่น SICK UM30-213113 และรุ่น SICK UM30-215113 ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ถึง ตารางที่ 3 ตามลำดับ เซ็นเซอร์รุ่น SICK UM30-213113 วัดระยะทางอยู่ในช่วงระหว่าง 200 – 1,300 มิลลิเมตร (ระยะทางสูงสุดที่วัดได้ 2,000 มิลลิเมตร) จะถูกนำมา

ติดตั้งไว้ที่ด้านหน้ารถตัดอ้อย (ตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 18) เพื่อตรวจวัดแนวต้นอ้อยดังแสดงในรูปที่ 13 และเซ็นเซอร์รุ่น SICK UM30-215113 วัดระยะทางอยู่ในช่วงระหว่าง 600 – 6,000 มิลลิเมตร (ระยะทางสูงสุดที่วัดได้ 8,000 มิลลิเมตร) จะถูกนำมาติดตั้งที่สายพานลำเลียงท่อนอ้อยของรถตัดอ้อย (ตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 18) เพื่อวัดระยะทางระหว่างรถตัดอ้อยกับรถบรรทุกอ้อยดังแสดงในรูปที่ 13 รายละเอียดคุณสมบัติเซ็นเซอร์ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก



(ก) เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113



(ข) เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก SICK UM30-215113

รูปที่ 16 เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 และรุ่น SICK UM30-215113

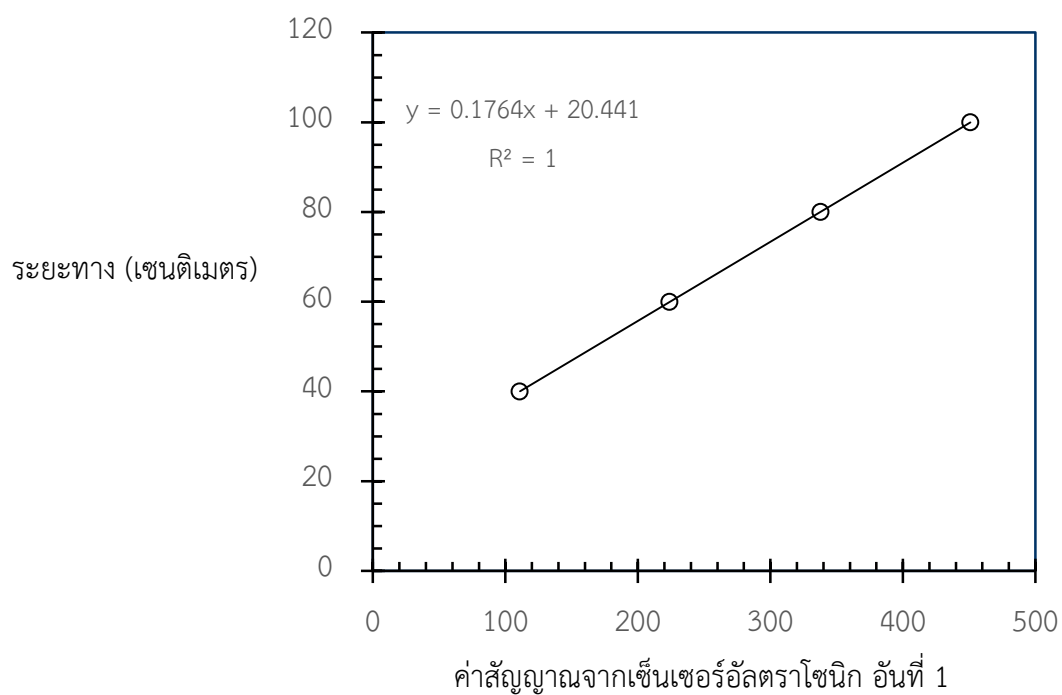


รูปที่ 17 การติดตั้งเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่ส่วนหน้า (ตำแหน่งที่ 1) และสะพานลำเรียงอ้อย (ตำแหน่งที่ 2)

เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกถูกนำมาใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ส่งเสริมการควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย เซ็นเซอร์ดังกล่าวจะต้องนำมาสอบเทียบกับระยะทางที่วัดได้จริง ข้อมูลตัวอย่างแสดงการสอบเทียบเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น UM30-213113 ที่จะนำมาติดตั้งด้านหน้ารถตัดอ้อยทั้งด้านซ้ายและด้านขวาถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 เส้นกราฟการสอบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงและค่าสัญญาณเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกถูกแสดงไว้ในรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 การสอบเทียบค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 อันที่ 1 กับระยะทาง

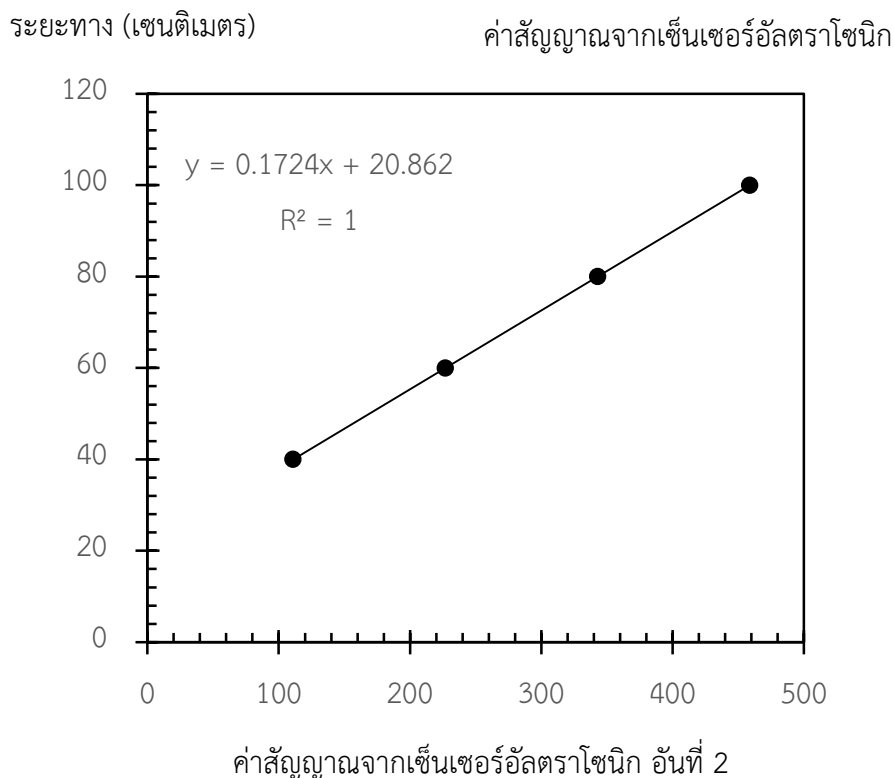
ค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก	ระยะทางจริง
รุ่น SICK UM0-213113	(cm)
111	40
224	60
338	80
451	100



รูปที่ 18 กราฟสอบเทียบเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 อันที่ 1

ตารางที่ 3 การสอบเทียบค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 อันที่ 2 กับระยะทาง

ค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-213113	ระยะทางจริง (cm)
111	40
227	60
343	80
459	100

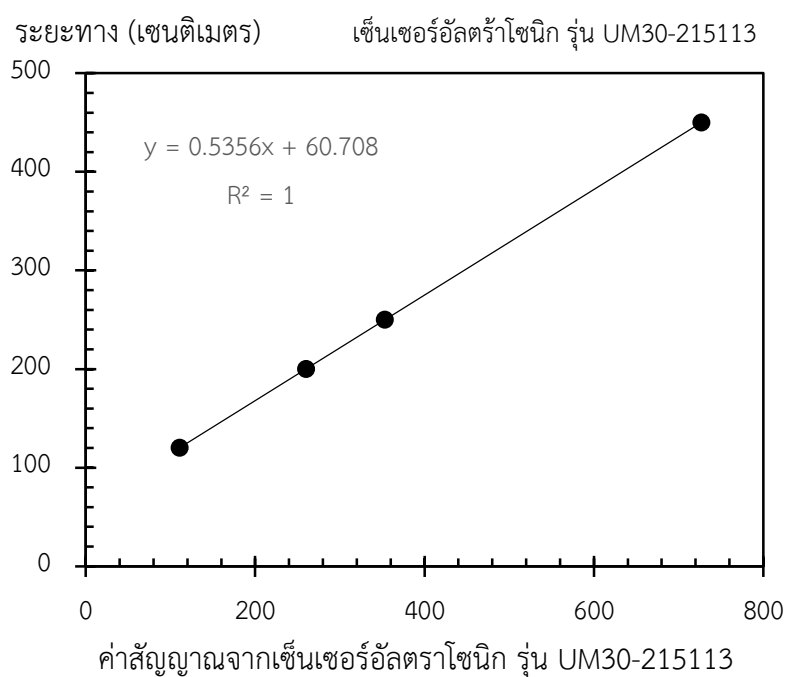


รูปที่ 19 กราฟสอบเทียบเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 อันที่ 2

สำหรับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-215113 (รูปที่ 16ข) สามารถวัดระยะทางได้ในช่วง 60 – 6,000 มิลลิเมตร (ระยะทางที่วัดได้สูงสุด 8,000 มิลลิเมตร) รายละเอียดคุณสมบัติเซ็นเซอร์ถูกแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 2 เซ็นเซอร์ดังกล่าวนี้จะถูกนำมาใช้สำหรับวัดระยะทางระหว่างรถตัดอ้อยและพาหนะบรรทุกอ้อย โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ที่สะพานลำเลียงท่อนอ้อยดังแสดงในรูปที่ 17 เซ็นเซอร์ดังกล่าวจะต้องนำมาสอบเทียบกับระยะทางที่วัดได้จริง ข้อมูลตัวอย่างการสอบเทียบเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น UM30-215113 ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4 และกราฟสอบเทียบเซ็นเซอร์ระหว่างค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกกับระยะทางถูกแสดงด้วยรูปที่ 20

ตารางที่ 4 การสอบเทียบค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-215113 กับระยะทาง

ค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-213113	ระยะทางจริง (cm)
111	120
260	200
353	250
727	450

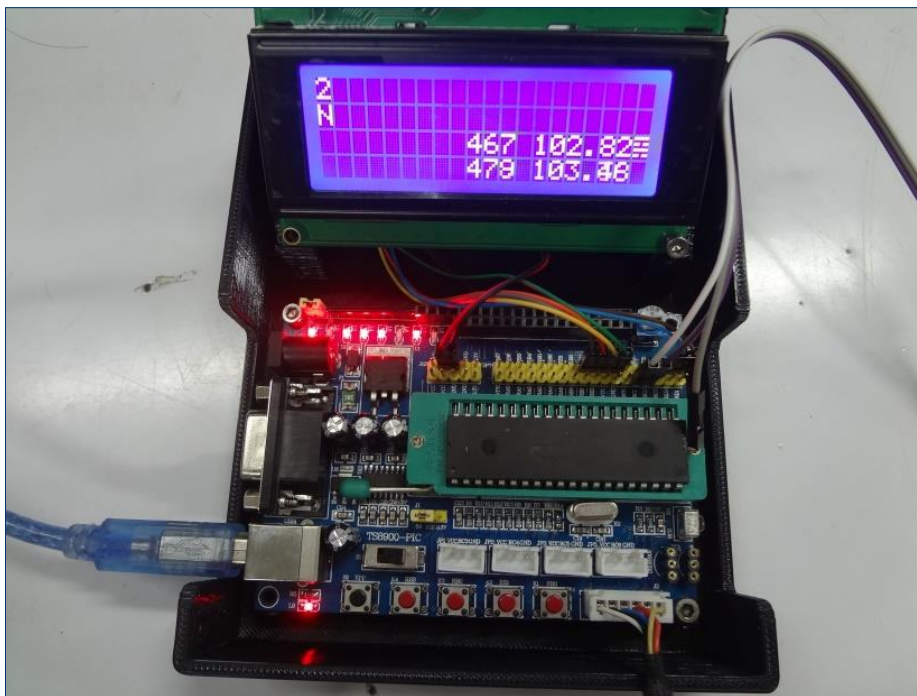


รูปที่ 20 กราฟสอบเทียบเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-215113

4.2.2 ทดสอบเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับติดตั้งบนรถตัดอ้อยเพื่อรับค่าสัญญาณเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก

ทดสอบเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับติดตั้งบนรถตัดอ้อยเพื่อรับค่าสัญญาณเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่ติดตั้งบริเวณด้านข้างเอียงไปทางด้านหน้ารถตัดอ้อยทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของรถตัดอ้อย (ตำแหน่งที่ 1) เพื่อนำค่ามาใช้ในการเขียนฟังก์ชันการตรวจสอบแนวของต้นอ้อยและฟังก์ชันคำนวณหา ระยะห่างระหว่างรถตัดอ้อยกับรถบรรทุกต่อไป รูปที่ 21 แสดงค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณจาก

เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก โดยเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่ 1 จะถูกเลือกให้วัดระยะแนวของต้น
อ้อยทางฝั่งซ้ายหรือขวาของรถตัดอ้อยจากสวิทช์บริเวณแท่นคันบังคับของคนขับรถตัดอ้อย

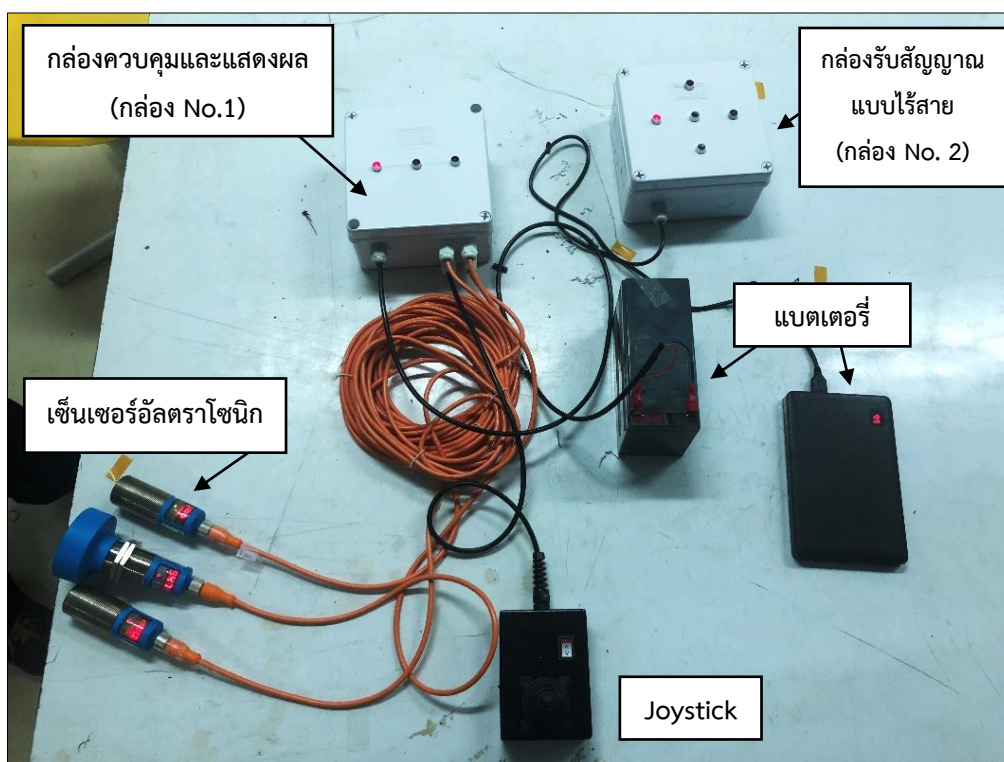


รูปที่ 21 ค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก

4.2.3 ส่วนประกอบอุปกรณ์ส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกัดตามรถตัดอ้อย

รูปที่ 22 แสดงชุดอุปกรณ์ส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกัดตามรถตัดอ้อย ประกอบด้วย 1) เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก 2) กล้องควบคุมและแสดงผล (กล้อง No. 1) 3) กล้องรับสัญญาณแบบไร้สาย (กล้อง No. 2) 4) Joy stick และ 5) แบตเตอรี่

สัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 จะส่งผ่านสายนำสัญญาณไปที่กล้อง
ควบคุมและแสดงผล (กล้อง No.1) ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ในรถตัดอ้อย สัญญาณจะถูกประมวลด้วยโปรแกรมที่



(ก) อุปกรณ์ส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย



(ข) Joystick

รูปที่ 22 (ก) ชุดอุปกรณ์ส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย และ (ข) Joystick

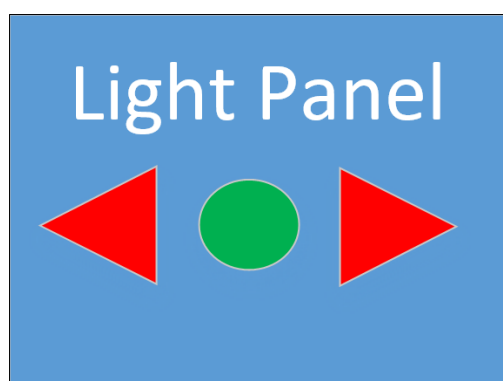
พัฒนาและแสดงผลด้วยหลอดไฟสีเขียวและสีแดง (รายละเอียดการทำงานเขียนอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.4 และในบทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ) คนขับรถตัดอ้อยจะสามารถส่งสัญญาณบอกคนขับรถบรรทุกให้ขับรถบรรทุกวิ่งเลื่อนตำแหน่งในแนวการเก็บเกี่ยวอ้อยเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งรถบรรทุกรับท่อนอ้อยจากสะพานลำเลียงของรถตัดอ้อยโดยใช้อุปกรณ์ Joystick

กล่องรับสัญญาณแบบไร้สาย (กล่อง No. 2) จะถูกติดตั้งไว้บนรถบรรทุกอ้อย ผู้ขับรถบรรทุกจะพยายามขับรถบรรทุกให้สอดคล้องกับการวิ่งของรถตัดอ้อยขณะกำลังเก็บเกี่ยวอ้อย (รายละเอียดการทำงานเขียนอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.4)

4.2.4 ฟังก์ชันการตรวจสอบระยะห่างแนวของต้นอ้อยและระยะห่างระหว่างรถตัดอ้อยกับรถบรรทุก

ออกแบบเขียนฟังก์ชันการตรวจสอบระยะห่างแนวของต้นอ้อยโดยจะนำค่าระยะที่รับจากเซ็นเซอร์ตำแหน่งที่ 1 มาเข้าอัลกอริทึมเพื่อแสดงค่าไปที่หน้าจอไฟแอลอีดีให้คนขับรถตัดอ้อยทราบ หน้าจอไฟแอลอีดีแสดงในรูปที่ 5 จะมีค่าเงื่อนไขดังนี้

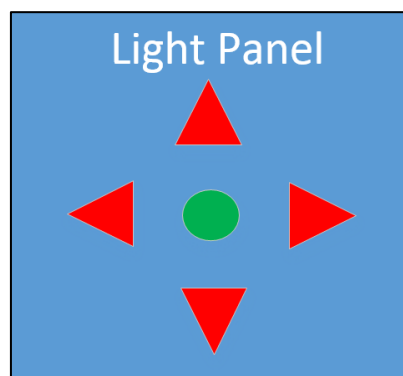
- ถ้าไฟเขียวติดให้คนขับรถตัดรักษาระยะเดิมไว้ หมายถึงรถตัดอ้อยห่างจากแนวต้นอ้อยไม่เกิน 10 เซ็นติเมตร จากค่าที่ตั้งไว้
- ถ้าไฟสีแดงด้านซ้ายและด้านขวาจะมีการแสดง 3 ระดับ ระดับแรกกระพริบช้า หมายถึงรถตัดอ้อยห่างจากแนวต้นอ้อยเกิน 10 เซ็นติเมตร ระดับที่สองกระพริบเร็ว หมายถึงรถตัดอ้อยห่างจากแนวต้นอ้อยเกิน 20 เซ็นติเมตร ระดับที่สามไฟติดค้าง หมายถึงรถตัดอ้อยห่างจากแนวต้นอ้อยเกิน 30 เซ็นติเมตร



รูปที่ 23 รูปแบบหน้าจอไฟแอลอีดีที่กล่องควบคุมและแสดงผล (กล่อง No. 1) ที่ติดตั้งในรถตัดอ้อย

ออกแบบเขียนฟังก์ชันการตรวจสอบระยะห่างระหว่างรถตัดอ้อยกับรถบรรทุก โดยจะนำค่าระยะที่รับจากเซ็นเซอร์ตำแหน่งที่ 2 มาเข้าอัลกอริทึมเพื่อแสดงค่าตำแหน่งที่ได้ส่งไปที่หน้าจอไฟแอลอีดีให้คนขับรถบรรทุกทราบ หน้าจอไฟแอลอีดีของรถบรรทุกแสดงในรูปที่ 24 จะมีค่าเงื่อนไขดังนี้

- ถ้าไฟเขียวติดให้คนขับรถบรรทุกรักษาระยะเดิมไว้ หมายถึงรถบรรทุกห่างจากรถตัดอ้อยไม่เกิน 10 เซนติเมตร จากค่าที่ตั้งไว้
- ถ้าไฟสีแดงด้านซ้ายและด้านขวาจะมีการแสดง 3 ระดับ ระดับแรกกระพริบช้า หมายถึงรถบรรทุกห่างจากรถตัดอ้อยเกิน 10 เซนติเมตร ระดับที่สองกระพริบเร็ว หมายถึงรถบรรทุกห่างจากรถตัดอ้อยเกิน 20 เซนติเมตร ระดับที่สามไฟติดค้าง หมายถึงรถบรรทุกห่างจากรถตัดอ้อยเกิน 30 เซนติเมตร



รูปที่ 24 รูปแบบหน้าจอไฟแอลอีดีที่กล่องรับสัญญาณแบบไร้สาย (กล่อง No. 2) ที่ติดตั้งในห้องคนขับรถบรรทุก

4.2.5 การออกแบบเขียนฟังก์ชันเพื่อรับสัญญาณจากคันบังคับสำหรับบอกให้คนขับรถบรรทุกขับเร็วขึ้นหรือช้าลง

ออกแบบเขียนฟังก์ชันเพื่อรับสัญญาณจากคันบังคับสำหรับบอกให้คนขับรถบรรทุกขับเร็วขึ้นหรือช้าลง โดยจะนำค่าระยะที่รับจากเซ็นเซอร์คันบังคับ มาเข้าอัลกอริทึมเพื่อแสดงค่าตำแหน่งที่ได้ส่งไปที่หน้าจอไฟแอลอีดีให้คนขับรถบรรทุกทราบ หน้าจอไฟแอลอีดีด้านบนและด้านล่าง แสดงในรูปที่ 24 จะมีค่าเงื่อนไขดังนี้

- ไฟเขียวติดให้คนขับรถตัดรักษาความเร็วเดิมไว้

- ไฟสีแดงด้านบนและด้านล่างจะมีการแสดง 2 ระดับ ระดับแรกไฟกระพริบ หมายถึงให้คนขับรถบรรทุกค่อยๆเพิ่มหรือลดความเร็ว ระดับที่สองติดค้าง หมายถึงให้คนขับรถบรรทุกเพิ่มหรือลดความเร็ว

โปรแกรมภาษาซีที่เขียนมีดังนี้

```
#include<16F877A.h>

#fuses
HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NOBROWNOUT,NODEBUG,NOWRT,NOPUT,NOCPU

#device ADC=10

#use delay (clock=6M)

#include <stdlib.h>

#include <lcd420_18F458_D2_D7.c>

#use rs232 (baud=9600, parity=N , xmit=PIN_C7, rcv=PIN_C6 )


float A,Ap;
char B;
int16 value;


char Led_all[2]={pin_D0,pin_D1};


char sensor_pin[2]={pin_A0,pin_A1};
char dip_sw[2]={pin_B6,pin_B7};
char left_righ_sw=pin_B5;


int1 state_tim0=0;


int16 state_tim_speed=0;
int16 Array_time_led[4]={25,50,100,2};


int1 led_selec=0;
int count_state=0;


int8 neu_range[4]={60,80,100,120};
```

```

int8 max_min_neu[4]={5,10,20,40};
char dip_state=0;

#INT_TIMER0
void tim_0()
{
    if(state_tim_speed>Array_time_led[count_state])
    {
        if(state_tim0==0)
        {
            output_high(Led_all[led_selec]);
            state_tim0=1;
        }
        else
        {
            output_low(Led_all[led_selec]);
            state_tim0=0;
        }
        state_tim_speed=0;
        return ;
    }
    state_tim_speed++;
}

void main()
{
    delay_ms(500);
    //dip check
    if(input(dip_sw[0]) == 0 && input(dip_sw[1]) ==0)
        dip_state=0;
    else if(input(dip_sw[0]) == 1 && input(dip_sw[1]) ==0)
        dip_state=1;
    else if(input(dip_sw[0]) == 1 && input(dip_sw[1]) ==1)
        dip_state=2;
}

```

```

else
    dip_state=3;
//ini lcd display

lcd_init();
lcd_gotoxy(1,1);
//lcd_putc("Running...\n");

//set port analog
setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
//set_adc_channel(0);

//set Display adc
/*
lcd_gotoxy(1,3);
printf(lcd_putc,"adc1 =");
lcd_gotoxy(1,4);
printf(lcd_putc,"adc2 =");
lcd_gotoxy(8,2);
printf(lcd_putc,"adc distance");
*/
//set timer0
set_timer0(0);
setup_counters( RTCC_INTERNAL,7);
enable_interrupts(INT_RTCC);
enable_interrupts(GLOBAL)
;
int16 i =0;
while(True)
{
    lcd_gotoxy(7,3);
    A=0;
    if(input(left_righ_sw))

```

```

{
    set_adc_channel(0);
    delay_ms(10);

    for(i = 0 ;i<1000 ;i++)
    {
        A =A + read_adc();
    }
    A=A/1000;
    Ap=(A*.1764+20.353);
    printf(lcd_putc,"%6.0f %6.2f\r",A,Ap);
    //printf("%6.0f %6.2f\r",A,Ap);
    //printf("sensor 1 = %4.0f\n",A);
    //printf("%4.0f\r",A);
}
else
{
    set_adc_channel(1);
    delay_ms(10);

    for(i = 0 ;i<1000 ;i++)
    {
        A =A + read_adc();
    }
    A=A/1000;
    Ap=(A*.1724+20.862);
    //printf("%6.0f %6.2f\r",A,Ap);
    lcd_gotoxy(7,4);
    printf(lcd_putc,"%6.0f %6.2f",A,Ap);
    //printf("sensor 2 = %4.0f\n",A);
    //printf("%4.0f\r",A);
}

```

```

        if(Ap>=(neu_range[dip_state]-max_min_neu[0]) && Ap <
(neu_range[dip_state]+max_min_neu[0]))
        {

            count_state=0;
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc,"N ");
        }

        else if(Ap>=(neu_range[dip_state]+max_min_neu[0]) && Ap <
(neu_range[dip_state]+max_min_neu[1]))
        {
            count_state=0;
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc,"L1");
        }

        else if(Ap>=(neu_range[dip_state]+max_min_neu[1]) && Ap <
(neu_range[dip_state]+max_min_neu[2]))
        {
            count_state=1;
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc,"L2");
        }

        else if(Ap>=(neu_range[dip_state]+max_min_neu[2]))
        {
            count_state=2;
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc,"L3");
        }

        else if(Ap<=(neu_range[dip_state]-max_min_neu[0]) && Ap >
(neu_range[dip_state]-max_min_neu[1]))
        {
            count_state=0;
            lcd_gotoxy(1,2);

```

```

        printf(lcd_putc,"R1");
    }
    else if(Ap<=(neu_range[dip_state]-max_min_neu[1]) && Ap >
(neu_range[dip_state]-max_min_neu[2]))
    {
        count_state=1;
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc,"R2");
    }
    else if(Ap<=(neu_range[dip_state]-max_min_neu[2]))
    {
        count_state=2;
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc,"R3");
    }

    // analog switch
    set_adc_channel(3);
    delay_ms(10);
    lcd_gotoxy(1,1);
    for(i = 0 ;i<1000 ;i++)
    {
        A =A + read_adc();
    }
    A=A/1000;
    if (A>=0 && A<=30)
    {
        printf(lcd_putc,"0");
    }
    else if(A>30 && A<=411)
    {
        printf(lcd_putc,"1");
    }
    else if(A>411 && A<=611)

```

```

{
    printf(lcd_putc,"2");
}
else if(A>611 && A<=993)
{
    printf(lcd_putc,"3");
}
else if(A>993 && A<=1023)
{
    printf(lcd_putc,"4");
}
}
}

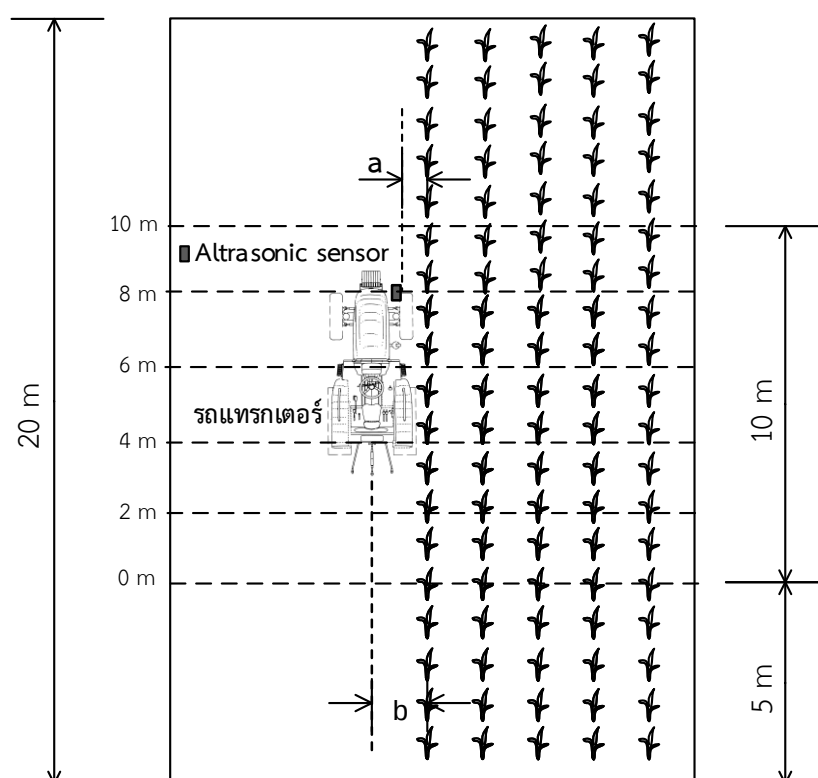
```

4.3 การประเมินความแม่นยำของอุปกรณ์สนับสนุนคนขับรถแทรกเตอร์ในการควบคุมแนวการขับ

ในขั้นตอนอุปกรณ์สนับสนุนการตัดสินใจของคนขับรถตัดอ้อยเพื่อช่วยในการควบคุมแนวการขับรถตัดอ้อยที่ถูกพัฒนานั้นจะถูกนำไปทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำในการแสดงผล โดยติดตั้งกล่องควบคุมและแสดงผล (กล่อง no.1) และเซนเซอร์อัลตราโซนิกบนรถแทรกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 25 ดำเนินการทดสอบที่ค่าเฉลี่ยความเร็วการเดินทาง 1.22 1.90 3.15 และ 4.40 km/h และทดสอบที่ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) 50 100 และ 150 cm โดยที่ระยะ a ทั้งสามระยะจะถูกกำหนดและจัดบันทึกในอัลกอริทึมและผู้ใช้สามารถระยะ a ทั้งสามระยะด้วยการปรับตำแหน่งสวิทช์ในกล่องควบคุม (กล่อง no.1) ทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 26 ทำการทดสอบที่แต่ละเงื่อนไขจำนวน 3 ซ้ำ การประเมินความแม่นยำของเซนเซอร์อัลตราโซนิกจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะทาง b นั่นคือ ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (รูปที่ 27) ในแต่ละการทดสอบรถแทรกเตอร์จะวิ่งเป็นระยะทาง 20 m โดยวัดระยะ b ทุก 2 เมตร รวมระยะทาง 10 เมตร รายละเอียดเงื่อนไขการทดสอบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5 รูปที่ 28 แสดงการวัดระยะทาง b ในการทดสอบภาคสนาม



รูปที่ 25 ลักษณะการติดตั้งกล่องควบคุมและแสดงผล (กล่อง no.1) บนรถแทรกเตอร์



รูปที่ 26 แสดงลักษณะการวัดระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) และระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b)



รูปที่ 27 แสดงอุปกรณ์โรยแป้งแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์

ตารางที่ 5 เงื่อนไขการทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำของอุปกรณ์สนับสนุนคนขับรถตัดอ้อยในการควบคุมแนวการขับ

ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) หน่วย cm	ความเร็วการเดินทางของรถแทรกเตอร์ (km/h)	จำนวนซ้ำการทดลอง
50	1.22	3
	1.90	
	3.15	
	4.43	
100	1.90	3
	3.15	
	4.43	
150	1.90	3

ผลการทดสอบ (ตารางที่ 6) แสดงให้เห็นว่าที่เงื่อนไขระยะระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับแนวต้นอ้อย (ระยะ a) 50 cm และความเร็วการเดินทางเฉลี่ย 1.22 1.90 3.15 และ 4.40 km/h พบว่าค่าเฉลี่ยรวมระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) เท่ากับ 1.03 1.04 1.01 และ 1.02 เมตร ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.03 0.03 0.03 และ 0.04 ตามลำดับ

ขณะที่เงื่อนไขระยะระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับแนวต้นอ้อย (ระยะ a) 100 cm และความเร็วการเดินทางเฉลี่ย 1.90 3.15 และ 4.40 km/h (ตารางที่ 7) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยรวมระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) เท่ากับ 1.52 1.53 และ 1.53 เมตร ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.05 0.07 และ 0.06 ตามลำดับ

และที่เงื่อนไขระยะระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับแนวต้นอ้อย (ระยะ a) 150 cm และความเร็วการเดินทางเฉลี่ย 1.90 km/h (ตารางที่ 7) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยรวมระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) เท่ากับ 1.78 เมตร และค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.19

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับแนวต้นอ้อยมากขึ้นความแม่นยำในการส่งสัญญาณของกล่อง no.1 ลดลงโดยพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับแนวต้นอ้อยมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ระยะระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับแนวต้นอ้อย (ระยะ a) ที่เหมาะสมและถูกนำมาประยุกต์ใช้กับรถตัดอ้อยคือ 50 cm ซึ่งพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระยะ a ขนาด 100 และ 150 cm นอกจากนั้นผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าในช่วงความเร็วการเดินทางของรถแทรกเตอร์ 1.22 ถึง 4.40 km/h ไม่มีผลต่อความแม่นยำในการส่งสัญญาณของกล่อง no.1 เห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างเซนเซอร์กับวัตถุถือเป็นปัจจัยสำคัญ

ตารางที่ 6 ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) ในการทดสอบที่ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) 50 cm

ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) เท่ากับ 50 cm					
ความเร็วการเดินทางรถแทรกเตอร์	ตำแหน่งบันทึกข้อมูล	ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) หน่วย cm			
		ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	
1.22	0 m	1.05	1.04	0.98	
	2 m	1.02	1.05	1.03	
	4 m	1.03	1.06	1.06	
	6 m	0.96	1.08	1.00	
	8 m	1.05	1.00	1.01	
	10 m	1.07	1.02	0.99	
	ค่าเฉลี่ย	1.03	1.04	1.01	1.03
	S.D.	0.04	0.03	0.03	0.03
1.90	0 m	1.02	1.07	0.96	
	2 m	1.04	1.05	0.98	
	4 m	1.03	1.00	1.03	
	6 m	1.07	1.02	1.06	
	8 m	1.04	1.09	1.07	
	10 m	1.07	1.02	1.04	
	ค่าเฉลี่ย	1.05	1.04	1.02	1.04
	S.D.	0.02	0.03	0.04	0.03
3.15	0 m	1.01	1.04	0.93	
	2 m	1.06	0.98	0.95	
	4 m	1.01	1.00	0.99	
	6 m	1.01	0.97	1.02	
	8 m	1.01	1.02	1.01	
	10 m	1.03	1.05	1.01	
	ค่าเฉลี่ย	1.02	1.01	0.99	1.01
	S.D.	0.02	0.03	0.03	0.03
4.40	0 m	0.97	0.99	1.03	
	2 m	1.03	1.04	1.07	
	4 m	1.03	1.02	1.09	
	6 m	0.96	1.00	1.01	
	8 m	1.09	0.98	1.03	
	10 m	1.00	1.03	1.05	
	ค่าเฉลี่ย	1.01	1.01	1.05	1.02
	S.D.	0.04	0.02	0.03	0.04

ตารางที่ 7 ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) ในการทดสอบที่ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) 100 cm และ 150 cm

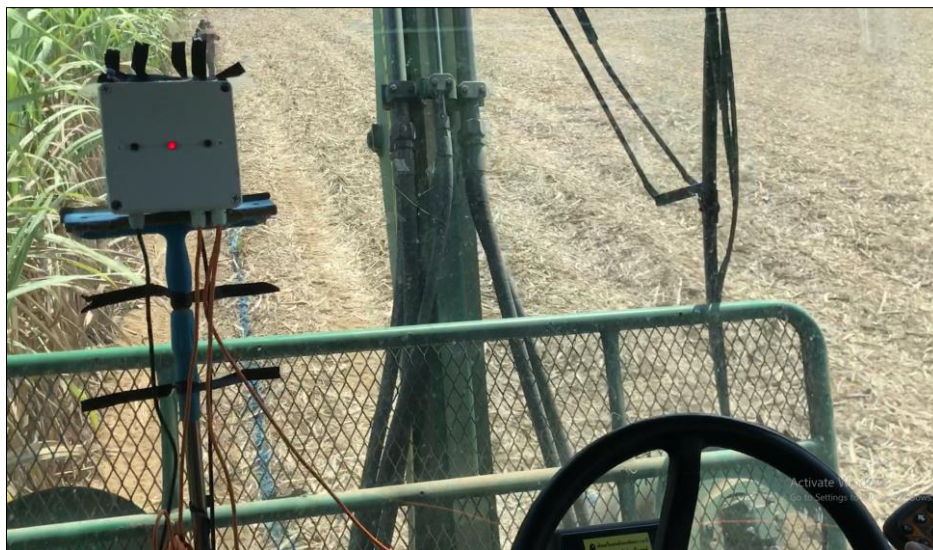
ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) เท่ากับ 100 cm					
ความเร็วการเดินทางรถแทรกเตอร์	ตำแหน่งบันทึกข้อมูล	ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) หน่วย เมตร			
		ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	
1.93	0 m	1.54	1.42	1.40	
	2 m	1.49	1.48	1.51	
	4 m	1.53	1.59	1.60	
	6 m	1.48	1.55	1.48	
	8 m	1.52	1.58	1.57	
	10 m	1.55	1.53	1.53	
	ค่าเฉลี่ย	1.52	1.53	1.52	1.52
	S.D.	0.03	0.06	0.06	0.05
3.15	0 m	1.55	1.53	1.58	
	2 m	1.5	1.56	1.63	
	4 m	1.46	1.51	1.43	
	6 m	1.57	1.57	1.47	
	8 m	1.56	1.60	1.59	
	10 m	1.40	1.42	1.65	
	ค่าเฉลี่ย	1.51	1.53	1.56	1.53
	S.D.	0.06	0.06	0.08	0.07
4.40	0 m	1.45	1.57	1.61	
	2 m	1.59	1.45	1.52	
	4 m	1.48	1.55	1.48	
	6 m	1.55	1.53	1.41	
	8 m	1.55	1.58	1.57	
	10 m	1.51	1.57	1.64	
	ค่าเฉลี่ย	1.52	1.53	1.63	1.53
	S.D.	0.05	0.04	0.08	0.06
ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) เท่ากับ 150 cm					
1.90	0 m	2.00	2.1	1.88	
	2 m	1.87	1.95	1.92	
	4 m	1.72	1.88	2.11	
	6 m	1.65	1.48	1.89	
	8 m	1.65	1.55	1.65	
	10 m	1.58	1.61	1.58	
	ค่าเฉลี่ย	1.75	1.76	1.84	1.78
	S.D.	0.15	0.23	0.18	0.19



รูปที่ 28 แสดงวิธีการวัดระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) ในแต่ละการทดลอง

4.4 การประเมินความแม่นยำของอุปกรณ์สนับสนุนคนขับรถตัดอ้อยในการควบคุมแนวการขับ

อุปกรณ์สนับสนุนการควบคุมรถตัดอ้อยที่ถูกพัฒนาขึ้นมานี้จะถูกนำมาติดตั้งไว้ในห้องคนขับรถตัดอ้อย (รูปที่ 29 ก) และติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกไว้บนรถตัดอ้อยที่ตำแหน่งระหว่างด้านหลังชุดโน้มต้นอ้อยกับล้อหน้าของรถตัดอ้อยทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของรถตัดอ้อย (รูปที่ 29 ข) โดยติดตั้งให้เซนเซอร์อยู่ห่างจากแนวต้นอ้อย 50 cm ประเมินความแม่นยำโดยการทดสอบที่ความเร็วการเดินทาง 4.65 km/h (ความเร็วการเดินทางของรถตัดอ้อยที่เกษตรกรใช้ในการเก็บเกี่ยวอ้อย) และ 5.12 km/h แต่ละเงื่อนไขทำการทดสอบ 4 ครั้ง รถตัดอ้อยวิ่งเป็นระยะทาง 50 m และทำการวัดระยะระหว่างแนวการวิ่งของรถตัดอ้อยกับแนวต้นอ้อย (ระยะ b) รวมระยะทาง 16 เมตร



(ก) ลักษณะการติดตั้งกล่อง no.1 ในห้องคนขับรถตัดอ้อย



(ข) การติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกบนรถตัดอ้อยที่ตำแหน่งระหว่างชุดโน้มต้นอ้อยกับล้อรถตัดอ้อย

รูปที่ 29 การติดตั้งอุปกรณ์บนรถตัดอ้อย

ตารางที่ 8 ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) ในการทดสอบที่ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) 50 cm

ความเร็วการเดินทาง ของรถตัดอ้อย (km/h)	ตำแหน่ง บันทึกข้อมูล	ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่ง ของรถตัดอ้อย (ระยะ b) หน่วย เมตร				
		ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ซ้ำที่ 4	
4.65 (ความเร็วการ เดินทางของรถตัด อ้อยขณะเก็บเกี่ยว อ้อย)	0 m	1.21	1.11	1.08	1.22	ค่าเฉลี่ยรวม
	2 m	1.10	1.10	1.17	1.1	
	4 m	1.13	1.06	1.18	1.13	
	6 m	1.09	1.11	1.19	1.15	
	8 m	1.15	1.17	1.11	1.19	
	10 m	1.17	1.18	1.14	1.16	
	12 m	1.08	1.13	1.16	1.14	
	14 m	1.11	1.09	1.2	1.17	
	16 m	1.17	1.15	1.21	1.11	
	18 m	1.06	1.2	1.13	1.25	
	20 m	1.03	1.06	1.12	1.18	
	ค่าเฉลี่ย	1.12	1.12	1.15	1.16	1.14
	S.D.	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05
5.12	0 m	1.18	1.09	1.19	1.26	ค่าเฉลี่ยรวม
	2 m	1.09	1.15	1.2	1.13	
	4 m	1.09	1.2	1.16	1.09	
	6 m	1.14	1.23	1.15	1.2	
	8 m	1.13	1.1	1.13	1.13	
	10 m	1.16	1.13	1.09	1.26	
	12 m	1.17	1.16	1.16	1.2	
	14 m	1.18	1.19	1.13	1.14	
	16 m	1.19	1.25	1.25	1.11	
	18 m	1.16	1.17	1.21	1.27	
	20 m	1.09	1.14	1.25	1.14	
	ค่าเฉลี่ย	1.14	1.16	1.17	1.18	1.16
	S.D.	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05

ตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วการเดินทางของรถตัดอ้อย 4.65 และ 5.12 km/h ค่าเฉลี่ยระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับแนวการวิ่งของรถตัดอ้อย (ระยะทาง b) เท่ากับ 1.14 และ 1.16 m ตามลำดับ โดยทั้งสองความเร็วการเดินทางมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.05 แสดงให้เห็นว่าในช่วงความเร็วการเดินทางของรถตัดอ้อย 4.65 km/h ถึง 5.12 km/h ไม่ส่งผลทำให้ความแม่นยำในการวัดระยะทางของเซนเซอร์ลดลง อีกทั้งกล่องควบคุมก็ยังสามารถประมวลผลได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

การทดสอบแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์สนับสนุนคนขับเพื่อช่วยในการควบคุมแนวการวิ่งของรถตัดอ้อยนั้นไม่ส่งผลต่อความเร็วการเก็บเกี่ยวของรถตัดอ้อย โดยในการทำงานจริงเซนเซอร์อัลตราโซนิก 1 ชุดจะถูกติดตั้ง ณ ตำแหน่งสะพานลำเลียงท่อนอ้อย ในโครงการวิจัยได้กำหนดเงื่อนไขระยะห่างระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิก 50 เซนติเมตร เพื่อส่งสัญญาณไปยังกล่องรับสัญญาณบนรถบรรทุกอ้อยเพื่อรักษา ระยะห่างระหว่างรถบรรทุกกับรถตัดอ้อยไว้ให้คงที่ ซึ่งในระหว่างการเก็บเกี่ยวอ้อยผู้วิจัยไม่สามารถบันทึก ระยะห่างระหว่างรถตัดอ้อยกับรถบรรทุกขณะปฏิบัติงานจริงได้

ในการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก 50 เซนติเมตร เป็นระยะที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานจริงเนื่องจากติดตั้งเซนเซอร์ใกล้กับแนวต้นอ้อยมากเกินไปอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซนเซอร์ อีกทั้งจากการทดสอบพบว่าการติดตั้งเซนเซอร์ที่ระยะดังกล่าวนั้น ชุดโน้มต้นอ้อยของรถตัดอ้อยจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เซนเซอร์สัมผัสกับต้นอ้อย

การดำเนินงานวิจัยระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์อัลตราโซนิกสามารถนำประยุกต์ใช้ในการตรวจจับแนวต้นอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เซนเซอร์อัลตราโซนิกวัดระยะทางได้แม่นยำแม้ในสภาวะการเก็บเกี่ยวอ้อยในสภาวะจริงที่มีทั้งใบอ้อยและฝุ่นละอองโดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยระยะระหว่างเซนเซอร์กับแนวต้นอ้อยที่ใกล้เคียงกัน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ) อย่างไรก็ตามผู้วิจัยพบว่าเซนเซอร์อัลตราโซนิกมีราคาค่อนข้างสูงซึ่งส่งผลต่อต้นทุนในการสร้างระบบดังกล่าว แต่หากในอนาคตสามารถพัฒนาต่อยอดโดยการสร้างมอนิเตอร์ควบคุมและแสดงผลการควบคุมทั้งรถตัดอ้อยและรถบรรทุกก็จะทำให้ระบบที่พัฒนามีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น หรือหากสามารถพัฒนาอัลกอริทึมที่มีความสามารถสูงผนวกกับการใช้เซนเซอร์อื่น ๆ ที่มีราคาถูกลงก็อาจส่งผลทำให้ระบบนี้มีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการวิจัย

สรุปผลการดำเนินโครงการวิจัย “ระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย”

1. ระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อยที่ถูกพัฒนาโดยการประยุกต์ใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกนั้นสามารถตรวจวัดแนวตันอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่พัฒนาสามารถแสดงผลในลักษณะหลอดไฟกระพริบทั้งในกรณีการควบคุมแนวการวิ่งของรถตัดอ้อยและการควบคุมระยะห่างระหว่างชุดสายพานลำเลียงอ้อยกับกระบะบรรทุกอ้อย
2. ความเร็วการเดินทางของยานพาหนะทั้งกรณีรถแทรกเตอร์และรถตัดอ้อยภายใต้สภาพไร้อ้อยไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการวัดระยะทางของเซนเซอร์อัลตราโซนิก
3. ระยะห่างระหว่างแนวตันอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิกเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการวัดระยะทางของเซนเซอร์อัลตราโซนิกโดยพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแนวตันอ้อยเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความถูกต้องในการวัดระยะลดลง
4. ในการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าระยะระหว่างแนวตันอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก 50 เซนติเมตรเป็นระยะที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานจริง

บรรณานุกรม

- Ahamed, T., Takigawa, T., Koike, M., Honma, T., Hasegawa, H., Zhang, Q. 2006a. Navigation using a laser range finder for autonomous tractor (part 1): Positioning of implement. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 68(1): 68 – 77.
- Ahamed, T., Takigawa, T., Koike, M., Honma, T., Hasegawa, H., Zhang, Q. 2006b. Navigation using a laser range finder for autonomous tractor (part 1): Navigation for approach composed of multiple paths. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 68(1): 78 – 86.
- Ahamed, T., Tian, L., Takigawa, T., Zhang, Y. 2009. Development of auto-hitching navigation system for farm implements using laser range finder. *Transactions of the ASABE*, 52(5): 1793 – 1803.
- Ahamed, T., Takigawa, T., Noguchi, R., Tian, L. 2014. *Bioproduction Engineering: A Road Map for Sustainable Agricultural Practices*. Nova Science Publishers, Inc., New York.
- Iida, M.; M. Kudou; K. Ono and M. Umeda. 2000. Automatic Following Control for Agricultural Vehicle. *IEEE*, 158-162.
- Norashikin, M. Thamrin; M. H. Nor; R. A. Arshad; R. S. Adnan; A. R. Noorfadzli; F. M. Mohamad and F. M., Siti. 2013. Tree Detection Profile Using a Single Non-Intrusive Ultrasonic Sensor for Inter-Row Tracking Application in Agriculture Field. *IEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, 8-10 Mac. 2013, Kuala Lumpur, Malaysia, 314-318.
- O'Connor, M.; G., E.; W., P.B. Carrier-phase dgps for closed-loop control of farm and construction vehicles. *Journal of the Institute of Navigation* 1996, 43, 167-178.
- Economic and Social Commission for Asia and the Pacific Regional Network for Agricultural Machinery. 1995. *RNAM Test Codes & Procedures for Farm Machinery*.
- Saurabh U. and K., Anil. 2016. Automated Seed Sowing Agribot Using Arduino. *International Conference on Communication and Signal Processing*, April 6-8, 2016, India, 1380-1383.

Stombaugh, T.S.; Bensen, E.R.; Hummel, J.W. Guidance of agricultural vehicles at high field speeds. *Transactions of the ASABE* 1999, 42, 537-544.

Thanpattranon, P., Ahamed, T. and Takigawa, T., 2015. Navigation of an Autonomous Tractor for a Row-Type Tree Plantation Using a Laser Range Finder—Development of a Point-to-Go Algorithm. *Robotics* Vol. 4, Issue 3, pp.341 – pp. 364, 2015, September.
doi:10.3390/robotics4030341.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลคุณสมบัติเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก



รูปผนวกที่ 1 เซนเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-213113

ตารางผนวกที่ 1 คุณสมบัติเซนเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-213113

Technical data

EN	UM30-213113
Operating range	200 ... 1300 mm
Limiting range	2000 mm
Ultrasonic frequency (typically)	200 kHz
Hysteresis (can be set using Connect+)	20 mm
Weight	150 g
Response time ¹⁾	92 ms
Analog output ^{2), 3)}	1 x 0 V ... 10 V ($\geq 100 \text{ k}\Omega$) / 1 x 4 mA ... 20 mA ($\leq 500 \Omega$)
Resolution	0.18 mm
Repeatability	$\pm 0.15 \%$ referring to current measurement value / $\pm 0.15 \%$ bezogen auf den aktuellen Messwert
Accuracy ⁴⁾	$\pm 1 \%$ referring to current measurement value / $\pm 1 \%$ bezogen auf den aktuellen Messwert
Supply voltage V_s ^{5), 6)}	DC 9 ... 30 V
Power consumption (without load)	$\leq 2.4 \text{ W}$
Housing material	Brass nickel plated, PBT; Display: TPU; Ultrasonic transducer: Polyurethane foam, glass epoxy resin Messing vernickelt, PBT; Display: TPU; Ultraschallwandler: Polyurethanschaum, Epoxharz mit Glasanteilen
Rating according to EN 60529	IP 67
Protection class	III
Connection type	Plug M12, 5-pin / Stecker M 12, 5-polig
Ambient temperature	Operation / Betrieb: $-25^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$ Storage / Lager: $-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$
Initialization time	$< 300 \text{ ms}$
Max. tightening torque for nuts	40 Nm



รูปผนวกที่ 2 เซนเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-213113

ตารางผนวกที่ 1 คุณสมบัติเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113

Technical data

EN	UM30-215113
Operating range	600 ... 6000 mm
Limiting range	8000 mm
Ultrasonic frequency (typically)	80 kHz
Hysteresis (can be set using Connect+)	100 mm
Weight	270 g
Response time ⁴⁾	240 ms
Analog output ^{2), 3)}	1 x 0 V ... 10 V ($\geq 100 \text{ k}\Omega$) / 1 x 4 mA ... 20 mA ($\leq 500 \Omega$)
Resolution	0.18 mm
Repeatability	$\pm 0.15 \%$ referring to current measurement value / $\pm 0.15 \%$ bezogen auf den aktuellen Messwert
Accuracy ⁴⁾	$\pm 1 \%$ referring to current measurement value / $\pm 1 \%$ bezogen auf den aktuellen Messwert
Supply voltage V_s ^{5), 6)}	DC 9 ... 30 V
Power consumption (without load)	$\leq 2.4 \text{ W}$
Housing material	Brass nickel plated, PBT; Display: TPU; Ultrasonic transducer: Polyurethane foam, glass epoxy resin Messing vernickelt, PBT; Display: TPU; Ultraschallwandler: Polyurethanschäum, Epoxydharz mit Glasanteilen
Rating according to EN 60529	IP 67
Protection class	III
Connection type	Plug M12, 5-pin / Stecker M 12, 5-polig
Ambient temperature	Operation / Betrieb: $-25 \text{ }^{\circ}\text{C}$... $+70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Storage / Lager: $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$... $+85 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Initialization time	$< 300 \text{ ms}$
Max. tightening torque for nuts	40 Nm

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างภาพการทดสอบในรถตัดอ้อย



ภาพผนวกที่ ข1 การทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการวัดระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยย่อยที่ 3

ระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย

โดย

ดร. ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล
รศ.ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์
ผศ.ดร. ธนา ชีพสมทรง
ดร. ภวินท์ ธีรภัทรานนท์

เดือน ธันวาคม ปี 2562

สัญญาเลขที่ RDG61T0066

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย

คณะผู้วิจัย	สังกัด
ดร. ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร. ธนา ชีพสมทรง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร. ภาวินท์ ธีรภัทรานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชุดโครงการวิจัยด้านอ้อยและน้ำตาล

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือพัฒนาระบบสนับสนุนการควบคุมยานพาหนะบรรทุกิตตามรตต์อ้อย โดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิก อุปกรณ์ส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกอ้อยติดตามรตต์อ้อย ประกอบด้วย 1) เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก 2) กล้องควบคุมและแสดงผล (กล้อง No. 1) 3) กล้องรับสัญญาณแบบไร้สาย (กล้อง No. 2) 4) Joy stick และ 5) แบตเตอรี่

เซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ติดตั้งด้านหลังชุดเกี่ยวโน้มต้นอ้อยทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของรตต์อ้อย ระยะทางระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิกกับต้นอ้อย 50 เซนติเมตร เซ็นเซอร์จะทำหน้าที่ระบุตำแหน่งของรตต์อ้อยแสดงผลโดยสัญญาณหลอดไฟเพื่อสนับสนุนการควบคุมแนวการวิ่งของรตต์อ้อย และติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกบริเวณสะพานลำเลียงท่อนอ้อยเพื่อวัดระดับกองท่อนอ้อยในกระบะรถบรรทุก ระยะระหว่างกองท่อนอ้อยในกระบะรถบรรทุกกับเซนเซอร์อัลตราโซนิกถูกกำหนดไว้ที่ระยะห่าง 50 เซนติเมตร เมื่อระยะห่างระหว่างเซนเซอร์กับส่วนบนของกองอ้อยในกระบะรถบรรทุกมีขนาดน้อยกว่า 50 เซนติเมตร อุปกรณ์จะแสดงสัญญาณในห้องคนขับรตต์อ้อย ในลักษณะสัญญาณไฟกระพริบที่กล้องอุปกรณ์ภายในห้องคนขับรตต์อ้อย จากนั้นคนขับรตต์อ้อยจะแสดงสัญญาณไฟกระพริบไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณในห้องคนขับรถบรรทุกเพื่อขับรถบรรทุกเลื่อนไปทางด้านหน้าและด้านหลัง

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกิตตามรตต์อ้อยที่ถูกพัฒนาโดยการประยุกต์ใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกนั้นสามารถตรวจวัดแนวต้นอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่พัฒนาสามารถแสดงผลในลักษณะหลอดไฟกระพริบทั้งในกรณีการควบคุมแนวการวิ่งของรตต์อ้อยและการควบคุมระยะห่างระหว่างชุดสายพานลำเลียงอ้อยกับกระบะรถบรรทุกอ้อย ระยะห่างระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิกเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการวัดระยะทางของเซนเซอร์อัลตราโซนิกโดยพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแนวต้นอ้อยเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความถูกต้องในการวัดระยะลดลง ขณะที่ความเร็วการเดินทางของยานพาหนะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการวัดระยะทางของเซนเซอร์อัลตราโซนิก และระยะห่างระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก 50 เซนติเมตร เป็นระยะที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานจริง

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	I
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การนำร่องรถแทรกเตอร์ด้วย Laser range finder	3
2.2 การใช้เซ็นเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic sensor) ในการระบุตำแหน่งวัตถุ	7
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	9
3.1.1 หลักการของระบบส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย	9
3.1.2 การประเมินประสิทธิภาพเชิงไร่	12
3.1.3 การวัดความเร็วการเดินทาง	13
3.1.4 การวัดเปอร์เซ็นต์การสิ้นไถล	13
3.1.5 ปริมาณการสูญเสียอ้อยด้วยรถตัดอ้อย	15
3.1.6 สมรรถนะการทำงาน	15
3.1.7 ความหนาแน่นสภาพแห้งของดิน	15
3.1.8 ความชื้นดิน	16
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการวิจัย	
4.1 ผลการติดต่อเกษตรกรเพื่อขอความอนุเคราะห์ขอใช้แปลงปลูกอ้อยเพื่อการทดสอบ	17
4.2 การพัฒนาระบบส่งเสริมการควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการวิจัย (ต่อ)	
4.2.1 ทดสอบเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก	17
4.2.2 ทดสอบเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับติดตั้งบนรถตัด อ้อยเพื่อรับค่าสัญญาณเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก	22
4.2.3 ส่วนประกอบอุปกรณ์ส่งเสริมการควบพาหนะบรรทุกติดตามรถตัด อ้อย	22
4.2.4 ฟังก์ชันการตรวจสอบระยะห่างแนวของต้นอ้อยและระยะห่าง ระหว่างรถตัดอ้อยกับรถบรรทุก	24
4.2.5 การออกแบบเขียนฟังก์ชันเพื่อรับสัญญาณจากคันบังคับสำหรับบอก ให้คนขับรถบรรทุกขับเร็วขึ้นหรือช้าลง	25
4.3 การประเมินความแม่นยำของอุปกรณ์สนับสนุนคนขับรถแทรกเตอร์ในการ ควบคุมแนวการขับ	31
4.4 การประเมินความแม่นยำของอุปกรณ์สนับสนุนคนขับรถตัดอ้อยในการควบคุม แนวการขับ	36
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการวิจัย	39
บรรณานุกรม	40
ภาคผนวก	42
ภาคผนวก ก ข้อมูลคุณสมบัติเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก	43
ภาคผนวก ข ตัวอย่างภาพการทดสอบในรถตัดอ้อย	46

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 พื้นที่ปลูกอ้อยที่จะดำเนินการขอความอนุเคราะห์สำหรับการทดสอบ	17
ตารางที่ 2 การสอบเทียบค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-213113 อันที่ 1 กับระยะทาง	19
ตารางที่ 3 การสอบเทียบค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-213113 อันที่ 2 กับระยะทาง	20
ตารางที่ 4 การสอบเทียบค่าสัญญาณจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SICK UM30-215113 กับระยะทาง	22
ตารางที่ 5 เงื่อนไขการทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำของอุปกรณ์สนับสนุนคนขับรถตัดอ้อย ในการควบคุมแนวการขับ	35
ตารางที่ 6 ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) ในการทดสอบที่ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) 50 cm	37
ตารางที่ 7 ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) ในการทดสอบที่ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) 100 cm และ 150 cm	38
ตารางที่ 8 ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) ในการทดสอบที่ระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) 50 cm	41

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 Laser range finder (a) SICK LMS (b) URG 04-LX	3
รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Laser range finder	4
รูปที่ 3 ระบบนำร่องรถแทรกเตอร์ที่พัฒนาโดย Subramanian (2005)	4
รูปที่ 4 (A) Sick LMS 200 laser radar (B) การติดตั้งเลเซอร์เซนเซอร์บนหลังการรถแทรกเตอร์	5
รูปที่ 5 แนวทางสำหรับทดสอบการนำร่องรถแทรกเตอร์	6
รูปที่ 6 Marker สำหรับทำรอยขีดไปตามแนวการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์	6
รูปที่ 7 แผนภาพบล็อกของตรวจสอบสิ่งที่กีดขวางและระบุทิศทางของหุ่นยนต์ในแปลง	7
รูปที่ 8 การทดสอบวิ่งตามของรถเก็บเกี่ยว	8
รูปที่ 9 แผนภาพบล็อกแสดงระบบตรวจจับไม้ค้อนอัตโนมัติโดยใช้ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง	8
รูปที่ 10 แผนผังบล็อกของระบบช่วยบอกทิศทางพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย และ รถตัดอ้อย	9
รูปที่ 11 ระยะระหว่างรถบรรทุกและรถตัดอ้อย	10
รูปที่ 12 ตำแหน่งติดตั้งของ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง ทั้งสองจุด	11
รูปที่ 13 แสดงการทำงานของ เซนเซอร์คลื่นเสียงความถี่สูง กรณีรถบรรทุกอ้อยวิ่งอยู่ด้านซ้ายคนขับรถตัดอ้อย	12
รูปที่ 14 การวัดความเร็วการเดินทาง	13
รูปที่ 15 การวัดการสั่นไถลของล้อรถแทรกเตอร์	14
รูปที่ 16 เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 และรุ่น SICK UM30-215113	18
รูปที่ 17 การติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ส่วนหน้า (ตำแหน่งที่ 1) และสะพานลำเรียงอ้อย (ตำแหน่งที่ 2)	18
รูปที่ 18 กราฟสอบเทียบเซนเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 อันที่ 1	20
รูปที่ 19 กราฟสอบเทียบเซนเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-213113 อันที่ 2	21
รูปที่ 20 กราฟสอบเทียบเซนเซอร์อัลตราโซนิกรุ่น SICK UM30-215113	22
รูปที่ 21 ค่าที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณจากเซนเซอร์อัลตราโซนิก	23
รูปที่ 22 (ก) ชุดอุปกรณ์ส่งเสริมการควบคุมพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย และ (ข) Joystick	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 23	รูปแบบหน้าจอไฟแอลอีดีที่กล่องควบคุมและแสดงผล (กล่อง No. 1) ที่ติดตั้งในรถตัดอ้อย	25
รูปที่ 24	รูปแบบหน้าจอไฟแอลอีดีที่กล่องรับสัญญาณแบบไร้สาย (กล่อง No. 2) ที่ติดตั้งในห้อง คนขับรถบรรทุก	26
รูปที่ 25	ลักษณะการติดตั้งกล่องควบคุมและแสดงผล (กล่อง no.1) บนรถแทรกเตอร์	34
รูปที่ 26	แสดงลักษณะการวัดระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ระยะ a) และระยะ ระหว่างแนวต้นอ้อยและแนวเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b)	34
รูปที่ 27	แสดงอุปกรณ์โรยแป้งแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์	35
รูปที่ 28	แสดงวิธีการวัดระยะระหว่างแนวต้นอ้อยกับเส้นแสดงแนวการวิ่งของรถแทรกเตอร์ (ระยะ b) ในแต่ละการทดลอง	39
รูปที่ 29	การติดตั้งอุปกรณ์บนรถตัดอ้อย	40



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการย่อยที่ 4

การพัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของ
รถแทรกเตอร์”

โดย

ผศ.ดร.ขวัญตรี แสงประชาธนารักษ์

ดร.วาธิส ลีลาภัทร

ผศ.ดร.ธนา ราษฎร์ภักดี

ผศ.ดร.รุจชัย อึ้งอารุณยะวี

เดือน ธันวาคม ปี 2562

สัญญาเลขที่ RDG61T0066

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการระบบควบคุมยานพาหนะบรรทุกติดตามรถตัดอ้อย

คณะผู้วิจัย	สังกัด
ผศ.ดร. ขวัญตรี แสงประชานารักษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร. วาอิส สีลาภักดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. ธนา ราษฎร์ภักดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. รุจชัย อึ้งอารุณยะวี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชุดโครงการวิจัยด้านอ้อยและน้ำตาล

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการนี้เป็นโครงการต่อเนื่องมาจากโครงการย่อยเรื่อง การพัฒนาต้นแบบระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติสำหรับควบคุมแถวการทำงานของรถแทรกเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งที่จะช่วยควบคุมแถวอ้อยให้ตรง และมีระยะห่างระหว่างแถวที่เหมาะสม (Traffic control) อย่างไรก็ตามระบบที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดด้านสภาพพื้นที่ใช้งาน เช่น ความลาดเอียง และคุณภาพการเตรียมดิน จึงมีความจำเป็นต้องมีการพัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสำหรับสนับสนุนการทำงานของระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น โดยมุ่งเน้นเพิ่มความสามารถในการชดเชยแรงกระทำด้านข้างและการยกตัวของรถแทรกเตอร์ในสามมิติ อันเนื่องมาจากสภาพพื้นที่ลาดเอียงและสภาพการเตรียมดินที่แตกต่างกัน เพื่อขยายข้อจำกัดให้สามารถใช้งานระบบได้ครอบคลุมพื้นที่การผลิตอ้อยมากยิ่งขึ้น

ระบบการควบคุมที่ได้ออกแบบและติดตั้งไปซึ่งมีอยู่สองแบบคือ ระบบที่ใช้ Servomotor และระบบที่ไฮดรอลิกส์ ระบบสามารถใช้งานได้บนพื้นที่ที่เรียบ ขรุขระ ใช้งานได้นาน ส่วนข้อมูล Input/Output ที่มีเก็บเพื่อนำมาหา Transfer function ด้วยวิธี System identification และเมื่อนำระบบการควบคุมการเลี้ยวแบบอัตโนมัติมาใช้ทดลองบนพื้นที่จริง ในการทดลองช่วงแรกแทรกเตอร์มีการส่ายไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ซึ่งเกิดจากความไม่สัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ควบคุมการเลี้ยวจาก Pixhawk 3Pro และระบบการบังคับเลี้ยว ส่วนปัจจัยอื่นนั้นก็ส่งผลด้วยแต่ยังไม่ชัดเจนมากนัก ส่วนตัวควบคุมแบบ PID Controller นั้นได้ทำการใช้ค่าที่เดิมตลอดและมีการปรับจูนมาแล้ว แต่ในอนาคตผู้วิจัยคิดว่าควรที่จะมีการหาค่า Gain PID controller ที่เหมาะสมกับแต่ละสภาพพื้นที่และมีการอัปเดตค่าตลอดเวลาเพื่อการควบคุมที่ดียิ่งขึ้น

บทคัดย่อ

ในขั้นตอนแรก การสำรวจภาคสนามพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น เพื่อศึกษาช่วงของมุลลาดเอียงและสภาพพื้นที่ที่มีการเตรียมดินก่อนปลูก พบว่า พื้นที่ปลูกอ้อยที่มีความลาดเอียงในจังหวัดขอนแก่นมีค่าความลาดเอียงส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0-6 องศา ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เครื่องจักรทางการเกษตร เช่น รถแทรกเตอร์ สามารถเข้าไปทำงานได้ แต่ก็มีบางพื้นที่ที่ภูมิประเทศติดภูเขาซึ่งมีความลาดเอียงสูง จากการสำรวจแปลงและสัมภาษณ์เกษตรกร โดยละเอียด จำนวน 5 ราย ในพื้นที่ อ.น้ำพอง อ.บ้านไผ่ และ อ.หนองเรือ พบว่า การกำหนดแนวการทำงานของเกษตรกร มี 2 รูปแบบ ได้แก่ การวางแผนแนวอ้อยแบบทิ้งน้ำ และการวางแผนแนวยาวของแปลง เพื่อลดรอบการกลับเลี้ยว โดยอุปสรรคในการทำงานในการกำหนดแนวอ้อย ได้แก่ ระยะห่างระหว่างแถวไม่สม่ำเสมอ จำนวนแถวในแต่ละรอบที่ปลูกไม่คงที่ และความเสี่ยงต่อการพลิกคว่ำมีผลต่อการกำหนดแนวปลูก ในการศึกษาขั้นที่ 2 เป็นการศึกษาไดนามิกส์ของตัวรถแทรกเตอร์ในกระบวนการปลูกอ้อยในสภาพความลาดเอียง พบว่าหากต้องการนำระบบกำหนดเส้นทางมาใช้เพื่อกำหนดเส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ เราจะต้องปรับมุมมองการเคลื่อนที่ของรถให้รับกับค่าความลาดเอียงที่อาจแตกต่างกันไป ดังนั้น เราจะต้องให้ความสนใจกับตัวแปรที่สำคัญ เช่น จุดหมุน มุมหมุนแนวนอน (Rolling angle) และมุมเลี้ยว (yawing angle) ในการศึกษาขั้นที่ 3 เป็นการพัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์ และเซนเซอร์วัดความเร็วรถ ประกอบด้วย ชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์ (ชุดทดลองผลิต) ชุดประมวลผล และเขียนโปรแกรม และกลไกสนับสนุน (ชุดต้นแบบ) ซึ่งได้ออกแบบให้ระบบทำงานร่วมกัน

การที่จะควบคุมระบบบังคับเลี้ยวให้เป็นระบบอัตโนมัติได้นั้นในส่วนของฮาร์ดแวร์จำเป็นต้องมีการติดตั้งชุดขับเพิ่มให้กับรถแทรกเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการเลือกใช้ Servomotor และวาล์วไฟฟ้าแบบปรับค่าได้หรือแบบสัดส่วน มีการติดตั้งตัววัดตำแหน่งมุมของล้อ และในส่วนของ Software ประกอบไปด้วย ศึกษากลศาสตร์การเคลื่อนที่ของระบบบังคับเลี้ยวและเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างวาล์วไฟฟ้ากับการเคลื่อนที่ของมุมล้อเพื่อหาสมการตัวแทนระบบเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลตอบสนอง จากนั้นนำสมการที่ได้ไปออกแบบระบบควบคุม ในโปรแกรม Matlab ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี และประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบนำทางของระบบ Autopilot ของ pixhawk ร่วมกับ ซอร์ฟแวร์ Qground control และ Mission planner ผลที่ได้คือ ในส่วนของการออกแบบและติดตั้งระบบลงบนรถแทรกเตอร์ เมื่อนำสมการมาวิเคราะห์ผลตอบสนองทำให้พบว่าระบบนี้สามารถควบคุมได้ ในส่วนของระบบอัตโนมัติที่รถแทรกเตอร์สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดด้วยระบบอัตโนมัติได้และให้ความแม่นยำมากขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับกันระบบ RTK GPS

Abstract

First, inclination of sugarcane fields during land preparation step was surveyed. Inclination of the field in Khon Kaen province range at 0-6 degree which is accessible for general agricultural machines such as tractor. However, in some area near mountain, the inclination was found to be higher than others. Refer to field survey and interview of 5 farmers in Nampong district, Banpai district and Nhongruae district, farmer tend to set the alignment of the crop rows in those high inclination field with 2 formations; water drain alignment and longest length alignment to decrease the turning time. The main obstacles were inconsistent row distance, uncertain row number and accidentally rolling risk of tractor. In the second step, dynamic of tractor was studied. When applying auto-steering in tractor, the angle of displacement of the tractor need to match with instant field inclination. Thus, the critical parameter such as pivot point, rolling angle and yawing angle need to be measured. Third, set of sensor and mechanical device supporting auto-steering was design and fabricated in testing unit and prototype.

Servo motor with proportional electrical valve was selected and equipped with tractor. The sensors measuring turning angle of the wheel were added. To design control software, correlation between dynamics of steering, electrical valve and turning angle were collected to form an equation representing response. Control system then was design using Matlab calculating signal from PID controller and application of pixhawk autopilot system with Qground control and Mission planner. The test results showed that this system can control tractor steering. Tractor can be driven automatically with the developed system. To increase precision, RTK GPS is recommended to be added.

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร.....	ข
บทคัดย่อ.....	ง
Abstract.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เซนเซอร์และระบบเก็บข้อมูล.....	3
2.1.1 สเตรนเกจ (Strain Gauge).....	3
2.2 กลศาสตร์ของรถแทรกเตอร์.....	12
2.3 ระบบควบคุม	14
ในปี1993 the United States Department Transportation, Federal Highway Administration และ the University of California, Berkeley [12] ได้ทำข้อตกลงร่วมกันในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ “Steering and Braking Control of Heavy Duty Vehicles” ซึ่งนักวิจัยได้เน้นไปที่การควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกหนัก สำหรับระบบ Automated Highway System โดยผลงานได้ดำเนินการแล้วเสร็จและเผยแพร่ในปี 1999 เป็นการทดลองกับรถบรรทุกหั่วลาก class 8 ที่มี trailer ยาว 45 ฟุต โดยทำการควบคุมการเคลื่อนที่ด้านข้าง และไปข้างหน้า โดยระบบบังคับเลี้ยวและระบบเบรคตามลำดับ ซึ่งเป็นการติดตั้งอุปกรณ์เสริมลงบนอุปกรณ์เดิมที่มีอยู่ และควบคุมด้วย software ที่พัฒนาการควบคุมมาโดยเฉพาะ (ภาพที่ 12 แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งลงบนรถบรรทุก).....	14
2.4 ระบบควบคุมอัตโนมัติในเครื่องจักรกลเกษตร [17-18]	20
ปัจจุบันรถอัตโนมัติถูกนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก ในอเมริกา รถระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติถูกพัฒนาเป็นสินค้าในภาคการเกษตร แต่สำหรับหุ่นยนต์อัตโนมัติ หุ่นยนต์ระบบ multi-agent หรือระบบควบคุมทางไกลนั้น คาดว่าน่าจะพัฒนาต่อไป ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาหลากหลายแง่มุม ตั้งแต่องค์ประกอบของเทคโนโลยีที่ช่วยสนับสนุนรถอัตโนมัติ จนถึงระบบอัตโนมัติที่ใช้ปฏิบัติงานเฉพาะเจาะจง รวมทั้งจะแนะนำผลงานวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับระบบหุ่นยนต์รุ่นใหม่อีกด้วย	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัยและผลการศึกษา.....	28
3.1.1 พื้นที่ที่ศึกษา	28

3.1.2	วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.3.1	ศึกษาลักษณะทั่วไปของรถแทรกเตอร์	45
3.3.2	กลไกระบบบังคับเลี้ยว	45
3.3.3	ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling).....	51
3.3.4	ศึกษาระบบบังคับเลี้ยว	58
3.3.5	ศึกษาและออกแบบระบบส่งกำลังแบบ Servomotor และไฮดรอลิกส์	60
1)	ออกแบบชุดควบคุมการเลี้ยว	63
3.3.6	ศึกษาระบบควบคุมอัตโนมัติ	74
1)	ชุดควบคุมและชุดประมวลผล	74
3.3.7	Sensor.....	75
3.3.8	ระบบ GPS	77
3.3.9	ติดตั้งระบบการควบคุมอัตโนมัติลงบนรถแทรกเตอร์.....	80
	ในการทดลองนี้ประกอบด้วยหลายส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของชุดควบคุม ซึ่งติดตั้งไว้อยู่บนหลังคาของตัวรถ และพยายามติดตั้งในจุดกึ่งกลางของตัวรถให้ได้มากที่สุดซึ่งในที่นี้เราไม่ทราบจุด CG ของรถ และเพื่อให้ระบบ GPS ทำงานได้ดี รวมถึงอุปกรณ์ส่งสัญญาณอื่น ๆ ด้วยดัง ภาพที่ 78	80
3.4.1	ศึกษา PID Controller	84
1)	การสเกลค่า	86
2)	การควบคุมตำแหน่งของล้อ.....	93
3.5.1	ทดสอบควบคุมเบื้องต้น	96
3.5.2	ศึกษาวงจรกรองสัญญาณความถี่ Lowpass filter	98
3.5.3	ศึกษาการหา Sytem Identification ของระบบ	101
1)	การสร้างแบบจำลองระบบงาน (Plant Model).....	101
2)	การระบุเอกลักษณ์ (System Identification)	102
3.5.4	ศึกษา Optimize paramerter PID controller	103
1)	ทดลองเก็บข้อมูลเพื่อนำค่ามาใช้หาสมการโมเดล	105
1	หาสมการคณิตศาสตร์ของวาล์วแต่ละด้าน.....	106
3.7.1.	การทดลองที่ 1 ทดลองเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์เบื้องต้น	128
3.7.2	การทดลองที่ 2 ปรับมุมล้อโดยยังไม่มีกรองสัญญาณ	136
3.7.3	การทดลองที่ 3 ปรับมุมล้อและมีการกรองสัญญาณ.....	144
3.7.4	การทดลองที่ 4 ปรับมุมล้อลดลงและมีการกรองสัญญาณ	152
3.7.5	การทดลองที่ 5 ทดลองด้วย RTK GPS และมีการกรองสัญญาณ.....	159
3.7.6	การทดลองที่ 6 ทดลองให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่เป็นแนว	167
บทที่ 4	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	184
4.1	สรุปผลการศึกษา.....	184

4.2 ข้อเสนอแนะ	185
บรรณานุกรม	187
ภาคผนวก	192
ภาคผนวก ก. ข้อมูลเชิงเทคนิคของอุปกรณ์.....	193
บรรณานุกรม	1
ภาคผนวก.....	6

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 Characteristics of position sensing system.....	17
ตารางที่ 2 ตารางแจกแจงความถี่ของจำนวนแปลงที่มีมุมลาดเอียงในช่วงต่างๆ จากการสำรวจในพื้นที่ จ.ขอนแก่น38	
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระบบ GPS	80
ตารางที่ 4 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่าง ๆ.....	100
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการทดลองในรูแบบต่างๆแบบที่ใช้ GPS ธรรมดา.....	166
ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการทดลองในรูแบบต่างๆแบบที่ใช้ RTK GPS	167
ตารางที่ 7 ตำแหน่ง Waypoint ของแต่ละแถวในการทดลองที่ 6	168
ตารางที่ 8 ระยะที่วัดได้จากการทดลองของการทดลองที่ 6 (เมตร)	171
ตารางที่ 9 ค่า Standard deviation และ Average ของแต่ละแถวของการทดลองที่ 6 (เมตร)	172
ตารางที่ 10 ระยะห่างระหว่างแถวของการทดลองที่ 6 (เมตร)	172
ตารางที่ 11 ระยะห่างระหว่างแถวของการทดลองที่ 6 (เมตร) (ต่อ)	173
ตารางที่ 12 ก-1 ข้อมูลเชิงเทคนิครถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Kubota รุ่น L4708.....	8

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 สเตรณเกจที่ทำจากฟอยล์โลหะ [4].....	3
ภาพที่ 2 เพียโซอิเล็กทริก เปลี่ยนแรงกดเป็นพลังงานไฟฟ้าฟอยล์ [5].....	4
ภาพที่ 3 Piezoelectric accelerometer [6].....	4
ภาพที่ 4 วงจรวีทสโตนบริดจ์ [7]	5
ภาพที่ 5 วงจรภายในแบบวีทสโตนบริดจ์ [8]	6
ภาพที่ 6 testo175-T3 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ Data Logger [9].....	7
ภาพที่ 7 DS1307 Real Time Clock Mini Board [9].....	8
ภาพที่ 8 Data logging systems [9]	8
ภาพที่ 9 หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรม(Program Memory) [9]	9
ภาพที่ 10 การเก็บข้อมูล digital [9].....	10
ภาพที่ 11 แรงกระทำในระนาบตั้งขณะทำงานจุดลากบนพื้นเอียง	12
ภาพที่ 12 แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งลงบนรถบรรทุก	14
ภาพที่ 13 H-infinity robust stabilization problem.....	15
ภาพที่ 14 Sliding mode control SCM.....	15
ภาพที่ 15 แสดง Steering actuator mounted on the steering column.....	16
ภาพที่ 16 แสดง Closed loop block diagram of the steering subsystem.....	16
ภาพที่ 17 แสดง 6-DOF of chassis and tire	17
ภาพที่ 18 แสดงแนวคิดของการควบคุมแบบปรับค่าได้	18
ภาพที่ 19 แสดงแบบจำลองเส้นทางเดียว (สองล้อ) สำหรับระบบติดตามเส้นทางอัตโนมัติ ที่มีตัวตรวจวัดหัว และท้าย	19
ภาพที่ 20 Block diagram of controller using front and tail lateral displacement	19
ภาพที่ 21 ตัวอย่างของโปรแกรมนำทางช่วยขับในการฉีดยาฆ่าแมลง	22
ภาพที่ 22 ตัวอย่างการแสดงผลของจอควบคุม	23
ภาพที่ 23 ระบบเคลื่อนที่ด้วยตนเอง (GDS) ในเครื่องดำนา.....	24
ภาพที่ 24 บอทแทรกเตอร์ใช้ในไร่โดยไม่ต้องใช้คนขับ.....	25
ภาพที่ 25 StarFire GPS กับคอนโทรลเลอร์.....	26
ภาพที่ 26 (ซ้าย) ผลการประมวลผลภาพเพื่อแยกพื้นที่ที่ทำงานแล้ว และพื้นที่ที่ยังไม่ได้ทำงาน (ขวา)กล้องรับ ภาพ (Vision).....	27

ภาพที่ 27 ขั้นตอนการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น	28
ภาพที่ 28 เลือกพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น	29
ภาพที่ 29 แบ่งกลุ่มอำเภอในจังหวัดขอนแก่นตามความหนาแน่นของพื้นที่ปลูกอ้อย	30
ภาพที่ 30 ตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อย	32
ภาพที่ 31 สำรวจแปลงอ้อยโดยใช้โปรแกรม Google Earth Pro	32
ภาพที่ 32 การหาความลาดเอียง	33
ภาพที่ 33 การหาขนาดพื้นที่แปลง	33
ภาพที่ 34 การหาความยาวแปลง	34
ภาพที่ 35 ชุดคำสั่งในการหาความลาดเอียง ขนาดแปลง และความยาวแปลง	34
ภาพที่ 36 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 1 ในความลาดเอียงต่างๆ	36
ภาพที่ 37 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 2 ในความลาดเอียงต่างๆ	37
ภาพที่ 38 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 3 ในความลาดเอียงต่างๆ	37
ภาพที่ 39 จุดศูนย์ถ่วงของรถแทรกเตอร์	40
ภาพที่ 40 การเคลื่อนที่ของรถในมุมเอียงแสดงให้เห็นค่าตำแหน่งเป้าหมายที่ผิดพลาด (Heraud, 2009)	41
ภาพที่ 41 แสดงตำแหน่งสามมิติของแทรกเตอร์บนเนินเขา ซึ่งขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศและทิศทางการเคลื่อนที่ (Heraud, 2009)	42
ภาพที่ 42 รถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Kubota รุ่น L4708	45
ภาพที่ 43 ระบบบังคับเลี้ยวบนรถยนต์ทั่วไป	46
ภาพที่ 44 เฟืองบังคับเลี้ยวแบบเฟืองตัวหนอนและแบบเม็ดลูกปัด	46
ภาพที่ 45 ชุดพวงมาลัยของรถแทรกเตอร์	47
ภาพที่ 46 แสดงการส่งกำลังไปยัง double piston G180 โดย G-rotor G110	48
ภาพที่ 47 แสดงการส่งกำลังไปยังล้อ	48
ภาพที่ 48 ลักษณะของมุม Caster	49
ภาพที่ 49 ลักษณะมุม Camber	50
ภาพที่ 50 ลักษณะมุม Kingpin	50
ภาพที่ 51 มุม Toe-in และ Toe-out	51
ภาพที่ 52 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบสองล้อ (Bicycle model)	52
ภาพที่ 53 การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของ แบบจำลองแบบสี่ล้อ	56
ภาพที่ 54 แรงที่กระทำในแนวแกน X-Y ของแบบจำลองแบบสี่ล้อ	56
ภาพที่ 55 Ackerman Steering	59
ภาพที่ 56 ไดอะแกรมวาล์วไฟฟ้าสำหรับควบคุมทิศทาง	60

ภาพที่ 57 แสดงแนวคิดการขับพวงมาลัยด้วย Bevel gear (1st version)	64
ภาพที่ 58 แสดงภาพ Idea Sketch ของระบบขับ (2nd version)	65
ภาพที่ 59 แสดงลักษณะการวางชุดขับที่ด้านข้างของพวงมาลัย	65
ภาพที่ 60 แสดง assembly drawing ลักษณะการวางชุดขับที่ด้านข้างของพวงมาลัย (2nd version)	66
ภาพที่ 61 แสดงอัตราทดของเฟืองขับและเฟืองตามในอัตราทด 3.8:1	66
ภาพที่ 62 การออกแบบและติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์เข้ากับพวงมาลัย	67
ภาพที่ 63 ตำแหน่งการติดตั้งการส่งกำลังด้วยฟันเฟือง และ ชุดขับ เซอร์โวมอเตอร์	68
ภาพที่ 64 ตำแหน่งการติดตั้งการส่งกำลังด้วยฟันเฟือง และ ชุดขับ เซอร์โวมอเตอร์	69
ภาพที่ 65 ติดตั้งชุดคอนโซลเข้าที่เดิม	69
ภาพที่ 66 แสดงวงจรไฮดรอลิกส์ของตัวควบคุมอัตโนมัติที่ได้ออกแบบ	71
ภาพที่ 67 ชุดวาล์วสำหรับควบคุมระบบบังคับเลี้ยว	72
ภาพที่ 68 วาล์ว G-rotor	73
ภาพที่ 69 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วาล์วไฮดรอลิกส์	73
ภาพที่ 70 Arduino uno	74
ภาพที่ 71 Raspberry pi	74
ภาพที่ 72 Pixhawk 3 Pro Autopilot	75
ภาพที่ 73 Gyroscope	75
ภาพที่ 74 Accelerometer	76
ภาพที่ 75 Magnetometer	77
ภาพที่ 76 การทำงาน GPS	78
ภาพที่ 77 การทำงานระบบ RTK GPS	79
ภาพที่ 78 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมที่ตัวรถ	80
ภาพที่ 79 ชุดควบคุมเส้นทางของรถแทรกเตอร์	81
ภาพที่ 80 แสดงอุปกรณ์ในการควบคุมโปรแกรมควบคุมเส้นทางรถแทรกเตอร์	82
ภาพที่ 81 ชุดควบคุมวาล์วไฮดรอลิกส์หรือควบคุมล้อ	83
ภาพที่ 82 อุปกรณ์จ่ายไฟ	83
ภาพที่ 83 ชุดขับวาล์วไฮดรอลิกส์แบบสัดส่วน	84
ภาพที่ 84 ชนิดของ Potentiometer	85
ภาพที่ 85 ไดอะแกรมการเก็บค่าตำแหน่งของล้อ	86
ภาพที่ 86 อุปกรณ์วัดตำแหน่งล้อ (LVDT)	86
ภาพที่ 87 ไดอะแกรมการเลี้ยว และการเก็บข้อมูล	87

ภาพที่ 88 แสดงการติดตั้ง Plate scale เพื่ออ่านค่ามุมล้อ	87
ภาพที่ 89 แสดงการติดตั้ง LVDT	88
ภาพที่ 90 แสดงสมการในโปรแกรม Simulink ที่ใช้ในการแปลงค่า จาก LVDT เป็นองศาล้อ.....	89
ภาพที่ 91 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Plate Scale กับ โปรแกรม Matlab Simulink	89
ภาพที่ 92 โมเดลรถขนาดเล็ก.....	90
ภาพที่ 93 สัญญาณคำสั่งของเซอร์โวมอเตอร์	91
ภาพที่ 94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณอ้างอิง กับ องศาจาก Servomotor	92
ภาพที่ 95 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณอ้างอิง กับ องศาจาก Plate scale	92
ภาพที่ 96 ไดอะแกรมหลักการควบคุมตำแหน่งล้อ	93
ภาพที่ 97 กราฟ Saturation และ Dead zone	94
ภาพที่ 98 Flow chart การควบคุมตำแหน่งล้อ	94
ภาพที่ 99 ตำแหน่งของล้อ	95
ภาพที่ 100 ทดสอบการควบคุมการเลี้ยวผ่านวิทยุบังคับ	96
ภาพที่ 101 ทดสอบหาตำแหน่งตรงกลางของล้อ	97
ภาพที่ 102 การควบคุมด้วยวิทยุบังคับบนพื้นที่จริง	97
ภาพที่ 103 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจร	98
ภาพที่ 104 ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอุดมคติ	99
ภาพที่ 105 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR	101
ภาพที่ 106 การจำลองระบบงานด้วยกล่อง	102
ภาพที่ 107 Logging voltage of input data for right to left turning	105
ภาพที่ 108 Logging angle of output data for right to left turning	105
ภาพที่ 109 Logging voltage of input data for left to right turning	105
ภาพที่ 110 Logging angle of output data for left to right turning	106
ภาพที่ 111 Time respond for right to left turning	107
ภาพที่ 112 Time respond for left to right turning	107
ภาพที่ 113 Pole Zero for left to right turning	108
ภาพที่ 114 Pole Zero for left to right turning	109
ภาพที่ 115 Bode plot for right to left turning	110
ภาพที่ 116 Bode plot for left to right turning	110
ภาพที่ 117 Nyquist plot for right to left turning	111
ภาพที่ 118 Nyquist plot for left to right turning	112

ภาพที่ 119 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงหรือ (Input (y1)) และสัญญาณบอกตำแหน่งล้อ (Output(u1)) วงเลี้ยวที่ 1.....	113
ภาพที่ 120 กราฟการหาค่า System identification วงเลี้ยวที่ 1	113
ภาพที่ 121 ค่า Sytem identification ที่ดีที่สุดวงเลี้ยวที่1	114
ภาพที่ 122 ผลตอบสนองต่อสัญญาณฟังก์ชันขั้นบันไดจากสมการวงเลี้ยวที่ 1	114
ภาพที่ 123 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบจากสมการวงเลี้ยวที่1.....	115
ภาพที่ 124 ค่า Pole-Zero ของสมการวงเลี้ยวที่ 1	116
ภาพที่ 125 เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณที่ได้จากการ Simulation วงเลี้ยวที่1.....	116
ภาพที่ 126 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงหรือ (Input (y1))และสัญญาณบอกตำแหน่งล้อ (Output(u1)) วงเลี้ยวที่ 2.....	117
ภาพที่ 127 กราฟการหาค่า System identification วงเลี้ยวที่ 2.....	118
ภาพที่ 128 ค่า Sytem identification ที่ดีที่สุดวงเลี้ยวที่2	118
ภาพที่ 129 ผลตอบสนองต่อสัญญาณฟังก์ชันขั้นบันไดจากสมการจากสมการวงเลี้ยวที่ 2.....	119
ภาพที่ 130 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบจากสมการวงเลี้ยวที่ 2	120
ภาพที่ 131 ค่า Pole-Zero ของสมการวงเลี้ยวที่2.....	120
ภาพที่ 132 เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณที่ได้จากการ Simulation วงเลี้ยวที่ 2	121
ภาพที่ 133 ทดลองค่าพารามิเตอร์ PI ที่ได้ กับตัวแทนระบบเลี้ยวจากขวาไปซ้าย.....	122
ภาพที่ 134 ทดลองค่าพารามิเตอร์ PI ที่ได้ กับตัวแทนระบบเลี้ยวจากซ้ายไปขวา.....	122
ภาพที่ 135 ทดลองค่าพารามิเตอร์ PI ที่ได้ กับตัวแทนระบบเลี้ยวแบบวงเลี้ยวที่ 1.....	123
ภาพที่ 136 ทดลองค่าพารามิเตอร์ PI ที่ได้ กับตัวแทนระบบเลี้ยวแบบวงเลี้ยวที่2	123
ภาพที่ 137 ชุด Manifold ที่ออกแบบใหม่.....	124
ภาพที่ 138 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งชุดไฮดรอลิกส์(ปรับปรุง).....	125
ภาพที่ 139 แสดงถึงการวางท่อไฮดรอลิกส์	125
ภาพที่ 140 ออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ผ่านโปรแกรม Qground control.....	126
ภาพที่ 141 จุด H หรือจุดเริ่มต้นของรถแทรกเตอร์.....	127
ภาพที่ 142 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 1.....	128
ภาพที่ 143 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 1	129
ภาพที่ 144 ภาพรวมเส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 1.....	129
ภาพที่ 145 รายละเอียดเส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 1	130
ภาพที่ 146 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อของการทดลองที่ 1	130
ภาพที่ 147 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงจุดที่ 5 ไป 25 ของการทดลองที่ 1	131

ภาพที่ 148 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของล้อเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ช่วงจุดที่ 4.5 ไป 8 ของการทดลองที่ 1.....	132
ภาพที่ 149 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 1.....	132
ภาพที่ 150 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่ามากของการทดลองที่ 1	133
ภาพที่ 151 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 1.....	134
ภาพที่ 152 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 1	134
ภาพที่ 153 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor ของการทดลองที่ 1	135
ภาพที่ 154 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 1.....	135
ภาพที่ 155 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่2.....	136
ภาพที่ 156 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่2	137
ภาพที่ 157 เส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 2	137
ภาพที่ 158 เส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 2	138
ภาพที่ 159 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อ ของการทดลองที่ 2.....	138
ภาพที่ 160 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลาที่ 10 ไป 35 ของการทดลองที่ 2	139
ภาพที่ 161 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลาที่ 10 ไป 19 ของการทดลองที่ 2	139
ภาพที่ 162 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 2.....	140
ภาพที่ 163 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่ามากของการทดลองที่ 2	141
ภาพที่ 164 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 2.....	142
ภาพที่ 165 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 2	142
ภาพที่ 166 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor ของการทดลองที่ 2	143
ภาพที่ 167 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 2.....	143
ภาพที่ 168 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 3.....	144
ภาพที่ 169 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 3	145
ภาพที่ 170 เส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 3	146
ภาพที่ 171 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อของการทดลองที่ 3	146
ภาพที่ 172 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลาที่ 15 ไป 20 การทดลองที่ 3	147
ภาพที่ 173 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลาที่ 13 ไป 16 ของการทดลองที่ 3	147

ภาพที่ 174 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 3.....	148
ภาพที่ 175 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่ามากของการทดลองที่ 3.....	149
ภาพที่ 176 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 3.....	150
ภาพที่ 177 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 3	150
ภาพที่ 178 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor ของการทดลองที่ 3	151
ภาพที่ 179 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 3.....	151
ภาพที่ 180 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่4	152
ภาพที่ 181 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่4	152
ภาพที่ 182 เส้นทางเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 4	153
ภาพที่ 183 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อของการทดลองที่ 4	153
ภาพที่ 184 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 5 ไป 35 ของการทดลองที่ 4	154
ภาพที่ 185 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 10 ไป 15 ของการทดลองที่ 4	155
ภาพที่ 186 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 4.....	155
ภาพที่ 187 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่ามากของการทดลองที่ 4	156
ภาพที่ 188 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 4.....	157
ภาพที่ 189 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 4	157
ภาพที่ 190 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 4.....	158
ภาพที่ 191 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor การทดลองที่ 4.....	158
ภาพที่ 192 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 5.....	159
ภาพที่ 193 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 5	159
ภาพที่ 194 เส้นทางเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 5	160
ภาพที่ 195 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อของการทดลองที่ 5	161
ภาพที่ 196 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 5 ไป 21 ของการทดลองที่ 5.....	161
ภาพที่ 197 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 5 ไป 7 ของการทดลองที่ 5	162
ภาพที่ 198 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 5.....	163

ภาพที่ 199 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 5.....	163
ภาพที่ 200 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 5.....	164
ภาพที่ 201 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 5	165
ภาพที่ 202 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor ของการทดลองที่ 5	165
ภาพที่ 203 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 5.....	166
ภาพที่ 204 ภาพเส้นทางการเดินของรถแทรกเตอร์จากโปรแกรม Qground control ของ การทดลองที่ 6	167
ภาพที่ 205 เส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 6	168
ภาพที่ 206 การเส้นอ้างอิงการวัดค่าเก็บข้อมูลของการทดลองที่ 6	169
ภาพที่ 207 ลักษณะการวัดค่าเก็บข้อมูลของการทดลองที่ 6	170

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันการแข่งขันในการผลิตภาคเกษตรมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันของอุตสาหกรรมอ้อยของไทย จำเป็นต้องใช้การบริหารจัดการการผลิตเพื่อให้มีต้นทุนต่อตันอ้อยที่ต่ำ การดำเนินกิจกรรมต่างๆในระหว่างการผลิตอ้อยให้ทันฤดูกาลเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเพิ่มผลผลิตและการลดต้นทุนการผลิตอ้อย หากเกษตรกรสามารถควบคุมแถวอ้อยให้ตรง และมีระยะห่างระหว่างแถวที่เหมาะสม (Traffic control) ตั้งแต่ขั้นตอนของการปลูกอ้อยใหม่ จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานเชิงเวลาและเพิ่มอัตราการทำงานของเครื่องจักรทุกขั้นตอน จากโครงการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาต้นแบบระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติสำหรับควบคุมแถวการทำงานของรถแทรกเตอร์ ซึ่งช่วยสนับสนุนการควบคุมแถวอ้อย โดยเฉพาะกระบวนการปลูก ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุด

อย่างไรก็ตาม พื้นที่ที่สามารถนำระบบดังกล่าวไปใช้งานยังคงมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากสภาพพื้นที่และความละเอียดของก่อนดินหลังการเตรียมดิน และชนิดของดิน เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อกลศาสตร์และไดนามิกส์ของรถแทรกเตอร์ ซึ่งจะส่งผลต่อความแม่นยำในการทำงานของระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในพัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสำหรับสนับสนุนการทำงานของระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นในโครงการ RDG5950145 ในการปลูกอ้อย โดยมุ่งเน้นเพิ่มความสามารถในการชดเชยแรงกระทำด้านข้างอันและการยกตัวของรถแทรกเตอร์ในสามมิติ อันเนื่องมาจากสภาพพื้นที่ลาดเอียงและสภาพการเตรียมดินที่แตกต่างกัน เพื่อขยายข้อจำกัดด้านพื้นที่ใช้งานให้ครอบคลุมพื้นที่ปลูกอ้อยจริงมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมรถแทรกเตอร์เพื่อการควบคุมแถวอ้อย (Traffic control) และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพื้นที่ของเครื่องจักรกลเกษตรในการผลิตอ้อยในวงกว้างมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการทำงานของรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น และพัฒนาระบบเพื่อใช้ควบคุมรถแทรกเตอร์ในกระบวนการปลูกอ้อย

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้สามารถนำระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นในโครงการก่อนหน้านี้ไปใช้งานได้ครอบคลุมสภาพพื้นที่ที่มีความลาดเอียงและสภาพการเตรียมดินที่หลากหลายมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรสามารถใช้งานเครื่องจักรกลเกษตรในกระบวนการปลูก กระบวนการบำรุงรักษาตลอดจนกระบวนการเก็บเกี่ยว ได้รวดเร็วขึ้น มีเวลาที่สูญเสียน้อยลง

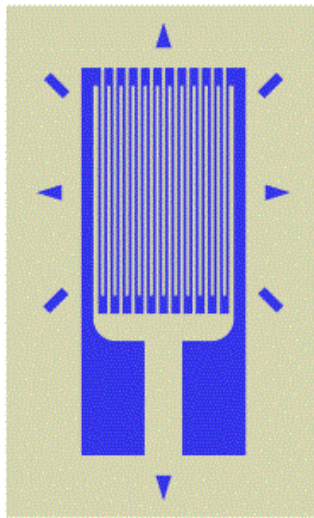
เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (outputs)
6 เดือนที่ 1	1. สำรวจภาคสนามพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัด ขอนแก่น เพื่อศึกษาช่วงของมุมลาดเอียงและ สภาพพื้นที่ที่มีการเตรียมดินก่อนปลูก 2. ศึกษาไดนามิกส์ของตัวรถแทรกเตอร์ใน กระบวนการปลูกอ้อยในสภาพความลาด เอียงและสภาพพื้นที่การเตรียมดินที่กำหนด ในช่วงที่ได้จากการสำรวจ 3. พัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบ บังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์ และเซนเซอร์วัดความเร็วรถ 4. พัฒนาโปรแกรมประมวลผล	1. ผลการสำรวจช่วงของมุมลาดเอียงและ สภาพพื้นที่ที่มีการเตรียมดินก่อนปลูก 2. ข้อมูลเกณฑ์การออกแบบชุดเซนเซอร์ และกลไกสนับสนุนฯ 3. ชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนชุด ทดสอบและเซนเซอร์วัดความเร็วรถ 4. โปรแกรมนำเข้าข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อ ประมวลผลร่วมในการควบคุมรถ แทรกเตอร์
6 เดือนที่ 2	5. ทำการทดสอบชุดเซนเซอร์และกลไก สนับสนุนในห้องปฏิบัติการ 6. ปรับปรุงชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนฯ 7. ทำการทดสอบชุดเซนเซอร์และกลไก สนับสนุนในภาคสนามภายใต้พื้นที่ที่มีความ ลาดเอียงและการเตรียมดินต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับ และประเมินผล 8. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ 9. ยื่นขอจดอนุสิทธิบัตร 10. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	5. ข้อมูลประกอบการปรับปรุงชุดเซนเซอร์ และกลไกสนับสนุน 6. ชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนต้นแบบ 7. ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมรถ แทรกเตอร์ในสภาพพื้นที่ต่างๆ 8. ผลการประเมินความคุ้มค่าทาง เศรษฐศาสตร์ 9. เอกสารยื่นขอจดอนุสิทธิบัตร 10. รายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซนเซอร์และระบบเก็บข้อมูล

2.1.1 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

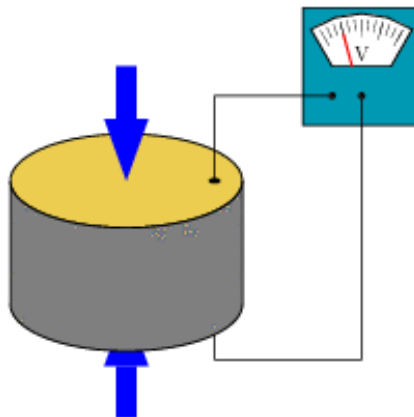
เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด(Strain) ของวัตถุ คิดค้นโดย เอ็ดเวิร์ด อี ชิมมอนส์ และอาร์เทอร์ ซี รูค ในปี ค.ศ.1938 ส่วนใหญ่สเตรนเกจ จะทำจากเส้นลวดโลหะขนาดเล็กขดเป็นรูปร่างต่างๆ อยู่บนแผ่นฉนวน นอกจากนั้นยังมีสเตรนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำด้วย ซึ่งมีความไวสูงกว่าและขนาดเล็กกว่าแบบลวดโลหะแต่มีราคาแพง



ภาพที่ 1 สเตรนเกจที่ทำจากฟอยล์โลหะ [4]

หลักการของเตรนเกจ คือ เมื่อสเตรนเกจถูกแรงกระทำ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป (ยืด หด บิด งอ) ทำให้ความต้านทานของวัตถุนั้นเปลี่ยนไปตามแรงที่กระทำ การนำไปใช้จะใช้การต่อวงจร Wheatstone bridge เพื่อหาความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปตัวอย่างการใช้สเตรนเกจ ในทางวิศวกรรมชีวเวช ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแรงต่างๆ เช่น ใช้เป็นเซ็นเซอร์ชั่งน้ำหนัก เซ็นเซอร์วัดแรงกดของฝ่าเท้า เซ็นเซอร์วัดความดันเลือด เป็นต้น

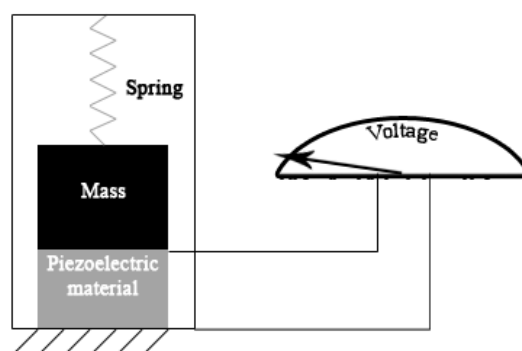
Piezoelectric (เพียโซอิเล็กทริก) คือ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่นๆ โดยเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆเหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุนั้นก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกันวัสดุที่มีสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก มีหลายชนิด เช่น คริสตอล(gallium phosphate, quartz, tourmaline) เซรามิก โพลีเมอร์ เป็นต้น



ภาพที่ 2 เพียโซอิเล็กทริก เปลี่ยนแรงกดเป็นพลังงานไฟฟ้าพอยล์ [5]

การนำเพียโซอิเล็กทริก ไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมชีวเวช เช่น ตัววัดคลื่นเสียงของหัวใจ(ไมโครโฟน), ตัวรับสัญญาณของเครื่องอัลตราซาวด์, Quartz crystal microbalance(QCM) ที่มีการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุลจำนวนมาก ตัวตรวจวัดแรง เป็นต้น

Accelerometer คือ เครื่องตัววัดความเร่ง ของการเคลื่อนที่ของวัตถุ ค้นเคยดีในมือถือสมาร์ทโฟนทั่วไป เช่น iPhone ตัวอย่างการใช้งานเช่น การเขย่าเพื่อเปลี่ยนเพลงหรือการเขย่าตัวเครื่องเพื่อใช้ในการควบคุมการเล่นเกมน ซึ่งคุณสมบัติของ accelerometer ที่ติดมาในเครื่อง โครงสร้างของ accelerometer จะประกอบด้วยสปริงและลูกตุ้มน้ำหนัก เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งลูกตุ้มน้ำหนักจะถูกกดไปอีกฝั่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ สปริงก็ทำหน้าที่ดึงกลับเข้าที่อีกครั้งเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่คือความเร่งเท่ากับศูนย์ ค่าที่วัดได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 3 Piezoelectric accelerometer [6]

ตัวเซ็นเซอร์ภายในที่จะใช้ในการตรวจวัดความเร่งของลูกตุ้มที่อยู่ในระบบนั้นมีหลายชนิด เช่น เพียโซอิเล็กทริก, สเตรนเกจ, ชนิดใช้แสงตรวจวัด, วัดแรงเฉือน เป็นต้น

การนำ accelerometer ไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมชีวเวช เช่น เครื่องตรวจวัดความเร็วที่ติดในรองเท้า เครื่องนับจำนวนก้าวเท้า เป็นต้น [6]

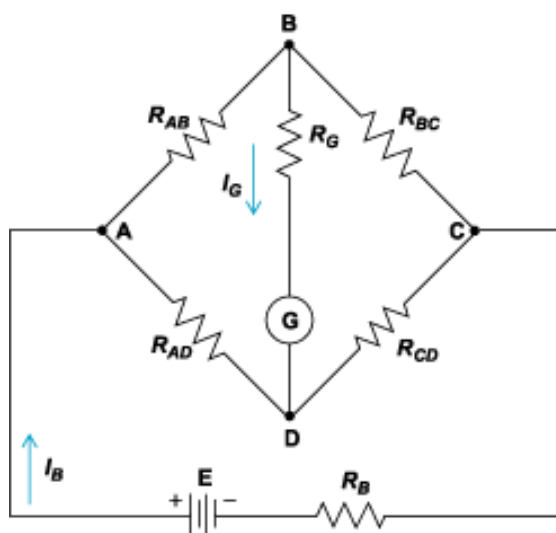
2.1.2 วงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง(DC Bridge)

บริดจ์กระแสตรงอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า บริดจ์ความต้านทาน ซึ่งประดิษฐ์โดยศาสตราจารย์ JameChristy ต่อมาได้รับความนิยมในช่วงของ Sir Charles Wheatstone ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของมัน ภายหลังบริดจ์ดังกล่าวจึงมีชื่อเรียกว่า “บริดจ์แบบวีทสโตนหรือวีทสโตนบริดจ์” วงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย

1. ตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน 2 สาขา เป็นวงจรปิด แต่ละสาขาจะประกอบด้วยตัวต้านทานต่อแบบอนุกรมกันอยู่ 2 ตัว ซึ่งสาขาของวงจรปิดนี้เรียกว่า แขนของบริดจ์ (Bridge Arm)

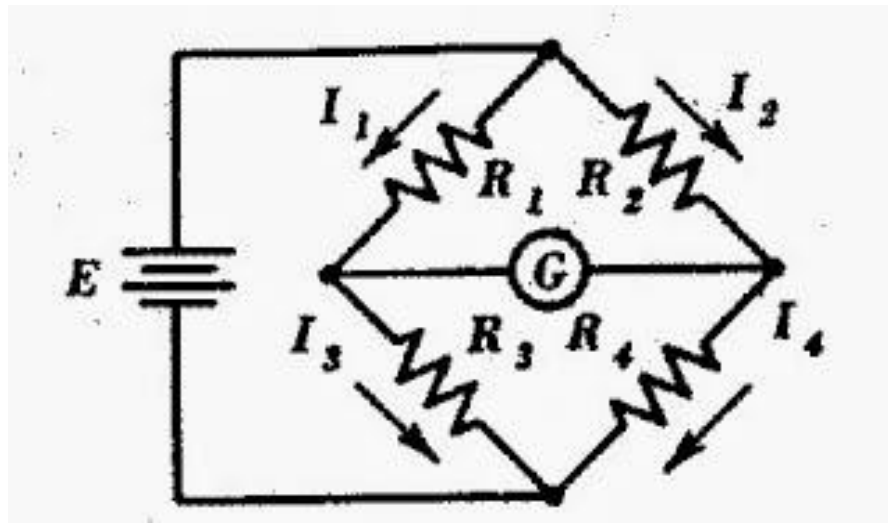
2. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(E) ซึ่งต่อขนานอยู่กับตัวต้านทานของวงจร ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับตัวต้านทานภายในวงจร

3. กัลวานอมิเตอร์ (G) จะต่อกับขั้วสายที่ขนานกัน ทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเพื่อบ่งบอกสภาพของวงจร ในกรณีที่เป็บริดจ์แบบสมดุลเข็มจะชี้ที่ศูนย์ แต่ถ้าไม่สมดุลเข็มจะเบี่ยงเบน



ภาพที่ 4 วงจรวีทสโตนบริดจ์ [7]

วงจรแบบบริดจ์กระแสตรงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ บริดจ์แบบสมดุล (Balanced Bridge) บริดจ์แบบไม่สมดุล (Unbalanced Bridge)



ภาพที่ 5 วงจรภายในแบบวีทสโตนบริดจ์ [8]

บริดจ์แบบสมดุล เป็นวงจรวัดค่าความต้านทานโดยการเปรียบเทียบความต้านทานที่ไม่ทราบค่า (กำหนดให้เป็น R_4) กับความต้านทานที่ทราบค่า (กำหนดให้เป็น R_3) ดังแสดงในภาพที่ 5 ถ้าหากกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ (G) เป็นศูนย์ แสดงว่าความต่างศักย์ระหว่างจุด 1,3 (จุดเชื่อมต่อของ R_1 และ R_3) และจุด 2,4 (จุดเชื่อมต่อของ R_2 และ R_4) เป็นศูนย์ จึงเรียกว่า "บริดจ์อยู่ในสมดุล" ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อม R_3 จะเท่ากับ R_4 (ความต้านทานที่ต้องการทราบค่า) และแรงดันตกคร่อม R_1 จะเท่ากับแรงดันตกคร่อม R_2

จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่า

แรงดันไฟตกคร่อม R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากันตามสมการ

$$I_3 R_3 = I_4 R_4$$

แรงดันไฟตกคร่อม R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากันตามสมการ

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

ในกรณีที่ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ $I_1 = I_3$ และ $I_2 = I_4$ แทน I_3 ด้วย I_1 และ แทน I_4 ด้วย I_2 ในสมการ

$$I_1 R_3 = I_2 R_4$$

จะได้ว่า

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

หรือ

$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

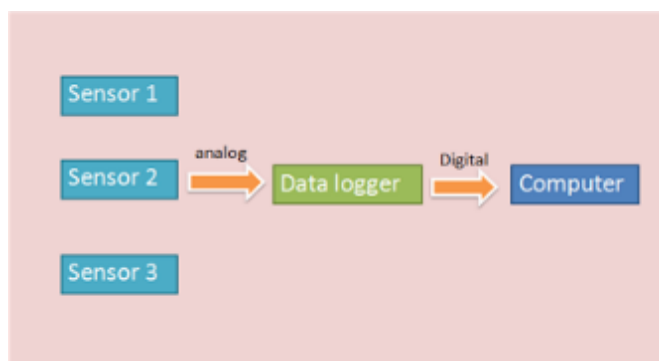
2.1.3 เครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger)

การเก็บข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น ความชื้น อุณหภูมิ แสงแดดในการงานเกษตร เป็นต้น จำเป็นต้องมีเครื่องคอยบันทึกและสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ง่ายโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger) จะเป็นตัวนำข้อมูลที่เก็บไว้แล้วมาถ่ายโอนเข้าคอมพิวเตอร์ เพื่อสะดวกต่อการขนย้ายและไม่สูญหาย [9]

1) เครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับวัดค่าและบันทึกข้อมูลในรูปสัญญาณชนิดต่างๆ โดยมีเซนเซอร์ (Sensor) รับค่าในรูปของอนาล็อก (analog) และส่งผ่านเครื่องแปลงสัญญาณ (Signal converter) ให้กลายเป็นดิจิตอล (digital) (A/D) และนำไปเก็บในหน่วยความจำ (Memory) ของเครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger) เพื่อการนำไปใช้ต่อไป หรือนำมาแสดงผลบนหน้าปัดของเครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger) หรือบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ การนำเสนอข้อมูลที่ได้จากเครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger) มี 3 รูปแบบ คือ

- (1) รูปแบบตาราง
- (2) รูปแบบ กราฟ
- (3) ใช้โปรแกรมในการนำเสนอ เช่น Excel



ภาพที่ 6 testo175-T3 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ Data Logger [9]

เครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger) จะประกอบด้วย นาฬิกาบอกเวลา Micro controller เครื่องตรวจจับ โดยสิ่งที่ต้องการเก็บข้อมูล เช่น ตัวตรวจจับอุณหภูมิ ตัวตรวจจับความเร็วลม หน่วยความจำ จอแสดงผล แหล่งจ่ายไฟ หม้อแปลงไฟฟ้า (adapter)

การใช้ Micro controller ในการควบคุมส่วนใหญ่ต้องใช้เวลาเป็นตัวกำหนดการทำงาน เช่น การบันทึกเวลาการทำงานเปิด-ปิดของเครื่องจักร การเก็บผลความชื้นในแต่ละวันของพืช ดังนั้น ถ้าในระบบควบคุม มีวงจรกำเนิดฐานเวลารวมอยู่ด้วยจะทำให้การออกแบบระบบและการเขียนโปรแกรมควบคุมสะดวกมากขึ้น วิธีนี้จะใช้ชิปที่ทำหน้าที่สร้างฐานเวลาจริงให้แก่ระบบ (RTC หรือ Real Time Clock) ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาจมีขนาดเล็กลงเป็น IC ที่ใช้พลังงานน้อยมากและมีความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น

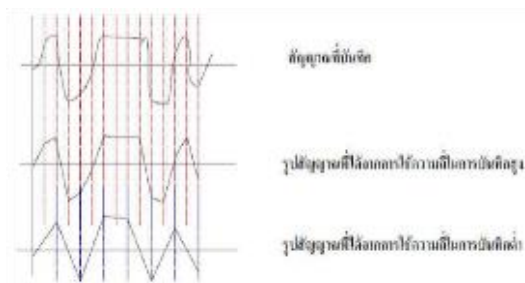


ภาพที่ 7 DS1307 Real Time Clock Mini Board [9]

แหล่งจ่ายไฟ ที่ใช้ส่วนมากจะมี 2 แบบ คือ ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V และ แบบใช้แบตเตอรี่ โดยเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน เช่น ถ้าต้องการใช้งานกลางแจ้ง ควรเลือกใช้แบบ Battery เป็นแหล่งจ่าย

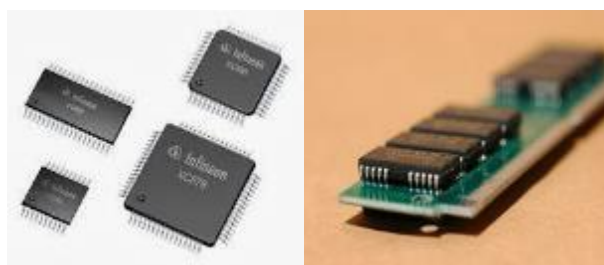
ความละเอียดที่ได้จากการวัดขึ้นอยู่กับ A/D ของเครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger) ที่เลือกใช้ว่ามีจำนวนบิตเท่าใด ยังมีบิตมากยิ่งวัดค่าได้ละเอียดมาก

ความถี่ในการเก็บข้อมูล (Sampling Frequency) มีผลต่อความแม่นยำในการเก็บข้อมูล ความถี่วนการเก็บข้อมูลที่ต่ำเกินไปอาจทำให้ระบบรับรูปแบบการตอบสนองที่ไม่ถูกต้อง ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 Data logging systems [9]

ระบบเครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger) จะเก็บข้อมูล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro controller) เพื่อควบคุมการทำงานของระบบเพื่อให้ส่วนต่างๆ ทำงานเก็บข้อมูล ตามคาบเวลาที่กำหนด และแสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์และเก็บในรูปหน่วยความจำ ซึ่งจัดได้ 2 ประเภทคือ เป็นหน่วยความจำที่อ่านได้เพียงอย่างเดียว (ROM) จะบรรจุโปรแกรมที่ต้องการประมวลผลการทำงาน ซึ่งแบ่งย่อยออกเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิป (Internal Program Memory) และหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมนอกชิป (External Program Memory) ซึ่งทั้งสองส่วนจะถูกแยกออกจากกันโดยคำสั่งทางซอฟต์แวร์ (software) และลักษณะการติดต่อกับฮาร์ดแวร์ (Hardware) คือจะมีคำสั่งเฉพาะสำหรับการติดต่อกับหน่วยความจำใดความจำหนึ่งและจัดสัญญาณโทรบ (Strobe Signal) ในการติดต่อกับหน่วยความจำแต่ละชนิดแยกออกจากกัน ขนาดของหน่วยความจำจะขึ้นอยู่กับการใช้งานและเบอร์ของชิป



ภาพที่ 9 หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรม(Program Memory) [9]

หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในชิปสามารถแบ่งย่อยเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลทั่วไป (Internal Ram) เป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลในขณะที่ทำงานและส่วนที่ใช้เป็นรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ (Special Function Register) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานในส่วนเฉพาะต่างๆ และสามารถจัดการหน่วยความจำและตำแหน่งต่างๆ ได้

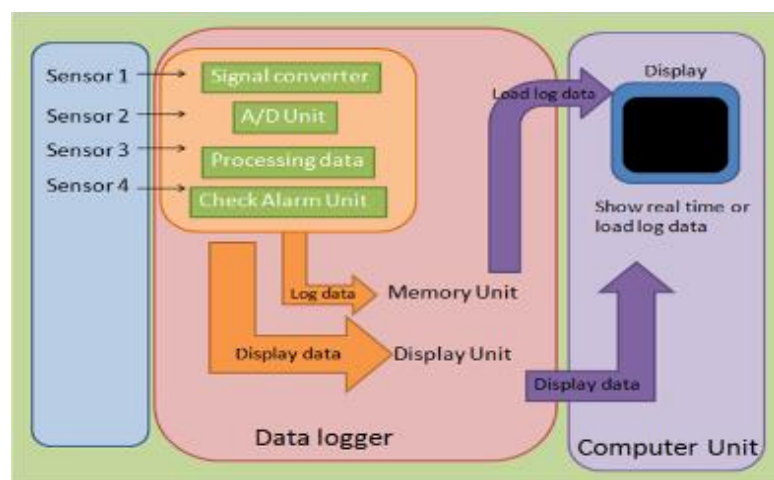
หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายนอกชิปสามารถเก็บข้อมูลบางอย่างไว้ไม่ให้สูญหาย แม้ว่าจะไม่มีการจ่ายไฟเข้ากับระบบก็สามารถทำได้ การใช้ IC หน่วยความจำ RAM พร้อมแบตเตอรี่สำรองประเภทลิเทียมหรือนิเกิล-แคดเมียมเป็นตัวเก็บข้อมูลเพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง ตามที่ต้องการจึงต้องมีการกำหนดขาของหน่วยประมวลผลกลางเข้ากับการต่อร่วมกับวงจรภายนอก

ระบบของเซนเซอร์ (Scanner) จะบรรจุสวิทช์และมีสายเชื่อมต่อกับ Integrating digital voltmeter ซึ่งส่วนมากจะมีความเร็วสูง โดยใช้ solid-state switching devices (JFET) การทำงานของ scanner จะถูกควบคุมโดยระบบ controller รูปแบบการทำงานของ scanner แบ่งได้ดังนี้

- (1) single-channel recording mode
- (2) single scan of all channel mode
- (3) continuous scan mode
- (4) periodic scan mode

2.1.4 การเก็บข้อมูล digital

สัญญาณจากทรานสดิวเซอร์ (transducer) จะผ่านเข้าไปในระบบของเซนเซอร์ (scanner) ไปยัง Integrating digital voltmeter ซึ่งใช้ analog to digital converter ความเร็วของการทำงานขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของ DVM และความละเอียดที่ต้องการ output จาก data logger เป็นค่าที่แสดงในจอภาพ มิเตอร์ แสดงเป็นแรงดัน output การบันทึกข้อมูลจากเครื่องแปลงสัญญาณข้อมูล (Data Logger) โดยส่วนมากจะพิมพ์ออกทางเครื่องพิมพ์ อย่างไรก็ตามก็สามารถเก็บบันทึกข้อมูลไว้ในอุปกรณ์อื่นได้ เช่น ฮาร์ดดิสก์ คอมพิวเตอร์ แลปแม่เหล็ก เป็นต้น



ภาพที่ 10 การเก็บข้อมูล digital [9]

2.1.5 การสอบเทียบเครื่องมือวัด(Calibration)

เนื่องจากเครื่องมือวัดที่ใช้ในการสำรวจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำและเชื่อถือได้ของข้อมูลจึงจำเป็นต้องดำเนินการให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดที่ใช้ในการสำรวจสามารถให้ผลการวัดที่แม่นยำตามความต้องการ การสอบเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับ การทำให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดที่ใช้ทำงานยังสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำตามที่ต้องการ(Miracle International Technology Co.,Ltd., 2011)

1) ความหมายของการสอบเทียบ

การสอบเทียบ หมายถึงการดำเนินการซึ่งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการชี้บอกโดยเครื่องมือวัดหรือระบบการวัด หรือค่าที่แสดงโดยเครื่องมือวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมนัยที่รู้ค่าของปริมาณที่วัดภายใต้ภาวะเฉพาะที่บ่งไว้ กล่าวคือ การสอบเทียบเป็นการดำเนินการภายใต้สภาวะเฉพาะเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือวัดเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่รู้ของปริมาณที่วัด (ซึ่งต้องเป็นค่าที่สามารถอ้างอิงได้) ผลจากการสอบเทียบจะให้ออกมาว่าเครื่องมือวัดที่ใช้ในการสำรวจยังคงมีคุณลักษณะทางด้านมาตรวิทยาที่เหมาะสมในการใช้งานต่อไปหรือไม่ [10]

2) ความสำคัญของการสอบเทียบ

ผลจากการสอบเทียบเมื่อนำมาวิเคราะห์ จะทำให้สามารถกำหนดได้ว่าเครื่องมือวัดควรจะใช้ต่อไปหรือจำเป็นต้องปรับแต่งผลจากการสอบเทียบ ทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องมือวัดที่ใช้ในการสำรวจยังคงทำงานได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ ผลการสอบเทียบหลายๆครั้งจะแสดงให้เห็นคุณลักษณะทางด้านความเสถียร(Stability)ของเครื่องมือวัด

การสอบเทียบเครื่องมือวัดนั้น ผลการวัดของเครื่องมือวัดนั้นส่งผลต่อคุณภาพของข้อมูลดังนั้นเครื่องมือวัดที่ไม่มีผลต่อคุณภาพของข้อมูลไม่จำเป็นต้องสอบเทียบ การกำหนดว่าเครื่องมือวัดใดต้องสอบเทียบบ้างอาจจะใช้ข้อสันนิษฐานดังต่อไปนี้

- ตั้งคำถามว่าหากเครื่องมือวัดที่ใช้ในการสำรวจอ่านค่าผิดไปจากเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จะได้รับผลกระทบที่เสียหายต่อคุณภาพของข้อมูลหรือไม่ หากพบว่าการสำรวจขึ้นอยู่กับค่าการอ่านของเครื่องมือวัดเป็นสำคัญแสดงว่าเครื่องมือวัดนั้นต้องดำเนินการสอบเทียบ

- เมื่อใดที่มีเหตุผลที่จำเป็นต้องมั่นใจในค่าของเครื่องมือวัดก็ต้องสอบเทียบตัวอย่างเช่น เรื่องของความปลอดภัย

การสอบเทียบเป็นสิ่งที่ต้องใช้ค่าใช้จ่าย แต่ก็มีผลความจำเป็น เนื่องจากหากพิจารณาจะเห็นว่ามูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข้อมูล เมื่อใช้เครื่องมือวัดที่ไม่เป็นมาตรฐานค่าใช้จ่ายในการสำรวจซ้ำอาจสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบเครื่องมือวัด การสอบเทียบที่ทำมากเกินไปจนเกิดความจำเป็นอาจก่อให้เกิดความสูญเสียงบประมาณที่เกินความจำเป็น [10]

3) ค่าผิดพลาดในการวัด(Error)

ค่าผิดพลาดในการวัด (Error) คือความแตกต่างระหว่างค่า(Value) ที่แสดงบนเครื่องมือกับค่าจริงของที่วัดได้ ค่าผิดพลาดแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

(1) ค่าผิดพลาดแบบสุ่ม ซึ่งเป็นการเกิดขึ้นโดยธรรมชาติ ค่าต่างๆที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปและไม่สามารถที่จะทำการคาดคะเนได้จากการทำงานของการวัด ค่าผิดพลาดแบบนี้เป็นค่าผิดพลาดที่ไม่สามารถควบคุมไม่ให้เกิดขึ้นได้ ได้แก่ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป การสั่นสะเทือนของสถานที่ทำงาน การรบกวนของสัญญาณความถี่ทางไฟฟ้า เป็นต้น

(2) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากตัวแปรที่ควบคุมเป็นค่าผิดพลาดจากเหตุที่สามารถควบคุมทำให้น้อยลงจนเป็นศูนย์หรือควบคุมไม่ให้เกิดต่อการวัดได้ เช่น ค่าผิดพลาดเนื่องจากการอ่านค่าของผู้ทดสอบหรือค่าผิดพลาดจากความสกปรกของเครื่องมือ เป็นต้น

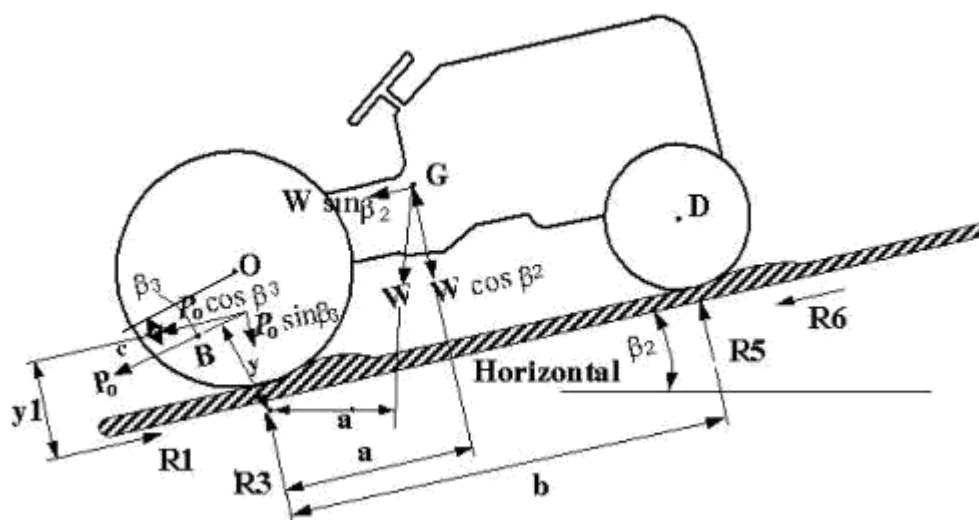
ซึ่งค่าผิดพลาดต่างๆที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องรู้และทำการควบคุมให้เกิดค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเพื่อให้ได้มาซึ่งความเที่ยงตรงของการวัด

4.4) ความเที่ยงตรง(Accuracy)

ความเที่ยงตรง(Accuracy)คือคุณภาพที่กำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบการวัด สามารถพิจารณาแบ่งเป็น2ส่วน ตามรูปแบบของค่าผิดพลาด โดยค่าผิดพลาดต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์จะต้องพิจารณาตามชนิดและธรรมชาติเครื่องมือสอบเทียบข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของการวัด เช่น การพิจารณาวัดขนาด น้ำหนัก เป็นต้น

2.2 กลศาสตร์ของรถแทรกเตอร์

แรงกระทำในระนาบตั้ง ขณะทำงานดูดลากบนพื้นเอียง ซึ่งมีมุมลาดเท β_2 และทิศทางของแรงดูดลากทำมุม β_3 กับแนวการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ มีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 11 [11]



ภาพที่ 11 แรงกระทำในระนาบตั้งขณะทำงานดูดลากบนพื้นเอียง

W = น้ำหนักรถแทรกเตอร์	R_f = แรงจุดจาก (Traction Force)
P_o = แรงลาตั้ง (Drawbar Pull)	R_2 = แรงปฏิกิริยาของดิน (Soil Reaction) ที่กระทำต่อล้อขับเคลื่อน ที่ตำแหน่ง c
	R_5 = แรงปฏิกิริยาของดิน (Soil Reaction) ที่กระทำต่อล้อหน้า ซึ่งให้มีแนวแรงผ่านจุดศูนย์กลางของพลาต้อ
	R_6 = แรงต้านทานการเคลื่อนที่ (Rolling Resistance)

ผลรวมของแรงในแนวนอนกับพื้นเอียง

$$R_f - W \sin \beta_2 - P_o \cos \beta_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \sum M_o &= 0 \\ R_5(b) + T_i + P_o(c) &= W(a') + R_6(r) \\ R_5 &= \frac{W(a') + R_6(r) - P_o(c) - T_i}{b} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ในสภาวะรถแทรกเตอร์หยุดนิ่ง $P_o = 0, \quad R_6 = 0, \quad T_i = 0$

$$R_{5 \text{ static}} = \frac{W(a')}{b} \quad \dots\dots\dots (3)$$

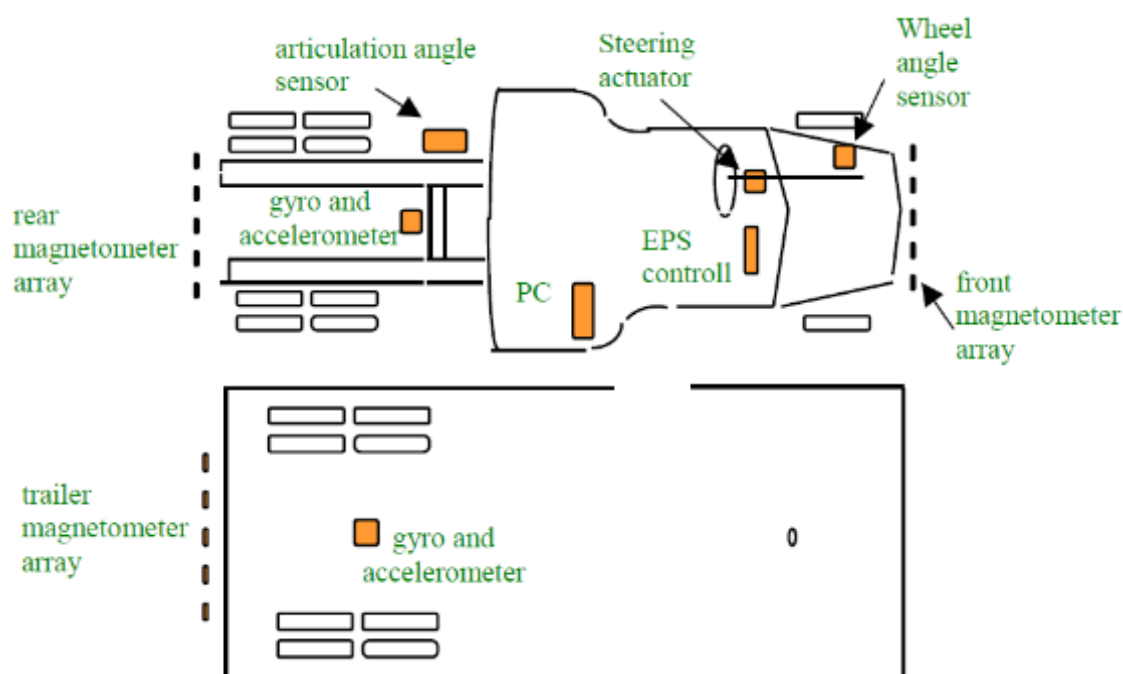
ในสภาวะรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ $P_o > 0, \quad R_6 > 0, \quad T_i > 0$

$$R_{5 \text{ dyn}} = \frac{W(a') + R_6(r) - P_o(c) - T_i}{b} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Weight \text{ Transfer} &= R_{5 \text{ static}} - R_{5 \text{ dyn}} \\ &= \frac{W(a')}{b} - \frac{W(a') + R_6(r) - P_o(c) - T_i}{b} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

2.3 ระบบควบคุม

ในปี 1993 the United States Department Transportation, Federal Highway Administration และ the University of California, Berkeley [12] ได้ทำข้อตกลงร่วมกันในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ “Steering and Braking Control of Heavy Duty Vehicles” ซึ่งนักวิจัยได้เน้นไปที่การควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกหนัก สำหรับระบบ Automated Highway System โดยผลงานได้ดำเนินการแล้วเสร็จและเผยแพร่ในปี 1999 เป็นการทดลองกับรถบรรทุกหัวลาก class 8 ที่มี trailer ยาว 45 ฟุต โดยทำการควบคุมการเคลื่อนที่ด้านข้าง และไปข้างหน้า โดยระบบบังคับเลี้ยวและระบบเบรคตามลำดับ ซึ่งเป็นการติดตั้งอุปกรณ์เสริมลงบนอุปกรณ์เดิมที่มีอยู่ และควบคุมด้วย software ที่พัฒนาการควบคุมมาโดยเฉพาะ (ภาพที่ 12 แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งลงบนรถบรรทุก)

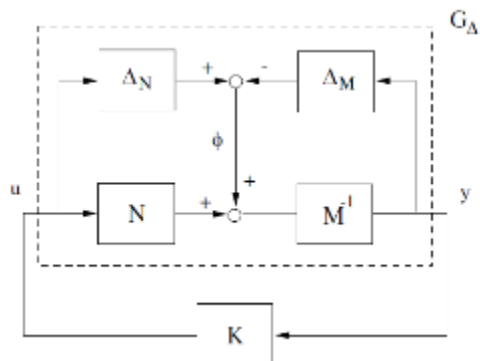


ภาพที่ 12 แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งลงบนรถบรรทุก

จากภาพการวัดระยะขจัดในแนวด้านข้างที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นกลางถนนใช้ Magnetometer array วางเรียงทั้งกันชนหน้า หลัง และบริเวณด้านหน้าของตู้บรรทุก อุปกรณ์วัดแรงเฉื่อยใช้ accelerometers and gyroscopes ติดตั้งที่หัวลากและตู้ ระบบ String Potentiometers ใช้สำหรับวัดมุมที่ล้อบังคับเลี้ยวกระทำกับถนนและมุมที่ใช้ในการคำนวณ ระบบตัวตรวจวัดทั้งหมดสื่อสารกับอุปกรณ์ทำงานคือ ระบบเบรคและระบบชดเชยการบังคับเลี้ยวด้วย the A/D and D/A board

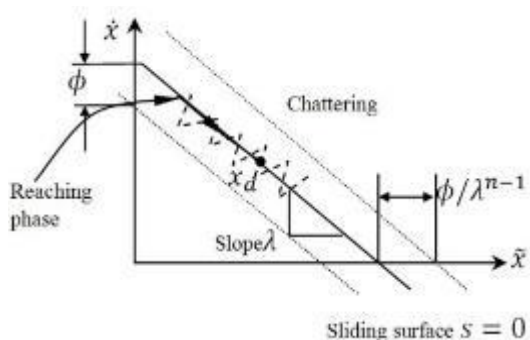
ในการควบคุมนั้นใช้วิธีการควบคุมแบบ H^∞ loop shaping controller สำหรับส่วนที่ทำเป็นเชิงเส้นได้และใช้ Sliding Mode Controller สำหรับค่าความไม่แน่นอนและสัญญาณรบกวนที่มี

ขอบเขต โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าวิธีการดังกล่าวมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงจากภายนอกและเหมาะสมสำหรับใช้ควบคุมยานพาหนะ (ภาพที่ 13-14 แสดงแนวคิดของวิธีการ H^∞ และ SMC)



ภาพที่ 13 H-infinity robust stabilization problem

Lemma : The normalized left coprime factors N and M of a transfer function $G \in \mathbb{R}$ exist and are unique to within left multiplication by a unitary matrix.



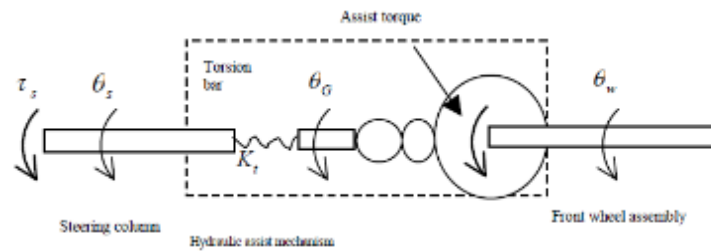
ภาพที่ 14 Sliding mode control SCM

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x}$$

$$s \cdot \dot{s} \leq -\eta |s|$$

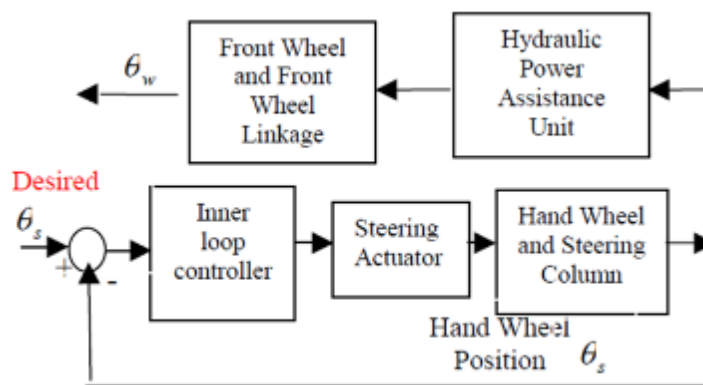
การทดสอบแบบลูปเปิดใช้เพื่อหาพลศาสตร์ของรถบรรทุกและค่าตัวแปรต่างๆ จากนั้นนำไปปรับค่าบนแบบจำลองเชิงเส้น จากนั้นทำการทดลองแบบลูปปิดที่ความเร็ว 45 miles/hr ที่ทางโค้งและ 60 miles/hr ที่ทางตรงซึ่งประสบความสำเร็จ และได้ดำเนินการทดสอบระบบเบรกอัตโนมัติ เพื่อที่จะใช้ในการควบคุมด้วยความเร็วของทางหลวงต่อไป

แม้ว่าระบบของรถบรรทุกจะได้รับการจำลองคณิตศาสตร์มาดีเพียงไร ก็ยังจำเป็นต้องพิจารณาที่ระบบบังคับเลี้ยวต่างหากอีกทอดหนึ่งเป็นระบบย่อยของการควบคุมทิศทาง จึงมีงานวิจัยที่ต่อยอดจากงานวิจัยข้างต้น [13] โดยเพิ่ม steering actuator ยี่ห้อ NSK ที่ประกอบด้วย DC motor, clutch, และ ECU แยกส่วนซึ่งเป็นตัวควบคุมกระแสที่ป้อนให้กับ DC motor อีกทอดหนึ่ง ณ ค่ากระแสที่เหมาะสมกับภาระในการบังคับเลี้ยว ซึ่งมีลักษณะแปรผันตรงกับค่าความต่างศักย์จากคำสั่งการบังคับเลี้ยวด้วยพวงมาลัยไฟฟ้า ซึ่งตัว clutch จะช่วยในการตัดต่อกำลังเพื่อควบคุมการบังคับเลี้ยวอีกทอดหนึ่ง ระบบบังคับดังกล่าวมีอุปกรณ์ตรวจวัด potentiometer with encoder สำหรับเป็นสัญญาณป้อนกลับ โดยระบบบังคับเลี้ยวดังกล่าวสามารถเขียนเป็นแบบจำลองได้ดังภาพที่15



ภาพที่ 15 แสดง Steering actuator mounted on the steering column

การควบคุมเป็นลักษณะ ของการสร้างความคงทนของระบบควบคุมผ่านการ loop shaping design โดยพิจารณาจาก frequency domain bode plot ซึ่งลักษณะของการควบคุมแบบลูปปิดแสดง ดังภาพ 15



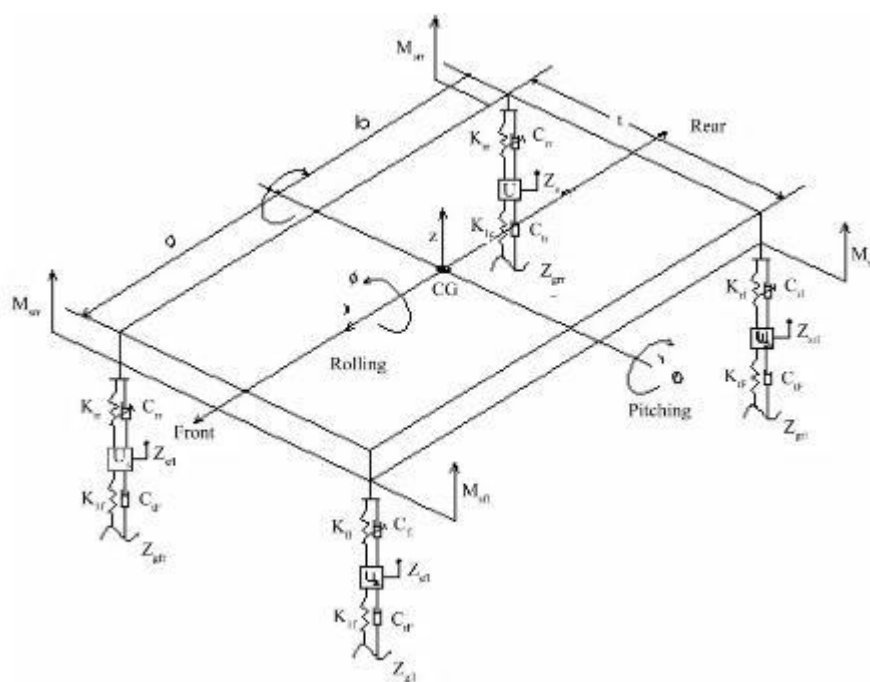
ภาพที่ 16 แสดง Closed loop block diagram of the steering subsystem

ปี 1990 Kwang-Mo Noh, *Iowa State University* [14] ได้เสนอตัวควบคุมแบบปรับค่าได้เองสำหรับระบบบังคับทิศทางรถ farm tractor โดยได้สรุปถึงอุปกรณ์ตรวจวัดแบบต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการควบคุมดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 1 Characteristics of position sensing system

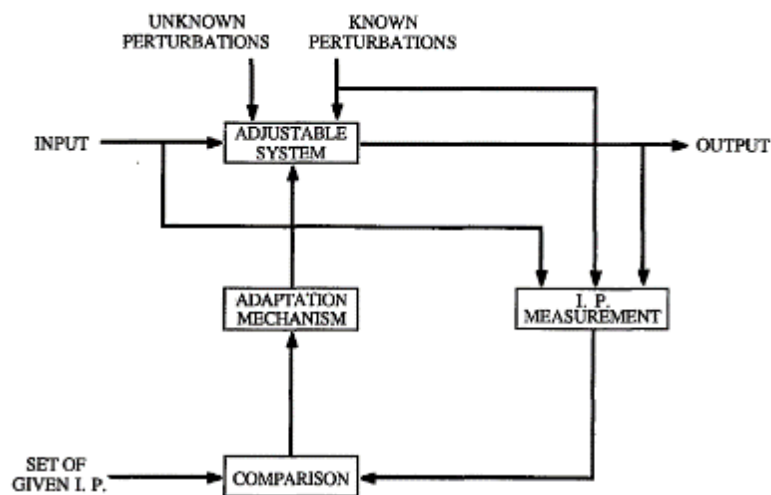
System	Sensor	Response	Cost	Accuracy	Versatility
Mechanical	Feeler	Fast	Low	Average	Poor
Leader-cable	Energized wire	Fast	Average	Excellent	Poor
Ultrasonic	Sonic transducer	Fast	Low	Average	Poor
Photoelectric	Infra-red	Average	High	Good	Average
	Image sensor	Slow	High	Good	Average
Navigational	Gyroscope	Fast	Average	Poor	Poor
	Radio signal	Average	High	Average	Excellent
	Radar	Fast	High	Average	Average
	Laser	Fast	High	Good	Average
	Satellite	Slow	High	Poor	Excellent

จากตารางพบว่าหากไม่มีการใช้ระบบนำร่องด้วยดาวเทียมหรือสถานีแล้ว ตัวตรวจวัดที่สามารถนำมาใช้แสดงดังกรอบเล็กในภาพโดยความเร็วในการตอบสนอง ราคา ความแม่นยำ แสดงในหลักถัดมา โดยไม่ว่าการควบคุมทิศทางจะเป็นแบบใดจำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Kinematics, Mechanics, และ Rigid-body dynamics ออกมาก่อนโดยได้ออกมาเป็นสมการ 6 องศาอิสระแบ่งเป็น 3 องศาอิสระสำหรับการเคลื่อนที่เชิงเส้น และ 3 องศาอิสระสำหรับการเคลื่อนที่เชิงมุม (ภาพที่ 1) ซึ่งสามารถจัดออกมาในรูปตัวแปรแสดง



ภาพที่ 17 แสดง 6-DOF of chassis and tire

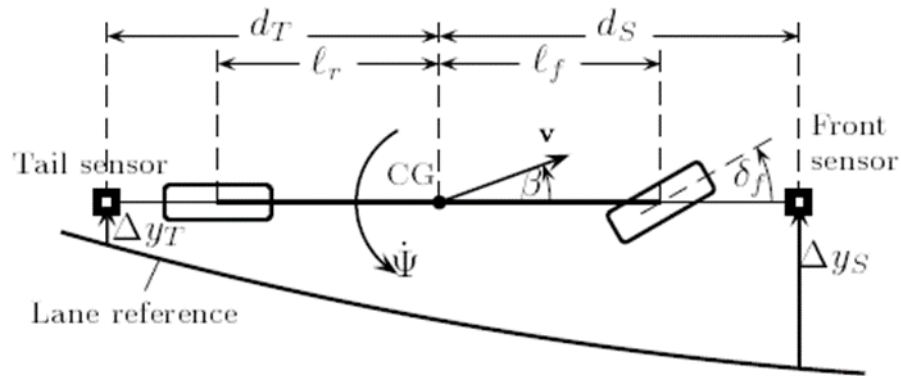
การควบคุมนั้นมีหลายวิธีเช่น ใช้ PID ควบคุมระบบที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว หรือใช้ optimal controller สำหรับหาค่าตัวควบคุมที่ดีที่สุดในสถานการณ์ต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการใช้วิธีนี้ในทางปฏิบัติมีความยากเนื่องจากต้องการค่าป้อนกลับจำนวนมาก หรือการใช้ adaptive controller ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การกำหนดค่าตัวแปร และทดสอบผลตอบแทน ซึ่งบางครั้งอาจไม่ได้ผลดีเท่าที่ควรแม้ว่าวิธีการนี้จะเหมาะกับการควบคุมระบบยานพาหนะก็ตาม แต่ก็ประสบกับปัญหาของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรและค่าความไม่แน่นอนที่มากับสัญญาณรบกวน และโมเดลที่ไม่เหมาะสม การออกแบบกฎการควบคุมจึงมักมาในแนวทางของ robust adaptive control ซึ่งรูปแบบของการควบคุมแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงแนวคิดของการควบคุมแบบปรับค่าได้

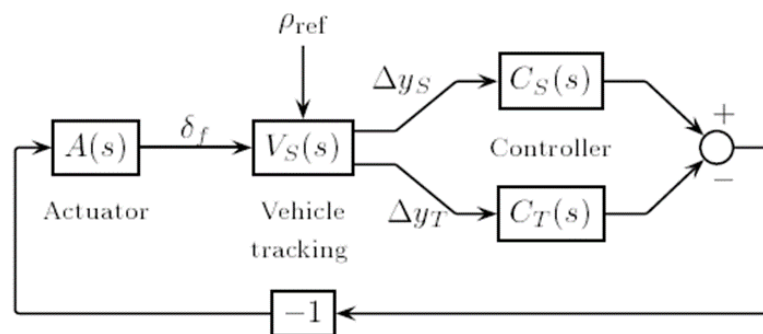
จากภาพพบการเปรียบเทียบของดัชนีสมรรถนะ IP เพื่อใช้ในการปรับค่า โดยใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น self-tuning regulator (STR), model-reference adaptive system (MRAS), gain-scheduling system, or dual controller เป็นต้น ขณะที่สัญญาณรบกวนทั้งที่รู้ค่าและไม่รู้ค่าถูกชดเชยได้ด้วยการควบคุมแบบ robust control เช่น SMC หรือ HSMC เป็นต้น

งานวิจัยต่อมา [15] พบว่า การใช้สัญญาณอ้างอิงจากตัวตรวจวัดด้านล่างสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ติดตั้งอยู่ด้านหน้าเพื่อใช้ในการบังคับเลี้ยวอัตโนมัตินั้นมีข้อจำกัด เรื่องการทำความเร็วที่ไม่สามารถทำได้ถึงค่าที่ใช้กันในทางหลวง ผู้วิจัยจึงใช้การเพิ่มตัวตรวจวัดที่ด้านหลังเพื่อวัดการเบี่ยงเบนด้านข้างจากค่าอ้างอิงกลางถนน ทำให้การควบคุมทำได้ง่ายขึ้นเมื่อใช้แบบจำลองเชิงสองล้อที่ทดแทนแบบจำลอง สี่ล้อ (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 แสดงแบบจำลองเส้นทางเดียว (สองล้อ) สำหรับระบบติดตามเส้นทางอัตโนมัติ ที่มีตัวตรวจวัดหัวและท้าย

โดยหากพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างสามารถสร้างเป็นสมการเชิงเส้นในรูปตัวแปรแสดงและเขียน block diagram ได้ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 Block diagram of controller using front and tail lateral displacement

ซึ่งพบว่าแม้ว่าสามารถใช้ s-domain เพื่อออกแบบตัวควบคุมได้ก็ยังคงจำเป็นต้องใช้การออกแบบด้วยวิธีการควบคุมแบบคงทนเพื่อใช้ในสถานการณ์จริงที่ข้อจำกัดและสิ่งรบกวนมากมาย ซึ่งการออกแบบเริ่มต้นด้วยการใช้

1. State input feedback design
2. State output feedback design เพื่อลดการใช้ค่า derivative ทำให้ลดข้อผิดพลาดของการป้อนกลับ
3. Robustness design ใช้การปรับค่าจากการทดลองบนหน้างานจริงเพื่อปรับค่า gain เหมาะสมกับการทำงาน

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้ตัวควบคุมแบบ output feedback with integral action [16] สำหรับชดเชยค่าความไม่แน่นอนและสัญญาณรบกวนในระบบบังคับเลี้ยวอัตโนมัติของรถโดยสารในเมือง ที่ใช้แบบจำลองแบบ single track โดยจำลองตัวควบคุมด้วยสัญญาณอ้างอิงจากสมการโพลีโนเมียล พร้อมๆ กับสร้างสัญญาณรบกวนด้วยโครงสร้างโพลีโนเมียลเช่นกัน จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่า ระบบควบคุมสามารถชดเชยค่าความไม่แน่นอนของโครงสร้างแบบจำลองได้ดี เนื่องจาก static state feedback law สามารถใช้คำนวณ augmented stated space matrix หน้าตัวแปรแสดง ที่ทำให้เกิดการจำกัดขอบเขตของ state output และเกิด Hurwitz invariant polynomial บนโครงสร้างสมการควบคุม ทำให้ยืนยัน เสถียรภาพของระบบควบคุมในที่สุด

2.4 ระบบควบคุมอัตโนมัติในเครื่องจักรกลเกษตร [17-18]

ปัจจุบันรถอัตโนมัติถูกนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก ในอเมริกา ระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ ถูกพัฒนาเป็นสินค้าในภาคการเกษตร แต่สำหรับหุ่นยนต์อัตโนมัติ หุ่นยนต์ระบบ multi-agent หรือระบบควบคุมทางไกลนั้น คาดว่าน่าจะพัฒนาต่อไป ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาหลากหลายแง่มุม ตั้งแต่องค์ประกอบของเทคโนโลยีที่ช่วยสนับสนุนรถอัตโนมัติ จนถึงระบบอัตโนมัติที่ใช้ปฏิบัติงานเฉพาะเจาะจง รวมทั้งจะแนะนำผลงานวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับระบบหุ่นยนต์รุ่นใหม่อีกด้วย

1. เทคโนโลยี Drive-by-wire

เทคโนโลยี Drive-by-wire ที่ช่วยให้การหมุนพวงมาลัยง่ายและสบายมากขึ้นนั้น ไม่ได้มีประโยชน์สำหรับการขับรถที่ต้องมีคนขับ (การขับรถเกียร์ธรรมดา) เท่านั้น แต่ยังเป็นเทคโนโลยีที่สำหรับระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติและหุ่นยนต์ต่าง ๆ อีกด้วย ซึ่งในอนาคตน่าจะพัฒนาต่อไปได้อีกมาก

Drive-by-wire หมายถึง การทำให้การขับเครื่องบินหรือรถประเภทต่าง ๆ ในอดีต ที่ผู้ขับต้องขยับอุปกรณ์ควบคุม เช่น พวงมาลัยหรือคันโยกโดยตรง เพื่อบังคับทิศทาง เปลี่ยนเกียร์ เพิ่มลดความเร็ว (คันเร่งรถยนต์) เปลี่ยนมาเป็นการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องหัวฉีดอัดลม/น้ำมัน (Drive) โดยคนขับเป็นคนกดสวิทช์หัวฉีดไฟฟ้านั้น (wire หมายถึงสายไฟ) กลไกในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Drive-by-wire (ในที่นี้จะใช้ตัวย่อว่า DWB)

เมื่อเปลี่ยนเป็นระบบ DWB แล้ว การควบคุมที่เคยใช้คนควบคุมและต้องใช้แรงคนในระดับหนึ่งนั้น เปลี่ยนเป็นทำได้โดยง่ายมากขึ้น โดยมีข้อดี เช่น เซ็นเซอร์การควบคุมการทำงานจะรวมมาอยู่ด้วยกันแล้ว กลายเป็นการควบคุมด้วยการกดปุ่มเพียงเท่านั้น เมื่อกลายเป็น DWB แล้ว การควบคุมในแต่ละส่วนจะขึ้นอยู่กับไฟสัญญาณ ดังนั้นการใช้ระบบอัตโนมัติที่ใช้คอนโทรลเลอร์ที่มีไฟสัญญาณหรือระบบที่ใช้หุ่นยนต์ก็จะง่ายมากขึ้น และจากนี้จะกล่าวถึง รถแทรกเตอร์ที่แบบมีคนขับในปัจจุบันที่ถือเป็นตัวแทนของเครื่องจักรด้านการเกษตร และสถานการณ์ปัจจุบันรวมถึงความเป็นไปได้ในอนาคตของ DWB

ระบบการควบคุมหลักของรถแทรกเตอร์คือ การเดินเครื่องหรือปิดเครื่องยนต์ การเปลี่ยนเกียร์หลักและเกียร์รอง ความเร็ว/ช้าของเครื่องยนต์ การเปิด/ปิดของ PTO การเปลี่ยนความเร็วของ PTO การเลื่อนขึ้นลงของหัวฉีด (การเปลี่ยนแรงดันน้ำมัน) การแยก/สัมผัสกันของคลัช และการเปิด/ปิดเบรกเป็นต้น รถแทรกเตอร์ขนาดเล็กที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน เมื่อเปรียบเทียบแล้ว ระบบควบคุมหลักที่เปลี่ยนเป็น DWB มากที่สุด คือ การเดินเครื่องหรือปิดเครื่องยนต์ การเลื่อนขึ้นลงของหัวฉีด ส่วนรถแทรกเตอร์ขนาดใหญ่ ราคาแพง ส่วนที่เปลี่ยนเป็น DWB มากที่สุดคือ เกียร์และส่วนที่เกี่ยวกับ PTO ข้างต้นคือสถานการณ์การนำ DBW มาใช้ในแทรกเตอร์ที่ขายอยู่ในปัจจุบัน ต่อมาจะขอแนะนำแทรกเตอร์ระบบควบคุมอัตโนมัติที่ศูนย์วิจัยเกษตรกรรมและอาหารแห่งชาติได้ปรับปรุงขึ้น เป็นตัวอย่างการทดลองนำ DBW มาใช้ในส่วนควบคุมการทำงาน มีเป้าหมายเพื่อทำให้เป็นหุ่นยนต์ ทำให้เป็นระบบอัตโนมัติ แแทรกเตอร์ที่นำมาปรับปรุงเป็นเครื่องธรรมดารุ่นเล็ก (กำลัง 22.8 kW) ในปัจจุบัน แม้แต่ในรถปลูกข้าวกลไกการบังคับที่ใช้ในแทรกเตอร์จะเป็นแบบระบบไฮดรอลิกทั้งหมด

2) ระบบช่วยเหลือการขับ

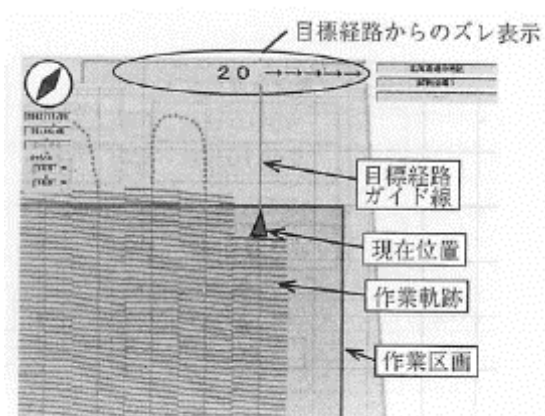
การทำงานของรถที่ใช้ทางการเกษตรแบบมีคนขับนั้น ในปัจจุบันบนหน้าจอจะแสดงตำแหน่งของรถ เส้นทางการทำงาน เส้นทางการแนะนำในการทำงาน ซึ่งระบบช่วยเหลือสนับสนุนการควบคุมหรือการตัดสินใจของผู้ขับเช่นนี้เรียกว่า “ระบบช่วยเหลือคนขับ” ในที่นี้จะขอแนะนำตัวอย่างระบบเนวิเกเตอร์ช่วยเหลือคนขับที่ศูนย์เกษตรและอาหารแห่งชาติได้นำเสนอในปี 2003 และระบบพาราเรลแทรกกิ้งที่พัฒนาโดยบริษัท Deere & Company ของอเมริกา ที่วางขายเป็นสินค้าในปี 2001

(1) การติดตั้งเนวิเกเตอร์ช่วยในการขับ (เนวิช่วยขับ) ที่แทรกเตอร์จะทำให้ทราบข้อมูล ตำแหน่งทิศทางจาก GPS และทราบสถานะของเครื่อง ซึ่งข้อมูลที่ช่วยขับเคลื่อน เช่น ตำแหน่งปัจจุบันหรือวิถีของรถนี้จะแสดงบนหน้าจอ นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งการบันทึกข้อมูลการทำงานอย่างละเอียดได้อีกด้วย การทำงานที่มีขอบเขตการทำงานกว้างและติดตามยาก เช่น การพ่นยา หรือการทำงานตอนกลางคืน หากทำงานผ่านจอข้อมูลก็จะทำได้ไม่สิ้นเปลืองและสะดวกมากขึ้น

โครงสร้างของเครื่องเนวิช่วยขับ คุณภาพข้อมูล คุณภาพการแสดงผล และคุณภาพการบันทึกข้อมูลของเนวิช่วยขับ จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำงานของเซ็นเซอร์ ซึ่ง I/O คอนโทรลเลอร์ (ติดตั้ง one-port microcomputer ที่เป็น port ที่สลับการใส่ข้อมูลใน serial port และ an A / D conversion input ได้) ที่เป็นเหมือนศูนย์รวบรวมข้อมูลจะทำหน้าที่หลายอย่าง และเซ็นเซอร์แต่ละตัวจะรับข้อมูลที่ต้องการสำหรับข้อมูลตำแหน่ง GPS ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานและมีความเชื่อมโยงกันนั้น จะ GPS แต่ละตัวจนถึง RTK-GPS สามารถรองรับข้อมูลของอย่างเป็นแบบแผน นอกจากนี้ โปรโตคอลแต่ละชนิดก็มีความสามารถในการจัดการกับระยะเวลาการรับส่งข้อมูล ความเร็วในการรับส่ง และการประกอบเข้าด้วยกันได้

ภาพที่ 21 แสดงตัวอย่างของโปรแกรมนำทางช่วยขับในการฉีดยาฆ่าแมลงที่มีระยะกว้าง 10 ม. เส้นประคือวิถีการเคลื่อนตอนที่เป็นรถเปล่า ตอนเครื่องทำงาน เส้นขอบเขตการทำงานที่ปรับตามความ

กว้างของระยะทำงาน จะแสดงให้เห็นถึงร่องรอยการทำงาน พิกัดตำแหน่งของจุดนี้จะถูกบันทึกสภาพทั้งตอนที่ทำงานและไม่ได้ทำงาน จอจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันตรงกลางจอ ทิศทางการเคลื่อนที่จะเลื่อนไปทางด้านบนด้วยตัวเอง หน้าจอเป็นจอแบบสัมผัสได้สามารถขยายใหญ่หรือทำให้เล็กลงและเลื่อนขึ้นลงได้ นอกจากนี้ ในระหว่างวิ่งจะแสดงระยะการทำงานที่ตั้งไว้ในรูปแบบเส้นนำทางแบบตาราง ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเคลื่อนที่กับเส้นนำทางที่ใกล้ที่สุดที่ (เส้นทางเป้าหมาย) กับทิศทางที่ไปนั้นจะแสดงเป็นลูกศรและตัวเลขในส่วนบนของจอ ในระหว่างทำงานก็สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งการแสดงของเส้นนำทางได้



ภาพที่ 21 ตัวอย่างของโปรแกรมนำทางช่วยขับในการฉีดยาฆ่าแมลง

ยกตัวอย่างเช่น ระบบพาราเรลแทรกกิ้ง (PTS) ที่บริษัท Deere&Company พัฒนาขึ้นมานั้นได้ถูกติดตั้งอุปกรณ์ช่วยขับ ซึ่งหนึ่งในฟังก์ชันของเนวิช่วยขับที่ได้กล่าวไปข้างต้น คือ การแสดงผลเส้นทางที่กำหนดและแสดงผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปัจจุบันกับเส้นทางที่กำหนดบนคอนโทรลเลอร์แบบพกพาที่มีวงขยายทั่วไป

GPS ที่เป็นตัวรับข้อมูลตำแหน่งเรียกว่า StarFireGPS ซึ่งบริษัทที่เกี่ยวข้องกับ GPS ชื่อ Deere & Company และ NavCom เป็นบริษัทหลักที่ให้บริการข้อมูลที่แม่นยำ สามารถค้นหาตำแหน่ง GPS ที่ผลต่างคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 20 ซม.ได้โดยไม่ต้องใช้ศูนย์ฐานข้อมูล (คิดค่าบริการ ที่ญี่ปุ่นสามารถใช้บริการนี้ได้) ในภาพที่ 22 เป็นตัวอย่างการแสดงผลของจอควบคุมแสดงเส้นทางที่เป็นเป้าหมายกับตำแหน่งที่เกี่ยวข้อง (แสดงเป็นภาพและผลคำนวณ) ซึ่งหากนำมาเป็นพื้นฐานในการแก้ไขตำแหน่ง เช่น การทำงานขนานกันไปในระยะห่างที่เท่ากันแบบไปกลับ ก็สามารถทำได้



ภาพที่ 22 ตัวอย่างการแสดงผลของจอควบคุม

ที่อเมริกาได้วางขายอุปกรณ์สำหรับงานด้านการเกษตรอย่างละเอียด เป็นแบบติดตั้ง (อุปกรณ์ที่แสดงผลความคลาดเคลื่อนจากเส้นทางเป้าหมายแบบบาร์) ไม่ซับซ้อนเท่า PTS นอกจากนี้ บริษัท Deere & Company ยังวางขายระบบอัตโนมัติที่รถแทรกเตอร์ได้อัตโนมัติเมื่อรถออกนอกเส้นทางเป้าหมายสัญญาณก็จะสับเปลี่ยนเอง

3) ระบบเคลื่อนที่ด้วยตนเอง (GDS)

การทำงานของยานยนต์สำหรับเกษตรกรรม ส่วนใหญ่การทำงานในแต่ละเส้นทางจะวิ่งรถไปกลับ ตรง ๆ ขนานกัน และทำซ้ำไปมา ซึ่งสามารถวิ่งได้อย่างอัตโนมัติด้วยการติดตั้งเซ็นเซอร์ค้นหาตำแหน่งการเคลื่อนที่ไว้ที่รถ ซึ่งจะจับทิศทางรถที่ไปกลับยังเป้าหมาย และพวงมาลัยอัตโนมัติจะรักษาตำแหน่งที่ตั้งเป้าหมายไว้ จากนั้นจะขอแนะนำระบบที่ศูนย์เกษตรและอาหารแห่งชาติได้วิจัยพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ครั้งหลังของยุค 1980 จนถึงปัจจุบัน

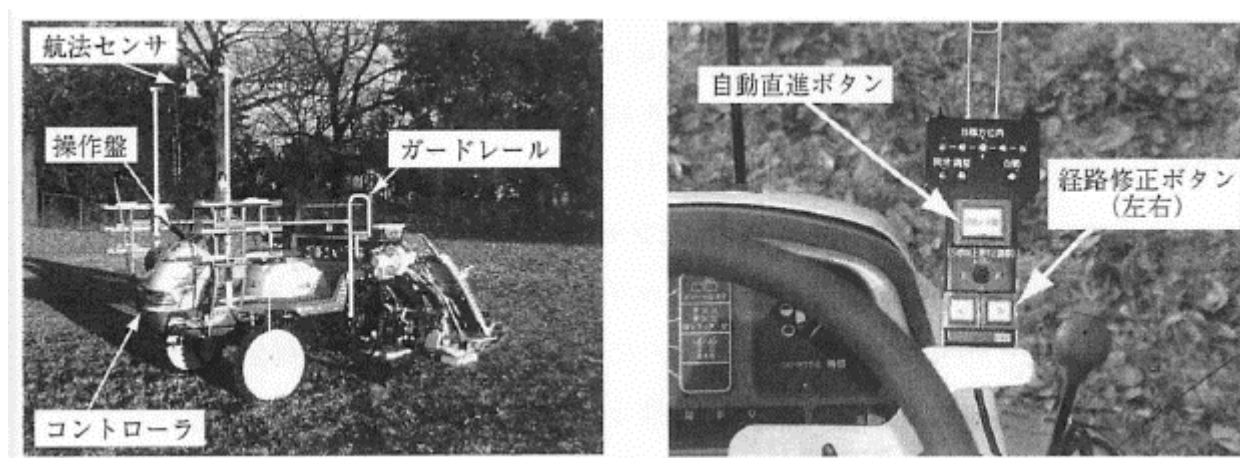
ระบบเคลื่อนที่ด้วยตนเอง คือระบบที่พัฒนาขึ้นโดยมีเป้าหมายเพื่อให้รถแทรกเตอร์แบบมีคนขับที่ใช้ในงานแปลงต่าง ๆ เปลี่ยนเป็นแบบไม่ใช้คนขับ รูป 1, 2 เป็นภาพรถแทรกเตอร์ทั่วไปในตลาดที่นำมาปรับปรุงมาเพื่อใช้ทดลอง คันที่ 1 (ALVA-I:13.2 KW, ปี 1990) คันที่ 2 (ALVA-II:18.4KW, ปี1992) สามารถควบคุมกลไกเช่น การหมุน การสลับเคลื่อนหรือหยุดเคลื่อนไปข้างหน้าข้างหลัง คันเร่ง การขยับขึ้นลงของเครื่อง โดยใช้สัญญาณจากคอนโทรลเลอร์ หนทางสุดท้ายคือ เอาเซ็นเซอร์สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยตนเองของรถแบบสามล้อ บริษัท Watson รุ่น FGM-200A มาใช้ และเอาเซ็นเซอร์ความลาดเอียง (สำหรับแก้ผลต่างความคลาดเคลื่อนเวลาเอียง) แบบ servo ของบริษัท Scnsorcx รุ่น Model 41200 มาใช้

การตรวจจับทิศทางรถเคลื่อนที่อย่างมีความละเอียดสูงด้วย GDS ของรถ จำเป็นต้องแก้ที่อิทธิพลจากความเอียงของรถและอิทธิพลของแม่เหล็กในรถ อิทธิพลของแม่เหล็กในรถ วิธีการติดตั้ง GDS ที่หมุนได้ 360 องศาที่ปรับแก้ได้ อิทธิพลการเอียง คำนวณการเอียงได้โดยตรง ปรับแก้กำลังของ GDS ปรับไปแต่ละอย่าง

เครื่องดำนาคือรถที่อัตโนมัติ เครื่องดำนาคือรถที่อัตโนมัติ (จากนี้จะเรียกอย่างย่อว่า เครื่องดำนาคือรถที่) โดยทั่วไปเครื่องดำนาคือรถที่อัตโนมัติแบบมีคนขับเหมือนที่กล่าวไปข้างต้น แต่การทำงานโดยใช้คนเวลาขับไปกลับตรง ๆ ก็สามารถควบคุมแบบอัตโนมัติได้ ซึ่งเป็นความพยายามในการพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ความแม่นยำ และลดภาระการทำงานของโอเปอเรเตอร์ ที่ศูนย์เกษตรและอาหารแห่งชาติ, Japan Aviation Electronics Industry, Ltd., Iseki & Co., Ltd. และ Yanmar Co., Ltd. ได้ร่วมกันพัฒนาขึ้น และในปัจจุบันมีแผนที่จะนำมาใช้งานจริง เครื่องดำนาคือรถที่อัตโนมัติเป็นเครื่องดำนาคือรถที่ถูกทำให้ควบคุมอัตโนมัติ โดยติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้เคลื่อนเป็นไปข้างหน้า เช่น เซอร์โวนำร่องทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ ประกอบด้วย GDS, Gyroscope หรือ เซ็นเซอร์อัตราเร่ง (ที่ใช้การวัดความเอียง) ซึ่งฟังชั่นและวิธีทำให้เคลื่อนแนวตรงแสดงอยู่ด้านล่าง

1. ทิศทางเป้าหมายถูกตั้งโดยอัตโนมัติระหว่างที่คนขับแบบแมนนวลก่อนที่จะเริ่มเปิดระบบเคลื่อนที่แนวตรงอัตโนมัติ
2. การเคลื่อนที่แนวตรงอัตโนมัติจะทำงานหรือยกเลิกขึ้นอยู่กับปุ่มควบคุมการเคลื่อนที่แนวตรง
3. หากกดปุ่มปรับเส้นทางบนแผงคอนโทรลระหว่างที่รถเคลื่อนที่อัตโนมัติอยู่ จะมีการปรับทิศทางการเคลื่อนที่ด้านข้าง
4. ระหว่างเคลื่อนที่อัตโนมัติ เมื่อใกล้ถึงจุดสิ้นสุดระยะทาง จะมีฟังชั่นแจ้งเตือนไปยังผู้ปฏิบัติงาน

เครื่องดำนาคือรถที่สามารถเคลื่อนไปได้อย่างน้อยมากกว่า 30 เมตร สมรรถภาพในการทำงานคือวิ่งไป 30 เมตรแล้วจะคลาดเคลื่อนจากเส้นทางเป้าหมายไปด้านข้าง 5 เซ็นติเมตร ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากแปลงที่มีหลุมไม่เรียบ หรืออาจเกิดจากระยะทางที่ให้อัตโนมัติยาว แต่ทั้งนี้ก็สามารถแก้ไขได้โดยไม่ต้องหมุนพวงมาลัย โดยใช้ปุ่มแก้ไขเส้นทาง



ภาพที่ 23 ระบบเคลื่อนที่ด้วยตนเอง (GDS) ในเครื่องดำนาคือรถ

4) ระบบวีงอัตโนมัติ (GPS)

ตัวอย่างการใช้ GPS ได้แก่ โรบอทแทรกเตอร์ใช้ในไร่โดยไม่ต้องใช้คนขับที่ Central Region Agricultural Research Center พัฒนาขึ้นมาในปี 1999 และระบบอัตโนมัติแทรกฟางที่วิ่งไปตามเส้นทางการทำงานที่บริษัท Deere&Company พัฒนาออกมาเป็นสินค้าในปี 2000

GPS ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อะไรเป็นพิเศษ สามารถใช้ได้ทุกพื้นที่ที่สัญญาณส่งถึง มีลักษณะเด่นคือสามารถรับข้อมูลตำแหน่งที่แน่นอนได้ ใช้กับหุ่นยนต์ทำงานกลางแจ้งหลากหลายด้าน โดยเฉพาะหุ่นยนต์แทรกเตอร์ใช้ในไร่ เนื่องจากกลุ่มเป้าหมายงานในไร่ขนาดใหญ่ โดยพื้นฐานจึงเป็นแทรกเตอร์ขนาด 55kW และเป็น 4WD ซึ่งเป็นรถที่ปรับปรุงให้สามารถควบคุมตามเป้าหมายได้ ระบบเนวิเกเตอร์นี้มีลักษณะเด่นคือไม่ใช้ความถี่ แบบ RTK-GPS ที่มีราคาแพง แต่ใช้การคัดกรองผลประมวลและการคาดคะเนจาก Kalman filter ที่เห็นจากเข็มวัดความเร็ว, GPS และ Gyroscope ซึ่งเป็น DGPS ของ (Leica:MX9400N) ที่มีความแม่นยำระยะหน้าหลัง 15 ซม. ส่วนของทิศทางการวิ่งใช้ Gyroscope แบบเส้นใยนำแสงของ (JAB:JG-108FD1)

การจัดการซอฟต์แวร์ เช่น การตั้งเงื่อนไขให้ Rotary Tillage ทำงานไปกลับทั้งไร่, การเตรียมดิน, การใส่ปุ๋ยและหยอดเมล็ดด้วยเครื่องใส่ปุ๋ยและหยอดเมล็ดในเวลาเดียวกัน, การพ่นยาโดยใช้เครื่องพ่นยาติดรถไถนั้น ขั้นตอนตั้งแต่ออกจากโรงเก็บจนไปถึงไร่ทั้งไร่กลับไปกลับทำได้โดยไม่ต้องใช้คน ด้านประสิทธิภาพการทำงานในระยะความยาวไร่ 100 เมตร Rotary Tillage กว้าง 2.1 เมตร เวลาเคลื่อนไปข้างหน้าจะคลาดเคลื่อนจากเส้นทางที่กำหนดต่ำกว่า 10 ซม. ค่าความเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งเริ่มต้นทำงานประมาณ 15 ซม.



ภาพที่ 24 บอทแทรกเตอร์ใช้ในไร่โดยไม่ต้องใช้คนขับ

ในส่วนของ ระบบอัตโนมัติแทรก บริษัท Deere & Company วางขายเครื่องควบคุมการทำงานจากเส้นทางที่กำหนดไว้โดยไม่ต้องใช้มือ ค้นหาตำแหน่งด้วย GPS และควบคุมอัตโนมัติให้วิ่งไปตามเส้นทางเป้าหมาย

ระบบนี้จะคล้ายกับระบบพาราเรลแทรกกึ่งในข้อ 2) คือถูกประกอบให้มี StarFire GPS กับคอนโทรลเลอร์ที่สามารถเปลี่ยนไปติดกับรถคันอื่นได้, ซอฟต์แวร์, นอกจากนี้แทรกเตอร์หลายรุ่นของ Deere & Company หรือเครื่องฟนยาที่เคลื่อนที่เองก็สามารถเพิ่มการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติได้

ภาพที่ 25 แสดงตัวอย่างหน้าจอของคอนโทรลเลอร์ การตั้งเป้าหมายของเส้นทางวิ่งไปเหมือนกับพาราเรลแทรกกึ่ง แล้วใส่ตำแหน่งเส้นทางที่ผ่านมา ตั้งค่า การหมุนเปลี่ยนทิศทางตรงพื้นที่หัวแปลง จะดูเป้าหมายเส้นทางต่อไปประกอบแล้วบังคับด้วยมือ ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้ง่ายมากขึ้นจากระบบอัตโนมัติแทรกกึ่งแม้จะเป็นการทำงานในพื้นที่กว้างหรือขอบเขตการทำงานที่ไม่ชัดเจน ทำให้การทำงานช้าซ้อนที่ไม่เกิดประโยชน์ลดลง มีแนวโน้มที่จะก้าวไปสู่การลดข้อผิดพลาดที่ไม่เกิดประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 25 StarFire GPS กับคอนโทรลเลอร์

5) ระบบรับภาพ (Vision)

ศูนย์เกษตรและอาหารแห่งชาติได้คิดค้น Machine vision ขึ้นมาในปี 1995 เป็นระบบเคลื่อนที่อัตโนมัติที่ข้อมูลเชิงภาพถูกแยกโดย Machine vision เป็นขอบเขตการทำงานที่ทำแล้วและยังไม่ได้ทำ, แนวต้นพีชกับแนวร่อง, แปลงกับส่วนนอกแปลงเป็นต้น

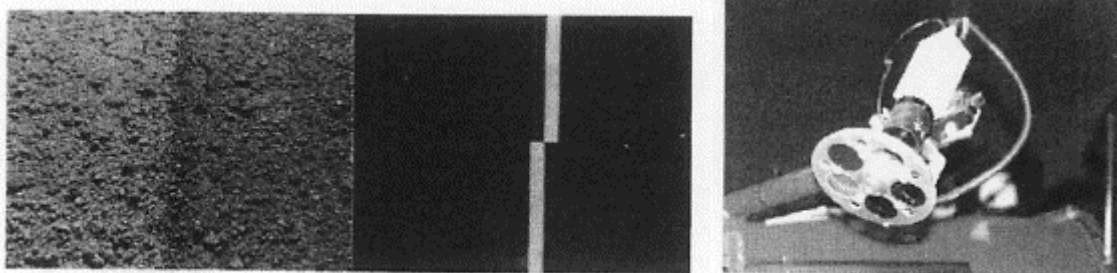
ตัวอย่างการนำเอา vision มาใช้กับการเคลื่อนที่อัตโนมัติ ศูนย์เกษตรและอาหารแห่งชาติและ The National Institute of Agrobiological Sciences ร่วมกันพัฒนาระบบ VSX ขึ้นมา อุปกรณ์ประมวลผลเป็นภาพ (VSX) คืออุปกรณ์ที่ค้นหาเส้นแนวเส้นของขอบเขตการทำงานที่ทำแล้วและยังไม่ได้ทำ โดยใช้ข้อมูลภาพขาวดำที่ได้จากกล้อง CCD แล้วนำมาเปลี่ยนฮับ ซึ่ง National Institute of Agrobiological Sciences นำมาใช้กับเครื่องตัดหญ้า

ระบบ VSX เป็นระบบที่ประยุกต์แยกส่วนที่ติดดินแล้วและยังไม่ได้ติดโดยไม่ต้องใช้คน โดยติดชุดฟิลเตอร์แสงไว้นากล้อง เลือกฟิลเตอร์ให้ตรงกับสภาพอากาศ ภาพดิน สภาพของพืชพันธุ์ ซึ่งจะช่วยให้

ประสิทธิภาพในการจำแนก นอกจากนี้ VSX ยังประมวลผลแยกในจอ 27x27 พิกเซล และรับคลื่นความถี่ในการเก็บข้อมูลประมาณ 30 Hz

รถที่ใช้ในการทดลอง ใช้รถแทรกเตอร์ 18 kW 4wd เป็นพื้นฐานของกลไกควบคุม การเปลี่ยนเกียร์ เบรคซ้ายขวา การยกขึ้นลงของอุปกรณ์ เนื่องจากปรับให้สามารถควบคุมเครื่องที่ลดการใช้พลังงานผ่านคอนโทรลเลอร์ จึงติดตั้งคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ไนต์บู้ค และใช้เซ็นเซอร์(GDS) คำนวณการควบคุมทิศทางการหมุนเหล่านี้แทน

กลยุทธ์ของการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติคือ การไถ 1,2 รอบแรก (ไปกลับ 1 รอบ) ใช้ระบบแมนนวล เป็นเหมือนการสอนก่อน จากนั้นรอบที่ 3 เป็นต้นไปใช้ระบบอัตโนมัติ โดยใส่ข้อมูลกำหนดจำนวนรอบที่จะขับเคลื่อนอัตโนมัติ ในรอบที่เป็นเหมือนการสอนนั้น ตั้งค่า VSX เช่น เลือกฟิลเตอร์ ปรับโฟกัสของกล้อง เวลาที่ใช้ ระยะทาง โดยเครื่องจะบันทึกข้อมูลตำแหน่งการเคลื่อนที่จาก GDS อย่างย่อ ๆ ได้



ภาพที่ 26 (ซ้าย) ผลการประมวลผลภาพเพื่อแยกพื้นที่ที่ทำงานแล้ว
และพื้นที่ที่ยังไม่ได้ทำงาน (ขวา)กล้องรับภาพ (Vision)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัยและผลการศึกษา

3.1 สำนวนภาคสนามพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น เพื่อศึกษาช่วงของมุลาดเอียงและสภาพพื้นที่ที่มีการเตรียมดินก่อนปลูก

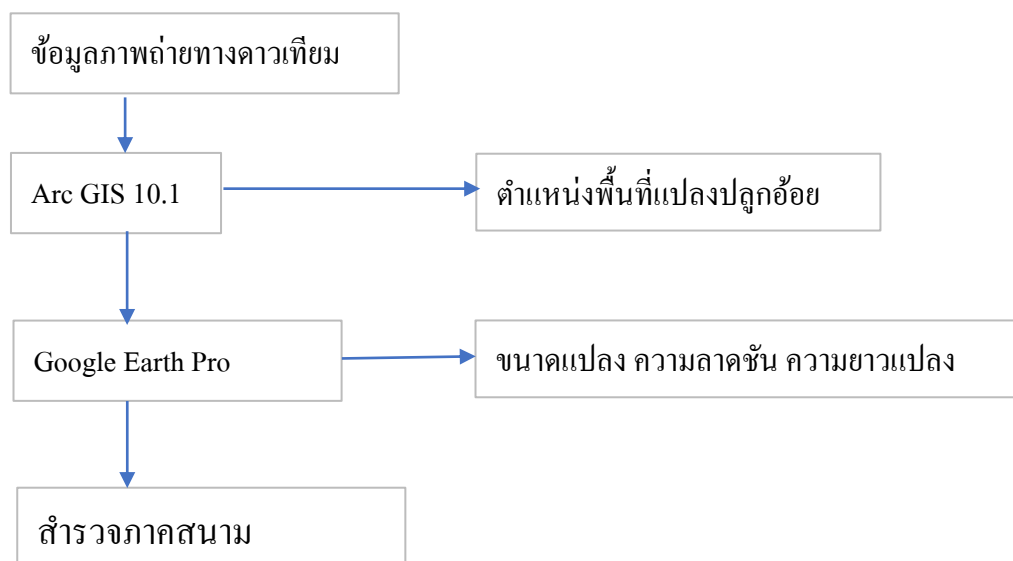
3.1.1 พื้นที่ที่ศึกษา

แปลงปลูกอ้อยในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น

3.1.2 วิธีดำเนินการวิจัย

1) สำนวนภาคสนามพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น เพื่อศึกษาช่วงของมุลาดเอียงและสภาพพื้นที่ที่มีการเตรียมดินก่อนปลูก

การสำนวนภาคสนามพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น เพื่อศึกษาช่วงของมุลาดเอียงและสภาพพื้นที่ที่มีการเตรียมดินก่อนปลูก จะสามารถทำได้นั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อยในเขตพื้นที่จังหวัดขอนแก่น จึงทำการสำนวนพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นโดยใช้โปรแกรมทางภูมิศาสตร์เข้ามาช่วย ได้แก่ โปรแกรม Arc GIS 10.1 และโปรแกรม Google Earth Pro ซึ่งทั้ง 2 โปรแกรมนี้ใช้เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่ปลูกอ้อยที่ได้จากภาพถ่ายทางดาวเทียม โดยโปรแกรม Arc GIS 10.1 ใช้วิเคราะห์หาตำแหน่งของพื้นที่ปลูกอ้อย และโปรแกรม Google Earth Pro ใช้วิเคราะห์หาขนาดของแปลง ความยาวของแปลง และช่วงของมุลาดเอียง ดังแสดงในภาพที่ 27

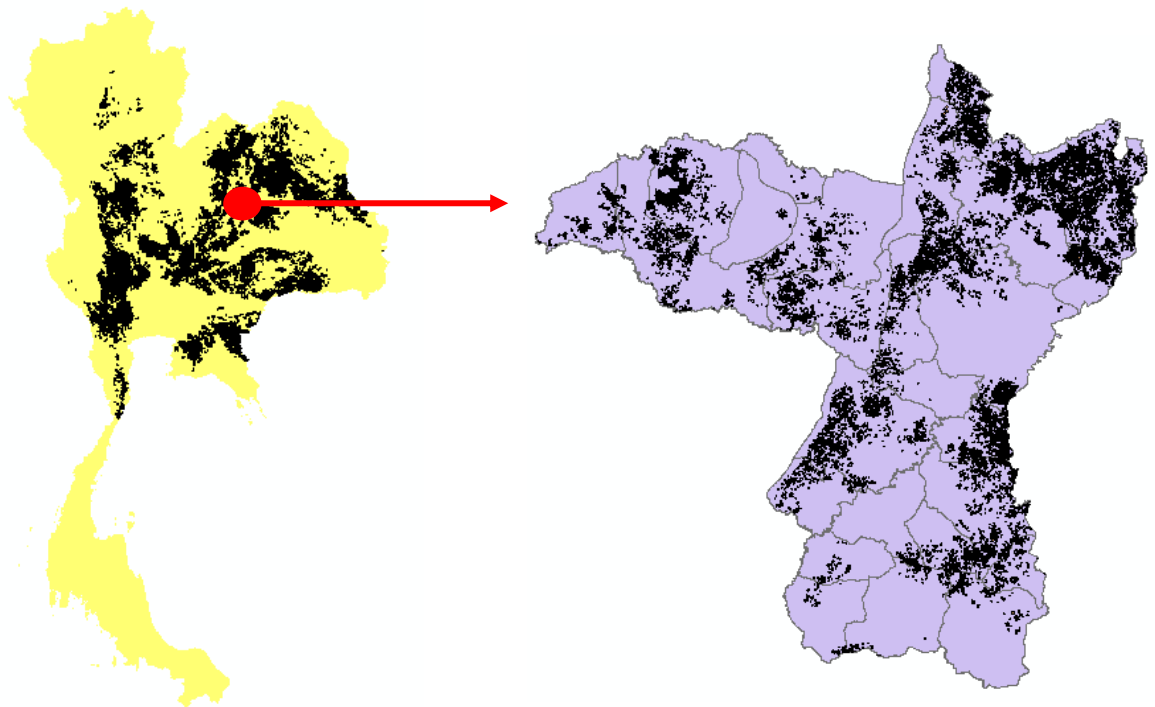


ภาพที่ 27 ขั้นตอนการสำนวนพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น

1. การสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นโดยใช้โปรแกรม Arc GIS 10.1

สำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นโดยใช้โปรแกรม Arc GIS 10.1 เป็นการนำข้อมูลจำนวนพื้นที่ปลูกอ้อยที่สำรวจด้วยภาพถ่ายทางดาวเทียมของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายที่รวบรวมพื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศไทย มาวิเคราะห์หาตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น ว่าอยู่ในอำเภอไหนบ้าง มีจำนวนทั้งหมดกี่แปลง โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1.1 ตัดข้อมูลพื้นที่ปลูกอ้อยที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางดาวเทียม เลือกพื้นที่ปลูกอ้อยเฉพาะในเขตพื้นที่จังหวัดขอนแก่น ดังแสดงในภาพที่ 28



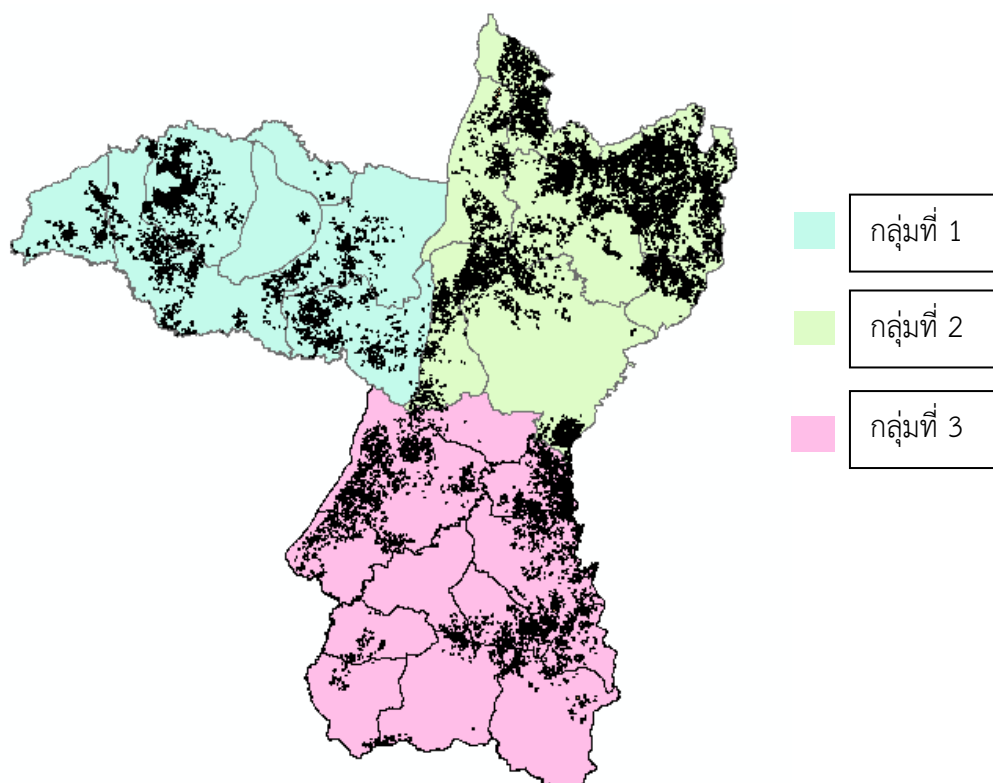
ก. พื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศไทย

ข. พื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น

ภาพที่ 28 เลือกพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น

เมื่อได้ตำแหน่งและจำนวนพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น ขั้นตอนต่อมาทำการวิเคราะห์ว่าพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นมีมากมีน้อยเพียงใดในแต่ละอำเภอ เพื่อทำการแบ่งกลุ่มพื้นที่ปลูกอ้อยตามความหนาแน่นของพื้นที่ปลูก ซึ่งการทำเช่นนี้เพื่อที่จะกระจายความถี่ของพื้นที่ปลูกอ้อย เพราะบางอำเภอมีพื้นที่ปลูกอ้อยน้อย บางอำเภอมีพื้นที่ปลูกอ้อยมาก

จากนั้น แบ่งพื้นที่ปลูกอ้อยและอำเภอในจังหวัดขอนแก่นออกเป็น 3 กลุ่ม เพื่อง่ายต่อการสุ่ม
สำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยแต่ละอำเภอ โดยแต่ละกลุ่มจะสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยกลุ่ม 1 100 แปลง กลุ่ม 2 150 แปลง
และกลุ่ม 3 120 แปลง รวมทั้งหมด 370 แปลง ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 แบ่งกลุ่มอำเภอในจังหวัดขอนแก่นตามความหนาแน่นของพื้นที่ปลูกอ้อย

จากภาพอำเภอในขอนแก่นมีทั้งหมด 26 อำเภอ เมื่อแบ่งกลุ่มอำเภอในจังหวัดขอนแก่น
ออกเป็น 3 กลุ่ม จะได้

กลุ่มที่ 1 มี 7 อำเภอ คือ ภูผาม่าน สีชมพู เวียงเก่า หนองนา ภูเวียง
หนองเรือ ชุมแพ

กลุ่มที่ 2 มี 7 อำเภอ คือ เมืองขอนแก่น อุบลรัตน์ เขาสวนกวาง บ้านฝาง
น้ำพอง กระนวน ชำสูง

กลุ่มที่ 3 มี 12 อำเภอ คือ บ้านแฮด พระยืน มัญจาคีรี โคกโพธิ์ไชย แวง
ใหญ่ แวงน้อย พล หนองสองห้อง ชนบท โนนศิลา เปือยน้อย บ้านไผ่

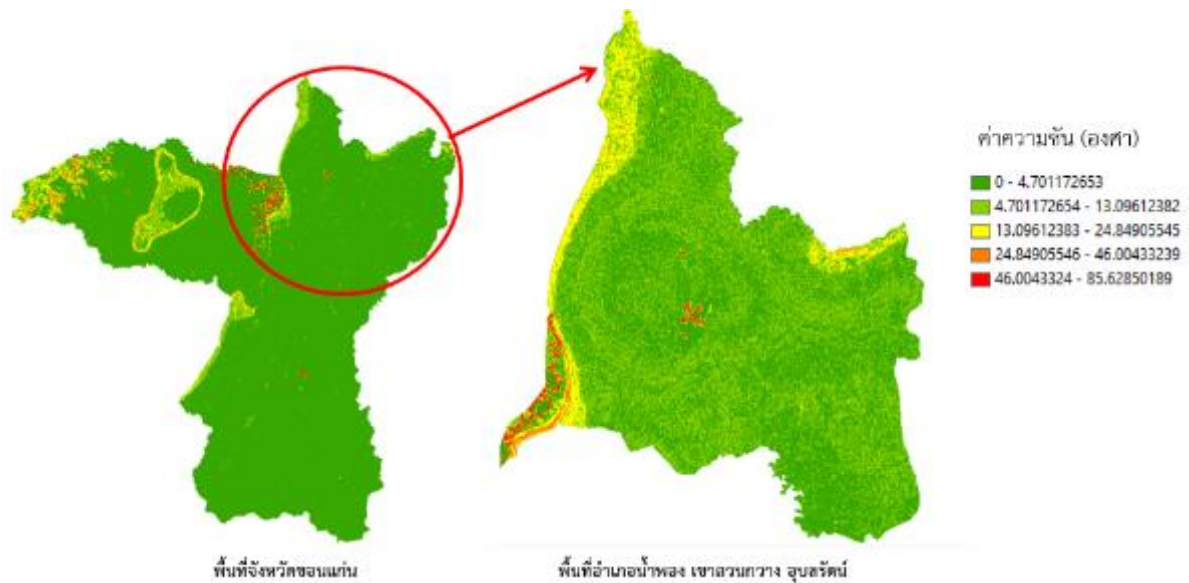
ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีพื้นที่ปลูกอ้อยกระจายตัวอยู่ในแต่ละอำเภอไม่เท่ากัน แสดงว่าการเก็บข้อมูลจำนวน
พื้นที่ปลูกอ้อยในแต่ละอำเภอจะมีจำนวนมากน้อยแตกต่างกันตามจำนวนพื้นที่ปลูกอ้อยแต่ละอำเภอ

2 การสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นโดยใช้โปรแกรม Google Earth Pro

การสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นโดยใช้โปรแกรม Google Earth Pro คือการนำข้อมูลพื้นที่ปลูกอ้อยที่ได้จากการใช้วิธี Arc GIS 10.1 มาหาตำแหน่งที่ตั้ง และหาความลาดเอียง เพราะข้อมูลพื้นที่ปลูกอ้อยที่ได้จากการใช้วิธี Arc GIS 10.1 นั้นเป็นการนำข้อมูลภาพถ่ายทางดาวเทียมมาวิเคราะห์อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ และข้อมูลพื้นที่ปลูกอ้อยดังกล่าวมีบางพื้นที่ที่ไม่ติดกับเส้นทางคมนาคม ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่าพื้นที่นั้นปลูกพืชชนิดใด มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

2.1 นำข้อมูลพื้นที่ปลูกอ้อยที่ได้จากการใช้วิธี Arc GIS 10.1 มาเปิดในโปรแกรม Google Earth Pro จะได้ตำแหน่งพื้นที่แปลง ดังแสดงในภาพที่ 30





ภาพที่ 30 ตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อย

จากภาพที่ 30 เมื่อได้ตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อยจากข้อมูลที่ใช้โปรแกรม Arc GIS 10.1 วิเคราะห์แล้ว นำมาเปิดในโปรแกรม Google Earth Pro จะเห็นว่าจุดขาวๆนั้นคือพื้นที่ปลูกอ้อย ซึ่งยังไม่ถูกสังเคราะห์ว่าพื้นที่ปลูกอ้อยจุดขาวๆนั้นแท้จริงแล้วเป็นแปลงปลูกพืชชนิดใด และมีขนาดเท่าใด ความลาดเอียงเท่าใด โปรแกรม Google Earth Pro จึงทำหน้าที่เป็นโปรแกรมที่จะสังเคราะห์ข้อมูลพื้นที่ปลูกอ้อย ดังแสดงในภาพที่ 31



ก. เส้นทางคมนาคมที่ตัดผ่านพื้นที่ปลูกอ้อย

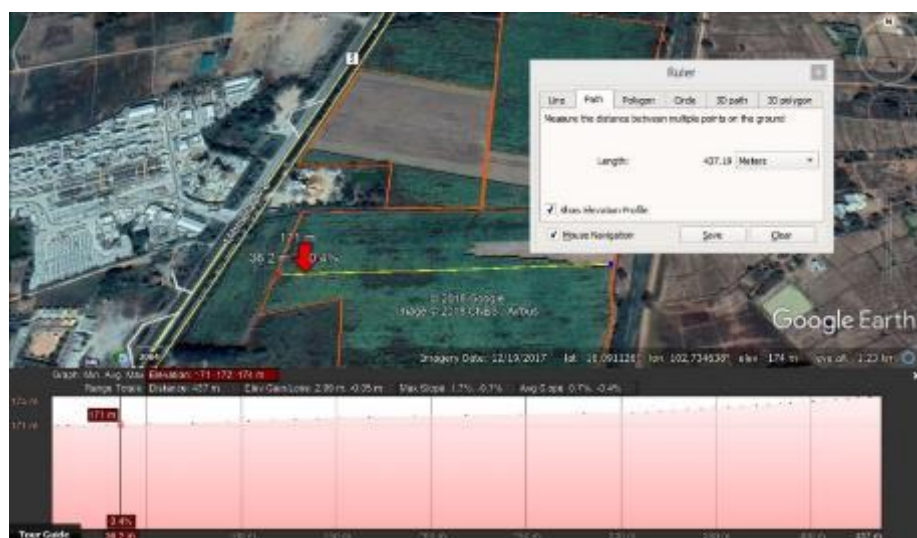


ข. พื้นที่ปลูกอ้อยจากมุมมองถนน

ภาพที่ 31 สํารวจแปลงอ้อยโดยใช้โปรแกรม Google Earth Pro

จากภาพที่ 31 การสำรวจแปลงอ้อยโดยใช้โปรแกรม Google Earth Pro จะเลือกสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยจุดสีขาว่าที่ติดกับเส้นทางคมนาคม เพื่อที่จะสามารถสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยโดยใช้มุมมองถนนได้ การสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยโดยใช้มุมมองถนนนั้น ทำให้เห็นสภาพแปลง แอวปลูก ชนิดของพืชที่ปลูก และสภาพแวดล้อมโดยรอบ

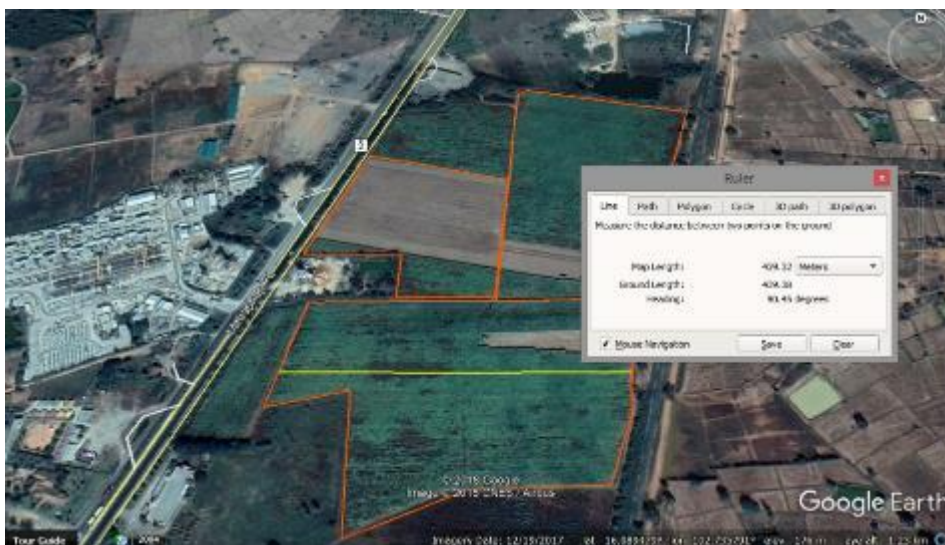
2.2 นำตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อยที่ได้จากการสำรวจมาหาความลาดเอียง ขนาดแปลง และความยาวแปลง ดังแสดงในภาพที่ 32 33 และ 34



ภาพที่ 32 การหาความลาดเอียง

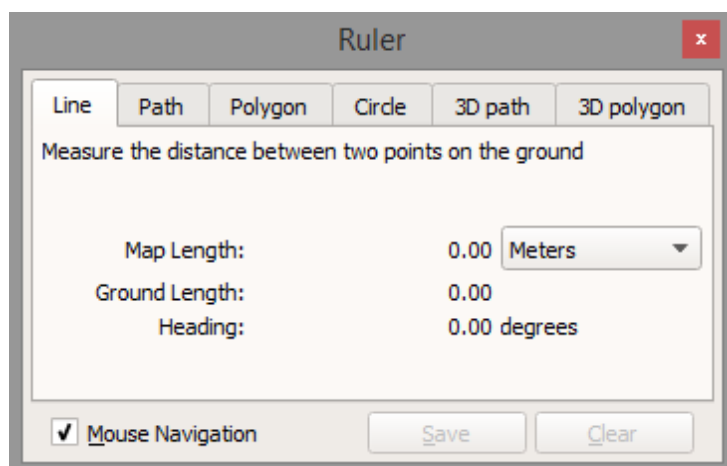


ภาพที่ 33 การหาขนาดพื้นที่แปลง



ภาพที่ 34 การหาความยาวแปลง

จากภาพที่ 3.2 33 และ 34 คือการหาความลาดเอียง ขนาดแปลง และความยาวแปลง โดยใช้ชุดคำสั่ง Ruler และเลือกที่คำสั่ง Line Path และ Polygon ในการหาความยาวแปลง ความลาดเอียง และขนาดแปลง ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ชุดคำสั่งในการหาความลาดเอียง ขนาดแปลง และความยาวแปลง

เมื่อได้ข้อมูลความลาดเอียง ขนาดแปลง และความยาวแปลงแล้วนำข้อมูลที่ได้มารอกลงในโปรแกรม Excel เพื่อทำเป็นชุดข้อมูลกับความถี่ของข้อมูล และจำแนกกลุ่มข้อมูลนั้นว่าอยู่ในกลุ่มใดตามความลาดเอียงที่หาได้ในแต่ละพื้นที่ปลูกอ้อย

2.3 สํารวจภาคสนามพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น

การสำรวจภาคสนามเป็นขั้นตอนการสำรวจที่ทำหลังจากได้ตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อยจากวิธีการใช้โปรแกรมแล้ว โดยการสำรวจภาคสนามจะเป็นการสำรวจการใช้รถแทรกเตอร์ ในการจัดการไร่อ้อยว่าความลาดชันมีผลต่อการทำงานของรถแทรกเตอร์ทั้งแบบใช้คนขับ และแบบใช้ระบบควบคุมทิศทางอัตโนมัติ ซึ่งวิธีการสำรวจภาคสนามจะทำการสำรวจโดยการจัดทำแบบสอบถาม และแบบสัมภาษณ์เกษตรกรชาวไร่อ้อย เพื่อให้ทราบถึงผลคำตอบของวัตถุประสงค์

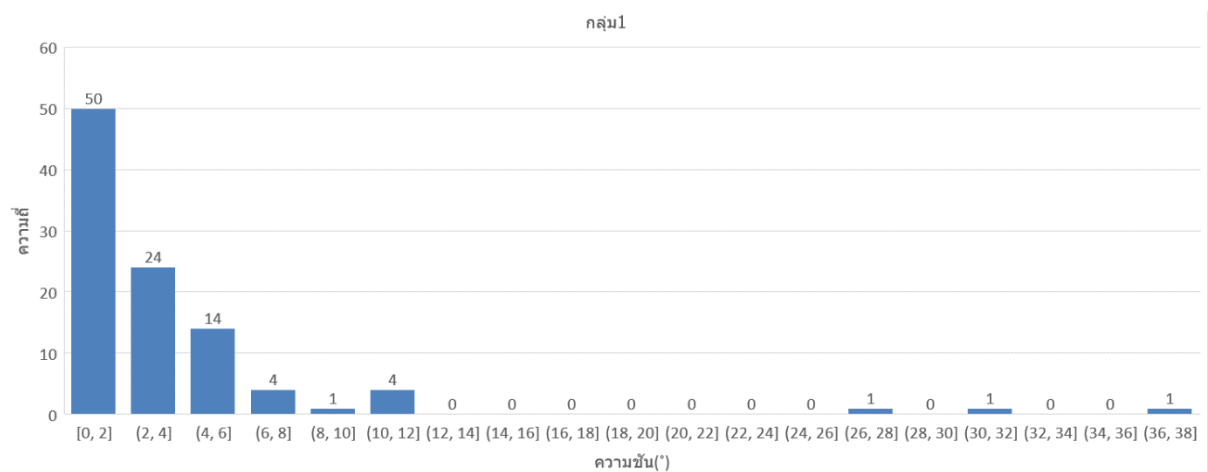
2. ศึกษาไดนามิกส์ของตัวรถแทรกเตอร์ในกระบวนการปลูกอ้อยในสภาพความลาดเอียงและสภาพพื้นที่การเตรียมดินที่กำหนดในช่วงที่ได้จากการสำรวจ
3. พัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์ และเซนเซอร์วัดความเร็วรถ
4. พัฒนาโปรแกรมประมวลผล
5. ทำการทดสอบชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนในห้องปฏิบัติการ
6. ปรับปรุงชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุน
7. ทำการทดสอบชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนในภาคสนามภายใต้พื้นที่ที่มีความลาดเอียงและการเตรียมดินต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับ และประเมินผล
8. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
9. ยื่นขอจดอนุสิทธิบัตร
10. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

2.4 ผลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยโดยใช้โปรแกรมและข้อมูลในระบบภูมิสารสนเทศ

ผลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยโดยใช้โปรแกรม Arc GIS 10.1 และ โปรแกรม Google Earth Pro วิเคราะห์และรวบรวมตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อย จำนวน 370 แปลง ในแต่ละกลุ่มอำเภอที่แบ่งตามการกระจายตัวของพื้นที่ปลูกอ้อย และเมื่อได้ตำแหน่งพื้นที่ปลูกอ้อยทั้ง 370 แปลง จึงทำการหาความลาดเอียง ขนาดแปลง และความยาวแปลง โดยมีผลการศึกษาดังนี้

ผลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยและเก็บข้อมูลความลาดเอียง ขนาดแปลง และความยาวแปลง ของพื้นที่ปลูกอ้อยทั้ง 370 แปลง โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้ผลการสำรวจดังนี้

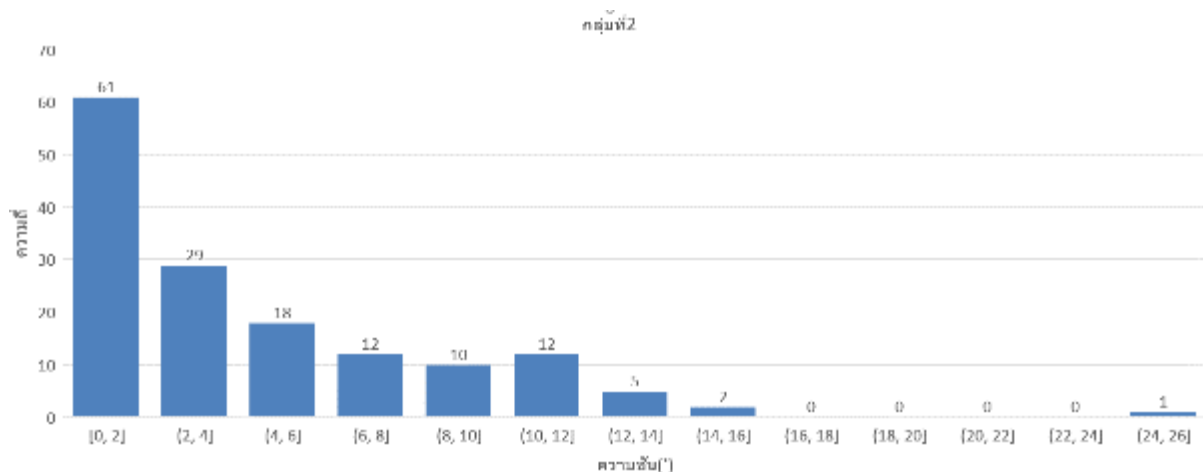
กลุ่มที่ 1 ได้แก่ อำเภอภูพาน สี่ชัย เวียงเก่า หนองนา ภูเวียง หนองเรือ ชุมแพ มีจำนวนพื้นที่ปลูกอ้อยที่สำรวจจำนวน 100 แปลง และมีความชันดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 1 ในความลาดเอียงต่างๆ

จากภาพที่ 36 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 1 ในความลาดเอียงต่างๆ เห็นได้ว่าพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นกลุ่มที่ 1 มีพื้นที่อยู่ในกลุ่มความลาดเอียงที่ 0 ถึง 2 องศา มากถึง 50 แปลง คิดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดที่ทำการสำรวจ และมีพื้นที่ที่มีความลาดเอียง สูงถึง 36 ถึง 38 องศา อยู่ 1 แปลง คิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าในกลุ่มที่ 1 พื้นที่ที่ทำการสำรวจมีพื้นที่ความลาดเอียงอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 องศา

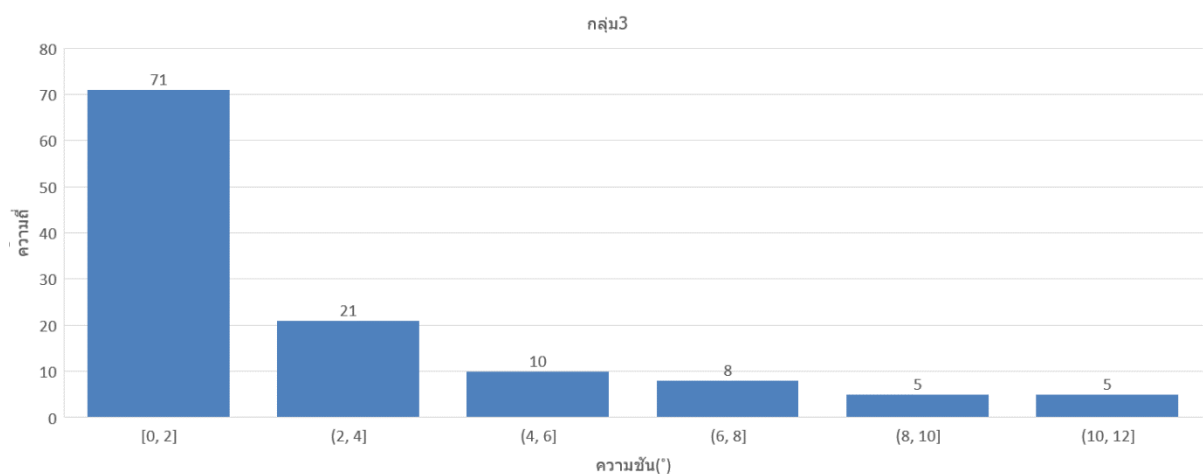
กลุ่มที่ 2 ได้แก่ อำเภอเมืองขอนแก่น อุดรรัตน์ เขาสวนกวาง บ้านฝาง น้ำพอง กระนวน ชำสูง มีพื้นที่ปลูกอ้อยที่สำรวจจำนวน 150 แปลง และมีความชันดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 2 ในความลาดเอียงต่างๆ

จากภาพที่ 37 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 2 ในความลาดเอียงต่างๆ พื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นกลุ่มที่ 2 มีพื้นที่อยู่ในกลุ่มความลาดเอียงที่ 0 ถึง 2 องศา มากถึง 61 แปลง คิดเป็น 40.67 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดที่ทำการสำรวจ และมีพื้นที่ที่มีความลาดเอียงสูงถึง 24 ถึง 26 เปอร์เซ็นต์ อยู่ 1 แปลง คิดเป็น 0.67 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าในกลุ่ม 2 พื้นที่ที่ทำการสำรวจมีพื้นที่ความลาดเอียงอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 องศา

กลุ่มที่ 3 ได้แก่ อำเภอบ้านแฮด พระยืน ภูผาชีรี โคกโพธิ์ไชย แวงใหญ่ แวงน้อย พล หนองสองห้อง ชนบท โนนศิลา เปือยน้อย บ้านไผ่ มีพื้นที่ปลูกอ้อยที่สำรวจจำนวน 120 แปลง และมีความชันดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 3 ในความลาดเอียงต่างๆ

จากภาพที่ 38 กราฟแจกแจงความถี่ของพื้นที่กลุ่มที่ 3 ในความลาดเอียงต่างๆ พื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่นกลุ่มที่ 3 มีพื้นที่อยู่ในกลุ่มความลาดเอียงที่ 0 ถึง 2 องศา มากถึง 71 แปลง คิดเป็น 59.167

เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดที่ทำการสำรวจ และมีพื้นที่ที่มีความลาดเอียงสูงถึง 10 ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ อยู่ 5 แปลง คิดเป็น 4.167 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าในกลุ่ม 3 พื้นที่ที่ทำการสำรวจมีพื้นที่ความลาดเอียงอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 องศา

การสำรวจความลาดเอียงพื้นที่ปลูกในจังหวัดขอนแก่น โดยใช้โปรแกรม Arc Gis 10.1 และ Google Earth Pro แบ่งกลุ่มพื้นที่สำรวจออกเป็น 3 กลุ่ม ได้ผลสรุปคือ พื้นที่ทั้ง 3 กลุ่มที่สำรวจรวมทั้งหมด 370 แปลง มีความลาดเอียงอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 องศา แสดงว่าพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น ส่วนใหญ่มีความลาดเอียงที่ต่ำ

ตารางที่ 2 ตารางแจกแจงความถี่ของจำนวนแปลงที่มีมุมลาดเอียงในช่วงต่างๆ จากการสำรวจในพื้นที่ จ.ขอนแก่น

ช่วงของมุมลาดเอียง	จำนวนพื้นที่ (แปลง)
0-2 องศา	182
2-4 องศา	74
4-6 องศา	42
6-8 องศา	24
8-10 องศา	16
10-12 องศา	21
12-14 องศา	5
14-16 องศา	2
>16 องศา	4

2.5 สรุปผลการสัมภาษณ์เกษตรกรที่มีการปลูกอ้อยในพื้นที่ลาดเอียงจำนวน 5 ราย

(1) การกำหนดทิศทางของแถวอ้อย

- วางแบบยวบน้ำจากหัวแปลงไหลผ่านชะหน้าดินและธาตุอาหารลงไปกองอยู่ท้ายแปลงทำให้อ้อยแถวท้ายแปลงมีการเจริญเติบโตดีกว่าหัวแปลง

- วางแบบขวาง ในเขตพื้นที่ที่มีความลาดเอียงเมื่อวางแถวปลูกแบบขวางทำให้น้ำไหลผ่านยากขึ้นเมื่อมวนน้ำมีปริมาณที่มากขึ้นทำให้น้ำพังร่องปลูกจนเสียหายและไหลลงไปยังท้ายแปลงเช่นเดิม การไถในเขตพื้นที่ลาดเอียงนี้ จากการทดลองไถทั้งแบบยาวและแบบขวางแล้ว ได้ผลว่าควรไถเตรียมแปลงปลูกแบบยาว เนื่องจาก

- ไถแบบยาวรถแทรกเตอร์สามารถวิ่งและทำงานได้มากกว่าแบบขวาง ไม่เสียเวลาเลี้ยวหัวแปลงบ่อยครั้ง

- ไถแบบยาวทำให้การทำงานของรถแทรกเตอร์เกิดความเอียงน้อย รถแทรกเตอร์จึงทำงานได้สะดวกไม่เสี่ยงต่อการ พลิกคว่ำระหว่างการทำงาน เพราะพื้นที่ที่มีความลาดเอียงสูงพอสมควร

การไถในพื้นที่ของเกษตรกร ใช้รถแทรกเตอร์ในการไถเพื่อยกร่องปลูกเพียงอย่างเดียว ส่วนการพรวนดินจะใช้รถไถขนาดเล็ก(รถไถเดินตาม) เนื่องจาก

- พื้นที่มีความลาดเอียงมาก ลำบากแก่การนำเครื่องจักรกลทางการเกษตรใหญ่ๆเข้าไปทำงาน
- รถแทรกเตอร์ในเขตพื้นที่ส่วนมากเป็นการ จ้าง ไม่มีเป็นของตัวเอง
- พื้นที่แปลงไม่สมมาตร และ ไม่มีขนาดใหญ่มาก การเก็บงานหรือการทำงานจึงใช้รถไถเดินตามแทน

(2) อิทธิพลของพื้นที่ลาดเอียงมีผลต่อการทำงานของรถแทรกเตอร์

- พื้นที่ลาดเอียงมีผลต่อการทำงานของรถแทรกเตอร์เป็นอย่างมาก ถึงแม้จะสามารถทำงานได้ในพื้นที่นั้นๆ แต่ก็ทำงานได้ในบางกระบวนการบางขั้นตอนในการจัดการไร่อ้อย เช่น สามารถไถเตรียมปลูก ยกร่อง ปลูกได้ แต่ไม่สามารถใช้รถแทรกเตอร์เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องปลูกและอุปกรณ์ทางการเกษตรอื่นๆได้จนครบกระบวนการ

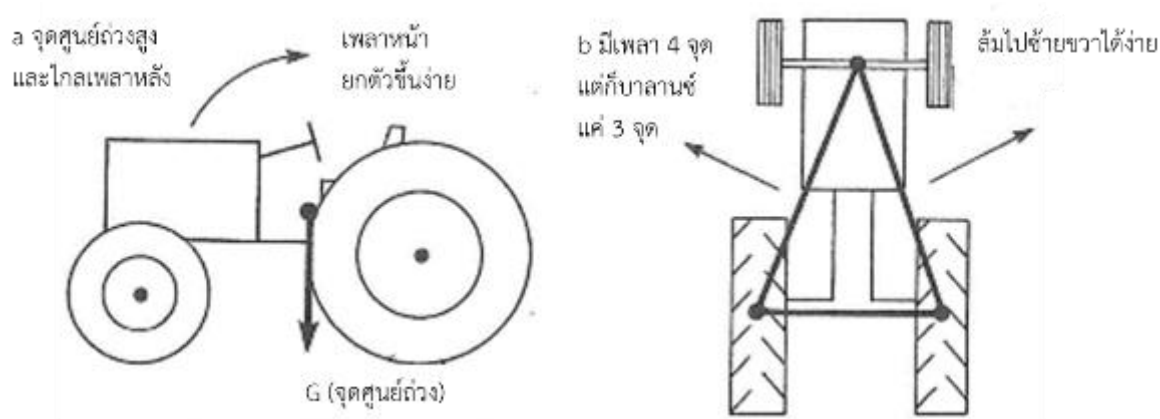
- การไถต่อ ในเขตพื้นที่ สามารถไถได้นานสุดคือ 3 ปี แต่ส่วนมากสามารถไถต่อได้ 2 ปี ปัญหานี้เกิดจาก การหารถตัดไม่ได้ อีกทั้งแรงงานตัดอ้อยก็ขาดแคลน ทำให้ต้องเผาอ้อยสดก่อนตัด เมื่อเผาอ้อย การเผาอ้อยก็ส่งผลต่อสภาพของผิวดิน ทำให้ดินไม่ดีไม่อุดมสมบูรณ์

- การปลูกอ้อยส่วนมากปลูกในเดือน ตุลาคม เมื่อตัดอ้อยแล้วทำการปลูกเลยทันที ปัญหาที่พบ บ้างคือ ปลูกอ้อยไม่ทันตามกำหนด เนื่องจากขาดแคลนแรงงานและสภาพพื้นที่ไม่ค่อยเหมาะสม(มีความลาดเอียง)

3.2 ศึกษาไดนามิกส์ของตัวรถแทรกเตอร์ในกระบวนการปลูกอ้อยในสภาพความลาดเอียงและสภาพพื้นที่การเตรียมดินที่กำหนดในช่วงที่ได้จากการสำรวจ

จากการสำรวจภาคสนามในพื้นที่ปลูกอ้อยจังหวัดขอนแก่น พบว่าช่วงของมุมลาดเอียงในแปลงปลูกอ้อยส่วนมาก อยู่ระหว่าง 0- 8 องศา ในกรณีการใช้งานรถแทรกเตอร์ พบว่า อุปสรรคทางรถแทรกเตอร์ส่วนใหญ่คือการตกจากพื้นที่ที่ทำงานหรือถนนและพลิกคว่ำ ในรถแทรกเตอร์แบบนี้ ลักษณะโครงสร้างและการทำงานจะมีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้

- จุดศูนย์ถ่วงอยู่สูง
- จุดศูนย์ถ่วงเอียงไปทางเพลาหลัง และขับเคลื่อนล้อหลัง
- เพลาหน้าได้รับการหนุนด้วย Pivot Pin 1 จุด และบาลานซ์แบบเดียวกับรถ 2 ล้อ
- จุดศูนย์ถ่วงอาจจะย้ายขึ้นอยู่กับการติดตั้ง หรือประเภทของอุปกรณ์ต่อพ่วง จากลักษณะเฉพาะนี้ เพลาหน้าจะยกขึ้นตามภาพที่ 1.34 ทำให้เกิด “Horse Stand Upright Phenomenon” ซึ่งง่ายต่อการถอย นอกจากนี้ยังแฉลบออกด้านข้างได้ง่ายเหมือนรถ 3 ล้อ



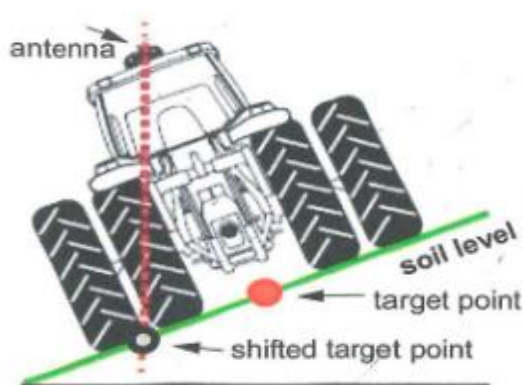
ภาพที่ 39 จุดศูนย์ถ่วงของรถแทรกเตอร์

การเข้าออกถนนไปยังแปลงต้องเลือกจุดที่มีความสูงต่างกันเล็กน้อย และเดินทางไปยังแปลงในแนวตั้งฉากกับถนน ตอนไถให้ถอยหลังแล้วค่อย ๆ เดินหน้าให้มากที่สุดที่จะเป็นไปได้ ห้ามเปลี่ยนเกียร์ระหว่างทาง จะอันตรายหากมีความสูงแตกต่างกันมากกว่าหนึ่งในสี่ของเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อหลัง อาจจะต้องเลี้ยงไปหรือใช้แผ่นบอร์ดเพื่อรองให้วิ่งไปได้ (ป้องกันการถอยหลัง)

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ต่อพ่วงแบบโรตารี หรือเมื่อขับเคลื่อนไปยังที่มีระดับต่างกัน เช่น คันนา ต้องหยุดอุปกรณ์ต่อพ่วง และปลายล่างของเครื่องต้องอยู่เหนือพื้นดิน 10 ซม. ขึ้นไป ในกรณีที่อุปกรณ์ต่อพ่วงที่หนักติดตั้งอยู่ด้านหลังแทรกเตอร์ พวงมาลัยอาจจะขยับได้ง่ายขึ้น ดังนั้น ไม่ควรขยับพวงมาลัยมากเกินไป

อาจทำให้เสียการทรงตัวและพลิกคว่ำได้ โดยความลาดชันได้มากที่สุดที่ยังปลอดภัยอยู่ที่ประมาณ 6° ทำงานในทางตรงและตั้งฉากให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (ป้องกันการแฉลบ)

การทำการเกษตรบนพื้นที่ลาดชันทำให้เกษตรกรต้องบังคับรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกัน บนพื้นที่ลาดเอียงใกล้เคียงกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งหมายความว่า รถแทรกเตอร์จะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในแนวเอียงตามความชันของเนินเพาะปลูก เนินลาดชัน หรือที่เราเรียกว่า แฉวปลูกพืชแนวเอียงถือเป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้น และจำเป็นจะต้องได้รับการแก้ไขอย่างถูกต้องเหมาะสม



ภาพที่ 40 การเคลื่อนที่ของรถในมุมเอียงแสดงให้เห็นค่าตำแหน่งเป้าหมายที่ผิดพลาด (Heraud, 2009)

หากต้องการนำระบบกำหนดเส้นทางมาใช้เพื่อกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ เราจะต้องปรับมุมมองการเคลื่อนที่ของรถให้รับกับค่าความลาดเอียงที่อาจแตกต่างกันไป ดังนั้น เราจะต้องให้ความสนใจกับตัวแปรที่สำคัญ เช่น จุดหมุน มุมหมุนแนวนอน และมุมเลี้ยว (ภาพที่ 4.6) ค่ามุมเลี้ยว คือ ค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ซึ่งอาจเกิดจากการไถลของรถจากเส้นทางเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนเนินลาด และอาจทำให้เกิดค่าความเบี่ยงเบนระหว่างเส้นทางจริงที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ และเส้นทางที่ระบบกำหนดให้



- สภาพภูมิประเทศเป็นตัวแปรที่กำหนดจุดหมุน (Roll; มุมลาดด้านข้าง) และมุมหมุนในแนวนอน (Pitch; มุมลาดลง)
- ทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับ ตำแหน่งที่ถูกกำหนดมาจากระบบกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยมี มุมเลี้ยว (Yaw) เป็นตัวแปรร่วม ซึ่งทำให้เกิดค่าเบี่ยงเบนของเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถ มุมเลี้ยวนี้อาจมีค่าใกล้เคียงกับ 0° ในแนวราบ แต่หากรถเคลื่อนที่ในแนวเอียง มุมเลี้ยวอาจมีค่ามากกว่า 0°

ภาพที่ 41 แสดงตำแหน่งสามมิติของแทรกเตอร์บนเนินเขา

ซึ่งขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศและทิศทางการเคลื่อนที่ (Heraud, 2009)

จุดหมุน มุมหมุนแนวนอน และมุมเลี้ยว สามารถวัดได้จากค่า GPS โดยเราจะนำค่านี้ไปคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถใหม่ หากจุดหมุนเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดค่าเบี่ยงเบนในการเคลื่อนที่บนทางลาดเอียง (ภาพที่ 4.6) เราสามารถแก้ปัญหานี้ได้ไม่ยากนัก โดยติดตั้งเสาอากาศ 2 ตัว ให้เสาอากาศตัวหนึ่งอยู่ที่ด้านซ้าย และอีกตัวหนึ่งอยู่ที่ด้านขวาตามแนวการเคลื่อนที่ของรถ จึงสามารถคำนวณจุดหมุนของรถได้ โดยใช้ส่วนต่างของค่าความสูงที่วัดได้ จากนั้นจึงนำไปคำนวณโดยใช้หลักตรีโกณมิติก็จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถที่ต้องการ เราสามารถระบุค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ได้จากตำแหน่งด้านข้างที่สัมพันธ์กันของเสาอากาศสองตัวนี้ และสุดท้าย หากใช้เสาอากาศสามตัวในการรับสัญญาณ เสาอากาศตัวที่สามซึ่งติดตั้งอยู่ด้านหน้าอีก 2 ตัวจะสามารถระบุช่วงการเบี่ยงเบนในแนวนอนได้ การนำระบบควบคุมพวงมาลัยมาปรับใช้เพื่อระบุตำแหน่ง ข้อมูลจำเป็นต้องใช้อัลกอริธึมที่เหมาะสมประกอบการคำนวณ (Heraud และ Lange 2009) อย่างไรก็ตาม เทคนิคการปรับเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถบนเนินเขายังต้องอาศัยความซับซ้อน และเทคนิคขั้นสูงในการคำนวณ

เราสามารถเสริมการทำงานของระบบกำหนดเส้นทาง โดยใช้การนำทางด้วยดาวเทียม (GNSS) ได้ โดยใช้ระบบเซ็นเซอร์วัดความเอียง เซ็นเซอร์เหล่านี้จะทำหน้าที่วัดความเร่งเชิงเส้น หรือความเร็วในการหมุน อีกทั้งยังสามารถระบุตำแหน่งของยานพาหนะได้ด้วย (Yazdi et al. 1998) อุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้มีขนาดเล็กมาก และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางตามการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ถุงลมนิรภัย หรือแอร์แบ็กในรถยนต์ และเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแบบไดนามิกให้มีความเสถียร หากติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเอียงและนำไปใช้อย่างถูกต้อง เซ็นเซอร์นี้จะช่วยวัดค่าการเคลื่อนที่และค่าการหมุนได้ทั้ง 3 ทิศทาง โดยใช้ค่าการหมุนอิสระ 6° คำนวณกับแกนจุดหมุน มุมหมุนแนวนอน และมุมเลี้ยว

นอกจากประสิทธิภาพการทำงานดังกล่าวและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่ไม่สูงมากนัก เซ็นเซอร์วัดความเอียงจึงไม่ใช่อุปกรณ์หลัก ที่สามารถนำมาใช้แทนระบบกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ด้วยเทคนิค GNSS ได้ แต่ยังมีระบบที่ใช้ในเชิงพาณิชย์อื่น ๆ ที่มีเสถียรภาพ GPS และเซ็นเซอร์วัดความเอียงติดตั้งมาด้วย สำหรับใช้วัดค่าเชิงพื้นที่ได้

ในทางปฏิบัติ เซ็นเซอร์วัดความเอียงไม่สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำ เมื่อติดตั้งบนรถที่เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดไว้เป็นเวลานานๆ ในกรณีที่เส้นทางนั้นถูกกำหนดมาเป็นเวลานานหลายเดือนหรือหลายปีแล้ว เนื่องจากเซ็นเซอร์วัดความเอียงทำงานด้วยหลักการ ดึงข้อมูลเดิมจากหน่วยความจำที่บันทึกเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถมาใช้งาน ซึ่งบันทึกตั้งแต่เมื่อเครื่องจักรออกวิ่งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งตามระยะเวลาที่กำหนดไปจนถึงจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ ซึ่งข้อมูลที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำนั้น ย่อมบันทึกค่าที่ผิดพลาดรวมเข้าไปในจำนวนข้อมูลที่ถูกต้องด้วย ซึ่งเราเรียกข้อมูลที่ผิดพลาดนี้ว่า ค่าที่ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อน หากใช้ระบบ GNSS ในการกำหนดเส้นทางเพียงอย่างเดียว ค่าที่บันทึกหรือเส้นทางที่กำหนดให้รถเคลื่อนที่ไปนั้น มักจะเป็นค่าที่ถูกต้อง เนื่องจากการได้รับการปรับปรุงค่าแบบอัตโนมัติอยู่ตลอดเวลาจากสัญญาณที่ได้รับจากดาวเทียมและตัวส่งสัญญาณ แต่หากใช้เซ็นเซอร์วัดความเอียงเป็นตัวระบุเส้นทางเพียงอย่างเดียว จะทำให้ไม่สามารถกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถที่ถูกต้องได้ ดังนั้น ปัจจุบันเราจึงนิยมใช้เซ็นเซอร์วัดความเอียงเป็นอุปกรณ์เสริม มีใช้อุปกรณ์หลักสำหรับการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์หรือการหักเลี้ยวแต่อย่างใด เพราะนิยมใช้ระบบ GPS ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่า เป็นตัวกำหนดทิศทางที่ถูกต้องนั่นเอง

หากกล่าวถึงการควบคุมผลลัพธ์ของ ทิศทางการเคลื่อนที่ที่คำนวณมาจากจุดหมุนและมุมหมุนในแนวนอน ซึ่งแตกต่างจากกรณีอื่น ๆ เนื่องจากระบบจะบันทึกค่าความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่ได้ยาก เพราะค่าเหล่านี้ไม่ระบุไว้ในจุดพล็อตเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ตั้งแต่แรก แต่หากต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งเครื่องจักรกลเกษตร เราอาจใช้หลักการทำงานของ GPS และเซ็นเซอร์วัดความเอียงช่วยได้ Li et al. (2009) และ Kellar et al. (2008) ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีความแม่นยำเท่ากัน เมื่อใช้ระบบ GPS ร่วมกับเสถียรภาพหลาย ๆ เสถียร หรือใช้เซ็นเซอร์วัดความเอียงช่วยควบคุมจุดหมุนและมุมหมุนแนวนอน อีกทั้งยังใช้เสถียรภาพอีก 1 เสถียร เพื่อ

ควบคุมมูลเฉลี่ยของรถ Li et al. (2009) และ Kellar et al. (2008) ระบุว่า วิธีการนี้จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการทำงานน้อยกว่า

อย่างไรก็ตาม เมื่อวัดจากข้อมูลที่มาจากพิกัดเดียวกัน เรายังจำเป็นต้องนำค่าจากตัวรับสัญญาณ GPS และเซ็นเซอร์วัดความเอียงมาคำนวณร่วมกัน ค่า GPS ที่เป็นตัวกำหนดพิกัดของรถแทรกเตอร์ สามารถนำไปใช้เป็นตัวใช้ในการคำนวณได้ในระยะยาว ถ้าสัญญาณนั้นไม่มีสิ่งกีดขวางมากในภายหลัง เช่น ต้นไม้ อาคารหรือมุมหักเหของสัญญาณ เป็นต้น และถ้านำค่าจากทั้งสองระบบมาคำนวณร่วมกัน เพื่อควบคุมทิศทางแบบผสมผสาน จะช่วยลดการส่งสัญญาณ GPS ในระยะสั้นได้ โดยการใช้การควบคุมจากระบบเซ็นเซอร์วัดความเอียง (Inertial Sensing)

3.3 พัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์ และเซนเซอร์วัดความเร็วรถ

3.3.1 ศึกษาลักษณะทั่วไปของรถแทรกเตอร์

ดังภาพที่ 42 รถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Kubota รุ่น L4708 ซึ่งเป็นรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นแบบขับเคลื่อนได้ทั้งแบบ สองล้อและสี่ล้อ มีแรงม้า 47 แรงม้า เป็นระบบบังคับเลี้ยวแบบ Hydro-static อัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก 30.5 ลิตร/นาที่



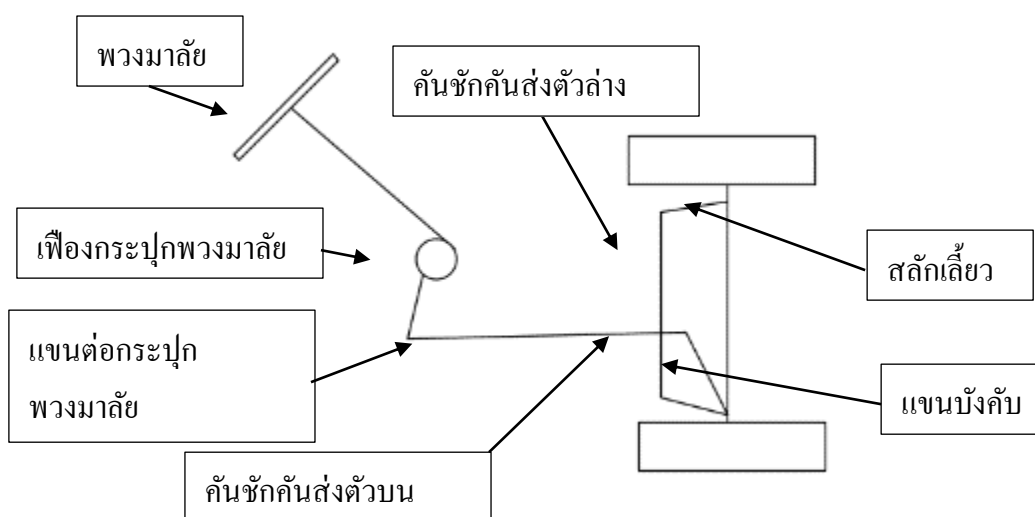
ภาพที่ 42 รถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Kubota รุ่น L4708

ที่มา: siamkubota.co.th

3.3.2 กลไกระบบบังคับเลี้ยว

ในการควบคุมทิศทางของรถให้ไปในทิศทางที่ต้องการนั้นจำเป็นต้องมีระบบบังคับเลี้ยว ซึ่งระบบบังคับเลี้ยวเป็นชุดอุปกรณ์สำหรับแปลงการเคลื่อนที่แบบหมุนของพวงมาลัยให้เป็นเป็นการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง เพื่อส่งต่อกำลังเพื่อควบคุมการเลี้ยวของล้อ ระบบบังคับเลี้ยวที่ดีนั้นต้องสามารถควบคุมทิศทางของรถได้อย่างแม่นยำ และเมื่อขณะรถอยู่ในสถานะที่เลี้ยวอยู่ เมื่อปล่อยมือหรือไม่บังคับพวงมาลัยแล้วรถจะต้องตรงไปข้างหน้าเองได้ และการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวนี้ต้องคำนึงถึงการซ่อมบำรุงหรือการรักษาด้วย

ระบบบังคับเลี้ยวสามารถควบคุมที่ล้อหลังก็ได้หรือทั้งสี่ล้อก็ได้ และระบบนั้นต้องไม่ทำให้ผู้ใช้งานเกิดความเมื่อยล้าเมื่อเกิดการเลี้ยว ส่วนประกอบของระบบบังคับเลี้ยวประกอบด้วยหลายชิ้นส่วนดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 ระบบบังคับเลี้ยวบนรถยนต์ทั่วไป

จากภาพที่ 43 จะมีหลักการทำงานคือเมื่อหมุนพวงมาลัยจะทำให้เฟืองกระปุกของพวงมาลัยเคลื่อนที่ทำให้แกนต่อพวงมาลัยเคลื่อนที่ตามไปด้วยและส่งกำลังไปยังคันชักคันส่งตัวบนและส่งกำลังไปยังแขนบังคับเลี้ยวทำให้เกิดการเลี้ยวเกิดขึ้น เฟืองบังคับเลี้ยวในรถแทรกเตอร์ยังมีการแยกย่อยได้อีกคือแบบเฟืองตัวหนอนและแบบกระบอกเกลียวและเม็ดลูกป็น จากภาพที่ 44

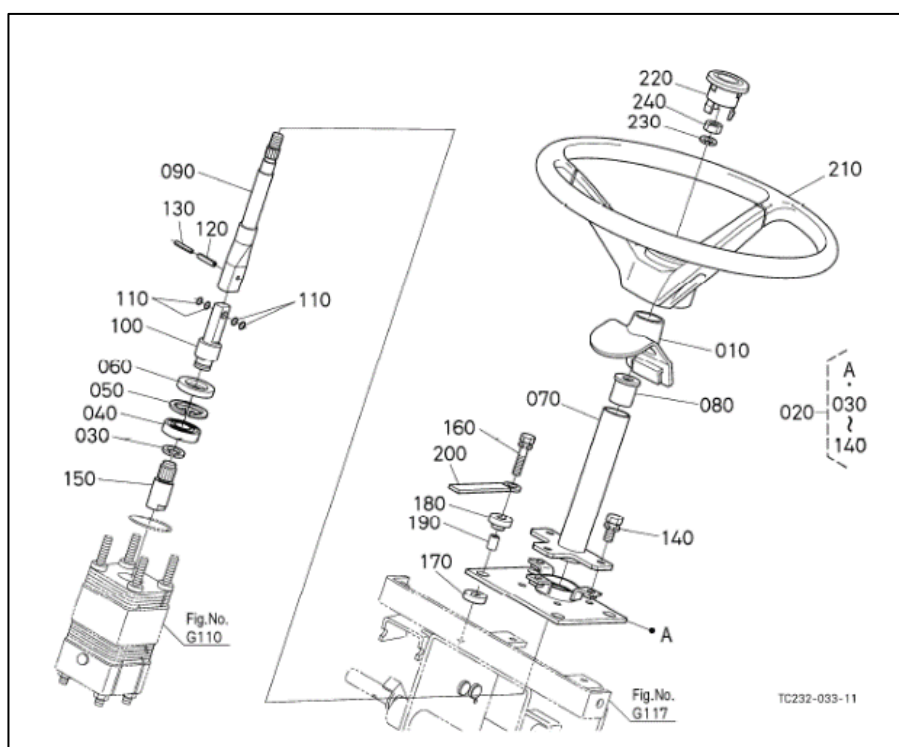


ภาพที่ 44 เฟืองบังคับเลี้ยวแบบเฟืองตัวหนอนและแบบเม็ดลูกป็น

ที่มา: pcat.ac.th

1) ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิกส์

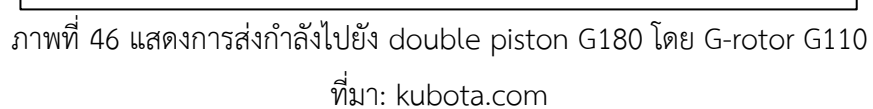
ระบบบังคับเลี้ยวแบบนี้จะใช้น้ำมันไฮดรอลิกส์ในการส่งกำลังการเลี้ยว ดังนั้นระบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีคันชักคัปส่งเลยและกระปุกเกียร์พวงมาลัยก็ได้ กลไกการบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย วงล้อพวงมาลัยที่ใช้บังคับทิศทาง แกนพวงมาลัยใช้ส่งกำลังการหมุนหรือแรงบิด เพื่อใช้ในการเปิดปิดทิศทางไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ผ่านวาล์ว ที่ใช้ควบคุมทิศทาง(G-Rotor) ดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ชุดพวงมาลัยของรถแทรกเตอร์

ที่มา: kubota.com

ซึ่งระบบส่งกำลังไฮดรอลิกส์เริ่มจากปั๊มที่มีหน้าที่ผลิตกำลังไฮดรอลิกส์และส่งกำลังไปยังวาล์ว(G-Rotor) เพื่อกำหนดทิศทางไหลของน้ำมันหลังจากนั้นน้ำมันจะไหลส่งไปยังกระบอกสูบ(cylinder)เพื่อใช้ควบคุมระยะชักต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 46

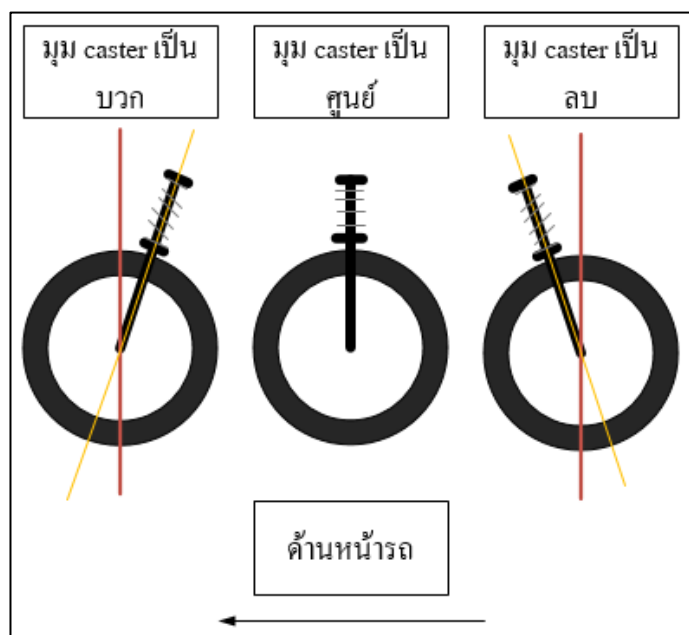
[illegible]

ภาพที่ 47 แสดงการส่งกำลังไปยังล้อ
ที่มา: kubota.com

2) ค่าการตั้งศูนย์มุมล้อหน้า

เพื่อให้การควบคุมการเลี้ยวของรถนั้นสามารถทำได้ง่ายและมีความเสถียรในการควบคุมทิศทาง ช่วยให้การสึกหรอของยางที่น้อยลง การตั้งศูนย์ของล้อจึงจำเป็น ซึ่งการตั้งศูนย์ล้อนั้นจะต้องมีความแม่นยำ ซึ่งมีองค์ประกอบหลายส่วนดังนี้ Caster angle, Camber angle, Kingpin inclination angle, Toe-in, Toe-out

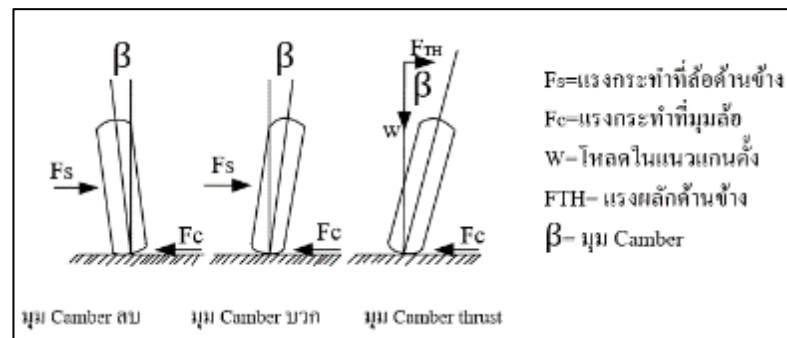
Caster angle จะทำให้การขับรถนั้นมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นกล่าวคือจะทำให้ “รถวิ่งได้ตรงทาง” และ “พวงมาลัยคืนกลับในแนวตรงได้เอง” (Self Centering) การปรับมุมแคสเตอร์จะเป็นดังนี้ ถ้าเรามองในด้านข้างของล้อรถ แล้วลากเส้นแกนกลางในแนวตั้ง (Vertical Line) เป็นแนวหลัก นั่นคือ “ไม่มีแคสเตอร์” หากเป็น “แคสเตอร์บวก” (Positive Caster) เส้นแกนจะเอนไปด้านหลังของเพล่า กิ่งงาก็วัดจากเส้นหลักแนวตั้ง ส่วน “แคสเตอร์ลบ” (Negative Caster) จะเป็นทิศทางตรงกันข้ามกันดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 ลักษณะของมุม Caster

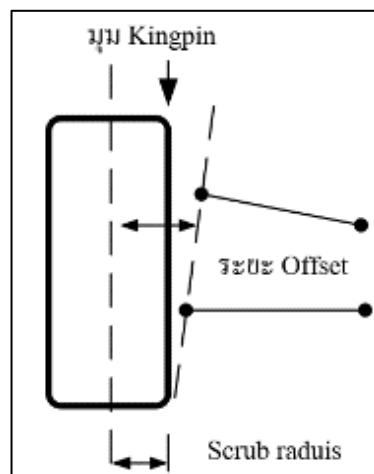
Camber angle หมายถึงมุมหรือองศาของล้อที่เอียงหรือเบนออกจากแนวตั้งโดยแคมเบอร์ 0 เป็นตำแหน่งที่ทำให้ล้อตั้งฉากกับถนนมากที่สุด มุมแคมเบอร์บวกคือจุดสูงสุดของล้อที่ทำมุมผายออกจากรถ ส่วนมุมแคมเบอร์ลบหมายถึงส่วนบนสุดของล้อทำมุมหุบเข้าไปในรถ แคมเบอร์เป็นบวกทำให้การยึดเกาะถนน ย่ำแย่ลงแต่จะดีเมื่อขับเข้าโค้ง แคมเบอร์ที่เป็นลบจะทำให้ยางล้อฝั่งนอกสัมผัสกับถนนได้เต็มที่ ส่วนยางฝั่งในจะสัมผัสกับถนนได้ไม่ดี มุมที่เป็นลบมากๆ เพิ่มการสึกหรอของยางฝั่งใน ลดแรงฉุดลากทางตรง ลดอัตราเร่ง และระยะของการเบรก โดยเฉพาะการขับทางตรงมากกว่าการขับเข้าโค้ง ข้อดีของแคมเบอร์ที่เป็นลบเฉพาะแค่ตอนขับเข้าโค้งเท่านั้น การปรับตั้งมุมแคมเบอร์ให้เป็นลบควรปรับตั้งน้อยๆ ไม่เบาะจนล้อด้านบนหุบเข้าไป

ที่ตัวถึงมากๆ เพราะการปรับมุมแคมเบอร์ให้เป็นลบมากๆ จะทำให้รถวิ่งบนทางตรงได้แย่มาก มุมแคมเบอร์ ทำหน้าที่ต้านการเอียงข้างของรถขณะขับขึ้นทางโค้ง ลดรัศมีหมุนเลี้ยวลง เพื่อให้หมุนพวงมาลัยได้เบา ทำให้ไม่เกิดการคลอนตัวลูกปืนล้อที่ระยะฟรี และลดอาการล้อลื่นดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ลักษณะมุม Camber

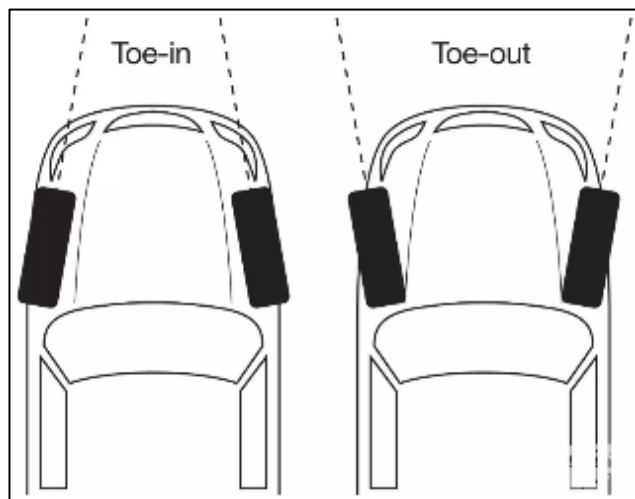
KING-PIN inclination เป็นตัวรับน้ำหนักจากรถไปยังล้อ และขณะเดียวกันก็เป็น เพลาของศูนย์ล้อด้วย มุมของ คิงพิน มีส่วนสัมพันธ์กับมุมของ แคมเมอร์ มาก คิงพิน จะช่วยทำให้การบังคับพวงมาลัยทำได้ง่าย และเมื่อเลี้ยวไปแล้วพวงมาลัยสามารถคืนกลับมาได้เอง คิงพิน เหมือน กับ แคมเมอร์ ทำให้น้ำหนักรถกดลงที่ด้านนอกของยาง ถ้า คิงพินผิดพลาด ผลก็คือ จะทำให้ยางสึกหรอด้านเดียวดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 ลักษณะมุม Kingpin

TOE-IN มุม Toe-in คือระยะหน้ายางเอียงเข้าหากัน ตามทิศทางหน้ารถ (เมื่อมองจากด้านบนลงสู่พื้นถนน) โทอิน จะมีค่าเป็นบวก เมื่อระยะห่างของยางด้านหน้า น้อยกว่าระยะห่างของยางด้านหลัง และ โทอิน จะมีค่าเป็นลบ เมื่อระยะห่างของยางด้านหน้ามากกว่าระยะห่างของยางด้านหลัง โทอินจะทำให้ล้อสั่น จากความต้านทานกลิ้ง ลดระยะหลวมของลูกหมากคันส่ง และทำให้ล้อรถ เคลื่อนที่ขนานไปอย่างคงที่ดังภาพที่ 51

TOE-OUT มุม Toe-out คือผลต่างของมุมเลี้ยวล้อหน้า ที่อยู่ด้านนอกวงเลี้ยว และด้านในวงเลี้ยว หรือรัศมีการเลี้ยวนั่นเอง มุมโทเอาต์ จะทำให้ล้อหมุนเลี้ยวได้อย่างราบรื่น ทำให้จุดศูนย์กลางการหมุนเลี้ยว แต่ละล้อร่วมกัน ป้องกันการสึกหรอของยาง และอาการเสียดังขณะเลี้ยวได้ระดับหนึ่งหากช่วงล่าง ปรับตั้งมุมโท-อิน มากกว่าปกติ ไหล่ยางด้านนอกจะสึกไม่เรียบและสึกเร็วกว่าปกติ ในทางตรงกันข้าม หากมีการปรับตั้งให้มุมโท-เอาต์มากเกินไป ไหล่ยางด้านในจะสึกไม่เรียบและสึกเร็วกว่าปกติดังภาพที่ 51



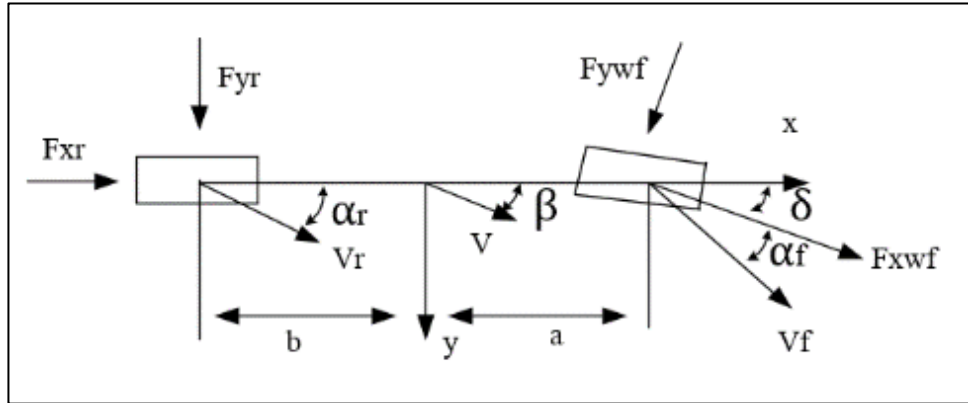
ภาพที่ 51 มุม Toe-in และ Toe-out

ที่มา: xo-autosport.com/

3.3.3 ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling)

เพื่อที่จะเข้าใจระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานพาหนะที่ต้องการจะศึกษานั้นจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจระบบสมการตัวแทนของระบบจริง(Mathematics Modeling) เพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในระบบในรูปแบบของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็ว ความเร่ง โมเมนต์ความเฉื่อย เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกมาศึกษา 2 รูปแบบ ด้วยกัน คือ สมการแบบจำลองแบบสองล้อ และ แบบสี่ล้อ

สมการแบบจำลองแบบสองล้อเป็นการจำลองแทนยานพาหนะอย่างง่าย มีตัวแปรอิสระในสมการสองตัว คือ ตัวแปรการเคลื่อนที่ไปทางด้านข้าง (Lateral) และตัวแปรการหมุนรอบแกน z (Yaw) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบสองล้อ (Bicycle model)

เมื่อ กำหนดให้

a คือ distance from front axle to CG

b คือ distance from rear axle to CG

δ คือ steering angle

β คือ มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์กลางถ่วง

α_f คือ front slip angle

α_r คือ rear slip angle

V_f คือ ความเร็วล้อหน้า

V_r คือ ความเร็วล้อหลัง

F_{xr} คือ longitudinal force on rear wheel

F_{ywf} คือ lateral force on front wheel

F_{yr} คือ lateral force on rear wheel

F_{xwf} คือ longitudinal force on front wheel

จากกฎของนิวตัน (Newton' Law)

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (3.1)$$

เมื่อพิจารณา ภาพที่ 52 จะได้สมการคณิตศาสตร์การเคลื่อนที่ของโมเดลสองล้อ (Bicycle model) ดังนี้

$$ma_x = F_{xwf} \cos \delta - F_{ywf} \sin \delta + F_{xr} \quad (3.2)$$

$$ma_y = F_{ywf} \cos \delta - F_{xwf} \sin \delta + F_{yr} \quad (3.3)$$

$$I_z \dot{\gamma} = aF_{ywf} \cos \delta - aF_{xwf} \sin \delta - bF_{yr} \quad (3.4)$$

กำหนดให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ในแนวแกน x ด้วยความเร็วคงที่หรือความเร่งเท่ากับศูนย์ แต่ยังมีความเร่งในแนวแกน y จะได้

$$a_y = \dot{v} + ru \quad (3.5)$$

กำหนดให้

I_z โมเมนต์ความเฉื่อย

γ คือ yaw rate

m คือ มวลของยานพาหนะ

นำสมการ(3.5)แทนลงในสมการ(3.3-3.4)จะได้สมการ

$$\dot{v} = -ru + \left(\frac{1}{m} \right) (F_{ywf} \cos \delta + F_{xwf} \sin \delta + F_{yr}) \quad (3.6)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{1}{I_z} \right) (aF_{ywf} \cos \delta + aF_{xwf} \sin \delta - bF_{yr}) \quad (3.7)$$

จะได้สมการแทน Bicycle model ตามสมการที่ (3.6-3.7)

สมการความเร็วล้อหน้า

$$V_{xf} = u$$

$$V_{yf} = v + ar$$

สมการความเร็วล้อหลัง

$$V_{xr} = u$$

$$V_{yr} = v - br$$

จากสมการความเร็วที่ล้อหน้าและล้อหลังนำมาคำนวณมุมลื่นไถลด้านข้างทั้งสองล้อจะได้สมการดังนี้

$$a_f = \delta_f - \tan^{-1} \left(\frac{v + ar}{u} \right) \quad (3.8)$$

$$a_r = \tan^{-1} \left(\frac{v - br}{u} \right) \quad (3.9)$$

เมื่อ กำหนดให้

a_f คือ front slip angle

a_r คือ rear slip angle

δ_f คือ front steering angle

δ_r คือ rear steering angle

ความเร็วของล้อหน้าและล้อหลังในแนวระนาบ

$$V_{xwf} = \cos \alpha_f \sqrt{u^2 + (v + ar)^2} \quad (3.10)$$

$$V_{xwr} = \cos \alpha_r \sqrt{u^2 + (v - br)^2} \quad (3.11)$$

แรงกระทำด้านข้างของล้อยานพาหนะทั้งล้อซ้ายและขวา

$$F_{ywf} = 2C_{af} a_f \quad (3.12)$$

$$F_{ywr} = 2C_{ar} a_r \quad (3.13)$$

จากสมการ (3.6-3.7) นำมาเขียนสมการใหม่ โดยมีเงื่อนไขของระบบ Bicycle model คือ มุมเลี้ยวของล้อมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะได้ $\cos \delta \approx 1, \sin \delta \approx 0$ และความเร็วในแนวแกน x คงที่ ดังนั้นค่า u ไม่จำเป็นต้องหา หรือแทนด้วย V ดังนั้นจะได้สมการ

$$\dot{v} = -ru + \left(\frac{1}{m} \right) (F_{yf} + F_{yr}) \quad (3.14)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{1}{I_z} \right) (aF_{yf} - bF_{yr}) \quad (3.15)$$

แทนค่าแรงจากสมการ(3.12-3.13)ลงในสมการ(3.14-3.15) จะได้

$$\dot{v} = -ru + \left(\frac{1}{m} \right) (2C_{af} a_f + 2C_{ar} a_r) \quad (3.16)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{1}{I_z} \right) (aC_{af} a_f - bC_{ar} a_r) \quad (3.17)$$

ประมาณให้ $\tan^{-1} \theta = \theta$ เมื่อ θ น้อย จึงประมาณค่ามุมลื่นไถลด้านข้างจะได้

$$a_f = \frac{v + ar}{u} - \delta_f \quad (3.18)$$

$$a_r = \frac{v - br}{u} \quad (3.19)$$

เมื่อนำสมการ(3.18-3.19) แทนลงในสมการ (3.16-3.17)โดยกำหนดให้ $\delta_r = 0$ เนื่องจากไม่ได้ควบคุมมุมเลี้ยวของล้อหลังจะได้สมการดังนี้

$$\dot{\mathbf{v}} = \frac{2C_{af} + 2C_{ar}}{mu} \mathbf{v} + \left(\frac{2aC_{af} - 2bC_{ar}}{mu} - u \right) \mathbf{r} - \frac{2C_{af}}{m} \delta_f \quad (3.20)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \frac{2aC_{af} - 2bC_{ar}}{I_z u} \mathbf{v} + \left(\frac{2a^2 C_{af} + 2b^2 C_{ar}}{I_z u} \right) \mathbf{r} - \frac{2aC_{af}}{I_z} \delta_f \quad (3.21)$$

หรือนำสมการ(3.20-3.21) มาเขียนอยู่ในรูป (State space)

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_0}{um} & -\left(u + \frac{C_1}{mu}\right) \\ -\frac{C_1}{I_z u} & -\frac{C_2}{I_z u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2C_{af}}{m} \\ -\frac{2aC_{af}}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f \quad (3.22)$$

กำหนดให้

$$C_0 = -(2C_{af} + 2C_{ar})$$

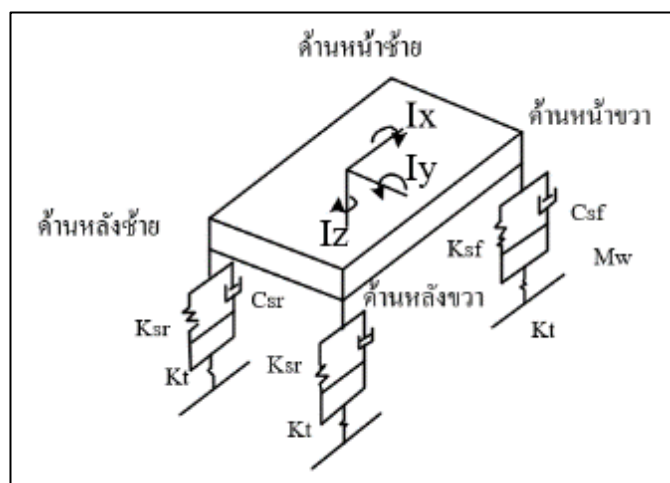
$$C_1 = -(2aC_{af} + 2bC_{ar})$$

$$C_2 = -(2a^2 C_{af} + 2b^2 C_{ar})$$

จากสมการ(3.20-2.21)จะได้สมการคณิตศาสตร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆที่สนใจ

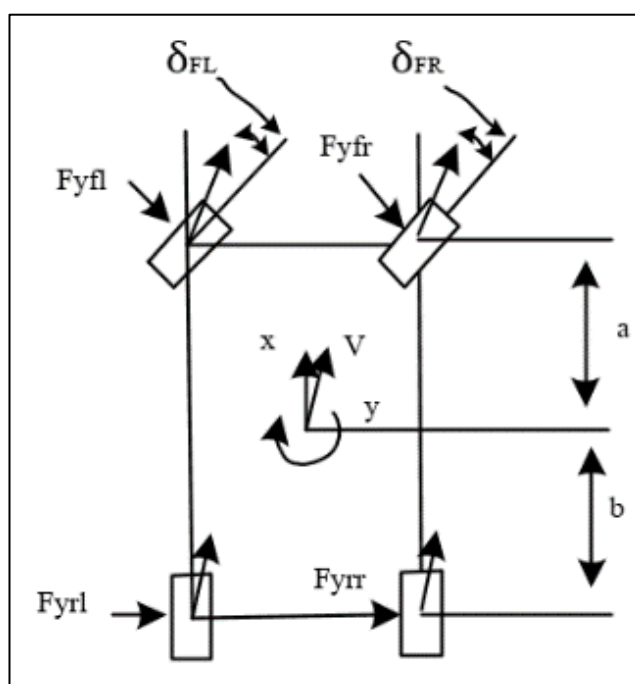
สมการแบบจำลองแบบสี่ล้อ

สำหรับสมการของระบบแบบจำลองแบบ สี่ล้อ จะพิจารณาแรงที่กระทำทั้งสี่ล้อ ซึ่งพิจารณาตัวแปรความเร็วของจุดศูนย์กลางถ่วงของระบบและมุมความเร็วของการเอียงหน้าและหลัง (Pitch)และมุมความเร็วของการเอียงซ้ายและขวา (Roll) พิจารณาในความเร็วที่เคลื่อนที่ไปด้านหน้าคงที่เช่นเดียวกับระบบ bicycle model ดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของ แบบจำลองแบบสี่ล้อ

ซึ่งจำลองระบบขณะกำลังเลี้ยว ดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 แรงที่กระทำในแนວแกน X-Y ของแบบจำลองแบบสี่ล้อ

กำหนดให้

K_t คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงที่ล้อยางกระทำกับผิวถนน

K_{sr} คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงที่ล้อหลังกระทำกับรถ

K_{sf} คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงที่ล้อหน้ากระทำกับรถ

C_{sf} คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อหน้ากระทำกับรถ

C_{sr} คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ล้อหลังกระทำกับรถ

จากภาพที่ เมื่อนำไปหาสมการการเคลื่อนที่ เช่นเดียวกันกับ Bicycle model จะได้ระบบสมการดังนี้

$$v = -ru + \frac{1}{M} (F_{yfl} \cos \delta + F_{yfr} \cos \delta + F_{yrl} + F_{yrr}) \quad (3.23)$$

$$r = \frac{1}{I_z} \left[\frac{W}{2} (-F_{yfl} \sin \delta + F_{yfr} \sin \delta + a(F_{yfl} \cos \delta + F_{yfr} \cos \delta) - b(F_{yrl} + F_{yrr})) \right] \quad (3.24)$$

$$q = \frac{1}{I_y} \left(\begin{aligned} &a(F_{fl} + F_{fr}) - b(F_{rl} + F_{rr}) - (F_{yfr} \sin \delta) \left(h - a\theta - \frac{W}{2}\phi \right) + \dots \\ &\dots - (F_{yfl} \sin \delta) \left(h - a\theta - \frac{W}{2}\phi \right) \end{aligned} \right) \quad (3.25)$$

$$p = \frac{1}{I_x} \left(\begin{aligned} &\frac{W}{2}(F_{fl} + F_{fr}) - \frac{W}{2}(F_{rl} + F_{rr}) - (F_{yfl} \cos \delta) \left(h + a\theta + \frac{W}{2}\phi \right) + \dots \\ &\dots - (F_{yfl} \sin \delta) \left(h + a\theta + \frac{W}{2}\phi \right) - F_{yrl} \left(h - b\theta + \frac{W}{2}\phi \right) - F_{yrr} \left(h - b\theta + \frac{W}{2}\phi \right) \end{aligned} \right) \quad (3.26)$$

โดยที่สามารถหาแรงที่เกิดจากด้านข้างของล้อ (Lateral force) ได้จากสมการดังนี้

$$F_{FR} = C_{aFR} \times a_{FR} F_{FR} \quad (3.27)$$

$$F_{FL} = C_{aFL} \times a_{FL} F_{FL} \quad (3.28)$$

$$F_{RR} = C_{aRR} \times a_{RR} F_{RR} \quad (3.29)$$

$$F_{RL} = C_{aRL} \times a_{RL} F_{RL} \quad (3.30)$$

โดยที่ค่ามุมลื่นไถลเท่ากับ

$$a_{FR} = \delta_f - \tan^{-1} \left(\frac{v + ar}{u - \frac{r}{2}} \right), a_{FL} = \delta_f - \tan^{-1} \left(\frac{v + ar}{u + \frac{r}{2}} \right) \quad (3.31)$$

$$a_{RR} = \delta_r - \tan^{-1} \left(\frac{v - ar}{u - \frac{r}{2}} \right), a_{RL} = \delta_r - \tan^{-1} \left(\frac{v - ar}{u + \frac{r}{2}} \right) \quad (3.32)$$

จะได้สมการคณิตศาสตร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่สนใจ

3.3.4 ศึกษาการระบบบังคับเลี้ยว

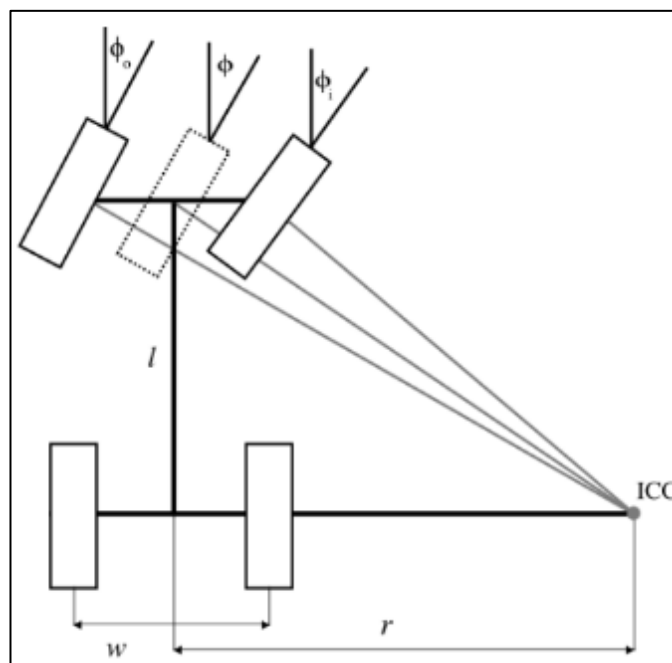
ระบบบังคับเลี้ยวเป็นระบบกลไกที่ทำหน้าที่ควบคุมการเลี้ยวให้รถเลี้ยวไปในทิศทางที่ต้องการ โดยจะทำหน้าที่ควบคุมสัมพันธ์ไปกับระบบต่างๆ เช่น ระบบรองรับ ระบบส่งกำลัง และระบบเบรก ช่วยให้ผู้ขับขี่มีความเชื่อมั่นในทุกๆ ยานความเร็วที่รถได้เคลื่อนที่ไป ระบบบังคับเลี้ยวที่ดีต้องมีลักษณะดังนี้

1. มีความคล่องตัวดีในการบังคับเลี้ยว ทั้งในที่แคบและคดเคี้ยว ระบบบังคับเลี้ยวที่ดีต้องสามารถควบคุมทิศทางของการเลี้ยวของล้อหน้าทั้งสองข้างได้เป็นอย่างดี และมีความคล่องตัวสูง
2. ความเหมาะสมในการบังคับเลี้ยว จุดมุ่งหมายที่สำคัญของระบบบังคับเลี้ยวก็เพื่อให้การบังคับเลี้ยวสะดวกสบาย ขณะที่รถมีความเร็วต่ำพวงมาลัยจะหนัก และเบาขึ้นเมื่อรถมีความเร็วสูงขึ้น
3. การคืนกลับของล้อหลังจากการเลี้ยว ต้องกระทำได้อย่างคล่องตัวและสม่ำเสมอ
4. รับการถ่ายทอดแรงกระทำจากพื้นถนนได้น้อย พื้นผิวถนนที่ขรุขระจะต้องไม่มีผลกระทบกับการบังคับเลี้ยว
5. การสูญเสียการควบคุมและการส่งกำลังของพวงมาลัยจะต้องมีน้อย

ระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์ได้รับการพัฒนามาเป็นลำดับจนถึงปัจจุบัน เพื่อให้การบังคับเลี้ยวของล้อหน้าเป็นไปด้วยความสะดวก ปลอดภัย แบ่งวิธีบังคับเลี้ยวได้ดังนี้

1. ระบบจุดหมุนจุดเดียว (Single Pivot System) ปกติรถยนต์จะมีล้อเพียง 4 ล้อ จุดหมุนของล้อมีแผ่นเหล็กกลมขนาดใหญ่รองอยู่จึงเรียกว่า ล้อที่ 5 (Fifth Wheel Steering) บริเวณกึ่งกลางเพลาล้อหน้ามีสลักใหญ่ (King-Pin) เป็นจุดหมุนสำหรับการเลี้ยว โดยมีแผ่นเหล็กกลมขนาดใหญ่ (Fifth Wheel) รองเพื่อลดความฝืด ข้อเสียของวิธีบังคับเลี้ยวแบบนี้คือ ล้อและเพลาล้อเคลื่อนที่ไปด้วยกันทำให้มีน้ำหนักรถมาก และรถจะเสียการทรงตัวได้ถ้าเลี้ยวด้วยความเร็ว วิธีบังคับเลี้ยวแบบนี้เหมาะสำหรับรถพ่วง (Trailers) แต่ไม่เหมาะสำหรับรถยนต์ทั่วไป

2. แบบอ็คเคอร์มันน์หรือแบบจุดหมุนสองจุด (Ackermann or Double Pivot System) การทำงานของระบบบังคับเลี้ยวแบบนี้ใช้กับระบบรองรับน้ำหนักแบบคานแข็ง โดยที่ปลายทั้งสองของคานหน้ามีจุดหมุน 2 จุด โดยหมุนรอบสลักล้อหน้า (King-Pin) ชุดแกนล้อหน้า (Steering Knuckle) ด้านในเจาะรูสำหรับสวมสลักล้อหน้าเข้ากับคานหน้า ด้านปลายของชุดแกนล้อหน้าจะเป็นเพลาลูไสล้อรถ ล้อรถจะหมุนรอบปลายแกนเพลาลูไสล้อรถ ซึ่งเป็นส่วนปลายของชุดแกนล้อ ชุดแกนล้อหน้าจะมีแขนบังคับเลี้ยวยึดติดอยู่ปลายแขนบังคับเลี้ยวจะต่ออยู่กับคันส่ง (Tie-Rod) โดยลูกหมากปลายอีกด้านหนึ่งของแขนบังคับเลี้ยวจะต่ออยู่กับคันชัก (Drag Link) ดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 Ackerman Steering

ที่มา: (<https://www.xarg.org/book/kinematics/ackerman-steering/>)

$$\tan \phi = \frac{l}{r} \quad (3.33)$$

$$\tan \phi_i = \frac{l}{r - w/2}$$

$$\tan \phi_i = \frac{l}{r + w/2}$$

โดยการลบส่วนกลับของสมการสองหลังเรามาถึงสมการการขับของเออร์แมน

$$\frac{1}{\tan \phi_o} - \frac{1}{\tan \phi_i} = \cot \phi_o - \cot \phi_i = \frac{r + w/2}{l} - \frac{r - w/2}{l} = \frac{w}{l}$$

เท่ากันโคแทนเจนต์ทั้งสองสามารถแสดงมุมฐาน ดังนี้:

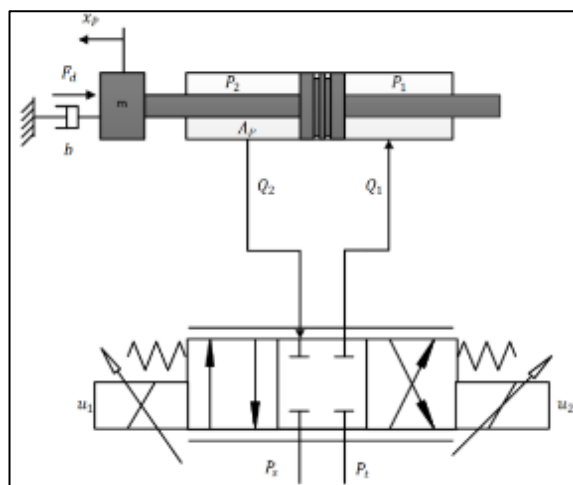
$$\cot \phi_i - \cot \phi = \frac{r - w/2}{l} - \frac{r}{l} = -\frac{w}{2l} \Leftrightarrow \cot \phi_i = \cot \phi - \frac{w}{2l} \quad (3.34)$$

$$\cot \phi_o - \cot \phi = \frac{r + w/2}{l} - \frac{r}{l} = +\frac{w}{2l} \Leftrightarrow \cot \phi_i = \cot \phi + \frac{w}{2l}$$

3.3.5 ศึกษาและออกแบบระบบส่งกำลังแบบ Servomotor และไฮดรอลิกส์

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาเกี่ยวกับระบบไฮดรอลิกส์ ส่วนระบบ Servomotor เป็นการออกแบบเพื่อนำมาเปรียบเทียบและวิจัยในอนาคต

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบและช่วยให้การออกแบบกฎการควบคุมได้ง่ายขึ้นจากภาพที่ 56 เป็นไดอะแกรมการออกแบบระบบส่งกำลังการบังคับเลี้ยวซึ่งบังคับทิศทางการเลี้ยวด้วย Electro hydraulic proportional direction valve



ภาพที่ 56 ไดอะแกรมวาล์วไฟฟ้าสำหรับควบคุมทิศทาง

เพื่อที่จะเข้าใจพฤติกรรมในการเคลื่อนที่ของระบบการเลี้ยวจำเป็นต้องสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาสำหรับการใช้ในออกแบบกฎการควบคุม พิจารณาไดอะแกรมตามภาพที่ 57 สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบไฮดรอลิกส์โดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งระบบสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ

Cylinder modeling

เพื่อให้ระบบที่ออกแบบนี้สามารถจ่ายต่อการออกแบบระบบควบคุม จึงจำเป็นต้องมีสมการคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของล้อย จากภาพที่ 3 อุปกรณ์ส่งกำลังการเคลื่อนที่ของล้อยคือ Double-rod hydraulic cylinder จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้สมการ

$$m \ddot{x}_p = A_p P_L - b \dot{x}_p - F_d \quad (3.35)$$

โดยที่ กำหนดให้

x_p คือ ระยะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (m)

P_L คือ ความดันเมื่อมีภาระ $P_L = P_1 - P_2$ (N/m²)

m คือ มวลของระบบแมคคานิกส์ (kg)

A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (m²)

b คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด (N/(m/s²))

F_d คือ แรงที่กระทำกับระบบแมคคานิกส์จากภายนอกและแรงอื่นที่มีค่าไม่แน่นอน (N)

Solenoid valve modeling

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R \quad (3.36)$$

โดยที่ กำหนดให้

$i(t)$ คือ coil current

$u(t)$ คือ control voltage

แรงที่เกิดจาก magnetic force

$$F_m(t) = f(i(t), x(t)) \quad (3.37)$$

โดยที่ กำหนดให้

$F_m(t)$ คือ electro-magnetic force

$x(t)$ คือ ระยะการเคลื่อนที่ของ spool

สมการคณิตศาสตร์ของ Electro hydraulic proportional direction valve ประกอบด้วย มวลของ spool, แรงสปริง, ความหนืดที่มาจาก electro-magnetic และแรงจากการไหลของน้ำมัน สามารถอธิบายได้ด้วยกฎนิวตันตามสมการ

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B_v \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F_m(t) + F_{st} + F_{fr} \quad (3.38)$$

โดยที่

m คือ มวลของ spool

B_v คือสัมประสิทธิ์ความหนืด

k คือสัมประสิทธิ์ความแข็งของสปริง

F_{st} คือ แรงที่เกิดขึ้นเมื่ออยู่ในช่วงsteady-state

F_{tr} คือ แรงที่เกิดขึ้นเมื่ออยู่ในช่วงtransient

Flow forces

แรงที่เกิดจากการไหลของน้ำมันประกอบด้วย2ชนิดคือ steady-state flow force และ transient flow force สมการของ steady-state flow force มีดังนี้

$$F_{st} = \rho Q v \cos \theta \quad (3.39)$$

Q และ v หาได้จากสมการ

$$Q = C_d A(x) \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3.40)$$

$$Q = C_d A(x) \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3.41)$$

$$v = C_v \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3.42)$$

จากสมการ(3.37),(3.38) จะได้

$$F_{st} = 2 C_v A(x) \Delta P \cos \theta \quad (3.43)$$

โดยที่

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

P_{in} คือความดันขาเข้า

P_{out} คือความดันขาออก

C_d คือ discharge coefficient

C_v คือ velocity coefficient

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำมันไฮดรอลิกส์,

Q คือ อัตราการไหลผ่านช่อง orifice

θ คือ มุมการไหลผ่านช่อง orifice

x คือ ระยะการเคลื่อนที่ของ spool

$A(x)$ คือ พื้นที่ของช่อง orifice เมื่อวาล์วมีการเปิด

สมการการแรงที่เกิดแบบ Transient

$$F_{lr} = -\rho l \frac{dQ}{dt} = C_d l \sqrt{2\rho\Delta P} \frac{dA(x)}{dt} \quad (3.44)$$

โดยที่

l คือ ระยะห่างของช่องทางการไหลเข้าและออก

$A(x)$ คือ orifice area

Orifice area คือพื้นที่ช่องทางการไหลหาได้จากสมการ

$$A(x) = \begin{cases} d^2 (\theta - \sin \theta) / 8 & x_{\max} \geq x > U \\ 0 & 0 < x \leq U \end{cases}$$

$$\theta = 2 \arccos(1 - (2x - U) / d)$$

โดยที่

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice

U คือ orifice เมื่อมีการเริ่มเปิด

x คือระยะของ spool เมื่อ orifice เริ่มเปิด

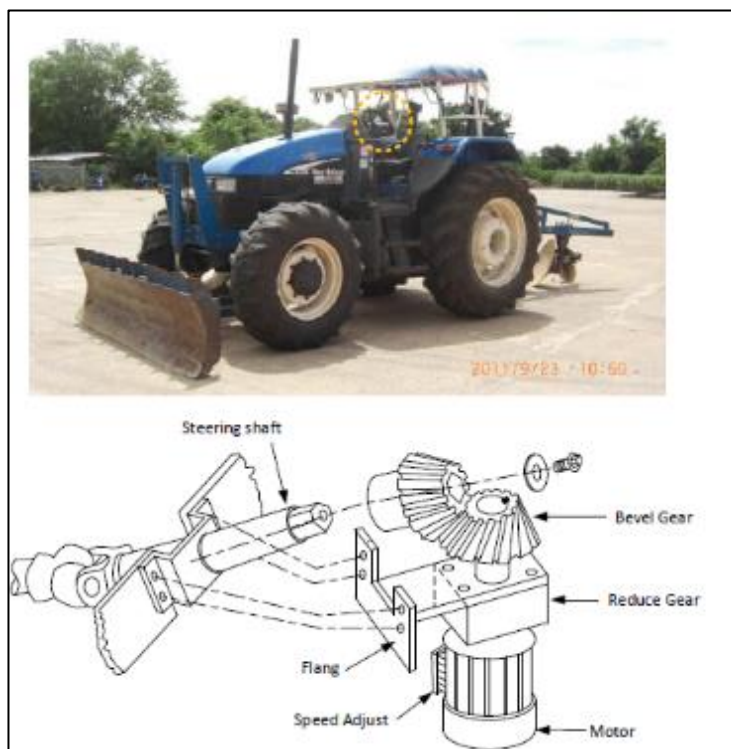
เนื่องจากสมการของระบบค่อนข้างที่จะซับซ้อนและยังมีพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่าของระบบอีกมากในงานวิจัยจึงเลือกใช้วิธี System Identification เพื่อใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบ

1) ออกแบบชุดควบคุมการเลี้ยว

แนวคิดการออกแบบระบบส่งกำลังการบังคับเลี้ยว (Actuator) แบบอัตโนมัติที่นิยมใช้กันในปัจจุบันหลักๆ คือ บังคับเลี้ยวด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเซอร์โวมอเตอร์ กับ ควบคุมการเลี้ยวด้วยระบบวาล์วไฮดรอลิคไฟฟ้า (Solenoid Valve) ซึ่งทั้งสองแบบก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป

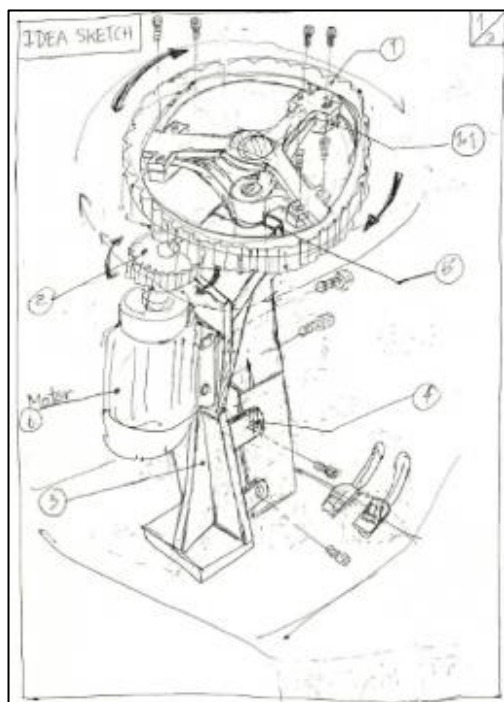
1. ออกแบบระบบบังคับเลี้ยวด้วยมอเตอร์

ระบบบังคับเลี้ยวด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ระบบนี้มีแนวคิดที่จะทำการใช้เครื่องมือในการบังคับผ่านระบบพวงมาลัยเดิม ดังแสดงในภาพที่ 57 เนื่องจากทางทีมวิจัยปรึกษากันในช่วงแรก ๆ ว่าจะได้สามารถติดตั้งได้โดยไม่จำเป็นต้องแก้ไขระบบ fluid power steering โดยมีแนวคิดขับเคลื่อนผ่าน Bevel Gear และส่งกำลังต่อไปยัง Steering Shaft



ภาพที่ 57 แสดงแนวคิดการขับพวงมาลัยด้วย Bevel gear (1st version)
ที่มา:ขวัญตรี แสงประชานารักษ์ และคณะ, (2559)

ซึ่งรายละเอียดต่อมาทางผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบข้อมูลชิ้นส่วนระบบพวงมาลัย ของรถที่จะใช้ทำการทดลอง Kubota รุ่น L4708 พบว่าการต่อ Bevel Gear นั้นทำได้ยากจึงได้ทำการออกแบบระบบหมุนเบื้องต้นได้ลอง Sketch ภาพระบบก่อนดังภาพที่ 57 ซึ่งระบบส่งกำลังอาจจะเป็นเฟืองหรือล้อยางก็ได้ ที่สามารถต่อเข้ากับชุดพวงมาลัยได้โดยตรงแล้วจึงสวมพวงมาลัยทับลงไปอีกชั้นหนึ่ง การติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนวางไว้ด้าน

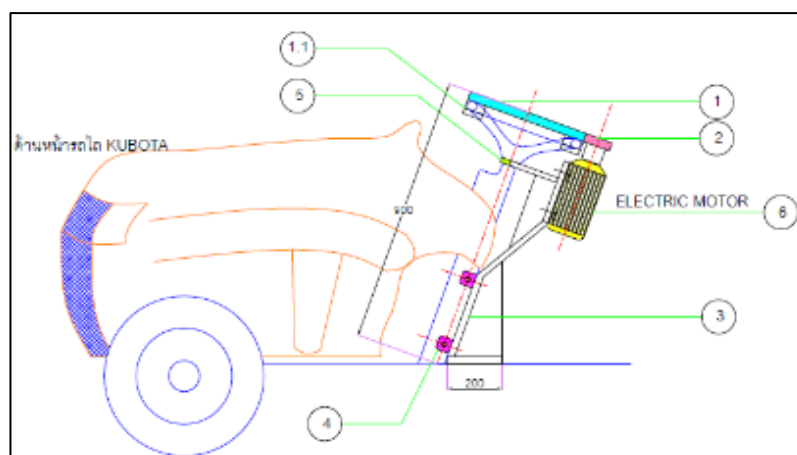


ภาพที่ 58 แสดงภาพ Idea Sketch ของระบบจับ (2nd version)

ที่มา: ขวัญตรี แสงประชาชนารักษ์ และคณะ, (2559)

หลังจากนั้นจึงได้เพิ่มรายละเอียดของชิ้นส่วนที่จะติดตั้งลงไปดังภาพที่ 59

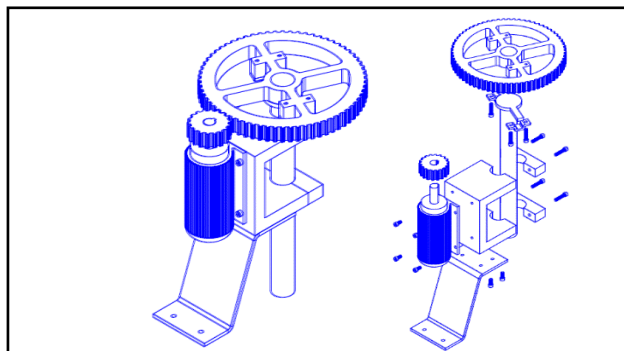
ซึ่งประกอบไปด้วย ชิ้นส่วนหมายเลข 1 คือเฟืองตาม ชิ้นส่วนหมายเลข 2 คือเฟืองขับ ชิ้นส่วนหมายเลข 3 คือColumn ชิ้นส่วนหมายเลข 4 คือJoint ชิ้นส่วนหมายเลข 5 คือClamp 2 ชิ้นส่วนหมายเลข 6 คือElectric motor และชิ้นส่วนหมายเลข 1.1 Clamp ตามลำดับ



ภาพที่ 59 แสดงลักษณะการวางชุดจับที่ด้านข้างของพวงมาลัย

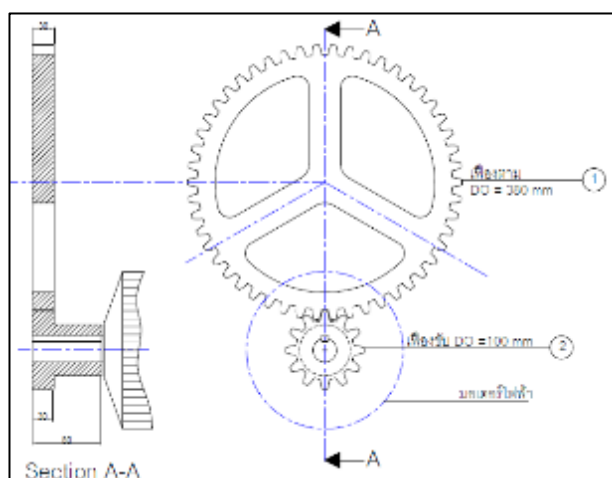
ที่มา: ขวัญตรี แสงประชาชนารักษ์ และคณะ, (2559)

หลังจากนั้นได้ออกแบบ 3D ของระบบขับเคลื่อนที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์จับยึดต่างๆและคำนึงถึงความแข็งแรงและง่ายในการประกอบรวมไปถึงการบำรุงซ่อมแซมดังภาพที่ 60



ภาพที่ 60 แสดง assembly drawing ลักษณะการวางชุดขับเคลื่อนด้านข้างของพวงมาลัย (2nd version)
ที่มา: ขวัญตรี แสงประชานารักษ์ และคณะ, (2559)

สำหรับอัตราทดได้ออกแบบเบื้องต้นที่ 3.8:1 เพื่อให้พวงมาลัยได้แรงบิดที่มากพอและหมุนได้ละเอียดพอที่จะทำการควบคุมทิศทางของรถ ดังแสดงภาพระบบส่งกำลังในภาพที่ 61



ภาพที่ 61 แสดงอัตราทดของเฟืองขับและเฟืองตามในอัตราทด 3.8:1
ที่มา: ขวัญตรี แสงประชานารักษ์ และคณะ, (2559)

แต่ถึงอย่างไรก็ตามต่อให้ออกแบบระบบขับเคลื่อนได้ดีเพียงใดก็ตาม ถ้าอุปกรณ์สร้างกำลังการขับเคลื่อนหรือมอเตอร์ไฟฟ้า ไม่เหมาะสมหรือกำลังการขับไม่เพียงพอก็อาจจะทำให้ระบบที่ออกแบบไปนั้นใช้งานไม่ได้ดังที่คาดหวังไว้ มอเตอร์ไฟฟ้านั้นมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น เซอร์โวมอเตอร์ สเตปปีงมอเตอร์ หรือ ดิซีมอเตอร์ เป็นต้น แล้วแต่จะเลือกมาประยุกต์ใช้งาน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ เซอร์โวมอเตอร์ เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่สามารถให้แรงบิดที่คงที่และมีความแม่นยำสูง

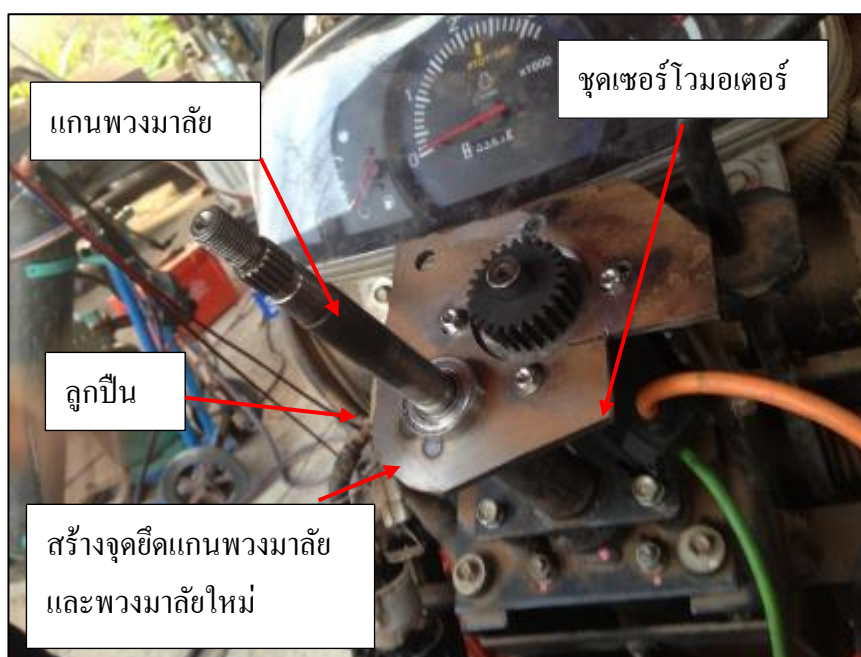
2. การติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนขั้วออกมาลัยที่ออกแบบ

การติดตั้งระบบบังคับเลี้ยวโดยใช้เซอร์โวมอเตอร์เข้ากับตัวรถผู้วิจัยมีแนวคิดที่อยากทำให้ชุดขับเคลื่อนนี้ติดตั้งได้ง่ายและให้รถมีสภาพเหมือนเดิมมากที่สุดเมื่อประกอบอุปกรณ์ต่างๆที่ถอดออกไปแต่บางครั้งถ้าจำเป็นต้องถอดอุปกรณ์บางชิ้นออกเลยก็จำเป็นต้องทำ เนื่องจากรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการทำวิจัยนี้เป็นรถขนาดเล็กอยู่แล้ว ดังนั้นการที่จะเพิ่มอุปกรณ์อื่นๆลงไปโดยที่อุปกรณ์นั้นไม่ใช่อุปกรณ์ที่ออกแบบมาจากโรงงาน นั้นทำได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น มีพื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มน้อย และไม่มีไฟล์สามมิติ หรือ Drawing เป็นต้น การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์มีขั้นตอนดังนี้

1. ถอดชุดคอนโซลหน้าออก ในการถอดออกนั้นต้องระมัดระวังอย่างมากเนื่องจากมีชุดสวิตส์ควบคุมต่างๆอยู่เพราะถ้าหากไม่ระมัดระวังอาจจะทำให้สายไฟขาดได้

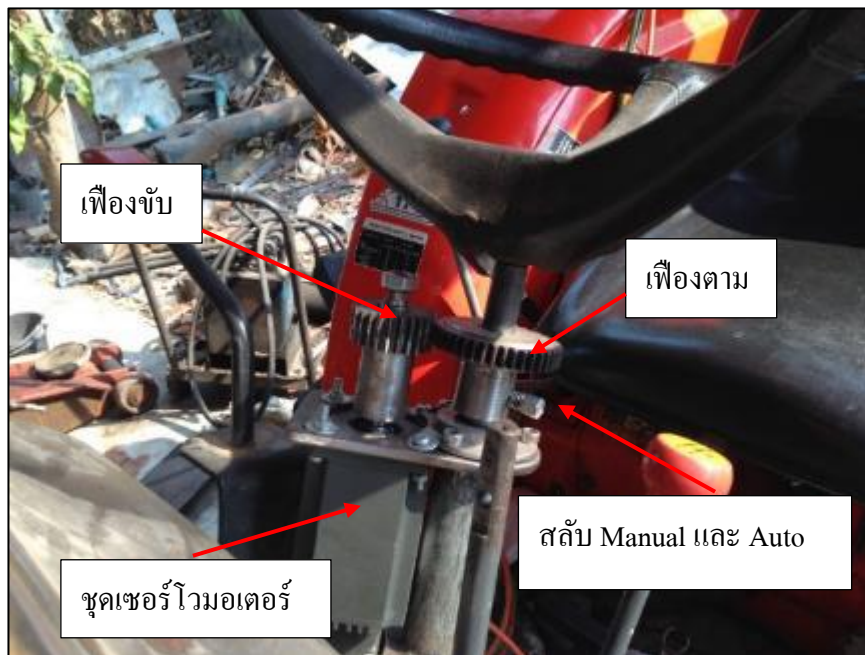
2. ถอดพวงมาลัยออก การถอดพวงมาลัยออกจะต้องมีความชำนาญด้วย เพราะพวงมาลัยยึดกับแกนด้วยร่องแบบสปาย การยึดกันแน่นมาก ต้องใช้ตัวดูดแบบสามขาดูดออกจึงจะทำได้

3. ถอดชุดแกนพวงมาลัยออก ชุดแกนพวงมาลัยจะมีปลอกข้างนอกเพื่อใช้ยึดพวงมาลัยให้แข็งแรง ส่วนแกนด้านในที่ใช้หมุนต่อกับ G-rotor ด้วยลิ้ม ในการออกแบบนั้นจำเป็นต้องทำปลอกแกนพวงมาลัยขึ้นมาใหม่พร้อมอัดลูกปืนเข้าไปด้วยเนื่องจากปลอกเก่าไม่มีชุดลูกปืนทำให้อาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับส่งกำลังตามมาดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 การออกแบบและติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์เข้ากับพวงมาลัย

ในส่วนของเฟืองที่อยู่บนแกนพวงมาลัยหรือเฟืองตามนั้นในการออกแบบทำให้สามารถยกขึ้นหรือลงได้เพื่อเมื่อไม่ใช้ระบบที่ออกแบบนี้ก็สามารถใช้พวงมาลัยแบบเดิมได้ แต่จะไม่สามารถใช้พวงมาลัยแบบเดิมพร้อมกับชุดเฟืองได้เพราะ Servomotor หมุนอิสระไม่ได้ ในส่วนของแกนพวงมาลัยจะบากร่องให้พื้นผิวเสมอกันเพื่อยึดเฟืองเข้ากับแกนพวงมาลัยให้และขันให้แน่นด้วยโบลต์ ดังภาพที่ 63



ภาพที่ 63 ตำแหน่งการติดตั้งการส่งกำลังด้วยฟันเฟือง และ ชุดขับ เซอร์โวมอเตอร์

การควบคุมการทำงานของ เซอร์โวมอเตอร์นั้นควบคุมผ่านชุดขับ ดังภาพที่ 65 ซึ่งตัวเซอร์โวมอเตอร์นี้ใช้ไฟฟ้า AC220V ในการขับเคลื่อน และชุดขับใช้ไฟฟ้า 220 V และ DC 24 V ดังนั้นจึงต้องมี Inverter สำหรับแปลงไฟฟ้าจาก แบตเตอรี่ ในส่วนของการควบคุมตำแหน่งของพวงมาลัยนั้นใช้ PLC Siemens ใช้การโปรแกรมด้วย Tia portal เขียนคำสั่งควบคุมด้วย ภาษา Ladder



ภาพที่ 64 ตำแหน่งการติดตั้งการส่งกำลังด้วยฟันเฟือง และ ชุดขับ เซอร์โวมอเตอร์

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์เสร็จจึงนำเอาชุดคอนโซลมาประกอบเข้าที่เดิม แต่ต้องตัดออกบ้างบางส่วนเพื่อให้สามารถประกอบเข้าที่เดิมได้ดังภาพที่ ๓



ภาพที่ 65 ติดตั้งชุดคอนโซลเข้าที่เดิม

ในเล่มวิทยานิพนธ์ไม่ได้มุ่งเน้นการศึกษาการเกี่ยวกับการส่งกำลังด้วย มอเตอร์ หรือเซอร์โวมอเตอร์แต่เป็นการออกแบบและติดตั้งเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับระบบไฮดรอลิกส์ และเพื่อใช้วิจัยต่อไปในอนาคต

3. ออกแบบระบบไฮดรอลิกส์

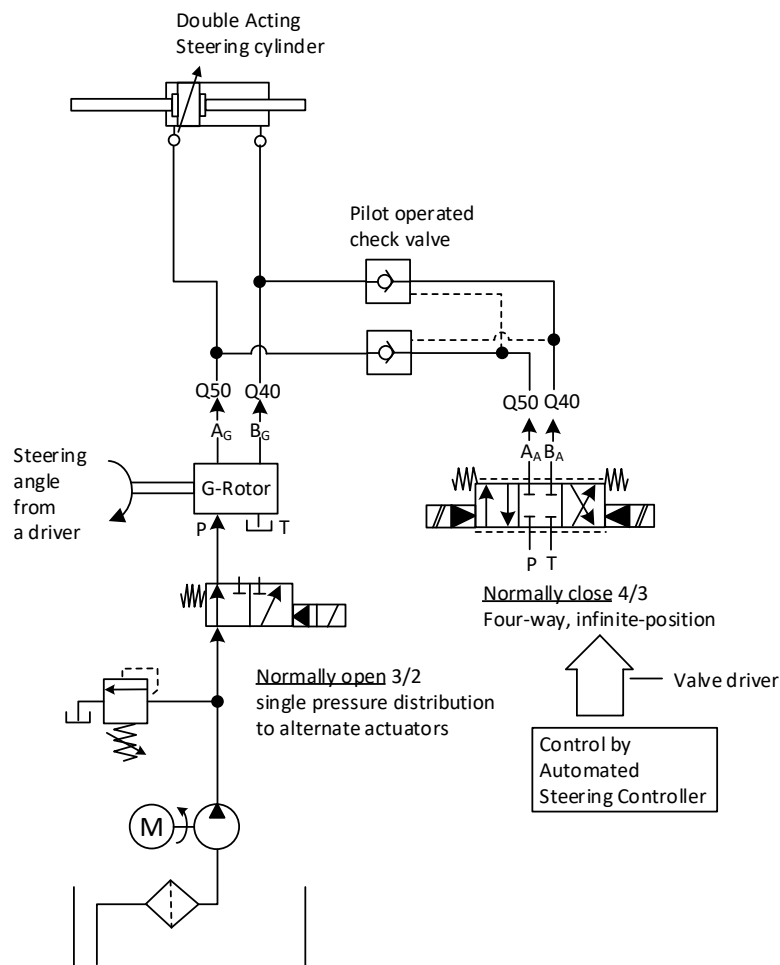
นอกจากระบบที่ขับเคลื่อนด้วยสายพานหรือเฟืองแล้ว ทางที่วิจัยยังมีแนวคิด อีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนของกระบวนการส่งกำลังลง ซึ่งอาจมีปัญหาเกี่ยวกับ backlash และ slip ได้ ซึ่งจากภาพส่วนประกอบของระบบพวงมาลัย แสดงไว้ในภาพที่ 66 ซึ่งในจุดนี้เองที่ทางที่วิจัยได้แนวคิดใหม่ว่า เนื่องจาก G-rotor มีการทำงานต่อตรงกับพวงมาลัยอยู่แล้วและทั้งยังมี port ไฮดรอลิกส์อีก 4 ports ซึ่งในระบบ fluid power control นั้นอนุญาตให้สามารถออกแบบระบบแทรกแซงการทำงานของระบบได้โดยแยกโหมดการทำงาน ระหว่าง Manual โดยผู้ขับขี่และระบบ Automated Steering ได้ ซึ่งจำเป็นต้องใช้

(1) Normally Open 3/2 valve เพื่อใช้ในการเลือกเส้นทางการจ่ายกำลังของไหลให้กับระบบ Manual หรือระบบ Automation

(2) Normally Close 4/3 infinite position เพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของของไหล กำลังในการควบคุมแบบอัตโนมัติ ด้วยการขับจากกระแสน Solenoid valve ทั้งด้านไปและด้านกลับ การที่เลือกเป็น Normally Close นั้นเนื่องจากเหตุที่ว่าระบบพวงมาลัยมีการทำงานตลอดเวลาไม่มากนักน้อยดั่งนั้น ช่วง idle time เทียบกับ operation time จึงน้อย นอกจากนั้นยังต้องการแยกระบบ Manual และ Auto ออกจากกันอย่างเด็ดขาด ทำให้กรณีระบบไฟฟ้ามีปัญหาผู้ใช้ยังสามารถบังคับรถแทรกเตอร์ได้ตามปกติ สำหรับ

(3) Pilot operated check valve ใช้สำหรับแยกระบบทั้งสองออกจากกันอีกชั้นหนึ่งในกรณีที่ใช้พวงมาลัยแบบ Manual ระบบก็จะไม่ไปรบกวนการทำงานของระบบอัตโนมัติ

การเลือกใช้อวาล์วในระบบที่ออกแบบขึ้นมาใหม่นี้จำเป็นต้องคำนึงถึงอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วย เนื่องจากอัตราการไหลผ่านวาล์วมีผลต่อผลตอบแทนของการเลือกโดยตรงซึ่งเมื่อเลือกขนาดของวาล์วได้ไม่เหมาะสมอาจทำให้การควบคุมไม่ได้ดังที่คาดหวังไว้



ภาพที่ 66 แสดงวงจรไฮดรอลิกส์ของตัวควบคุมอัตโนมัติที่ได้ออกแบบ

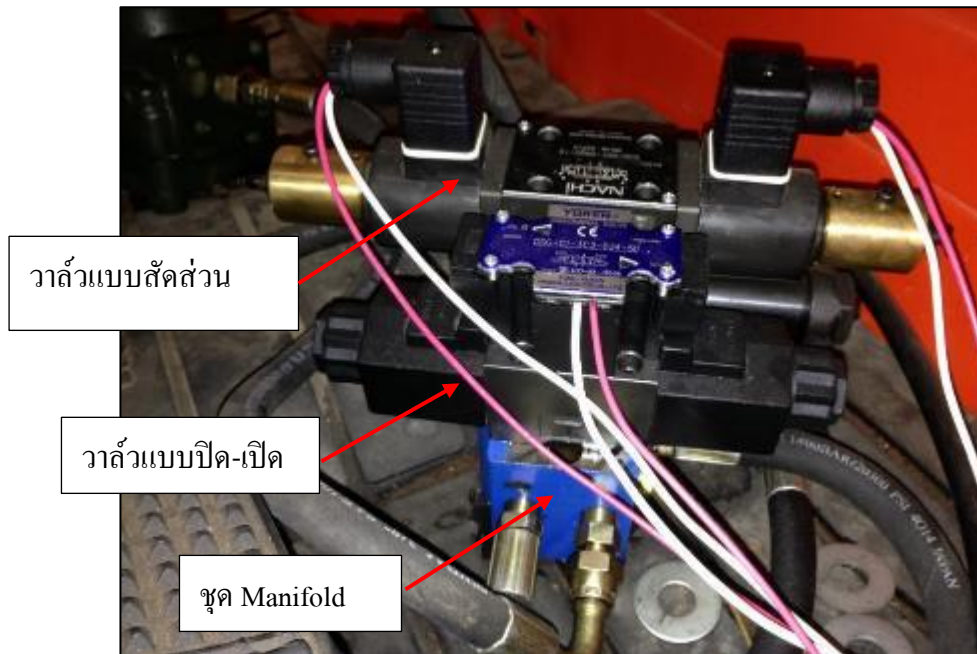
ที่มา: ขวัญตรี แสงประชานารักษ์ และคณะ, (2559)

4. การติดตั้งอุปกรณ์ไฮดรอลิกส์ที่ออกแบบ

การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆของระบบไฮดรอลิกส์นั้นจะต้องคำนึงอันดับแรกคือ ความเสถียรของระบบ กล่าวคือในอุดมคตินั้นสายน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่ใช้ส่งกำลังไปยังกระบอกสูบนั้นจะต้องมีขนาดและความยาวที่เท่ากันให้ได้มากที่สุดเพื่อให้การเคลื่อนในแต่ละด้านนั้นมีความเร็วที่เท่ากันในแต่ละด้าน แต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ยากเพราะการติดตั้งมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ในการติดตั้ง และสิ่งที่ควรคำนึงถึงอันดับต่อมา คือ ความง่ายในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ เพราะระบบไฮดรอลิกส์มีน้ำมันเข้ามาเกี่ยวข้องและถ้าติดตั้งอุปกรณ์โดยไม่คำนึงถึงข้อนี้อาจจะต้องถอดอุปกรณ์อื่นๆอีกหลายอย่างตามมาด้วยเพื่อซ่อมแซมเพียงแค่จุดเดียว และในการติดตั้งควรคำนึงถึงความสวยงามความเป็นระเบียบด้วย

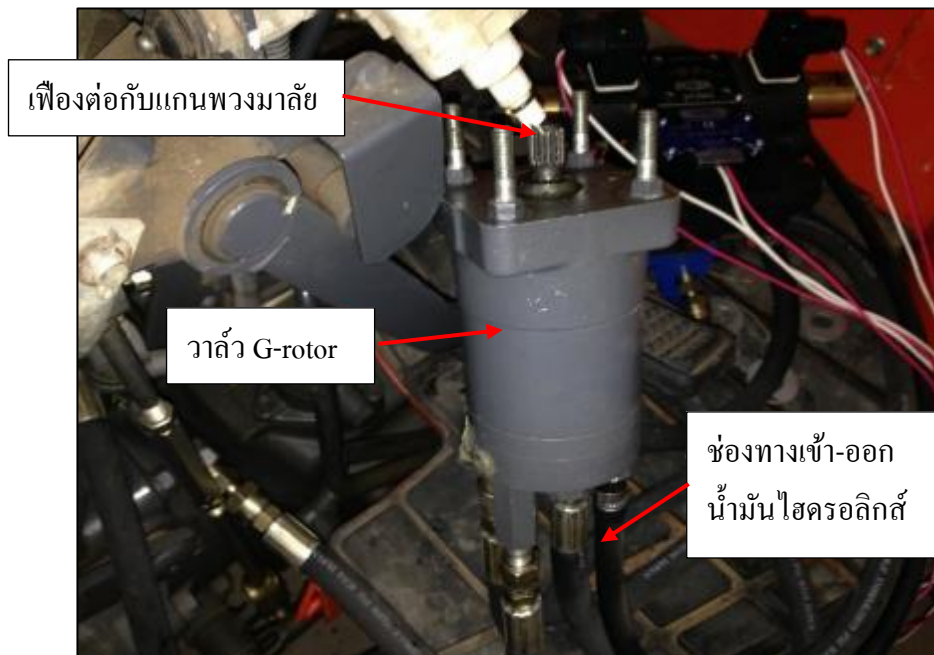
จากภาพที่ 67 คือชุดวาล์วไฮดรอลิกส์สำหรับควบคุมกระบอกสูบ (วาล์วสี่ตำแหน่ง) เป็นวาล์วแบบสัดส่วนกล่าวคือสามารถปรับความเร็วของกระบอกสูบได้ด้วยการปรับกระแส และวาล์วสำหรับเลือกกระหว่าง

ระบบพวงมาลัยเดิม หรือระบบ อัตโนมัติ (วาล์วสื่อน้ำเงิน) เป็นวาล์วแบบปิดเปิดอย่างเดียวไม่สามารถหรีได้ วาล์วทั้งสองใช้ไฟฟ้า DC 24 V ในการขับเคลื่อน



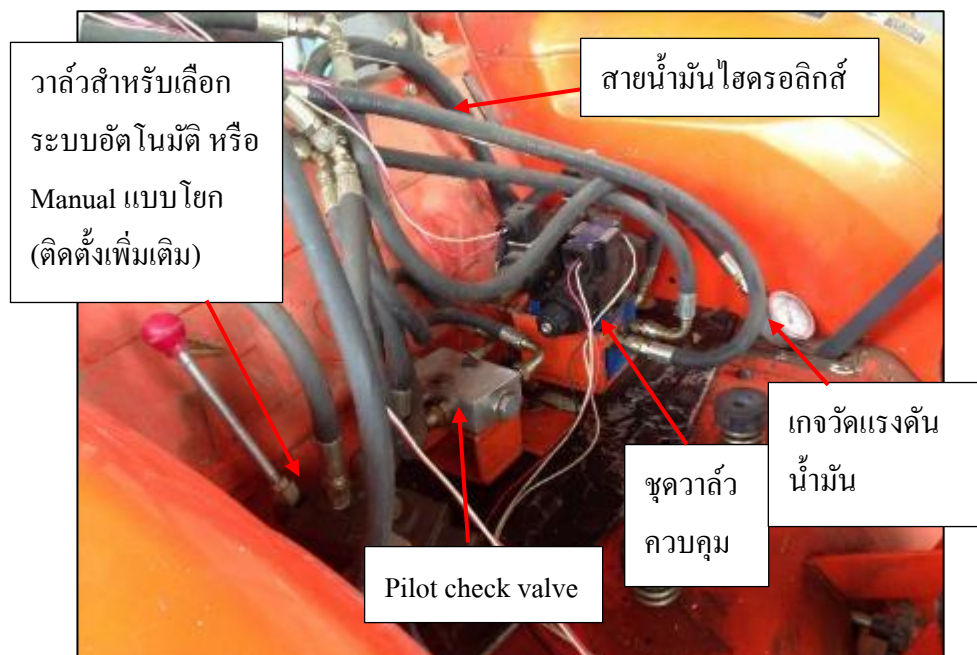
ภาพที่ 67 ชุดวาล์วสำหรับควบคุมระบบบังคับเลี้ยว

ภาพที่ 68 คือ ชุดวาล์วของพวงมาลัยเดิมของรถแทรกเตอร์หรือวาล์ว G-rotor ใช้ในการควบคุมการเลี้ยวโดยมี พอร์ตน้ำมันเข้าหนึ่งพอร์ต พอร์ตน้ำมันออกสองพอร์ต และพอร์ตน้ำมัน ไหลกลับไปแทงค์ หนึ่ง พอร์ต



ภาพที่ 68 วาล์ว G-rotor

ภาพที่ 69 เมื่อติดตั้งชุดอุปกรณ์ครบทั้งหมดแล้ว อุปกรณ์ในภาพประกอบด้วยชุดวาล์ว และ ไพลอต เซควาล์ว ไพลอตเซควาล์วมีหน้าที่สำหรับกันไม่ให้น้ำมันไฮดรอลิกส์ไหลไปยังระบบควบคุมการเลี้ยว เดิมเวลาใช้ระบบ อัตโนมัติ จะเห็นว่าอุปกรณ์ที่ติดตั้งไปมีไม่กี่ชิ้นแต่เมื่อรวมสายไฮดรอลิกส์เข้าไปแล้วดูไม่เป็นระเบียบเรียบร้อยมากนัก แต่ก็เพียงพอสำหรับการทดลองเก็บข้อมูลในเบื้องต้น



ภาพที่ 69 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วาล์วไฮดรอลิกส์

3.3.6 ศึกษากระบวนการควบคุมอัตโนมัติ

1) ชุดควบคุมและชุดประมวลผล

Arduno เป็นบอร์ดประมวลผลที่เหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้น เนื่องจากสามารถทำงานได้หลากหลาย และมีผู้ใช้เป็นจำนวนมากจึงมี ไลบรารีที่ทำการออกมาเยอะ และโค้ดและโปรแกรมก็มีแจกให้ศึกษาฟรี แต่ข้อเสียคือไม่สามารถทำงานได้หลากหลายอย่างเนื่องจากหน่วยความจำที่น้อย และความเร็วในการประมวลผลไม่มาก ผู้ใช้จึงนิยมนำมาใช้ในการควบคุมประมวลผลเฉพาะกับอุปกรณ์เท่านั้น



ภาพที่ 70 Arduino uno

ที่มา: arduinoprojects.in.th

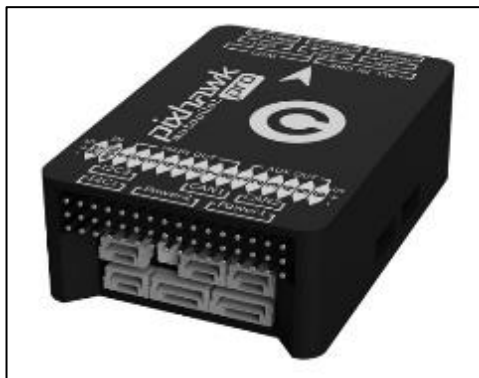
Rasoberry pi เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถลงระบบปฏิบัติการเข้าไป แล้วสามารถทำงานได้เหมือนคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้ทุกอย่างแต่อาจจะไม่เร็วมากนักเมื่อต้องทำงานพร้อมกันหลายๆ คำสั่ง ผู้ใช้ส่วนใหญ่จะนิยมนำมาใช้เฉพาะทาง ใช้งานในหัวข้อที่สนใจเท่านั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานดี และด้วยข้อดีคือมีขนาดเล็กจึงนิยมนำมาใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องประมวลผลและเคลื่อนที่ไปมาตลอด



ภาพที่ 71 Raspberry pi

ที่มา: element14.com

Pixhawk 3 pro autopilot ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Pixhawk 3 pro ดังภาพที่ ซึ่งภายในประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผล ARM cortex M4 ความเร็ว 180 MHZ 32-bit IMU ภายในประกอบไปด้วย gyro, accelerometer, magnetometer, barometer

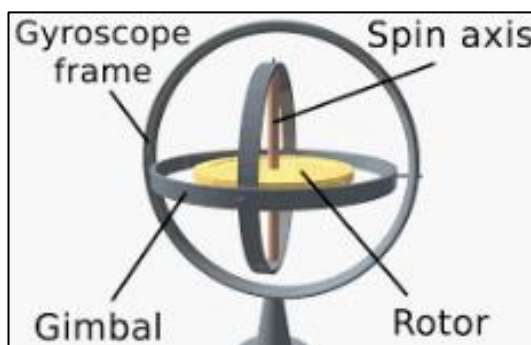


ภาพที่ 72 Pixhawk 3 Pro Autopilot

ที่มา: docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk3_pro.htm

3.3.7 Sensor

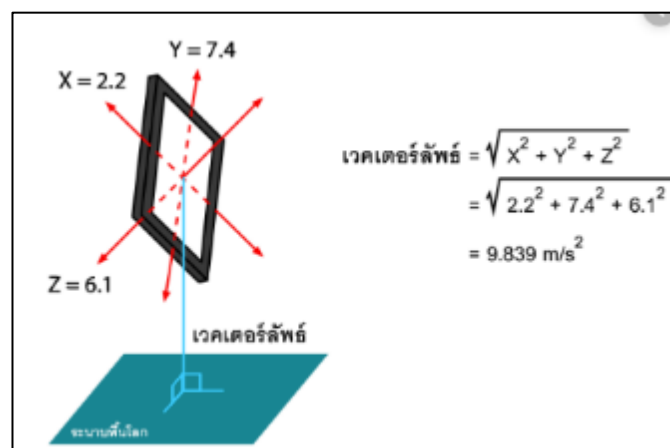
Gyroscope เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อหมุน เพื่อช่วยรักษาระดับทิศทางของแกนหมุน ทำให้เอียงในทิศทางต่างๆ ได้โดยอิสระ นั่นคือ หมุนในแกนใดๆ ก็ได้ โมเมนตัมเชิงมุมของล้อดังกล่าวทำให้มันคงรักษาดำแหน่งของมันไว้แม้กรอบล้อจะเอียง จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ต่างๆ มากมาย เช่น เข็มทิศ และนักบินอัตโนมัติของเครื่องบิน เรือ กลไกบังคับทางเสือของตอร์ปิโด อุปกรณ์ป้องกันการกลิ้งบนเรือใหญ่ และระบบนำร่องเฉื่อย (inertial guidance) รวมถึงระบบในยานอวกาศ และสถานีอวกาศ



ภาพที่ 73 Gyroscope

ที่มา: wikipedia.org

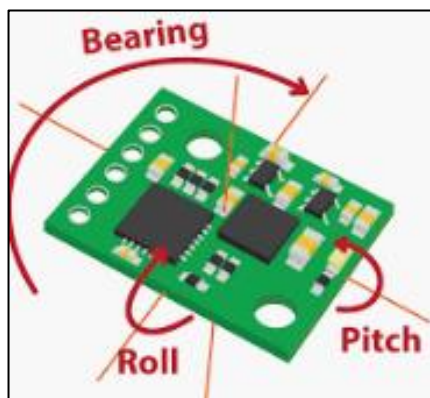
Accelerometer คือ เครื่องวัดความเร่ง ของการเคลื่อนที่ของวัตถุ พบได้ในสมาร์ทโฟนทั่วไป เช่น iPhone ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การเขย่าเพื่อเปลี่ยนเพลง หรือการเขย่าตัวเครื่องเพื่อใช้ในการควบคุม การเล่นเกม ทั้งหมดเป็นคุณสมบัติของ accelerometer ที่ติดมาในเครื่องแปลตรงตัวคือ Acceleration + Meter หรือมิเตอร์ความเร่ง จากนิยาม หมายถึง Sensor วัดความเร่งเพิ่มขึ้น หรือลดลง(ในหน่วย m/s^2) โครงสร้างของ accelerometer จะประกอบด้วยสปริงและลูกตุ้มน้ำหนักเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลูกตุ้มน้ำหนักจะถูกกดไปอีกฝั่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ สปริงก็ทำหน้าที่ดึงกลับเข้าที่อีกครั้งเมื่อหยุดการ เคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่คือความเร่งเท่ากับศูนย์ ค่าที่วัดได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนตัว เซ็นเซอร์ภายใน ที่จะใช้ในการตรวจวัดความเร่งของลูกตุ้มที่อยู่ในระบบนั้นมีหลายชนิด เช่น เพียโซอิเล็กทริก, สเตรนเกจ, ชนิดใช้แสงตรวจวัด, วัดแรงเฉือน เป็นต้น



ภาพที่ 74 Accelerometer

ที่มา: akexorcist.com

Magnetometer หรือMagnetic Field sensor หรือที่เรารู้จักกันดีในนามเข็มทิศ (compass) เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกทั้ง 3 แกน (x, y, z) มีหน่วยเป็น μT (ไมโครเทสลา) โดย Magnetic Field sensor จัดอยู่ในหมวดหมู่ของ Position Sensors เพราะว่า ส่วนใหญ่แล้วเราจะใช้เป็นเข็ม ทิศในการหาตำแหน่ง ทิศทาง ดังแสดงในภาพที่ 75



ภาพที่ 75 Magnetometer

ที่มา: doc.inex.co.th

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ชุดควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ แบบสำหรับภาพที่ใช้งานกับ ยานพาหนะได้หลายรูปแบบ เช่น โดรนในรูปแบบต่างๆ เครื่องบินแบบ fix wing และ โหมต Rover ใน โปรแกรม ซึ่งในปัจจุบันนี้ทั้งในและต่างประเทศก็มีการพยายามพัฒนาชุดควบคุมนี้ออกมาอยู่เรื่อยๆเนื่องจากมี เซนเซอร์ครบหรือ hardware เพียงพอสำหรับทำระบบนำทางแบบอัตโนมัติ ซึ่งแตกต่างจากในอดีตที่มีความ ยุ่งยาก สำหรับโปรแกรมที่ใช้สามารถใช้ได้ฟรีและสามารถแก้ไข firmware ภายในได้ตามต้องการเพื่อให้ เหมาะกับระบบนั้นๆ แต่สำหรับในงานวิจัยนี้จะเน้นเพียงแค่นำเอาระบบนี้มาประยุกต์ใช้เท่านั้นและแก้ไข พารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่โปรแกรมให้มาเท่านั้น ไม่ได้เข้าไป coding หรือแก้ไข firmware แต่อย่างใด เพราะ ผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเท่านั้น

3.3.8 ระบบ GPS

หลักการทำงานของ GPS คือ การคำนวณระยะทางระหว่างดาวเทียมกับอุปกรณ์รับ GPS โดย จะต้องทราบตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวง ประกอบกับได้ระยะทางจากดาวเทียม 3 ดวง ขึ้นไปแล้ว อุปกรณ์ GPS ก็จะสามารถคำนวณ หาจุดตัดกันของผิวทรงกลม ของระยะทางของดาวเทียม GPS แต่ละดวง ได้ ดังนั้น ในทางทฤษฎี สิ่งที่อยู่บน GPS จำเป็นต้องทราบในการคำนวณหาตำแหน่งแต่ละครั้ง คือ ตำแหน่ง ดาวเทียม GPS ในอวกาศ อย่างน้อย 3 ดวง และ ระยะห่างจาก ดาวเทียม GPS แต่ละดวง โดยการจะได้มาซึ่ง ข้อมูลทั้ง 2 แบบ ในทางปฏิบัติ คือ

1) การได้มา ซึ่งตำแหน่งดาวเทียม GPS ในอวกาศ จะต้องได้มีข้อมูลประกอบ 2 ตัว คือ

a.ข้อมูลวงโคจร จะทำให้อุปกรณ์ GPS ทราบว่า เส้นทางเดินทางของดาวเทียม GPS แต่ละ ดวงจะอยู่ ณ ตำแหน่งใด เมื่อไร

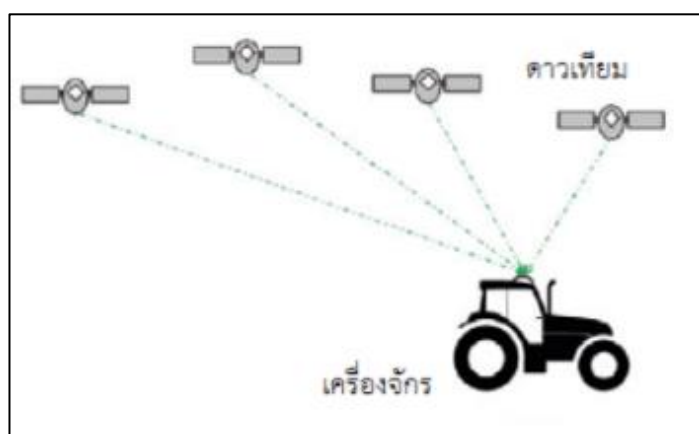
b.เวลาปัจจุบัน ซึ่งเมื่ออุปกรณ์ GPS ทราบ เวลาปัจจุบัน แล้ว ก็จะใช้เวลาปัจจุบัน ไปคำนวณหา ตำแหน่ง ของดาวเทียม GPS จากข้อมูลวงโคจรได้

ดังนั้น เมื่ออุปกรณ์รับ GPS ทราบ ข้อมูลวงโคจร ดาวเทียม GPS และเวลาปัจจุบัน อุปกรณ์รับ GPS ก็จะทราบตำแหน่ง ดาวเทียมในอวกาศได้ ซึ่งข้อมูลทั้งหมด จะได้มาจากสัญญาณดาวเทียมที่อุปกรณ์รับ GPS ตัวนั้นรับได้

2) การได้มา ซึ่งระยะห่างของอุปกรณ์รับ GPS กับ ดาวเทียม GPS แต่ละดวง เนื่องจาก การเดินทางของคลื่นสัญญาณ GPS นั้น จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่(v คงที่) คือ ความเร็วแสง (186,000ไมล์ต่อวินาที) ซึ่งเมื่อเป็นดังนั้น ถ้าอุปกรณ์รับ GPS รู้ระยะเวลา(t) ที่สัญญาณใช้ในการเดินทางจาก ดาวเทียม GPS มายังอุปกรณ์รับ GPS ก็จะสามารถคำนวณระยะทางระหว่าง ดาวเทียม GPS กับ อุปกรณ์รับ GPS ได้ จากสูตร

$$\text{ความเร็ว} \times \text{เวลา} = \text{ระยะทาง}$$

โดยปกติการ ทำงานของ GPS จะใช้การระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์ได้ตามภาพที่ ซึ่ง เนื่องจากระยะการส่งสัญญาณมาหารถแทรกเตอร์มีระยะทางที่ไกลมากดังนั้นโอกาสที่ตำแหน่งจะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงก็เกิดขึ้นได้ง่าย ซึ่งยังไม่รวม ปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เช่น สภาพอากาศ หรือสิ่งกีดขวางต่างๆ เป็นต้น

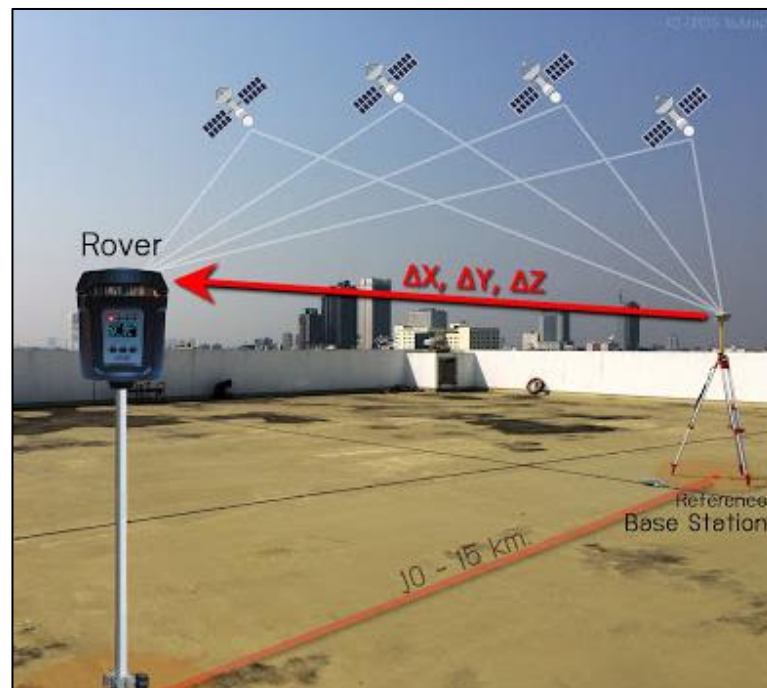


ภาพที่ 76 การทำงาน GPS

ที่มา: kubotasolutions.com

ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการระบุตำแหน่งจึงมีการคิดระบบ RTK-Real Time Kinematic ซึ่งเป็นสถานีภาคพื้นดินที่ทำหน้าที่รับสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ได้ค่าพิกัดการวัดทันที ณ เวลาทำการรังวัดซึ่งมีตำแหน่งคงที่ โดยมีเครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งจะถูกวางไว้ในตำแหน่งที่รู้ค่าแน่นอนตลอดเวลาเป็นสถานีหลัก (Base station) ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองคือสถานีเคลื่อนที่ (Rover station) จะนำไปวางไว้บนตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด เช่น วางที่รถแทรกเตอร์หรือเครื่องจักร โดยใช้พิกัดอ้างอิงจากดาวเทียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการและการวางแผน การทำแผนที่และออกแบบแปลง การเก็บตัวอย่างดินและทำแผนที่ การควบคุมเครื่องจักรและตรวจสอบคุณภาพ

การทำงาน การปรับอัตราปุ๋ยให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ การให้น้ำตามความชื้นของดินและความต้องการของพืช และทำแผนที่ผลผลิต เป็นต้น ซึ่งระดับความแม่นยำของการระบุตำแหน่งด้วยสัญญาณดาวเทียมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาพอากาศ ความคลาดเคลื่อนนาฬิกา คุณภาพของเครื่องรับสัญญาณ ตัวอย่างเช่น ตำแหน่งโทรศัพท์มือถืออาจคลาดเคลื่อนในรัศมี 5 เมตร ถ้าใช้งานในสภาพอากาศเปิดไม่มีสิ่งกีดขวาง แต่หากใช้ในบริเวณอาคารอาจทำให้ระดับความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น เป็นต้น



ภาพที่ 77 การทำงานระบบ RTK GPS

ที่มา: salesmanual.deere.com

เมื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระบบ RTK-Real Time Kinematic กับระบบอื่นจะเห็นได้ว่าระบบนี้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดแต่ต้นทุนก็สูงตามไปด้วย ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระบบ GPS

ระบบ	ความคลาดเคลื่อน	ค่าใช้จ่ายการใช้สัญญาณ
สัญญาณย่านความถี่เดียว(L1)	25 ซม.	ฟรี
สัญญาณย่านความถี่เดียว(L1,L2)	18 ซม.	ฟรี
สัญญาณที่มีการปรับค่า Correction Signal	4 ซม.	เสียค่าใช้จ่าย
สถานีภาคพื้น Real time kinematic	2 ซม.	ลงทุนค่าสถานีหรือเสียค่าใช้จ่าย

ที่มา: kubotasolutions.com

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบนำทางด้วยGPS แบบ RTK (Real time kinematics)ซึ่งประกอบไปด้วย สองส่วนหลักๆ คือ Base RTKซึ่งอุปกรณ์ในส่วนนี้เป็นส่วนที่ตั้งอยู่กับที่และส่วนที่ติดอยู่กับรถแทรกเตอร์ หรือที่เรียกว่า RTK Rover

3.3.9 ติดตั้งระบบการควบคุมอัตโนมัติลงบนรถแทรกเตอร์

ในการทดลองนี้ประกอบด้วยหลายส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของชุดควบคุม ซึ่งติดตั้งไว้อยู่บนหลังคาของตัวรถและพยายามติดตั้งในจุดกึ่งกลางของตัวรถให้ได้มากที่สุดซึ่งในที่นี้เราไม่ทราบจุด CG ของรถ และเพื่อให้ ระบบ GPS ทำงานได้ดี รวมถึงอุปกรณ์ส่งสัญญาณอื่น ๆ ด้วยดัง ภาพที่ 78



ภาพที่ 78 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมที่ตัวรถ

ในภาพที่ 78 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังนี้ คือ GPS สำหรับรับตำแหน่งรถ Telemetry สำหรับเชื่อมต่อไร้สายกับคอมพิวเตอร์และส่งข้อมูลการอัปเดตต่างๆ และReceiver สำหรับเชื่อมต่อกับวิทยุบังคับ

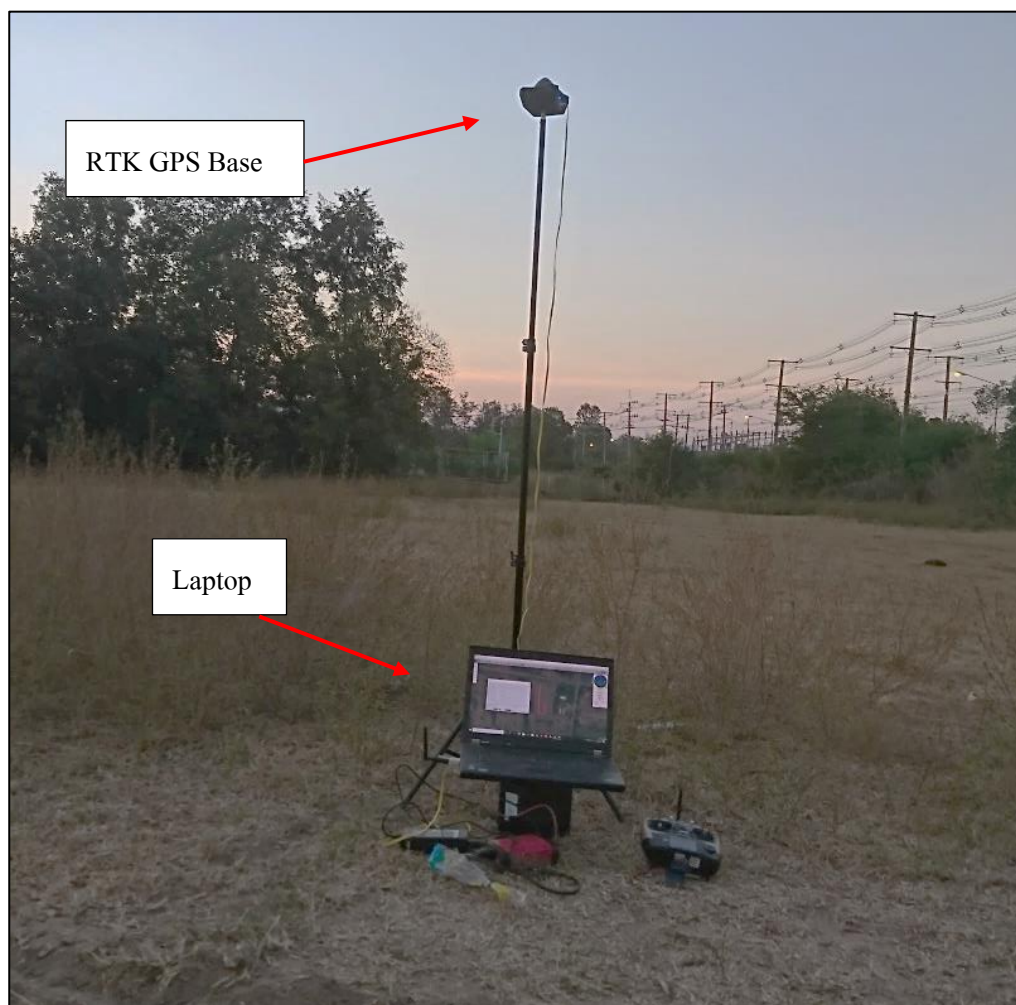
ภายในกล่องควบคุมประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ คือ ชุดควบคุมเส้นทางหรือแบตเตอรี่ อุปกรณ์ลดไฟกระชากตรง บอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino uno และ โมดูลแปลงสัญญาณ pulse เป็นสัญญาณ Analog ดังภาพที่ 79



ภาพที่ 79 ชุดควบคุมเส้นทางของรถแทรกเตอร์

จากภาพที่ 79 การติดตั้งบอร์ดควบคุมเส้นทางจะต้องติดตั้งให้ถูกต้องดังแสดงในภาพรวมถึง GPS ด้วย และต้องมีการ calibrate ก่อนการติดตั้งเสมอ

จากภาพที่ 80 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมโปรแกรม ประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สาย (Telemetry) RTK GPS Base แบตเตอรี่ และอุปกรณ์แปลงไฟ DC 12 v เป็น AC220 V สำหรับคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 80 แสดงอุปกรณ์ในการควบคุมโปรแกรมควบคุมเส้นทางรถแทรกเตอร์

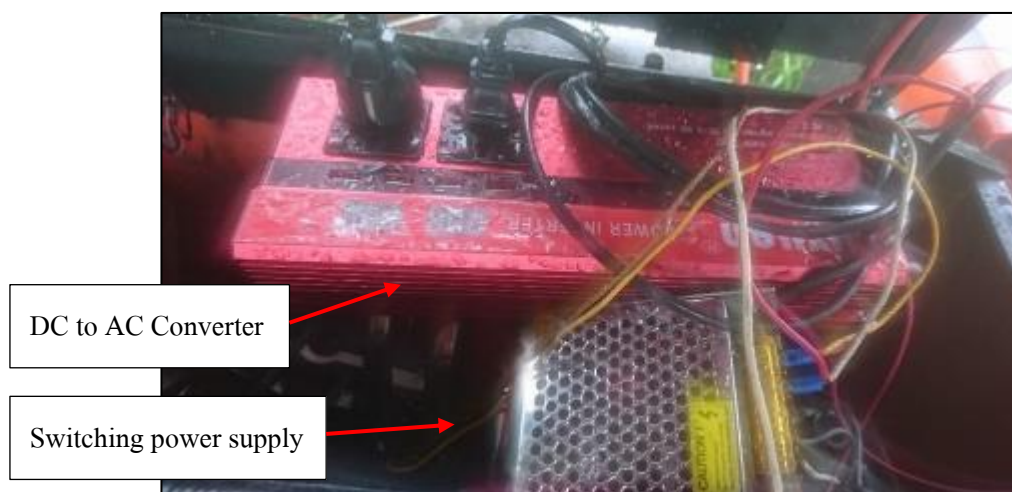
จากภาพที่ 80 คอมพิวเตอร์ ใช้สำหรับออกแบบควบคุมเส้นทางผ่านทาง โปรแกรม Qground control สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่โปรแกรมมีมาให้ได้ ในการทดลองนี้ มีการปรับ พารามิเตอร์ เพียงแค่บางตัว เช่น PID controller เป็นต้น นอกจากนี้ยังมี RTK GPS base ซึ่งใช้ร่วมกับ RTK Rover ที่ติดตั้งอยู่บนรถซึ่ง RTK GPS base นี้ต้องตั้งอยู่กับที่พร้อมกับเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และโปรแกรม Qground control อยู่ตลอดเวลา เนื่องจากมันจะคำนวณความแม่นยำตลอดเวลา ซึ่งถ้ามีการปิดเครื่องหรือปิด โปรแกรมมันจะคำนวณใหม่ทันที จากการทดลองถ้าต้องการความแม่นยำที่ ± 50 เซนติเมตร จะใช้เวลา ประมาณ 3-4 ชั่วโมง ในสภาพอากาศฟ้าเปิด อีกอุปกรณ์ที่จำเป็นไม่แพ้กันเลย คือ ชุดพลังงานให้กับ คอมพิวเตอร์

ภาพที่ 81 คือชุดควบคุมการทำงานของวาล์วไฮดรอลิกส์ ซึ่งประกอบด้วย ชุดขับเคลื่อนวาล์ว (Valve Driver) การ์ด NI USB 6003 และคอมพิวเตอร์ สำหรับรันโปรแกรมแมทแลป Simulink



ภาพที่ 81 ชุดควบคุมวาล์วไฮดรอลิกส์หรือควบคุมล้อ

จากภาพ 81 ในการทดลองจำเป็นจะต้องใช้คอมพิวเตอร์สองเครื่อง โดยเครื่องที่อยู่บนรถแทรกเตอร์มีหน้าที่ในการเก็บข้อมูลและควบคุมการทำงานของวาล์วไฮดรอลิกส์ ผ่านทาง การ์ด NI USB 6003 ซึ่งอุปกรณ์นี้จะรับข้อมูล Analog สองช่องในการควบคุมคือ สัญญาณที่มาจาก ชุดควบคุมเส้นทาง 1 ช่อง และสัญญาณที่มาจาก อุปกรณ์วัดมุมล้อ (LVDT) เพื่อมาคำนวณและส่งออกเป็นสัญญาณ Analog 2 ช่อง จากนั้นส่งไปขับวาล์วด้านซ้ายและขวาอีกที นอกจากนี้ยังสามารถรับสัญญาณ Digital ได้ด้วย จากนั้นตัวขับวาล์วจะรับสัญญาณต่อและส่งต่อไปขับวาล์วอีกทอดหนึ่ง



ภาพที่ 82 อุปกรณ์จ่ายไฟ

จากภาพที่ 82 ประกอบ Inverter มีหน้าที่ แปลงไฟ DC 12 V ให้เป็น ไฟ AC 220 V เพื่อจ่ายให้คอมพิวเตอร์และ จ่ายไปให้ Switching power supply เพื่อให้แปลงเป็นไฟ DC 24 V สำหรับใช้ขับวาล์วอีกที

3.4. พัฒนาโปรแกรมประมวลผล

3.4.1 ศึกษา PID Controller

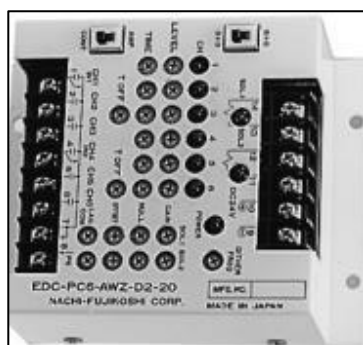
ตัวควบคุมแบบ PID controller เป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่นิยมใช้ในมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่เข้าใจได้ง่ายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลายงาน ในการควบคุมแบบ PID จะประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์การควบคุมคือ ตัวควบคุมแบบ Proportional ตัวควบคุมแบบ Integral และ ตัวควบคุมแบบ Derivative ดังสมการที่ 3.45 โดยมีหลักการคือ นำเอาค่า $e(t)$ หรือค่าความผิดพลาดของระบบระหว่างสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการกับสัญญาณ Feedback ที่วัดได้ เข้ามายังกระบวนการ PID controller

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.45)$$

เมื่อ $u(t)$	=	ค่าสัญญาณเอาต์พุต
$e(t)$	=	ค่าความผิดพลาดในขณะนั้น
K_p	=	อัตราขยายสัดส่วน
K_i	=	อัตราขยายปริพันธ์
K_d	=	อัตราขยายอนุพันธ์

3.4.2 การเชื่อมต่อระบบอัตโนมัติเข้ากับชุดควบคุมไฮดรอลิกส์

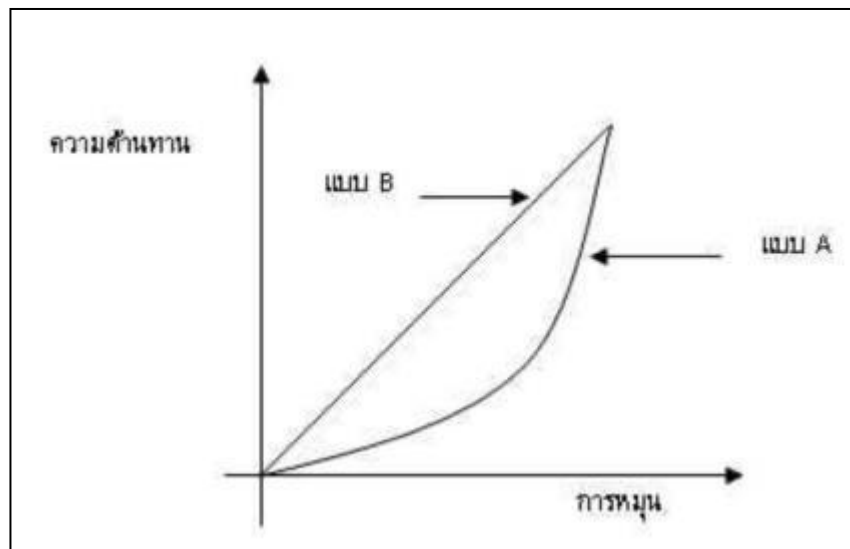
การควบคุมวาล์วแบบสัดส่วนหรือ Electro hydraulic proportional direction valve นั้นมีความต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงในการควบคุมตำแหน่งแต่สัญญาณ Input ที่มาจากแหล่งต่างๆที่ใช้ควบคุมนั้นมีสัญญาณ Input ที่ต่ำดังนั้นจึงต้องเพิ่มสัญญาณโดยให้ผ่านไปยัง Amplifier หรือ valve driver ก่อน ซึ่งจะทำให้โวลต์และค่ากระแสเพิ่มขึ้น ก่อนที่จะไปขับวาล์ว



ภาพที่ 83 ชุดขับวาล์วไฮดรอลิกส์แบบสัดส่วน

ที่มา: pt.aliexpress.com

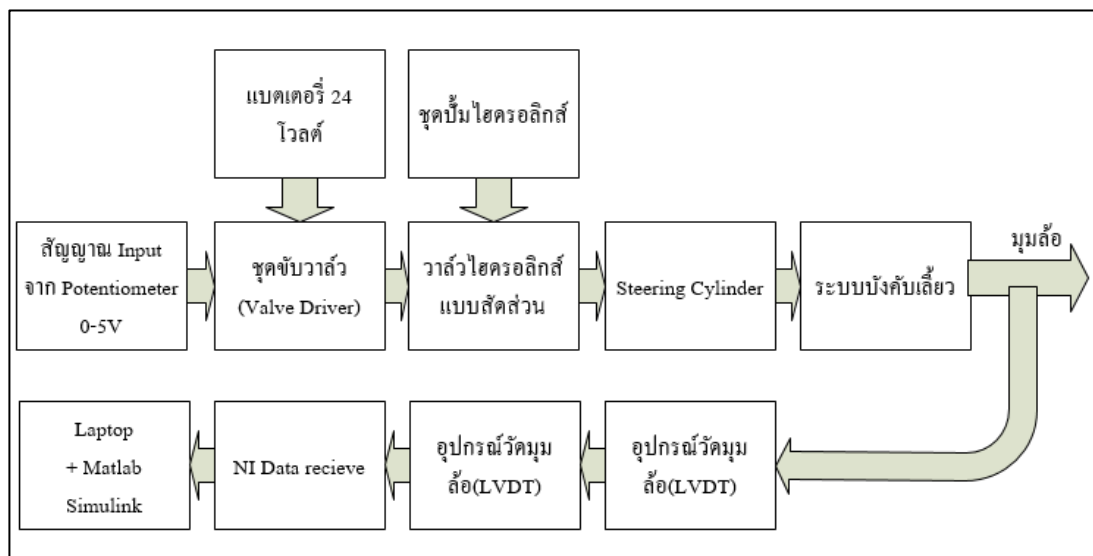
ตามข้อมูลเชิงเทคนิคของของ Valve driver รับ อินพุต จากสัญญาณควบคุมจากภายนอก 0-5 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ในการสร้างสัญญาณนี้ ซึ่งในการทดสอบเก็บข้อมูลเบื้องต้นจึงเลือกใช้ Potentiometer เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย และชนิดของ Potentiometer นั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกันและแต่ละชนิดก็ให้สัญญาณออกมาแตกต่างกัน เป็นชนิด A จะให้สัญญาณแบบ Logarithm ชนิด B ให้สัญญาณเป็น Linear



ภาพที่ 84 ชนิดของ Potentiometer

ที่มา: rmutphysics.com

แต่ในการควบคุมตำแหน่งของล้อด้วยวาล์วจริง ๆ นั้นจะต้องรู้ตำแหน่งของล้อที่เคลื่อนที่ในเวลาจริงด้วยดังนั้นทางผู้วิจัยจึงติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของล้อเข้าไป ดังภาพที่ 85 อุปกรณ์วัดมุมล้อที่ติดตั้งเข้าไปนั้นเป็นแบบตัวต้านทานแบบเชิงเส้นความยาว 250 mm. จากนั้นเมื่อทราบตำแหน่งของล้อมาสเกลค่าใหม่เพื่อต้องการให้เข้าใจมุมล้อที่แท้จริงได้



ภาพที่ 85 ไดอะแกรมการเก็บค่าตำแหน่งของล้อ

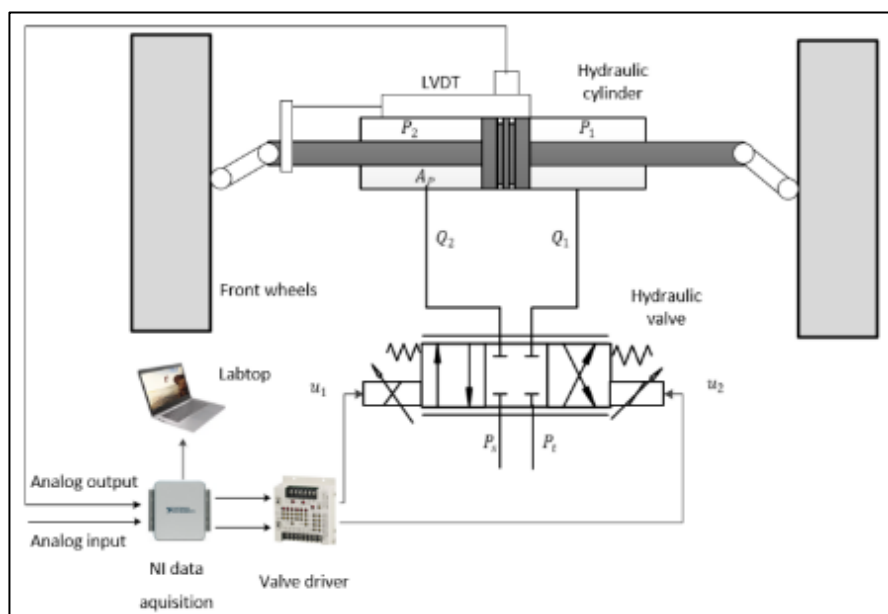


ภาพที่ 86 อุปกรณ์วัดตำแหน่งล้อ (LVDT)

ที่มา: thesensorconnection.com

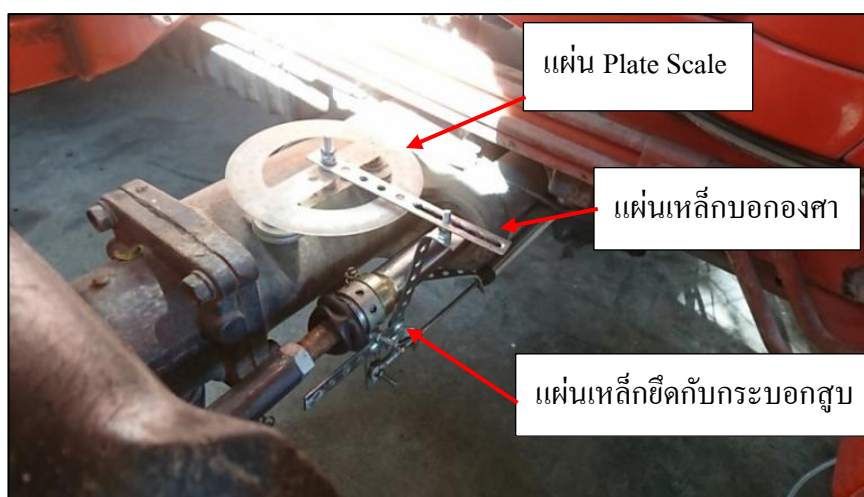
1) การสเกลค่า

การเก็บข้อมูลการเลี้ยว ซึ่งประกอบด้วยช่อง Analog คือ Input ซึ่งในที่นี้ คือ Potentiometer แบบ joy stick ส่งค่า Analog 0-5 V และ Output ที่ได้คือ องศาของมุมล้อที่ได้จาก LVDT ข้อมูลทั้งหมดจะถูกเก็บผ่าน NI data acquisition ด้วยโปรแกรม Simulink



ภาพที่ 87 ไดอะแกรมการเลี้ยง และการเก็บข้อมูล

เนื่องจากค่าที่ได้จาก LVDT หรือจาก Potentiometer จะออกมาในรูปแบบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้ทราบค่าของมุมเลี้ยวที่แท้จริงจึงต้องมีการทดลองเพื่อเก็บค่านามาใส่เกลใหม่จาก Output เดิมที่ให้อยู่รูปแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในรูปขององศาการเลี้ยวของล้อ จากภาพที่ 88 ได้แสดงการติดตั้ง Plate Scale ด้านบนเพลาน้ำของล้อสำหรับอ่านค่ามุมของล้อเพื่อเก็บข้อมูลโดยที่จะมีเหล็กยึดกับกระบอกลูกสูบและเชื่อมต่อไปยังเหล็กด้านบนที่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นองศาตามการเคลื่อนที่ของกระบอกลูกสูบ



ภาพที่ 88 แสดงการติดตั้ง Plate scale เพื่ออ่านค่ามุมล้อ

จากภาพที่ 88 แสดงถึงการยึด LVDT เพื่อวัดมุมล้อซึ่งจุดยึดด้านหนึ่งจะต้องยึดไว้อยู่กับที่และอีกด้านหนึ่งเป็นจุดยึดเพื่อให้คันชักเคลื่อนที่ได้ตามกระบอกลูกสูบการติดตั้ง LVDT นั้นต้องคำนึงถึงระยะลิมิตของคันชักด้วยเพราะถ้าไม่คำนึงถึงจุดนี้อาจจะทำให้ LVDT เสียหายหากเคลื่อนที่เกินลิมิตที่ทำได้



ภาพที่ 89 แสดงการติดตั้ง LVDT

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จาก LVDT จะให้ Output ออกมาในลักษณะ Analog voltage 0-5 V และค่าที่เก็บได้จาก Plate Scale อยู่ในรูปขององศา แต่เราต้องการค่าที่อ่านได้จาก LVDT ให้ออกมาเป็นองศาเลยเนื่องจากสามารถนำค่านี้ไปวิเคราะห์ต่อในโปรแกรมและเราไม่สามารถอ่านค่าที่ Plate Scale ตลอดเวลาได้ดังนั้นต้องแปลงค่าดังกล่าวออกมาให้เป็นองศาโดยใช้สมการเส้นตรงตามสมการที่ 3.46

$$y = m x + c \quad (3.46)$$

โดยที่

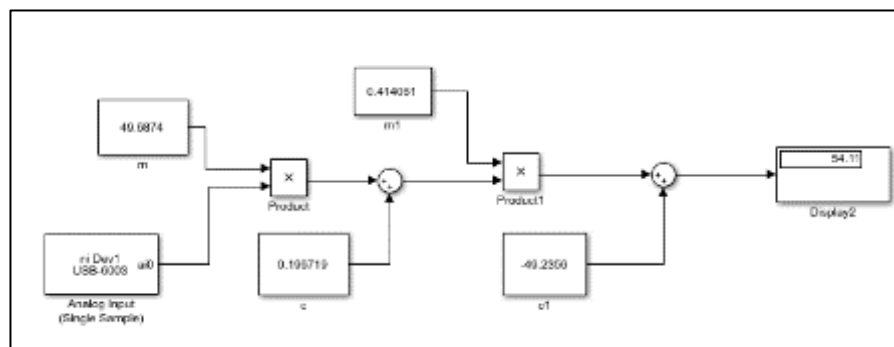
y = คือตัวแปรตาม (องศาของมุมล้อ)

m = ค่าความชันของกราฟ

x = คือตัวแปรต้น (ระยะการเคลื่อนที่ของ LVDT)

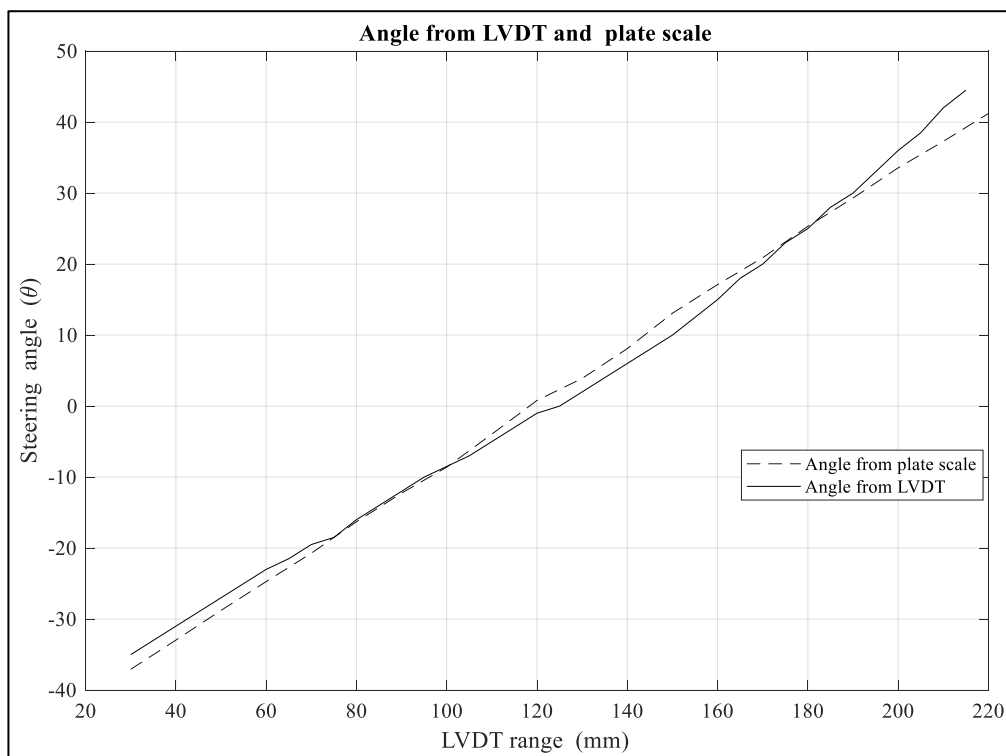
c = คือค่าคงที่

เมื่อได้ข้อมูลความสัมพันธ์ของค่าที่เก็บได้แล้วเมื่อทำการป้อนค่า Input ในรูปแบบ 0-5 V ลงในสมการเส้นตรงโดยจำลองสมการผ่านโปรแกรม Matlab Simulink จะได้ค่าองศาของล้อจากภาพที่ 90



ภาพที่ 90 แสดงสมการในโปรแกรม Simulink ที่ใช้ในการแปลงค่า จาก LVDT เป็นองศาล้อ
ที่มา: wikipedia.org

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างค่าที่เก็บได้จาก Plate Scale กับค่าที่อ่านได้จากกา
จำลองผ่านโปรแกรม Matlab Simulink จากภาพอธิบายได้ว่ามุมมองของล้อที่ทำได้ประมาณ ± 35 องศา
ซึ่งค่าทางด้านลบเป็นการเลี้ยวทางด้านซ้ายและค่าบวกเป็นการเลี้ยวไปทางด้านขวา ส่วนตำแหน่งตรงกลางคือ
0 องศา เมื่อพิจารณากราฟในแกนของค่าของ LVDT มีค่าเป็นมิลลิเมตร เนื่องจากได้ทำการสเกลค่า 0-5V ให้
เป็นระยะการเคลื่อนที่เป็นมิลลิเมตรโดยใช้หลักการและวิธีเดียวกันกับหลักการข้างต้นและสมการ 3.46



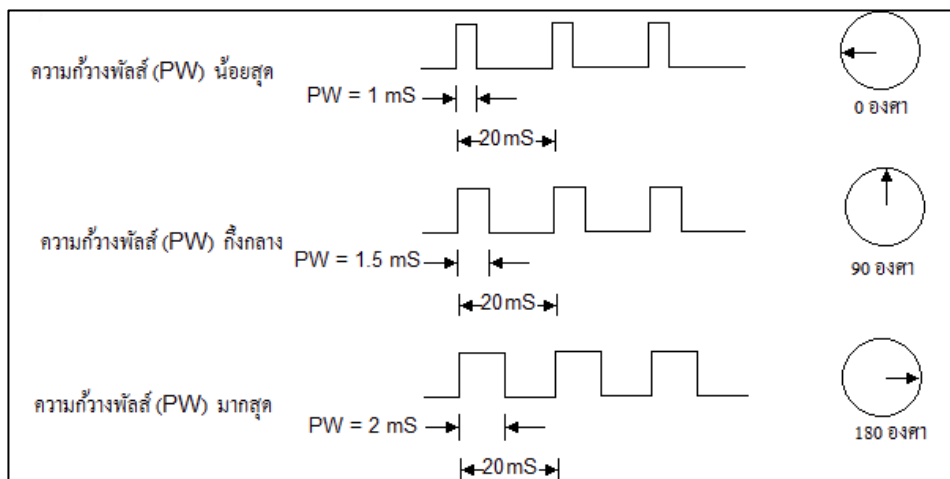
ภาพที่ 91 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Plate Scale กับ โปรแกรม Matlab Simulink

เนื่องจากในการทดลองในงานวิจัยนี้เลือกใช้บอร์ด คอนโทรลเลอร์สำหรับรถบังคับที่มีขนาดเล็ก ดังภาพที่ 92 ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงนำชุดทดสอบนี้ไปทดสอบในเบื้องต้นแล้วว่ารถโมเดลที่ใช้ชิ้นมีการวิ่งตามเส้นทางที่กำหนดและวิ่งเป็นเส้นตรงในระดับที่น่าพอใจ การควบคุมให้รถวิ่งตามเส้นทางที่กำหนดนั้นประกอบไปด้วยสองส่วนคือส่วนแรกควบคุมการเลี้ยวของล้อ และส่วนที่สองนั้น ควบคุมความเร็วในการวิ่งด้วย



ภาพที่ 92 โมเดลรถขนาดเล็ก

หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการนำเอาหลักการควบคุมนี้มาปรับใช้กับรถแทรกเตอร์ในงานวิจัยซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เฉพาะการควบคุมการเลี้ยวเท่านั้น เนื่องจากการควบคุมความเร็วของรถแทรกเตอร์นั้นจะต้องออกแบบระบบเพิ่มเติมขึ้นมาอีก ดังนั้นผู้วิจัยจึงให้ความสนใจในส่วนของการเลี้ยวก่อน ในส่วนของการควบคุมการเลี้ยวของรถโมเดลขนาดเล็กนั้นมีการใช้การควบคุมผ่านทาง Servomotor ดังภาพที่ 92 ด้วยการรับคำสั่ง Pulse ผ่านทางคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมตำแหน่งตามต้องการ สัญญาณ Pulse ที่ส่งมาจากคอนโทรลเลอร์นั้นจะมีลักษณะดังภาพที่ 93 ซึ่งมีความกว้างของคาบเวลาอยู่ที่ 20 ms และความกว้างของ สัญญาณ Pulse เมื่อ Servomotor อยู่ที่ตำแหน่ง 0 องศา จะมีความกว้างของสัญญาณ Pulse ที่ 1 ms ที่ตำแหน่ง 90 องศา จะมีความกว้างของสัญญาณ Pulse ที่ 15 ms ที่ตำแหน่ง 180 องศา จะมีความกว้างของสัญญาณ Pulse ที่ 2 ms ตามลำดับ

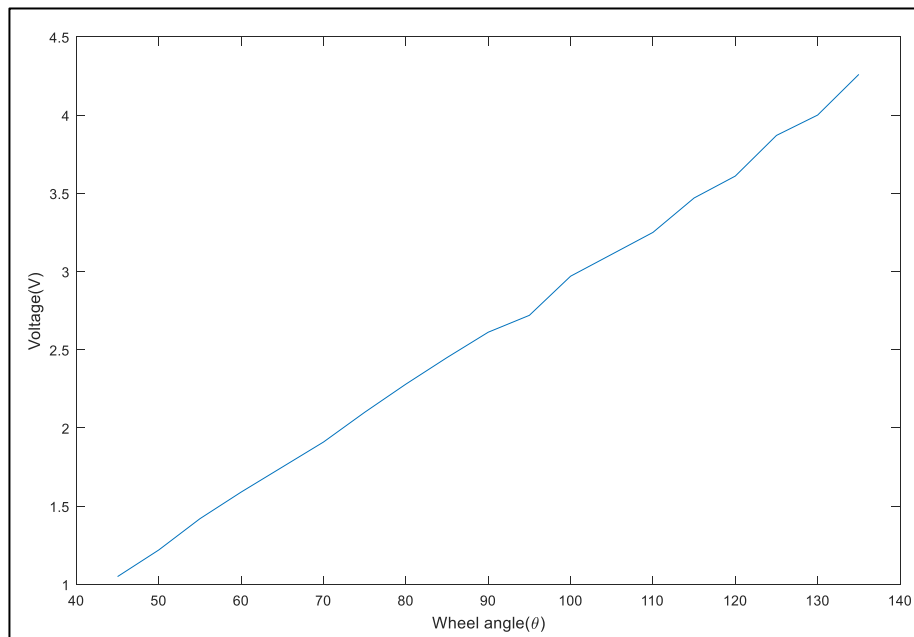


ภาพที่ 93 สัญญาณคำสั่งของเซอร์โวมอเตอร์

ที่มา: sites.google.com

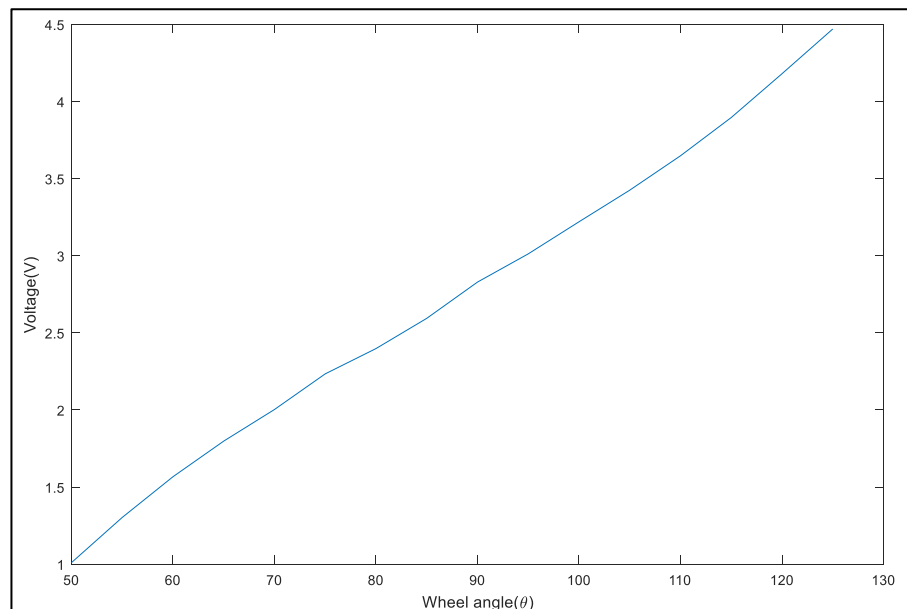
แต่เนื่องด้วยในการควบคุมตำแหน่งของล้อนั้นจะต้องมีการนำาสัญญาณมาเปรียบเทียบกับเพื่อหาความคลาดเคลื่อนก่อนจึงจะสามารถควบคุมตำแหน่งของล้อได้แต่สัญญาณที่ได้จากชุดอุปกรณ์และโปรแกรมในการควบคุมการเลี้ยว นั้นเป็นสัญญาณแบบ Pulse และสัญญาณที่ได้จาก LVDT เป็นแบบ Analog ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงสัญญาณแบบอ้างอิงที่มาจากชุดคอลโทรลเลอร์ที่มาในรูปแบบของสัญญาณ Pulse ให้เป็นสัญญาณ Analog ก่อน

หลังจากได้สัญญาณ อ้างอิงจากอิงในรูปแบบ Analog แล้วจึงทำการเก็บค่าเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับองศาของ Servomotor จากภาพที่ 93 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ออกมาในรูปแบบของเชิงเส้น



ภาพที่ 94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณอ้างอิง กับ องศาจาก Servomotor

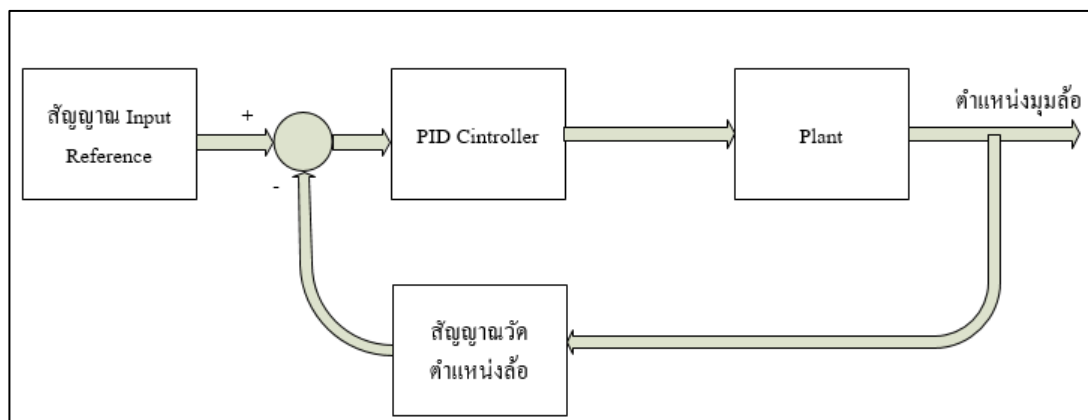
หลังจากได้สัญญาณอ้างอิงจากอิงในรูปแบบ Analog แล้วจึงทำการเก็บค่าเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับองศาของจาก Plate scale ที่ติดตั้งเพื่อวัดมุมล้อในรถแทรกเตอร์จากภาพที่ 94 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ออกมาในรูปแบบของเชิงเส้น



ภาพที่ 95 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณอ้างอิง กับ องศาจาก Plate scale

2) การควบคุมตำแหน่งของล้อ

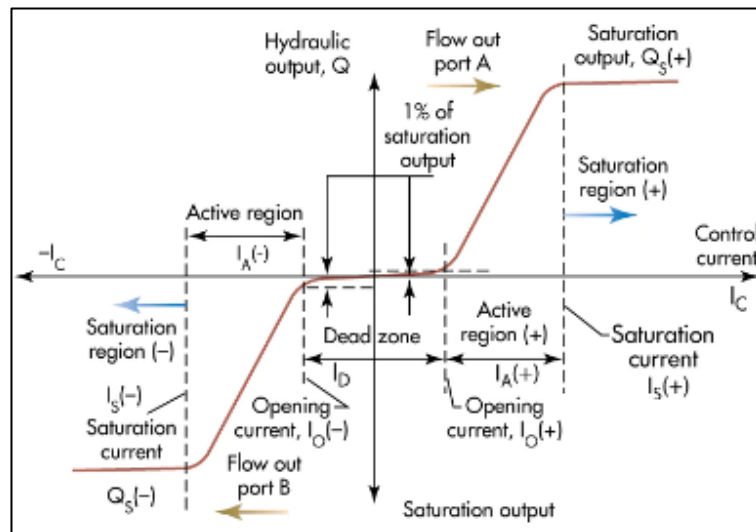
หลังจากที่ได้ข้อมูลทั้งหมดเป็นชนิดเดียวกันแล้วจึงมาทำการออกแบบการควบคุมมุล้อดังไดอะแกรมในภาพที่ 96 ประกอบด้วยสัญญาณ Reference หรือสัญญาณอ้างอิง ที่ได้จากชุดคอนโทรลเลอร์ สำหรับควบคุมตำแหน่งตามต้องการจากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่วัดได้จากตำแหน่งของล้อ เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนแล้วจึงส่งค่าไปยังระบบควบคุมตำแหน่งของล้ออีกทอดหนึ่งซึ่งสมการควบคุมนี้เลือกใช้ คือ PID Controller และส่งค่าไปควบคุมระบบบังคับเลี้ยวหรือ Plant ต่อไป



ภาพที่ 96 ไดอะแกรมหลักการควบคุมตำแหน่งล้อ

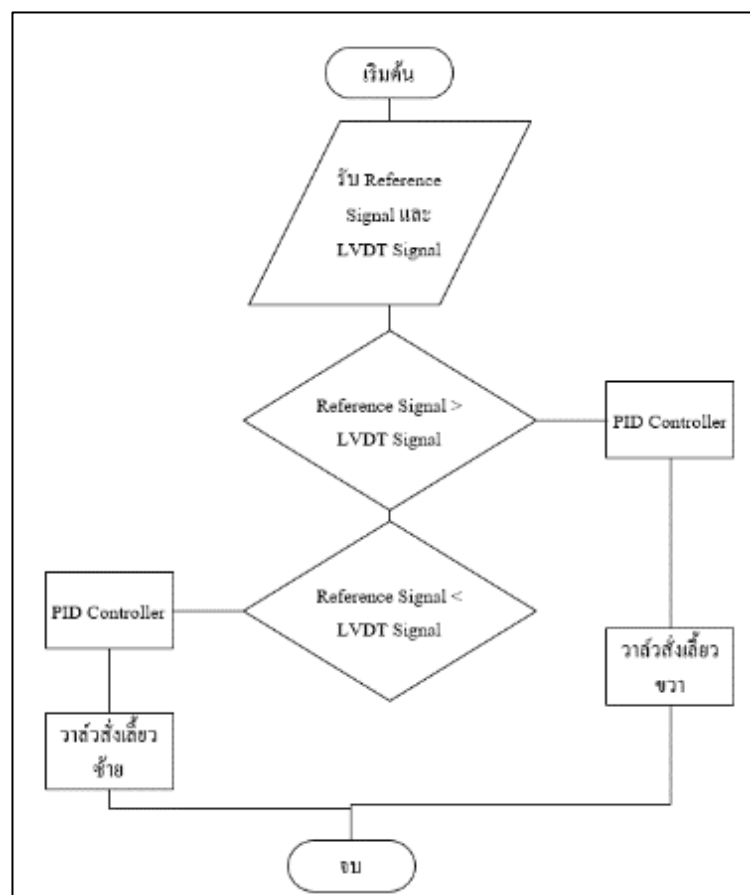
แต่เนื่องด้วยวาล์วที่ใช้เป็นแบบสั่งงานการเลี้ยวที่ละด้านซึ่งหมายถึงถ้าหากจะเลี้ยวทางด้านขวาจะต้องสั่งงานวาล์วทางด้านขวาแต่ถ้าจะเลี้ยวทางด้านซ้ายก็ต้องสั่งงานวาล์วทางด้านซ้ายและทั้งสองจะต้องไม่สั่งการทำงานพร้อมกันดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบการควบคุมการเลี้ยวขึ้นมาใหม่โดยยังคงอยู่บนพื้นฐานของการควบคุมแบบ PID Controller ดังแสดงในไดอะแกรมในภาพที่ 96

ในการควบคุมวาล์วที่แบบสองด้านแบบนี้สิ่งที่ต้องการมากที่สุดคือเมื่อต้องการการเปลี่ยนทิศทางการเลี้ยวอย่างเฉียบพลันวาล์วก็ต้องเปลี่ยนทิศทางให้เร็วที่สุดเช่นกัน แต่ในทางปฏิบัติอาจต้องคำนึงถึงลิมิตการทำงานของวาล์วด้วยเช่นค่า Saturation, Dead zone เป็นต้น ดังภาพที่ 97



ภาพที่ 97 กราฟ Saturation และ Dead zone

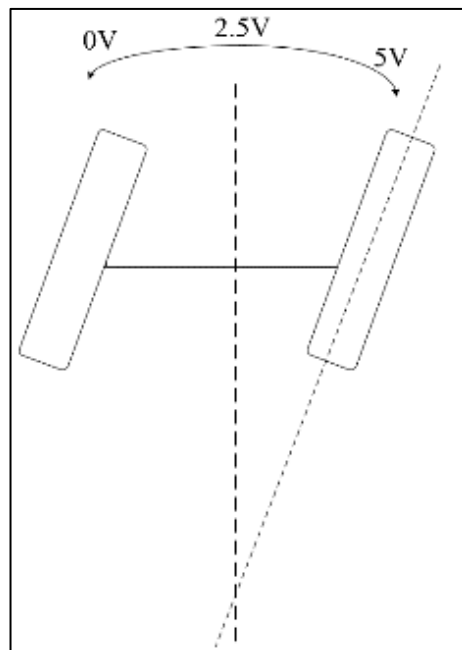
ที่มา: hydraulicspneumatics.com



ภาพที่ 98 Flow chart การควบคุมตำแหน่งลิ้นชัก

จากภาพที่ 98 คือไดอะแกรมการควบคุมตำแหน่งของการลิ้นชักโดยเริ่มแรก กำหนดให้ มุมลิ้นชักที่ตำแหน่งซ้ายสุดประมาณ 0V ตำแหน่งกลาง 2.5V และตำแหน่งขวาสุดที่ 5V ซึ่งค่าทั้งหมดนี้เป็นค่าในอุดมคติ

ในการทดลองจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนและปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสมในการทดลอง จากนั้นเมื่อรับค่ามาแล้วก็จะเปรียบเทียบค่าถ้าหากว่าค่า Referene Signal มีค่ามากกว่า LVDT Signal ก็จะส่งคำสั่งให้มีการควบคุมการเลี้ยวไปด้านขวาแต่ถ้าค่า Referene Signal มีค่าน้อยกว่า LVDT Signal จะส่งคำสั่งให้มีการควบคุมการเลี้ยวไปด้านซ้าย ซึ่งหลักการจะทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งของล้อได้ตามต้องการได้ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการที่จะควบคุมการเลี้ยวได้ราบเรียบหรือผลตอบสนองดีแค่ไหนขึ้นอยู่กับ การปรับค่า PID Controller ที่เหมาะสม



ภาพที่ 99 ตำแหน่งของล้อ

3.5 ทำการทดสอบชุดเซนเซอร์และกลไกสับสนุนในห้องปฏิบัติการ

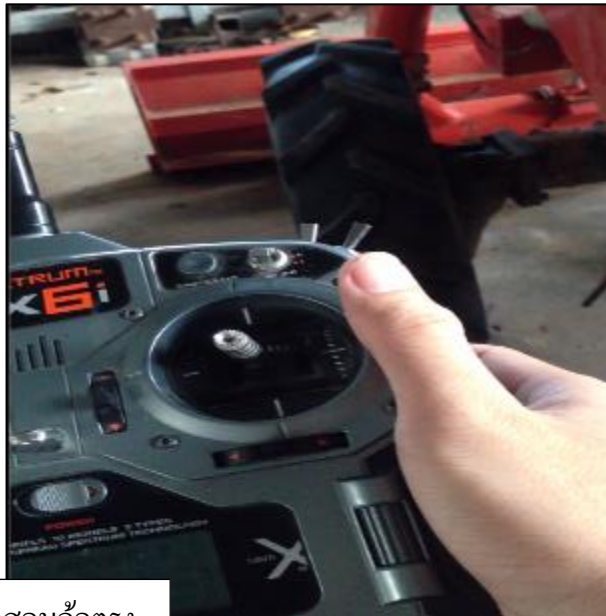
3.5.1 ทดสอบควบคุมเบื้องต้น

เพื่อเป็นการให้แน่ใจว่าระบบการควบคุมที่ได้ออกแบบไปนั้นสามารถใช้ได้ดีเพียงใดทางผู้วิจัยจึงได้ทดสอบการควบคุมตำแหน่งของล้อในเบื้องต้นพร้อมทั้งปรับจูนคอนโทรลเลอร์ให้เหมาะสมกับการเลี้ยวด้วยการ ทดสอบนำชุดควบคุมมาใช้โดยสั่งผ่านโหมด Manual ในโปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ 100 และภาพที่ 101 เพื่อแสดงถึงการทดสอบการเลี้ยวของล้อด้วยการควบคุมผ่านทางวิทยุบังคับบนพื้นปูนและพื้นหญ้าและลองทดสอบการเลี้ยวในมุมต่างๆและปรับมุมการเลี้ยวที่เหมาะสม จากภาพที่ 100 ได้ทดลองควบคุมการเลี้ยวในรูปแบบต่างๆบนพื้นปูนผ่านวิทยุบังคับ ซึ่งผลที่ได้อยู่ในระดับที่น่าพอใจสามารถควบคุมได้ดี



ภาพที่ 100 ทดสอบการควบคุมการเลี้ยวผ่านวิทยุบังคับ

แต่เมื่อไม่มีการโยกรีโมทแล้วล้อจะต้องตั้งตรงได้ ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้จะต้องใช้การปรับสัญญาณ ช่วยเพื่อให้ตรง



ทดสอบล้อตรง

ภาพที่ 101 ทดสอบหาตำแหน่งตรงกลางของล้อ

หลังจากนั้นจึงได้มีการนำรถออกไปทดสอบบังคับบนสนามจริงเพื่อสังเกตการเลี้ยวแล้วนำมาปรับปรุงปรับมุมการเลี้ยวที่เหมาะสม ในการทดสอบนั้นผลจากการควบคุมผ่านวิทยุบังคับก็ยังสามารถควบคุมได้ดีมีผลตอบสนองที่น่าพอใจ ซึ่งในส่วนนี้เมื่อตอนทดลองแบบอัตโนมัติยังจำเป็นต้องปรับตั้งค่าการเลี้ยวใหม่ให้เหมาะสมกับระบบควบคุมต่อไปดังภาพที่ 102

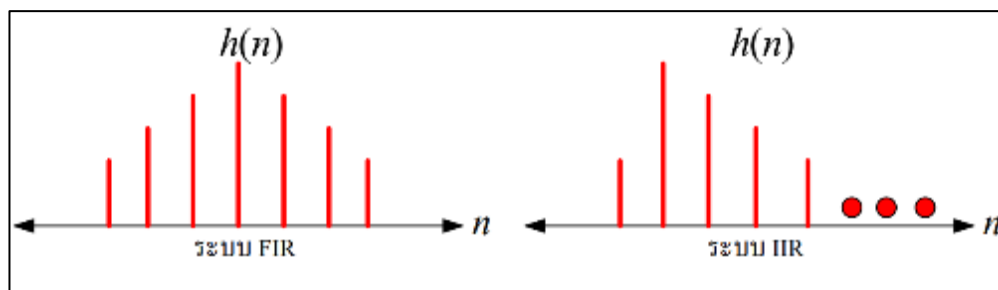


ภาพที่ 102 การควบคุมด้วยวิทยุบังคับบนพื้นที่จริง

3.5.2 ศึกษาวงจรกรองสัญญาณความถี่ Lowpass filter

การควบคุมระบบอัตโนมัติให้ได้สิ่งที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าระบบควบคุมคือ การได้สัญญาณที่มีคุณภาพซึ่งปกติโดยทั่วไปแล้วสัญญาณที่ได้มาจากการวัดหรือเก็บค่ามาได้สัญญาณนั้นจะมาพร้อมกับสัญญาณรบกวนซึ่งอาจเกิดจากบริเวณรอบๆมีคลื่นที่มารบกวนซึ่งอาจส่งผลให้สัญญาณที่ได้มีการผิดเพี้ยนไปหรือไม่เสถียรไปไม่น่าเชื่อถือ เมื่อนำสัญญาณนี้ไปใช้ก็ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพต่อการควบคุมตามมา ดังนั้นการแก้ปัญหานี้จึงมีความจำเป็นอย่างมากในการควบคุมหรือการออกแบบการควบคุม แต่ในปัจจุบันก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้ด้วยการกรองสัญญาณก่อนแล้วจึงนำสัญญาณมาใช้งาน ในการกรองสัญญาณนั้นก็มีมากมายหลายวิธีแล้วแต่ความเหมาะสม เช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter ; LPF) , วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter ; HPF) , วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter ; BPF) และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน (band-stop filter ; BSF)

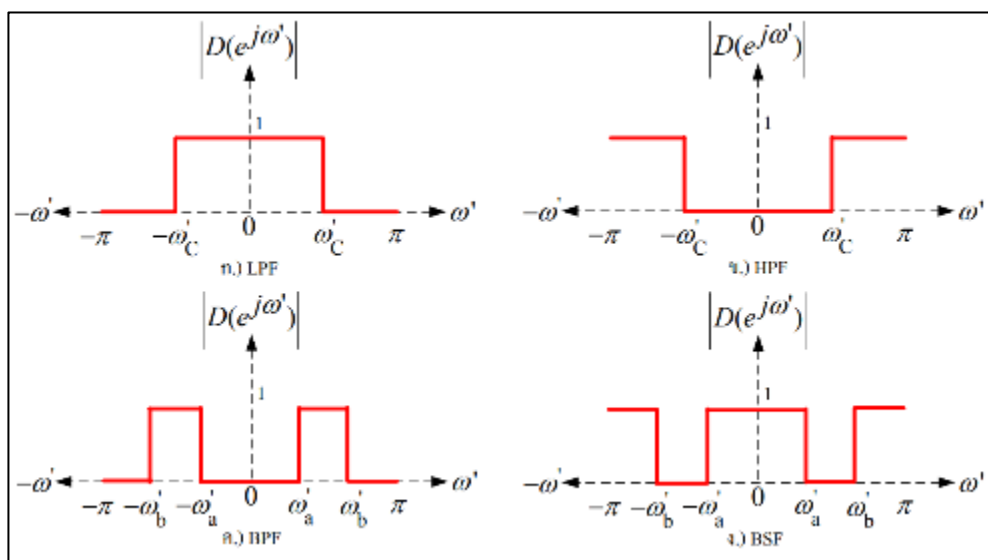
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้เลือกเอา Block Lowpass filter ในโปรแกรม Matlab Simulink มาวิเคราะห์ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจการทำงานของระบบนี้จึงสามารถอธิบายได้ว่าระบบการกรองความถี่แบบนี้เป็นแบบดิจิทัลและสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบตามการตอบอิมพัลส์ดังภาพที่ 103 คือ แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response : FIR) กับผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด (Infinite Impulse Response : IIR) (ธันต์ ศรีสกุล, มปป.)



ภาพที่ 103 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจร

ที่มา: ธันต์ ศรีสกุล,(มปป.)

การออกแบบวงจรกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่าง (window method) ในการออกแบบวงจรกรองความถี่โดยใช้วิธีหน้าต่างนั้นซึ่งเป็นวิธีพื้นฐาน โดยมีสิ่งที่สำคัญคือการหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ จากผลตอบสนองของความถี่ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติ



ภาพที่ 104 ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอุดมคติ

ที่มา: ธนันต์ ศรีสกุล,(มปป.)

จากภาพที่ 104 จะสมมติให้ $d(n)$ แทนเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์และกำหนดให้ $D(e^{j\omega'})$ แทนผลตอบสนองเชิงความถี่ สำหรับตัวกรองความถี่ในอุดมคติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 104 ที่เราจะหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติได้ โดยใช้ เทคนิคของการแปลงฟูริเยร์แบบเวลาไม่ต่อเนื่องชนิดผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform: IDTFT) ตัวอย่างเช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังนี้

$$d(n) = \text{IDFT}\{D\} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D(e^{j\omega'}) e^{j\omega' n} d\omega' = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (1) e^{j\omega' n} d\omega' \\ &= \left[\frac{e^{j\omega' n}}{2\pi j n} \right]_{-\omega_c}^{\omega_c} = \frac{e^{j\omega_c n} - e^{-j\omega_c n}}{2\pi j n} \\ &= \frac{\sin(\omega_c n)}{\pi n}; -\infty < n < \infty \end{aligned}$$

ในสมการ (3.47) จะพบปัญหาที่ $n = 0$ เพราะผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ $d(n)$ มีค่าเป็นเศษ ศูนย์ส่วนด้วยศูนย์ วิธีแก้ไขปัญหา เราสามารถหาค่า $d(0)$ ได้โดยใช้ทฤษฎีของลอปิตัล จะได้ว่า

$$d(0) = \frac{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\sin(\omega_c' n))}{d(n)}}{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\pi n)}{d(n)}} = \frac{\omega_c'}{\pi} \quad (3.45)$$

สำหรับวงจรกรองความถี่แบบอื่นๆ เราสามารถหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ $d(n)$ ได้โดย การแปลง IDTFT เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองนั้นๆ ได้ดังตารางที่ เพื่อใช้ในการ ออกแบบต่อไป

ตารางที่ 4 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่าง ๆ

ชนิดของตัวกรอง	$D(n), -\infty < n < \infty$	$D(n), n = 0$
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	$\frac{\sin(\omega_c' n)}{\pi n}$	$\frac{\omega_c'}{\pi}$
วงจรกรองความถี่สูงผ่าน	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega_c' n)}{\pi n}$	$1 - \frac{\omega_c'}{\pi}$
วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	$\frac{\sin(\omega_b' n) - \sin(\omega_a' n)}{\pi n}$	$\frac{\omega_b'}{\pi} - \frac{\omega_a'}{\pi}$
วงจรแถบความถี่หยุดผ่าน	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega_b' n) - \sin(\omega_a' n)}{\pi n}$	$1 - \left(\frac{\omega_b'}{\pi} + \frac{\omega_a'}{\pi} \right)$

ที่มา: ธนันต์ ศรีสกุล,(มปป.)

จากที่ได้แสดงในตารางข้างต้น เป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ $d(n)$ ของวงจรกรองความถี่ แบบต่างๆ โดยวิธีการแปลง IDTFT ผู้ที่ต้องการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอลในที่นี้ ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางคณิตศาสตร์มากนัก เพราะการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ เราจะใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ในตารางที่ ได้โดยตรง ที่ได้แสดงในสมการที่ 3.47 กับ 3.48 เป็นเพียงตัวอย่างการหาผลตอบสนองอิมพัลส์ $d(n)$ ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยวิธีการแปลงจาก IDTFT ที่ n มีค่า $-\infty < n < \infty$ กับที่ $n = 0$ ตามลำดับก่อนที่จะทำการออกแบบนั้นจะต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญๆตามลักษณะเฉพาะของวิธีหน้าต่าง ต่อการออกแบบวงจรกรองความถี่ เช่น ความถี่ตัด , อัตราการลดทอน , ความพริ้วหรือริบเบิลของแถบผ่าน และความกว้างของแถบเปลี่ยน โดยพิจารณาตามภาพที่ 105 ดังนี้

ความถี่ตัด(cutoff frequency ; f_c) หมายถึงจุดตัดของความถี่ที่ให้สัญญาณผ่านหรือไม่ผ่านไป ยังขั้วออกของวงจรกรอง สำหรับวงจรกรองความถี่ของ FIR กำหนดค่าความถี่ที่ขนาดลดลงประมาณ 0.5 นิยามนี้แตกต่างกับแบบ IIR ที่ใช้นิยามเดียวกันกับวงจรกรองแบบ Analog คือที่ขนาดลดลงประมาณ 0.707

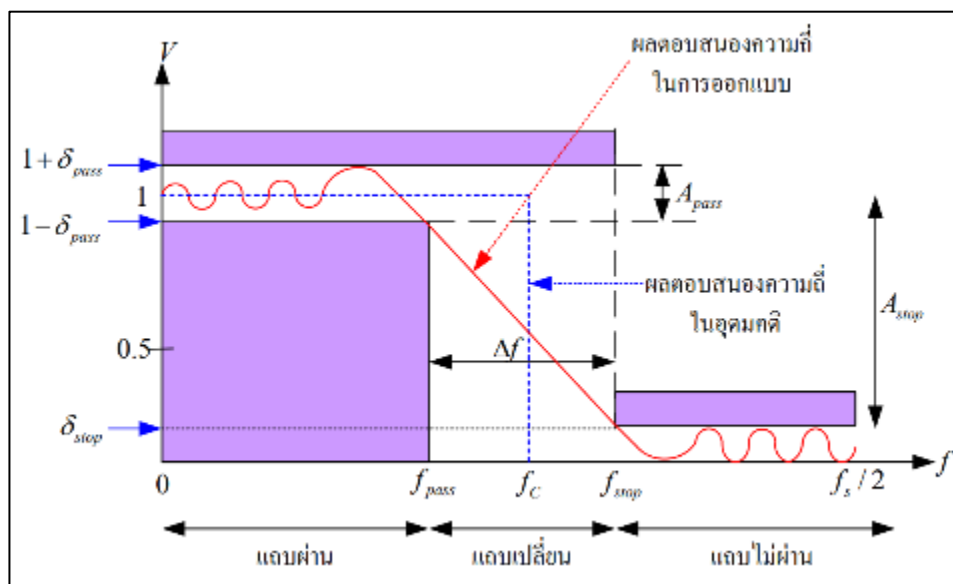
การลดทอนของแถบหยุด(stop-band attenuation ; A_{stop}) คือ จำนวนเท่าที่แถบหยุดลดทอนลง วัดค่าเป็น dB โดยการลดทอนของแถบหยุดมีความสัมพันธ์กับความพลั้วของแถบหยุด แสดงดังสมการ(3.46)

$$A_{stop} = 20 \log \delta_{stop} \quad (3.46)$$

ความพริ้วหรือริบเปิดของแถบผ่าน(pass-band ripple ; δ_{pass}) หมายถึง ค่าสูงสุดที่ขนาดแถบผ่านแกว่งออกจากค่า 1 ตามภาพที่ 105 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A_{pass} = 20 \log \frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \quad (3.47)$$

ความกว้างของแถบเปลี่ยน (transition band width ; Δf) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของ ขนาดเทียบกับ ช่วงความถี่



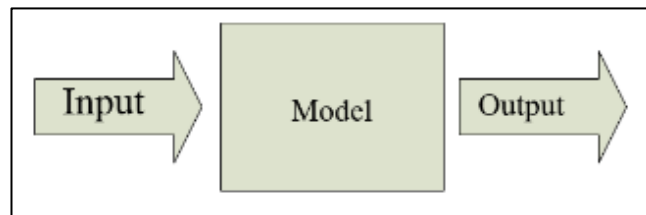
ภาพที่ 105 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR

ที่มา: ธนันต์ ศรีสกุล, (มปป.)

3.5.3 ศึกษาการหา Sytem Identification ของระบบ

1) การสร้างแบบจำลองระบบงาน (Plant Model)

สามารถจำลองในส่วนของระบบงาน ให้เป็นรูปแบบของ “กล่อง (Box)” ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 106 การจำลองระบบงานด้วยกล่องภาพที่ 106



ภาพที่ 106 การจำลองระบบงานด้วยกล่อง

สามารถจำแนกรูปแบบการโมเดลของกล่อง ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

White Box Modelling: เป็นโมเดลระบบทำงานที่ทราบโครงสร้างของระบบทั้งหมดอย่างถูกต้องและครบถ้วน หรือเป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นได้อย่างแน่นอนตลอดเวลา (เช่น $F = ma$) ซึ่งโมเดลนี้จะทำให้สามารถทำนายผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระบบได้ถูกต้อง

Grey Box Modelling: เป็นโมเดลระบบทำงานที่ทราบโครงสร้างของระบบเพียงบางส่วน (ไม่ทราบทั้งหมด) ยังมีข้อมูลของพารามิเตอร์บางตัวไม่ครบถ้วน เนื่องจากบางพารามิเตอร์ไม่สามารถวัดได้ (เช่น น้ำหนักของดาวเคราะห์) ซึ่งการจะทำให้ได้พารามิเตอร์ครบถ้วน อาจต้องหาจากข้อมูลจากประสบการณ์และความชำนาญ (Experiment data) หรือข้อมูลจากการปรับตั้ง (Tuning data)

Black Box Modelling: เป็นโมเดลระบบทำงานที่ไม่ทราบโครงสร้างภายใน หรือเป็นระบบทำงานที่ไม่มีทฤษฎีมารองรับอย่างถูกต้องเหมาะสม ซึ่งการจะโมเดลนี้ได้ต้องมาจากการเดาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของระบบออกมา เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าตัวที่จะควบคุมไม่มีชีทข้อมูล (Data Sheet) ประกอบ

จากแบบจำลองระบบงานทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าในการทำงานจริงระบบทำงานส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Grey Box และ Black Box เนื่องจากไม่มีข้อมูลของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ทั้งหมด หรือไม่มีข้อมูลเลย เช่น ข้อมูลในมอเตอร์ที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น หรือบางครั้งอุปกรณ์มีการใช้งานเป็นเวลานาน ทำให้พารามิเตอร์เพี้ยนไปจากเดิม (แต่ไม่ทราบว่าเพี้ยนไปเป็นค่าใด) จึงเป็นการยากที่จะโมเดลทางคณิตศาสตร์ให้ได้อย่างถูกต้อง

วิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) จึงได้ถูกพัฒนามาเพื่อใช้หาโมเดลของระบบที่เป็นชนิด Grey Box และ Black Box โดยอาศัยข้อมูลความสัมพันธ์ของอินพุตกับเอาต์พุตของระบบงานนั้นๆ มาหาโมเดลของระบบงานได้

2) การระบุเอกลักษณ์ (System Identification)

สามารถระบุเอกลักษณ์ของระบบใด ๆ ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของอินพุตกับเอาต์พุต ดังสมการ (3.48)

$$y = f(u) \quad (3.48)$$

เมื่อ y คือ เอาท์พุต (ตัวแปรตาม, dependent variables)

u คือ อินพุต (ตัวแปรอิสระ, independent variables)

ตัวอย่าง : จากกฎของนิวตัน $F = ma$ ถ้าต้องการหาความเร่ง (a) จะพบว่า ความเร่งเป็นผลกระทบบางมาจากแรงที่กระทำ (F) ซึ่งจะมีมวล (m) เป็นค่าคงที่ จะได้ $y = a$, $u = F$ และ $f(u) = u/m$

ซึ่งโดยทั่วไป ตัวแปร y และ u มีลักษณะเป็นเวกเตอร์ได้ (หลายอินพุต, หลายเอาท์พุตที่มีความสัมพันธ์กันอยู่) เช่น $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_p]'$ และ $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]'$ โดยที่

กรณี $m = 1$: คำตอบที่ได้ เป็นปริมาณสเกลาร์ (Scalar, $p = 1$) สมการที่ (1) จะเป็นลักษณะเส้นโค้ง (Curve) ในระนาบ $x - y$ (รูป 2 มิติ)

กรณี $m = 2$: สมการที่ (1) จะมีลักษณะเป็นพื้นผิว (Surface) (รูป 3 มิติ)

กรณี $m > 2$: สมการที่ (1) จะมีลักษณะเป็นพื้นผิวชั้นสูง (Hypersurface) ในที่ว่าง (Space) ที่เหมาะสม (รูปหลายมิติ)

การระบุเอกลักษณ์ให้มีความถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวน และความผิดพลาดต่างๆ ด้วย จะได้

$$y(k) = f(u(k)) + v(k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.49)$$

เมื่อ $v(k)$ คือ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (เช่น ความผิดพลาดจากการวัด)

กระบวนการระบุเอกลักษณ์ จะทำการเรียนรู้ (Learning) เพื่อหา $f(u)$ จากความสัมพันธ์ของคู่ $(u(k), y(k))$ ซึ่งก็คือ (examples, training set) ซึ่งจะต้องมีการใช้ทฤษฎีต่างๆมาใช้ในการหาคำตอบ (ระบุเอกลักษณ์ของระบบ) ออกมา เช่น ทฤษฎีการประมาณฟังก์ชัน (Function Approximation Theory), ทฤษฎีการเรียนรู้ (Learning Theory), ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) และ Last but not least, statistics เป็นต้น

3.5.4 ศึกษา Optimize parameter PID controller

จากงานวิจัยของ (Wisawa Mamaa, 2018) ได้นำเอาวิธีการ PSO มาหาค่าพารามิเตอร์ค่าเกนของ PID controller ที่เหมาะสมให้กับพารามิเตอร์เชิงไม่เชิงเส้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามค่าสัญญาณอ้างอิงของระบบ เมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมจะเห็นว่าเป็นปัญหาแบบ 3 มิติ ซึ่งแต่ละอนุภาค จะประกอบไปด้วยค่า K_p, K_i, K_d

โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาก็คือ

$$f = (e(t) \times \alpha) + (e_{\max}(t) \times \beta) \quad (3.52)$$

เมื่อ $\alpha + \beta = 1$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

$$0 \leq \beta \leq 1$$

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด

$e_{\max}(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดสูงสุด

เมื่อนำสมการมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเกน Kp, Ki, Kd จะมีขั้นตอนการหาดังนี้

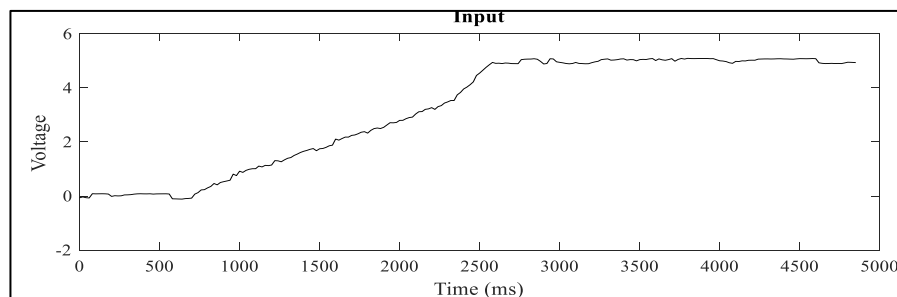
1. ทำการกำหนดค่าให้อนุภาคเริ่มต้น ได้แก่ C1, C2, r1, r2, W, ความเร็วเริ่มต้นและค่าเกนเริ่ม Kp, Ki, Kd ต้น
2. จากนั้นนำค่าอนุภาคเริ่มต้นไปคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับให้หยุดการคำนวณ แต่ถ้าไม่ให้ทำการคำนวณ ข้อ 3 ถึง 6 ใหม่
3. ถ้าค่า Kp, Ki, Kd ใหม่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีกว่าค่า Kp, Ki, Kd เดิมที่ให้ผลที่ดีที่สุด ($f_t < f_{t-1}$) ให้ค่าเกนใหม่เป็น p_i^{best} แต่ถ้าไม่ให้ค่าเกนเดิมเป็น p_i^{best}
4. จากนั้นนำค่า p_i^{best} ของทุกอนุภาคมาหา g_i^{best}
5. จากนั้นนำค่า p_i^{best} และ g_i^{best} ไปคำนวณหาความเร็วของแต่ละอนุภาค
6. คำนวณหาค่าเกนใหม่

ในการหาค่าที่พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เฉพาะค่าพารามิเตอร์ PI Control มาใช้ เนื่องจากระบบที่จะนำมาประยุกต์ใช้นั้นต้องการผลตอบสนองของล้อยที่เร็ว

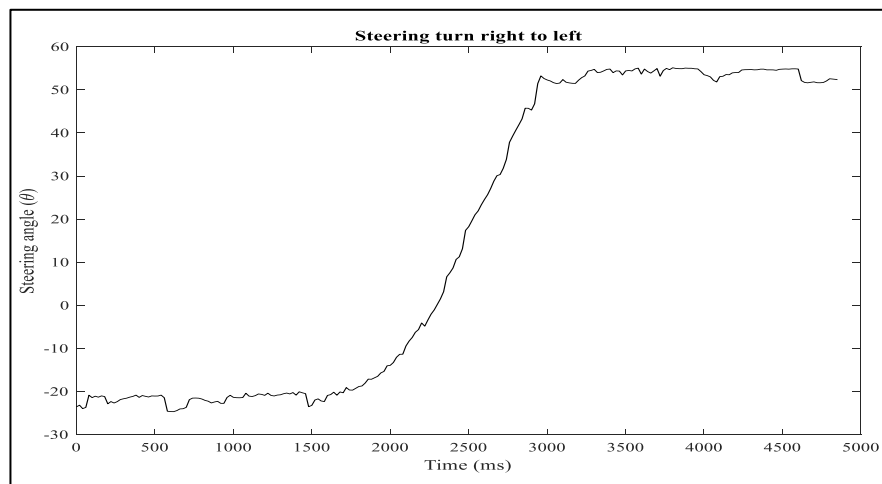
3.5.5 ปรับปรุงชุดเซนเซอร์และกลไกสับสนุนฯ

1) ทดลองเก็บข้อมูลเพื่อนำค่ามาใช้หาสมการโมเดล

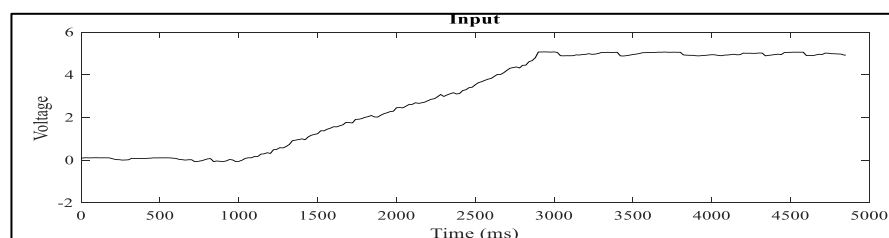
ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบทฤษฎีระบบควบคุมตั้งนั้นในการหาสมการของระบบจึงเลือกใช้วิธี system identification โดยใช้ system identification Toolbox ในโปรแกรม Matlab ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องทราบค่า พารามิเตอร์ของอุปกรณ์แต่จำเป็นต้องทราบค่า input และ output ของระบบเท่านั้น อุปกรณ์วัดค่าของระบบ ดังภาพที่ ประกอบด้วย LVDT ใช้



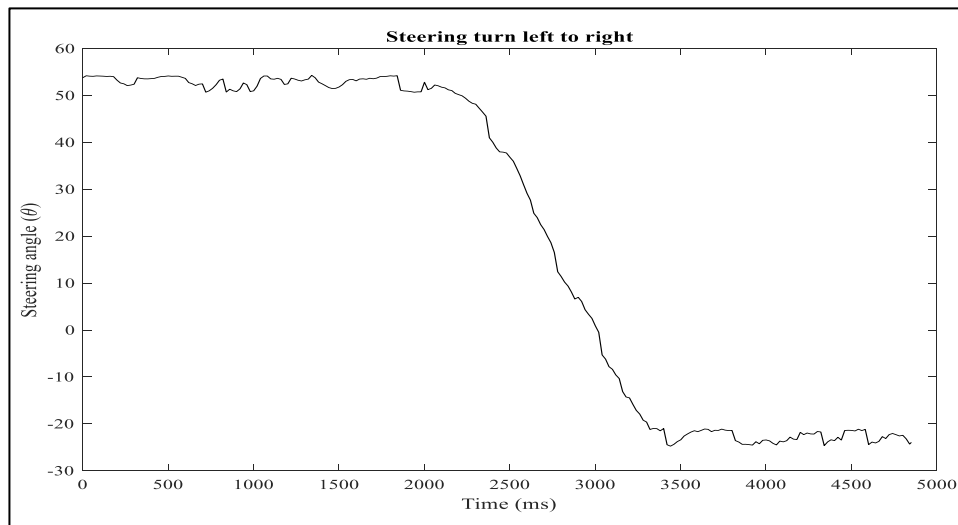
ภาพที่ 107 Logging voltage of input data for right to left turning



ภาพที่ 108 Logging angle of output data for right to left turning



ภาพที่ 109 Logging voltage of input data for left to right turning



ภาพที่ 110 Logging angle of output data for left to right turning

1 หาสมการคณิตศาสตร์ของวาล์วแต่ละด้าน

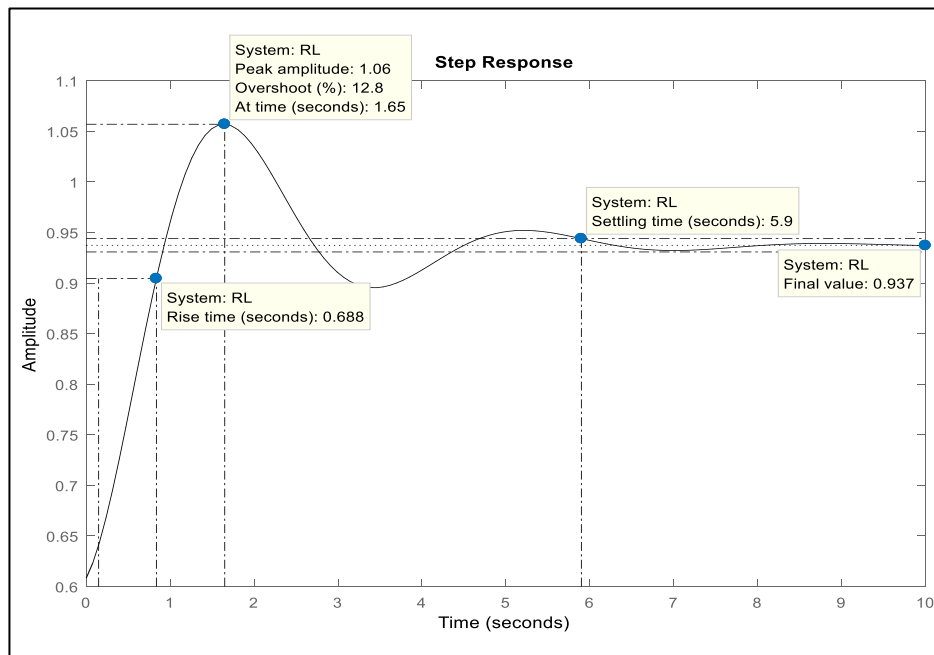
ซึ่งระบบที่ได้จะมีสองส่วนคือ ข้อมูลที่เก็บจากการเลี้ยวจากขวาไปซ้ายและซ้ายไปขวา นำข้อมูลที่ได้นี้มาประมาณค่าเพื่อหาสมการ transfer function ด้วย toolbox system identification ในโปรแกรม matlab ซึ่งได้สมการการเลี้ยวจากขวาไปซ้ายและจากซ้ายไปขวาดังสมการที่(3.52-3.53) ตามลำดับ

$$\frac{0.6083s^2 + 0.8703s + 3.2198}{s^2 + 1.172s + 3.433} \quad (3.50)$$

$$\frac{0.6248s^2 + 0.3461s + 8.223}{s^2 + 0.004323s + 8.649} \quad (3.51)$$

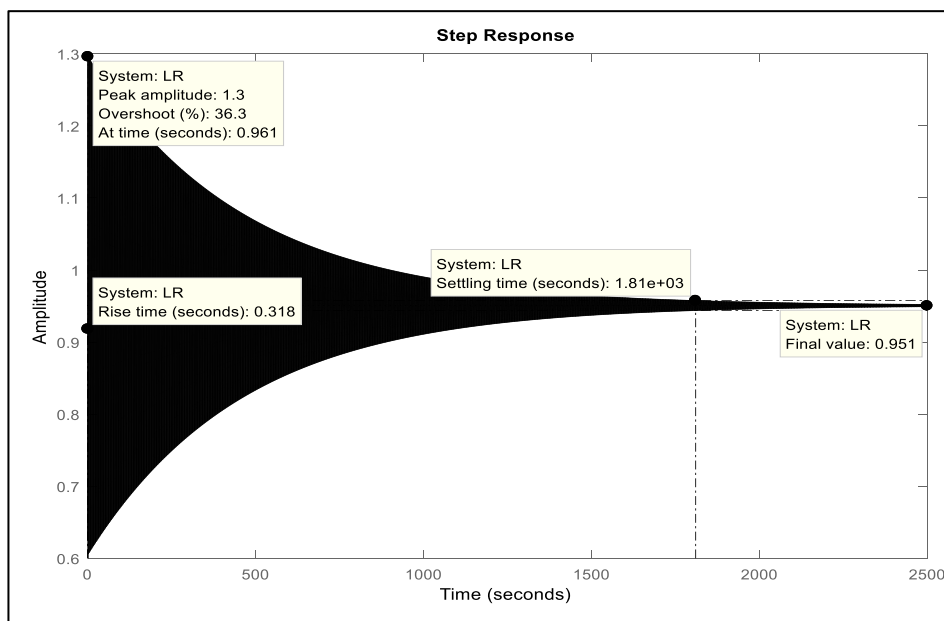
1 วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในโดเมนเวลา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบส่วนมากจะวิเคราะห์ในโดเมนของเวลาโดยวิเคราะห์จากผลตอบสนองด้วยการป้อนค่าเข้าสู่ระบบ ส่วนมากแล้วจะป้อนอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันได และมีเงื่อนไขการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่าต่อไปนี้คือ rise time, peak time, overshoot, settling time, final value จากการป้อนค่าให้กับสมการระบบบังคับเลี้ยวจากขวาไปซ้ายและซ้ายไปขวาจะได้กราฟดังภาพที่ 111



ภาพที่ 111 Time respond for right to left turning

จากภาพที่ 111 เป็นการตอบสนองของระบบบังคับเลี้ยวจากขวาไปซ้ายในกรณีหน่วงต่ำกว่าวิกฤติ (underdamped system) ผลที่ได้จากระบบคือระบบมีช่วงเวลาผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเอาต์พุตเพิ่มขึ้น (rise time) จาก 0%-100% เท่ากับ 0.688 วินาที, มีค่า overshoot เท่ากับ 12.6%, settling time 5.9 วินาที, มีค่า final value เท่ากับ 0.937

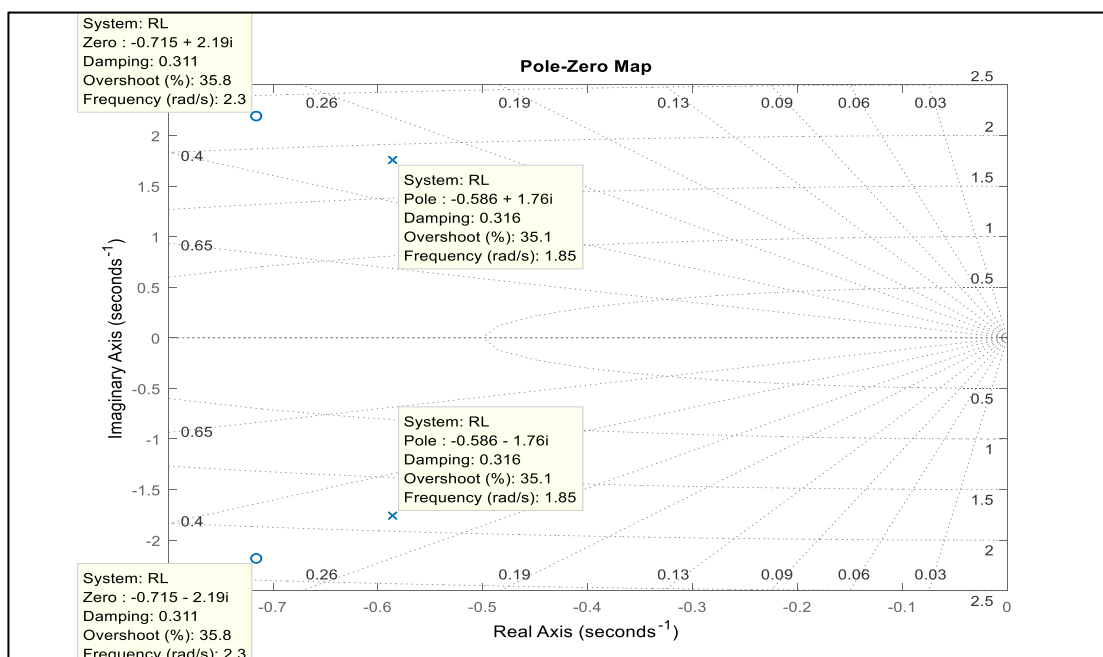


ภาพที่ 112 Time respond for left to right turning

จากภาพที่ 112 เป็นการตอบสนองของระบบบังคับเลี้ยวจากซ้ายไปขวาผลที่ได้จากระบบคือ ระบบมีช่วงเวลาผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเอาต์พุตเพิ่มขึ้น (rise time) จาก 0%-100% เท่ากับ 0.318 วินาที, มีค่า overshoot เท่ากับ 36.3%, settling time 1.81e03 วินาที, มีค่า final value เท่ากับ 0.951

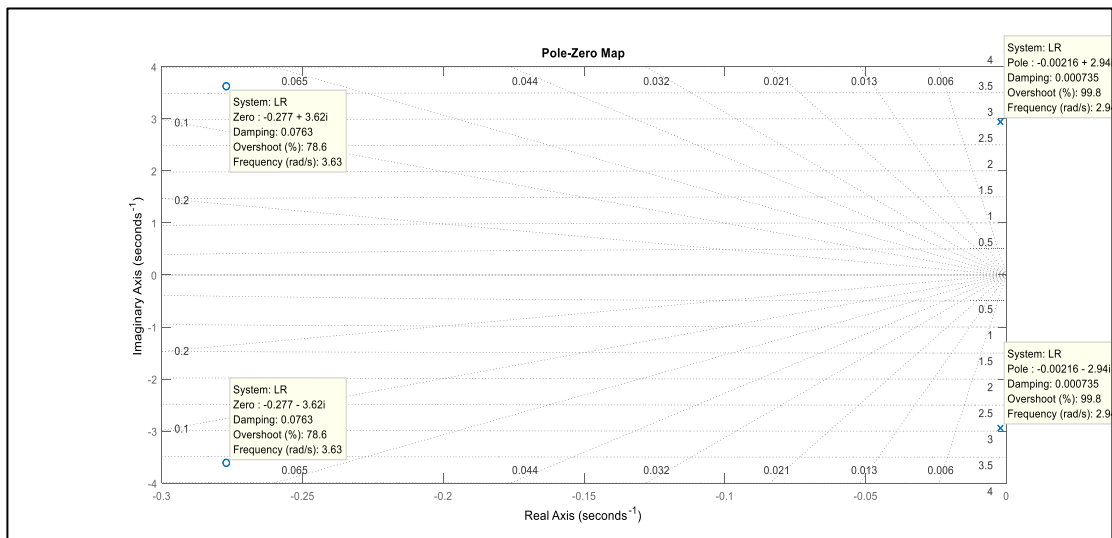
2. วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วย pole-zero

ซึ่งจะแทนที่สมการถ่ายโอนด้วยสมการอนุพันธ์เชิงสามัญจะอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนพหุนาม ค่า pole-zero เหล่านี้สามารถนำมาอธิบายลักษณะการตอบสนองของระบบได้โดยพิจารณาตำแหน่ง pole zero บน s-plane ระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อค่า pole ของระบบ มีค่าเป็นลบหรืออยู่ด้านซ้ายมือของ s-plane ระบบจะมีลักษณะลดลงเรื่อยๆแต่ถ้าระบบนั้นมีส่วนจินตภาพเข้ามาด้วยระบบนั้นจะมีลักษณะลดลงเรื่อยๆผสมกับการแกว่งในกรณีที่ pole อยู่ใกล้แกนจินตภาพเสถียรภาพของระบบจะลดลงและถ้า pole อยู่บนแกนจินตภาพระบบจะมีการแกว่งแบบไม่ลดลงซึ่งหมายความว่าระบบไม่เสถียร



ภาพที่ 113 Pole Zero for left to right turning

จากภาพที่ 113 พบว่าค่า pole ของ ระบบบังคับเลี้ยวจากขวาไปซ้ายนั้นมีค่าเป็นลบหรืออยู่ทางด้านซ้ายมือของ S-plane และมีค่าจินตภาพรวมอยู่ด้วย นั้นหมายความว่าระบบจะมีผลตอบสนองในลักษณะที่ลดลงเรื่อยๆผสมกับการแกว่ง

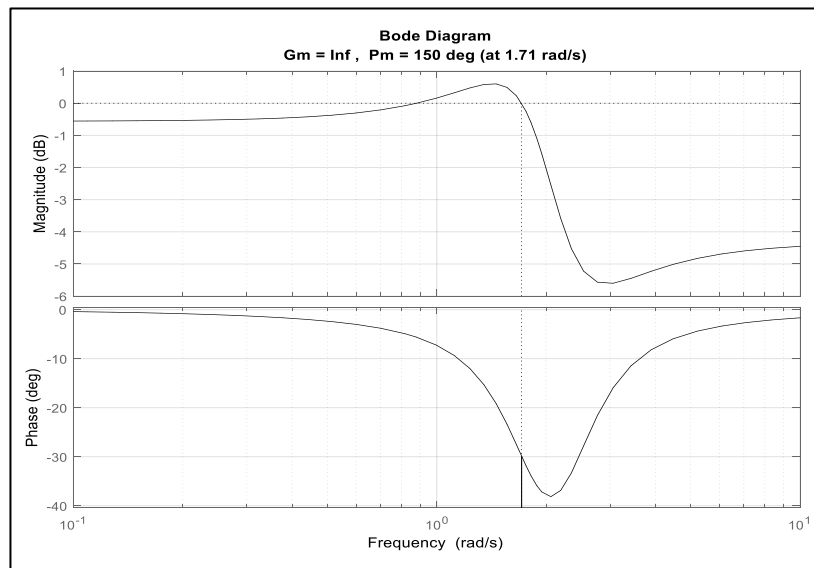


ภาพที่ 114 Pole Zero for left to right turning

จากภาพที่ 114 พบว่าค่า pole ของระบบบังคับเลี้ยวจากซ้ายไปขวานั้นมีค่าเป็นลบหรืออยู่ทางด้านซ้ายมือของ S-plane และมีค่าจินตภาพรวมอยู่ด้วยหมายความว่าระบบจะมีผลตอบสนองในลักษณะที่ลดลงเรื่อยๆสมกับการแกว่งแต่เนื่องจากตำแหน่ง pole อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพนั้นหมายความว่าระบบจะมีการลดลงเข้าสู่จุดสมดุลที่ช้าแต่ระบบนี้ก็ยังมีเสถียรภาพอยู่

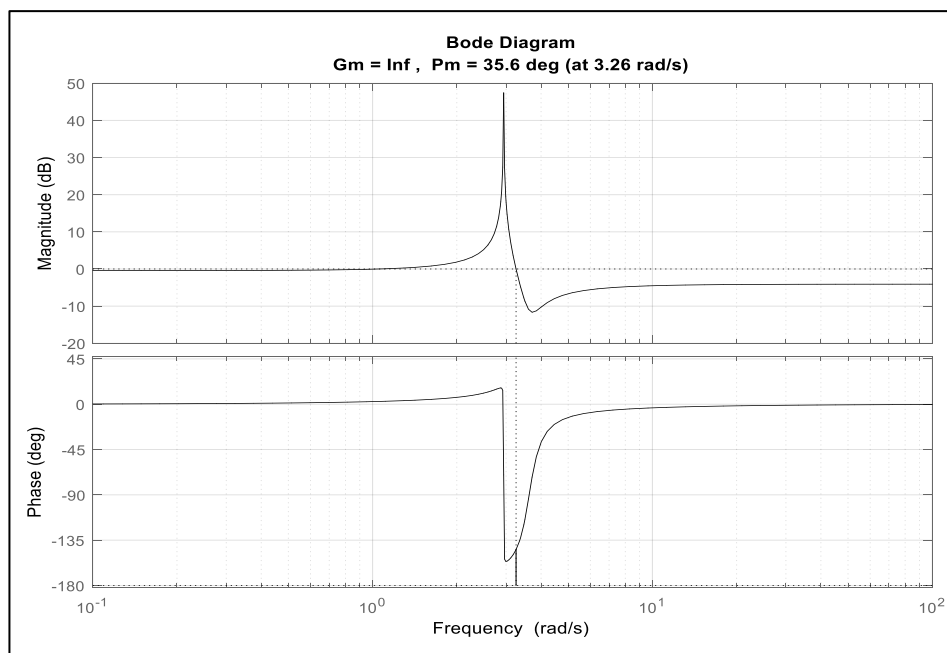
3 วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในโดเมน s

การตอบสนองเชิงความถี่คือการวิเคราะห์ระบบพลศาสตร์ในสถานะอยู่ตัว (steady-state response) ของระบบที่มีสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ชอยด์ การตอบสนองประเภทนี้เรียกว่าการตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนโดยพิจารณาตำแหน่ง pole zero การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่นั้นจะต้องแทนค่า $s = j\omega$ ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนเราก็จะได้สมการที่เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนที่ใช้แทนผลตอบสนองเชิงความถี่ได้เกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในโดเมนความถี่ประกอบด้วยค่า เกนมาร์จิน (gain margin) หรืออัตราขยาย K ของระบบ, ค่าเฟสมาร์จิน (phase margin) หรือมุมเฟสที่วัดเมื่อค่าขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับหนึ่งแสดงว่าระบบจะมีเสถียรภาพจะระบบลดลงเรื่อยๆเมื่อมุมเฟสมีค่าลดลง, ค่าความถี่คัตออฟและความกว้างแถบ (cutoff frequency and bandwidth) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึง rise time ของระบบถ้าแถบความถี่กว้างมากจะทำให้ rise time มีค่าน้อยทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วแต่ก็ไม่ควรมากเกินไปเพราะจะทำให้มีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นซึ่งการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูงนั้นทำได้ยาก กราฟ Bode plot ของระบบบังคับเลี้ยวจากขวาไปซ้ายและจากซ้ายไปขวา แสดงในภาพที่ 115-116 ตามลำดับ



ภาพที่ 115 Bode plot for right to left turning

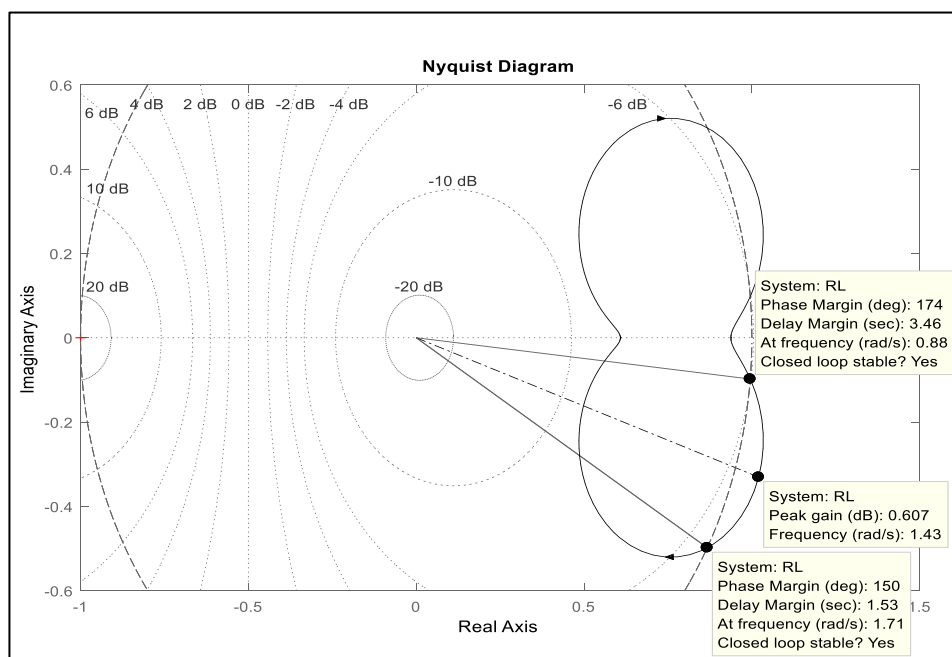
จากภาพที่ 115 กราฟ Bode plot ของสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเลี้ยวจากขวาไปซ้าย พบว่า ระบบมีค่าอัตราขยาย (gain margin) เป็น อนันต์ ซึ่งนั่นหมายความว่าระบบนั้นมีความเสถียรค่ามุมเฟส (phase margin) ของระบบมีค่า 160 deg ที่ 1.71 rad/s แสดงว่าระบบนั้นจะมีการแกว่งที่ลดลงเรื่อยๆ และระบบมีค่า bandwidth เท่ากับ 2.1906 rad/s



ภาพที่ 116 Bode plot for left to right turning

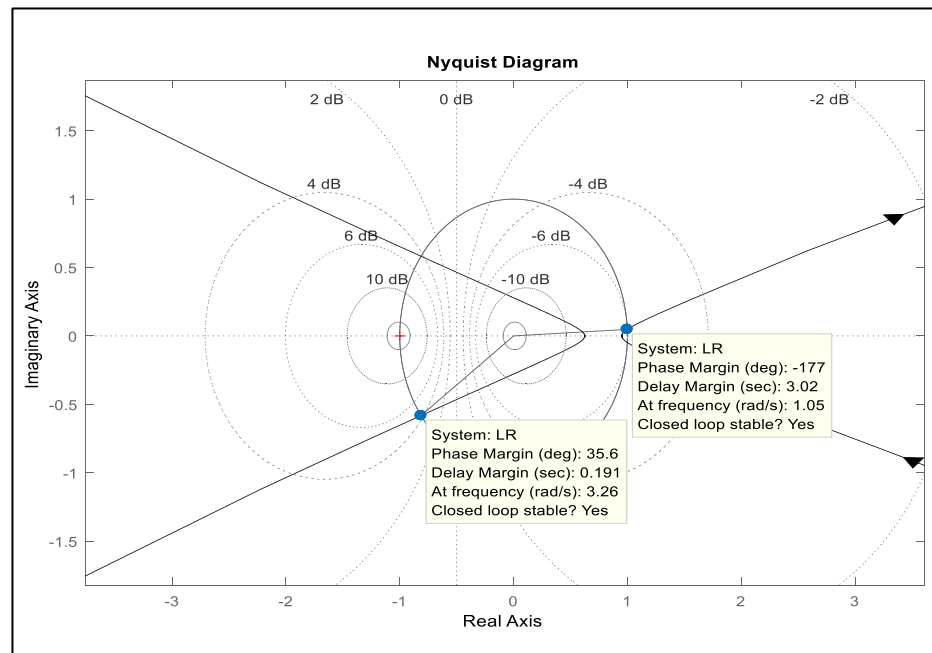
จากภาพที่ 116 กราฟ Bode plot ของสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเลี้ยวจากซ้ายไปขวา พบว่า ระบบมีค่าอัตราขยาย (gain margin) เป็น อนันต์ ซึ่งนั่นหมายความว่าระบบนั้นมีความเสถียรค่ามุมเฟส (phase margin) ของระบบมีค่า 35.6 deg ที่ 3.26 rad/s ซึ่งเป็นค่าที่น้อยแสดงว่าระบบนั้นจะมีการแกว่งที่มากกว่าระบบในภาพที่ 116 แต่ก็ลดลงเรื่อยๆ และระบบมีค่า bandwidth เท่ากับ 3.3424 rad/s

เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยแผนภาพ nyquist โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือจะพิจารณาเส้นโค้งโพลาร์ของสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ถ้า s อยู่ด้านขวามือของกราฟ s -plane หรือระบบมีความไม่เสถียรแล้ว เมื่อคำนวณหาจุดของเส้นโค้งโพลาร์กับแกน u จะพบว่าระบบจะอยู่บนแกน $j\omega$ พอดี ที่ $u = -1$ นั่นหมายความว่าระบบจะเริ่มไม่มีความเสถียรแล้ว ดังนั้นถ้าพิจารณาจากแผนภาพ Nyquist จาก 117 ซึ่งเป็นแผนภาพจากสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่เลี้ยวจากขวาไปซ้าย ซึ่งพิจารณาแกน u พบว่าเส้นกราฟโพลาร์ของระบบไม่มากกว่าจุดที่ $u=-1$ ซึ่งแสดงว่าระบบนี้มีความเสถียร



ภาพที่ 117 Nyquist plot for right to left turning

เช่นเดียวกับกราฟภาพที่ 117 ซึ่งเป็นแผนภาพจากสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่เลี้ยวจากซ้ายไปขวา เส้นกราฟโพลาร์ของระบบจะมีค่าใกล้เคียง $u=-1$ นั่นแสดงว่าระบบนั้นมีการแกว่งมากแต่ก็ยังมีความเสถียรอยู่



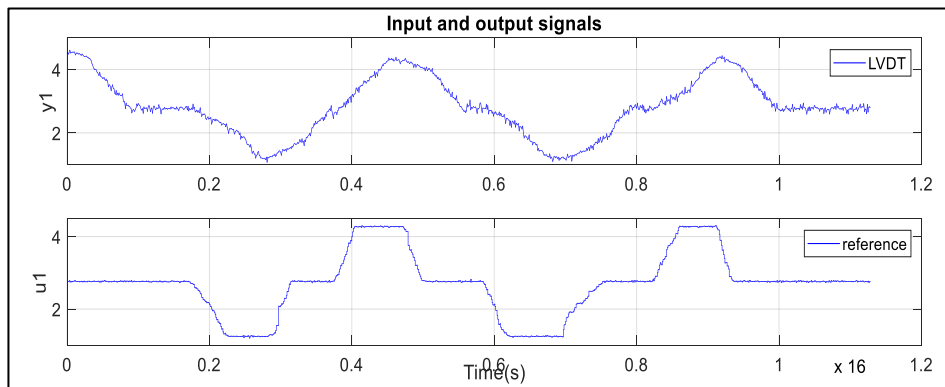
ภาพที่ 118 Nyquist plot for left to right turning

จากการใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ได้ออกแบบซึ่งก็สามารถสรุปได้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากวิธีการต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีความสอดคล้องและมีทิศทางไปในทางเดียวกันและยังสอดคล้องกับระบบจริงด้วยกล่าวคือ สมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่เลี้ยวจากขวาไปซ้ายนั้นมีผลตอบสนองในลักษณะที่ไม่มีการแกว่งตัวมากซึ่งแตกต่างจากสมการสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่เลี้ยวจากซ้ายไปขวาที่มีการแกว่งตัวมาก ในระบบจริงก็เป็นเช่นนั้นเพราะในระบบไฮดรอลิกมีการรั่วซึมทั้งภายในและนอกกระบอก และสายส่งน้ำมันไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลให้แรงดันน้ำมันในท่อในการกำหนดตำแหน่งการเลี้ยวไม่สมดุลทำให้สมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบทั้งสองสมการมีค่าไม่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามระบบทั้งสองนี้ก็ยังชดเชยได้จากระบบควบคุมและระบบมีเสถียรภาพในระบบปิด

2. หาสมการการเลี้ยวในภาพรวมของระบบ

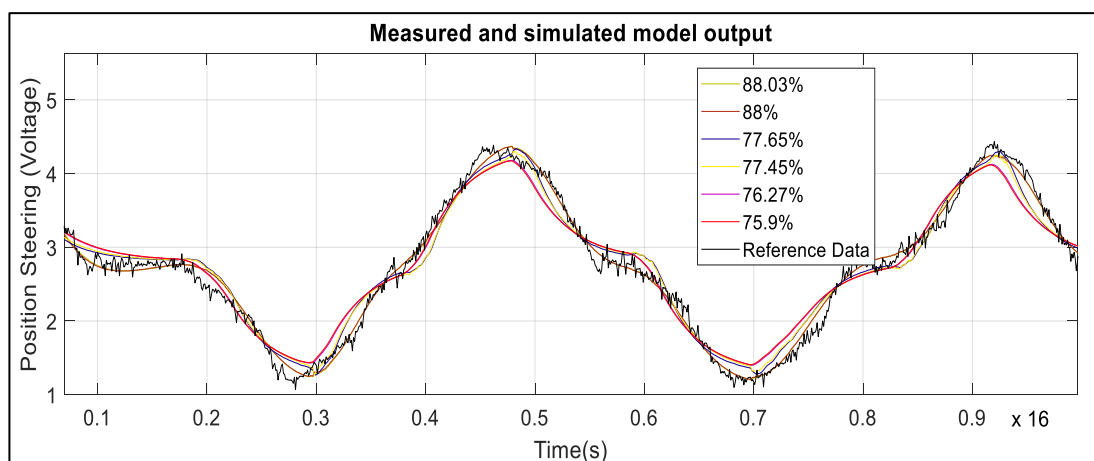
หลังจากควบคุมตำแหน่งการเลี้ยวของล้อได้แล้วจึงทำการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณวัดตำแหน่งของล้อ เพื่อนำมาหาสมการตัวแทนระบบอีกครั้งเพื่อวิเคราะห์หาผลตอบสนองและใช้ออกแบบ Controller ต่อไป จากภาพที่ 119 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงหรือ (Input(y1)) และสัญญาณบอกตำแหน่งล้อ (Output(u1))

1. วงเลี้ยวที่ 1



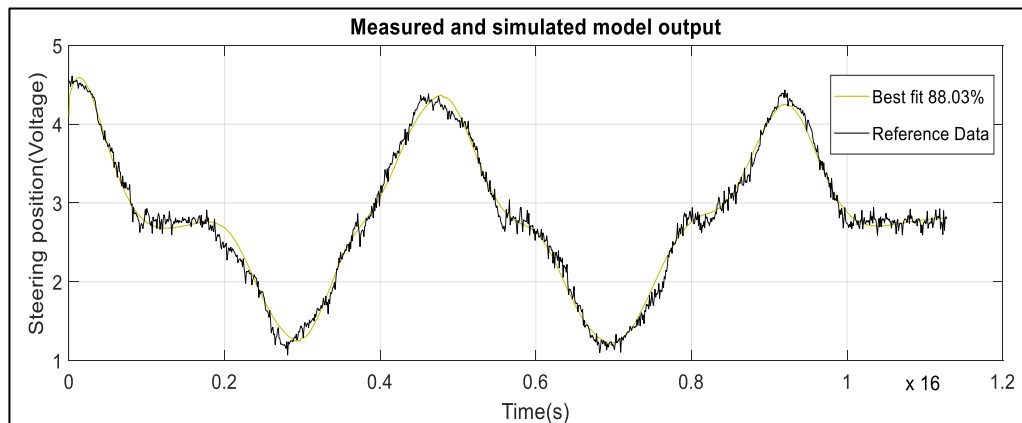
ภาพที่ 119 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงหรือ (Input (y1)) และสัญญาณบอกตำแหน่งล้อ (Output(u1)) วงเลี้ยวที่ 1

จากข้อมูลที่ได้จึงนำมาหา สมการตัวแทนของระบบการเลี้ยวโดยใช้วิธี System identification Toolbox ในโปรแกรม Matlab Simulink ซึ่งผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 120



ภาพที่ 120 กราฟการหาค่า System identification วงเลี้ยวที่ 1

จากภาพที่ 120 แสดงถึงกราฟการหาสมการที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้มากที่สุดโดยในแต่ละค่านั้นก็จะมีค่าพารามิเตอร์ Pole และค่า Zero ที่ต่างกันจนผลที่ได้น่าพึงพอใจ จากกราฟ มีความแม่นยำสูงสุดที่ 88.03% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสมการนี้เพื่อนำไปวิเคราะห์



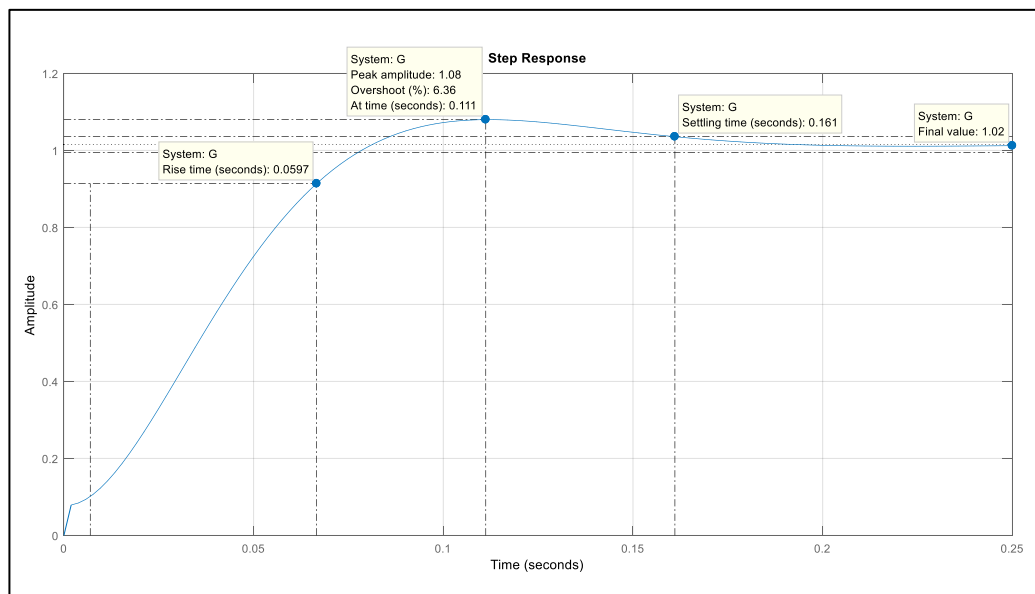
ภาพที่ 121 ค่า System identification ที่ดีที่สุดวงเลี้ยวที่ 1

จากภาพที่ 121 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบการหาสมการโมเดลที่ใกล้เคียงที่สุด ซึ่งจากกราฟจะได้สมการที่ออกมาตามสมการที่ (3.52)

$$= \exp(-0.001 * s) * \frac{0.07803s^2 + 4.232s + 1394}{s^2 + 48.04s + 1373} \quad (3.52)$$

(2.1) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในโดเมนเวลา

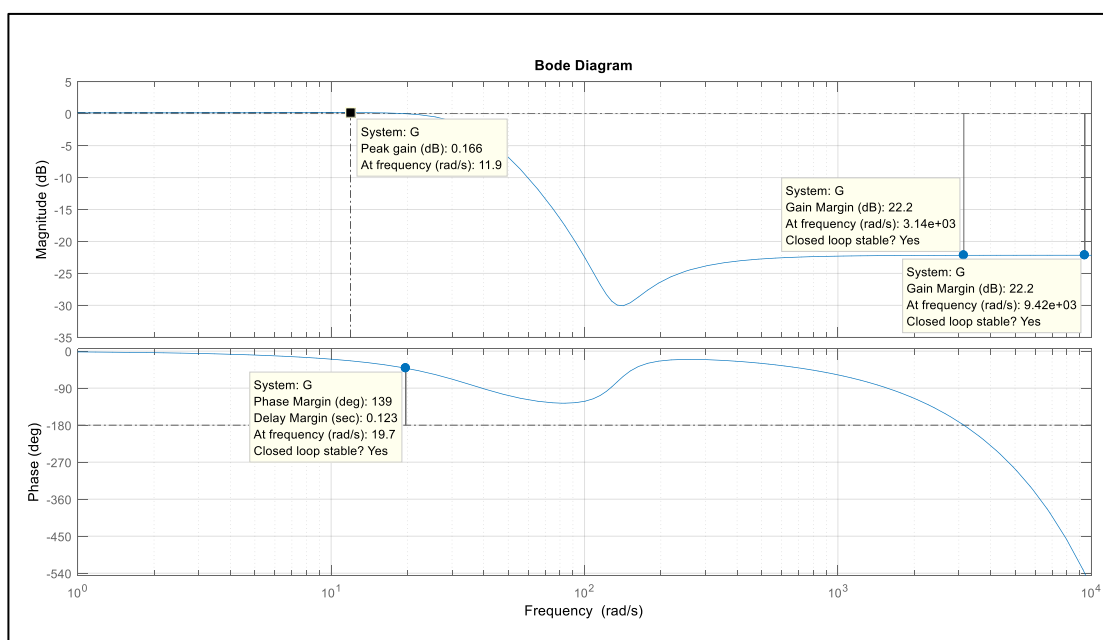
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบส่วนมากจะวิเคราะห์ในโดเมนของเวลาโดยวิเคราะห์จากผลตอบสนองด้วยการป้อนค่าเข้าสู่ระบบ ส่วนมากแล้วจะป้อนอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันได และมีเงื่อนไขการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่าต่อไปนี้คือ rise time, peak time, overshoot, settling time, final value



ภาพที่ 122 ผลตอบสนองต่อสัญญาณฟังก์ชันขั้นบันไดจากสมการวงเลี้ยวที่ 1

จากภาพที่ 122 เป็นการตอบสนองของระบบบังคับเลี้ยวที่ตำแหน่งการเลี้ยว 1.2V ถึง 4.5V ผลที่ได้จากระบบคือระบบมีช่วงเวลาผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเอาต์พุตเพิ่มขึ้น (rise time) จาก 0%-100% เท่ากับ 0.0597 วินาที, มีค่าovershoot เท่ากับ 6.36%, settling time 0.161วินาที, มีค่า final value เท่ากับ 1.02 เป็นระบบที่สามารถควบคุมได้

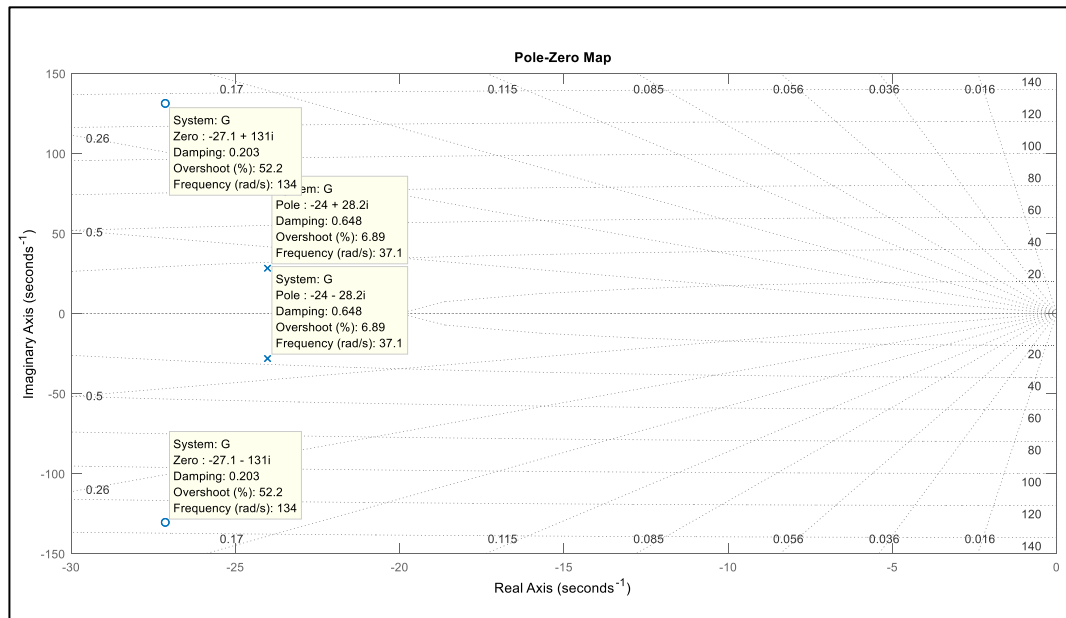
(2.2) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในโดความถี่



ภาพที่ 123 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบจากสมการวงเลี้ยวที่1

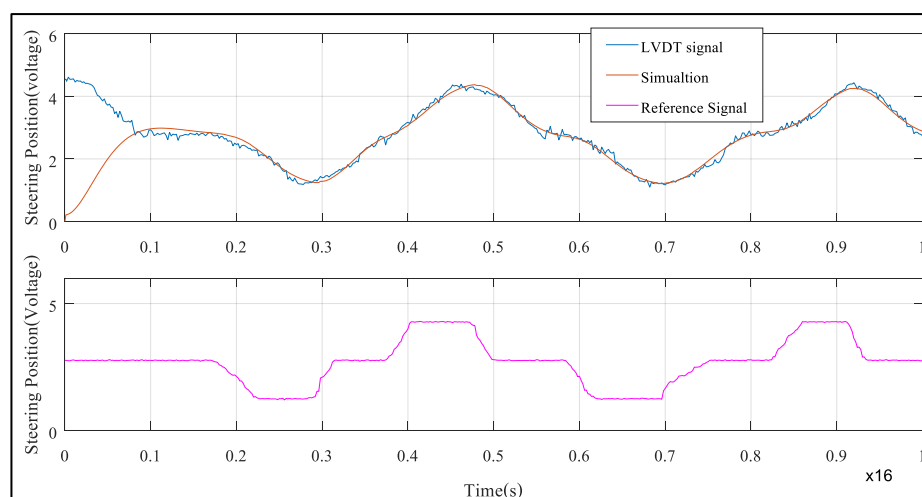
จากภาพที่ 123 กราฟ Bode plot diagram ของสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเลี้ยวที่ตำแหน่งการเลี้ยว 1.2V ถึง 4.5V พบว่า ระบบมีค่าอัตรายาย Gain margin 22.2 dB ซึ่งนั่นหมายความว่าระบบนั้นมีความเสถียรค่ามุมเฟส Phase margin ของระบบมีค่า 139 deg ที่ 19.6 rad/s แสดงว่าระบบนั้นจะมีการแกว่งที่ลดลงเรื่อยๆ

(2.3) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วย pole-zero



ภาพที่ 124 ค่า Pole-Zero ของสมการวงเลี้ยวที่ 1

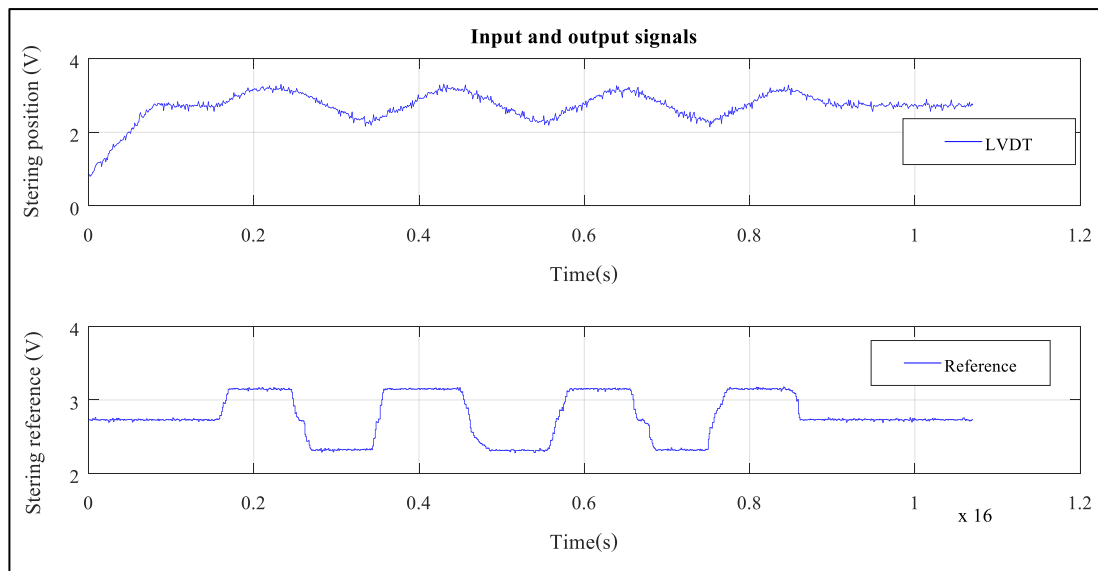
จากภาพที่ 124 พบว่าค่า pole ของ ระบบบังคับเลี้ยวที่ตำแหน่งการเลี้ยว 1.2V ถึง 4.5V นั้น มีค่าเป็นลบหรืออยู่ทางด้านซ้ายมือของ S-plane และมีค่าจินตภาพรวมอยู่ด้วย นั้นหมายความว่าระบบจะมีผลตอบสนองในลักษณะที่ลดลงเรื่อยๆสมกับการแกว่งแต่ก็อยู่ในด้านที่สามารถควบคุมได้



ภาพที่ 125 เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณที่ได้จากการ Simulation วงเลี้ยวที่1

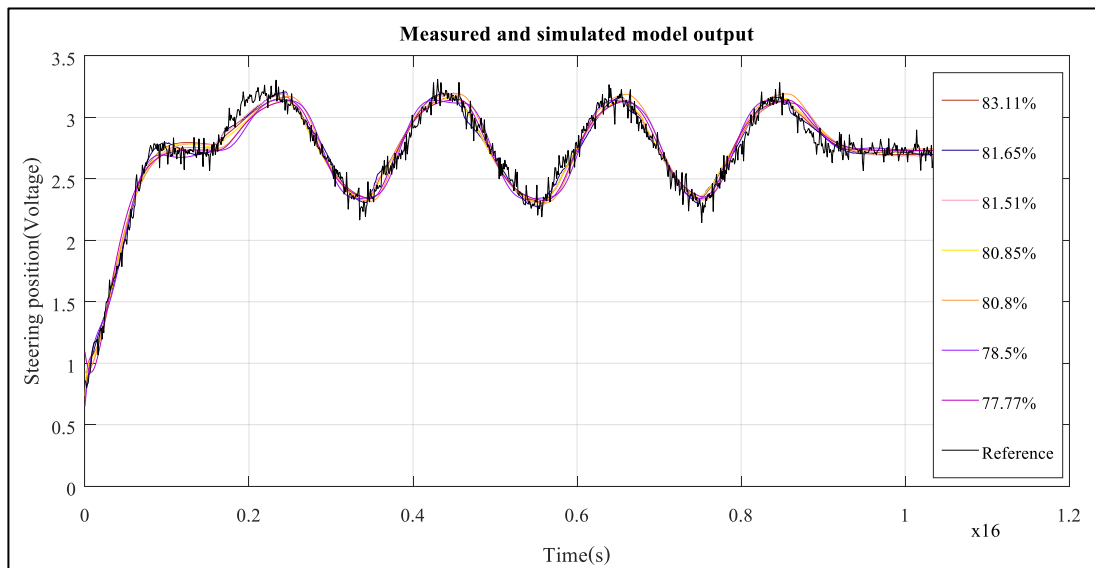
เมื่อได้สมการตัวแทนของระบบแล้ว จึงได้ทำการพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบโดยใช้ Input ที่เหมือนกัน ผลที่ได้แสดงใน ภาพที่ 125 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการโมเดลที่หาได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับโมเดลจริง ซึ่งสามารถนำโมเดลนี้ไปวิเคราะห์หาระบบควบคุมที่เหมาะสมบนโปรแกรมต่อไป

2 วงเลี้ยวที่ 2



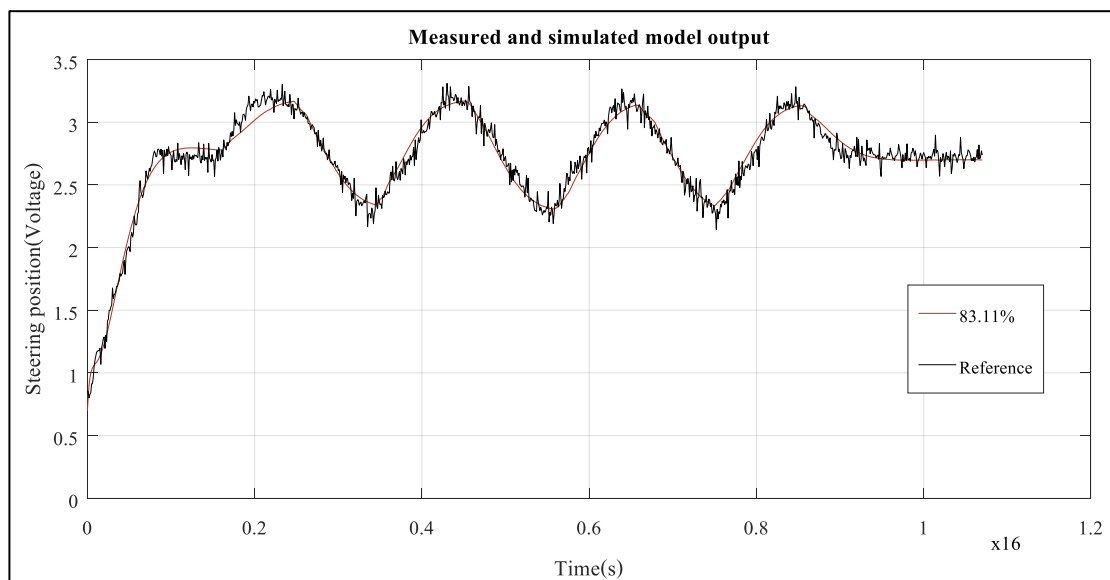
ภาพที่ 126 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงหรือ (Input (y1))และสัญญาณบอกตำแหน่งล้อ (Output(u1)) วงเลี้ยวที่ 2

จากข้อมูลที่ได้จึงนำมาหา สมการตัวแทนของระบบการเลี้ยวโดยใช้วิธี System identification Toolbox ในโปรแกรม Matlab Simulink ซึ่งผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 127



ภาพที่ 127 กราฟการหาค่า System identification วงเลี้ยวที่ 2

จากภาพที่ 127 แสดงถึงกราฟการหาสมการที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้มากที่สุดโดยในแต่ละค่านี้ ก็จะมีการหาค่าพารามิเตอร์ Pole และค่า Zero ที่ต่างกัน จนผลที่ได้น่าพึงพอใจ จากกราฟ มีความแม่นยำ สูงสุดที่ 88.11% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสมการนี้เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



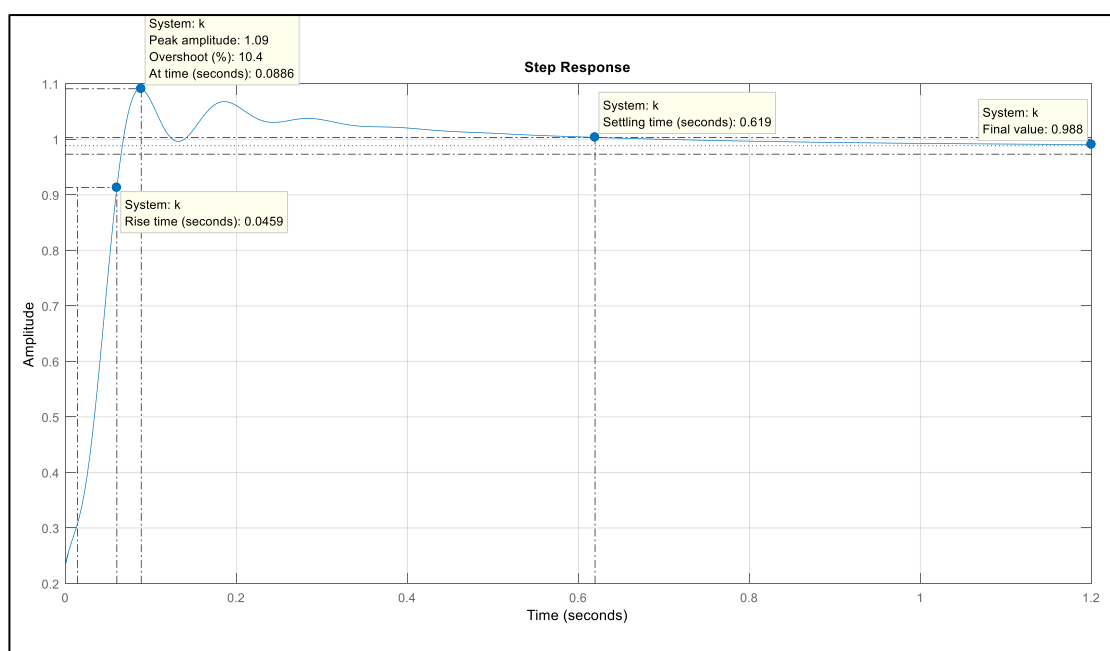
ภาพที่ 128 ค่า Sytem identification ที่ดีที่สุดวงเลี้ยวที่2

จากภาพที่ 128 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบการหาสมการโมเดลที่ใกล้เคียงที่สุด ซึ่งจาก กราฟจะได้สมการที่ออกมาตามสมการที่ 3.55

$$\frac{0.2337s^4 + 22.24s^3 + 849.3s^2 + 1.234e05s + 3.621e05}{s^4 + 62.33s^3 + 4877s^2 + 1.264e05s + 3.664e05} \quad (3.55)$$

(2.4) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในโดเมนเวลา

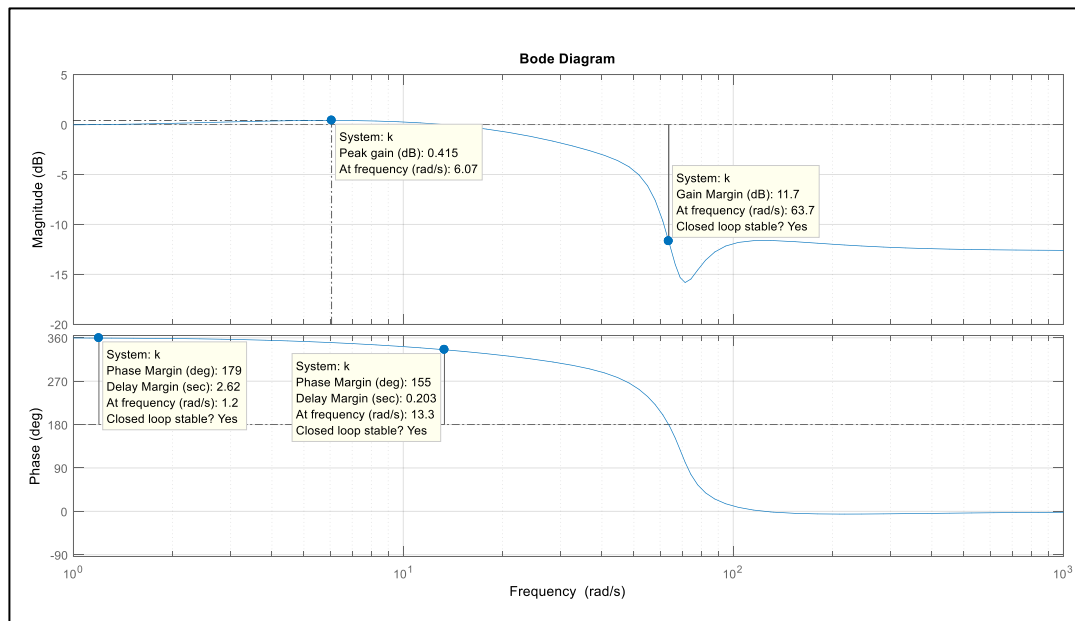
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบส่วนมากจะวิเคราะห์ในโดเมนของเวลาโดยวิเคราะห์จากผลตอบสนองด้วยการป้อนค่าเข้าสู่ระบบ ส่วนมากแล้วจะป้อนอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันได และมีเงื่อนไขการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่าต่อไปนี้คือ rise time, peak time, overshoot, settling time, final value



ภาพที่ 129 ผลตอบสนองต่อสัญญาณฟังก์ชันขั้นบันไดจากสมการจากสมการวงเลี้ยงที่ 2

จากภาพที่ 129 เป็นการตอบสนองของระบบบังคับเลี้ยวที่ตำแหน่งการเลี้ยว 2.3V ถึง 3.1V ผลที่ได้จากระบบคือระบบมีช่วงเวลาผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเอาต์พุตเพิ่มขึ้น rise time จาก 0%-100% เท่ากับ 0.0597 วินาที, มีค่าovershoot เท่ากับ 10.4 %, settling time 0.619 วินาที, มีค่า final value เท่ากับ 0.988

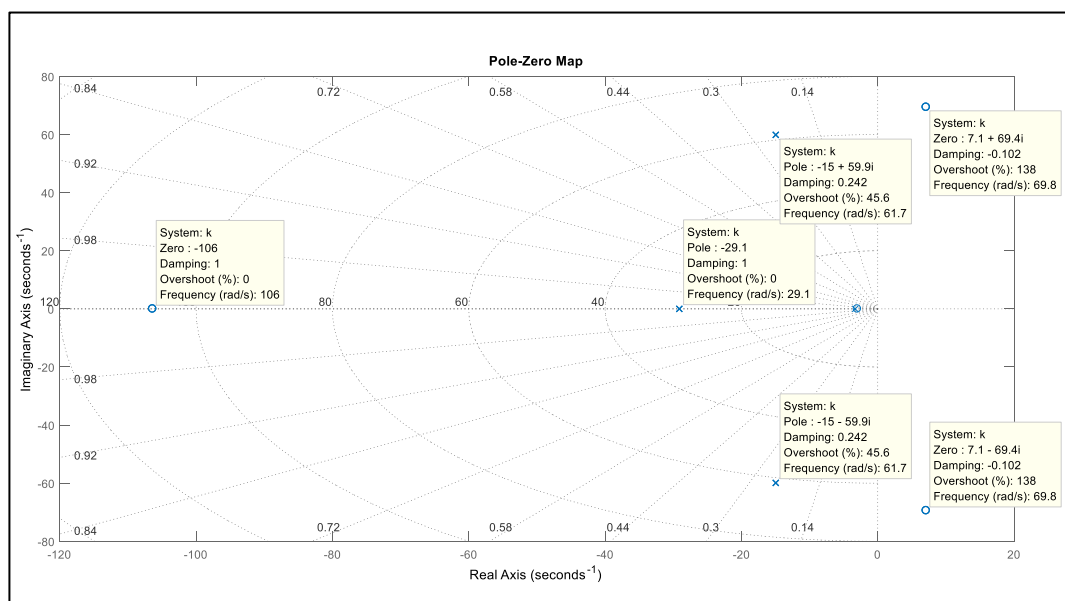
(2.5) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในโดความถี่



ภาพที่ 130 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบจากสมการวงเลี้ยงที่ 2

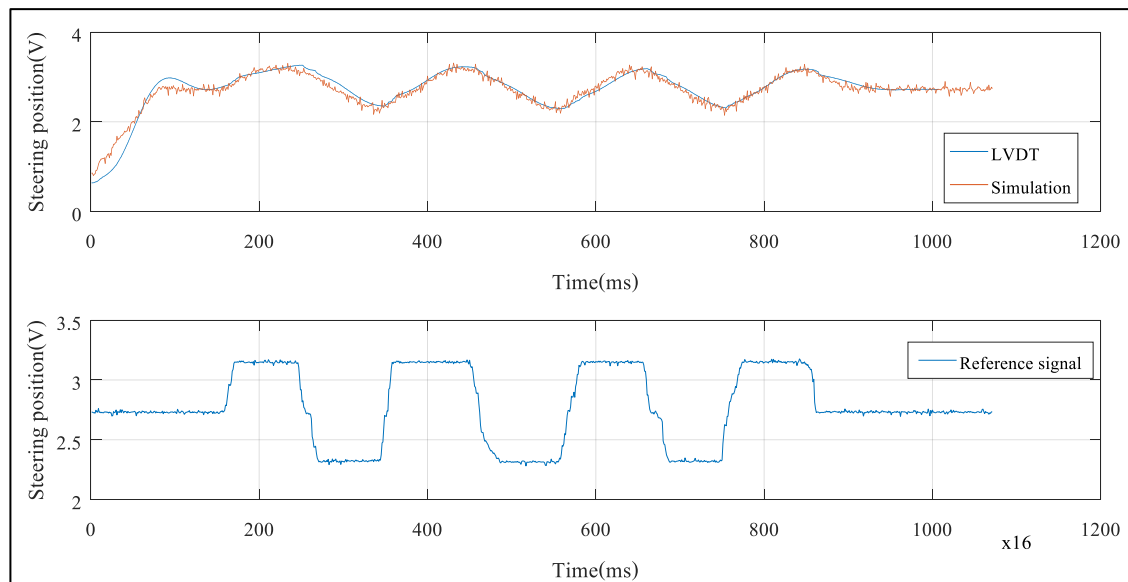
จากภาพที่ 130 กราฟ Bode plot ของสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเลี้ยงที่ตำแหน่งการเลี้ยง 2.3V ถึง 3.1V พบว่า ระบบมีค่าอัตราขยาย gain margin เท่ากับ 0.415 ซึ่งนั่นหมายความว่าระบบนั้นมีความเสถียรค่ามุมเฟส phase margin ของระบบมีค่า 155 deg ที่ 13.3 rad/s แสดงว่าระบบนั้นจะมีการแกว่งที่ลดลงเรื่อยๆ

(2.6) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วย pole-zero



ภาพที่ 131 ค่า Pole-Zero ของสมการวงเลี้ยงที่2

จากภาพที่ 131 พบว่าค่า pole ของ ระบบบังคับเลี้ยวที่ตำแหน่งการเลี้ยว 2.3V ถึง 3.1V นั้น มีค่าเป็นลบหรืออยู่ทางด้านซ้ายมือของ S-plane และมีค่าจินตภาพรวมอยู่ด้วย นั้นหมายความว่าระบบจะมี ผลตอบสนองในลักษณะที่ลดลงเรื่อยๆผสมกับการแกว่ง

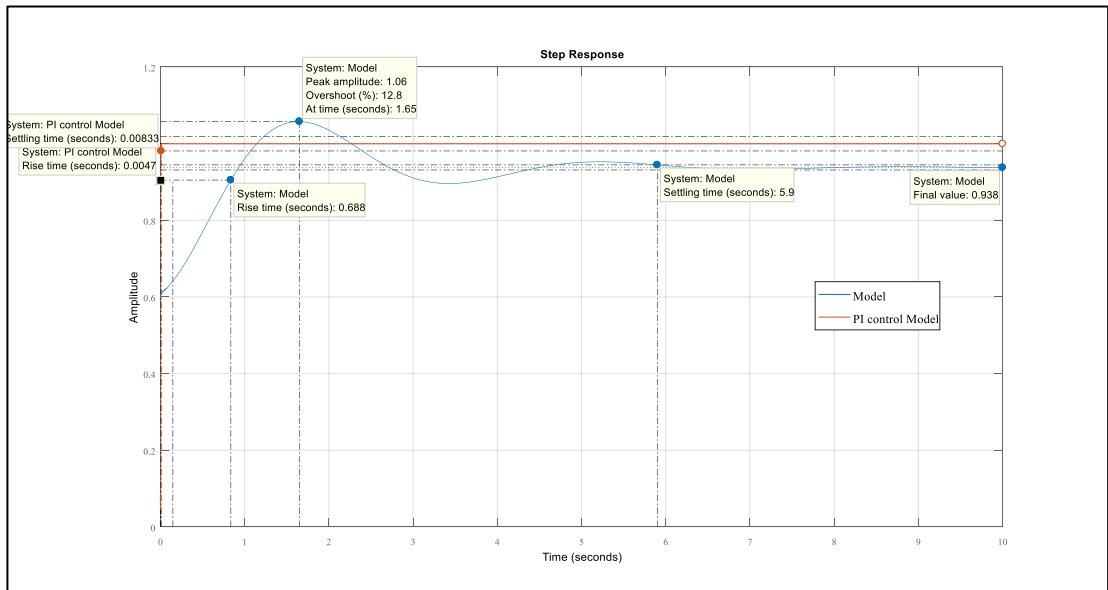


ภาพที่ 132 เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณที่ได้จากการ Simulation วงเลี้ยวที่ 2

เมื่อได้สมการตัวแทนของระบบแล้ว จึงได้ทำการพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบโดยใช้อินพุตที่เหมือนกัน ผลที่ได้แสดงในภาพที่ 132 Error! Reference source not found.

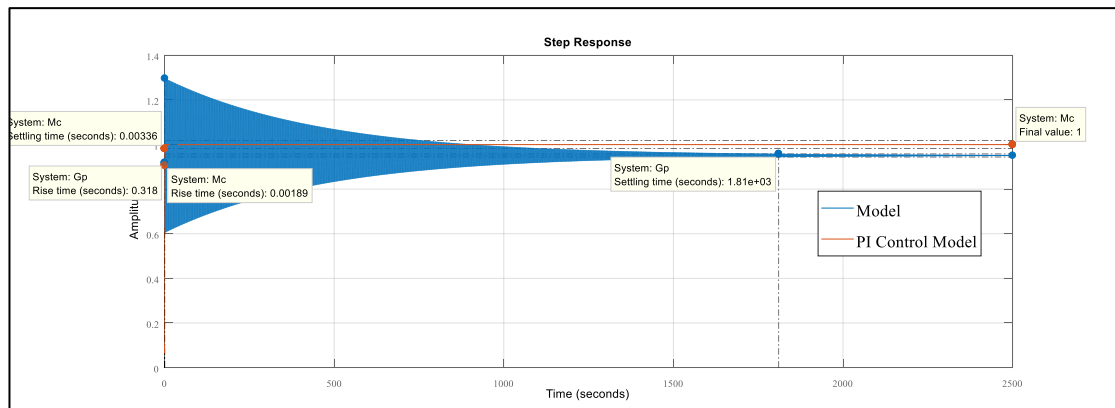
3 ทดลอง Optimization PID Controller

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยต้องการทำการทดลองเพื่อต้องการจะหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบ PID ที่เหมาะสมสำหรับสมการตัวแทนระบบที่หามาได้ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ PSO ซึ่งสมการตัวแทน จากสมการที่ 3.52 เป็นสมการตัวแทนระบบบังคับเลี้ยวจากด้านขวาไปซ้ายเมื่อนำสมการไปหาค่าการควบคุมแบบ PI จะได้ค่า เกณฑ์นี้ คือ $K_p=0.0760$ และ $K_i=802.5005$ จากนั้นจึงได้ทดสอบเปรียบเทียบดังภาพที่ 133



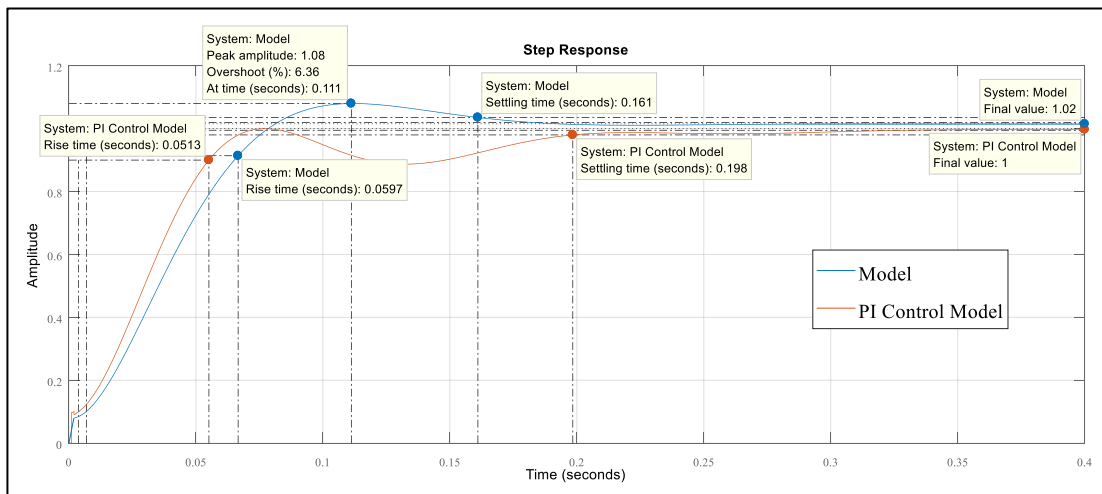
ภาพที่ 133 ทดลองค่าพารามิเตอร์ PI ที่ได้ กับตัวแทนระบบเลี้ยวจากขวาไปซ้าย

จากสมการที่ 3.54 เป็นสมการตัวแทนระบบบังคับเลี้ยวจากด้านซ้ายไปขวาเมื่อนำสมการไปหาค่าการควบคุมแบบ PI จะได้ค่า เกณฑ์นี้ คือ $K_p=0.1076$ และ $K_i=1.9786e+03$ จากนั้นจึงได้ทดสอบเปรียบเทียบดังภาพที่ 134



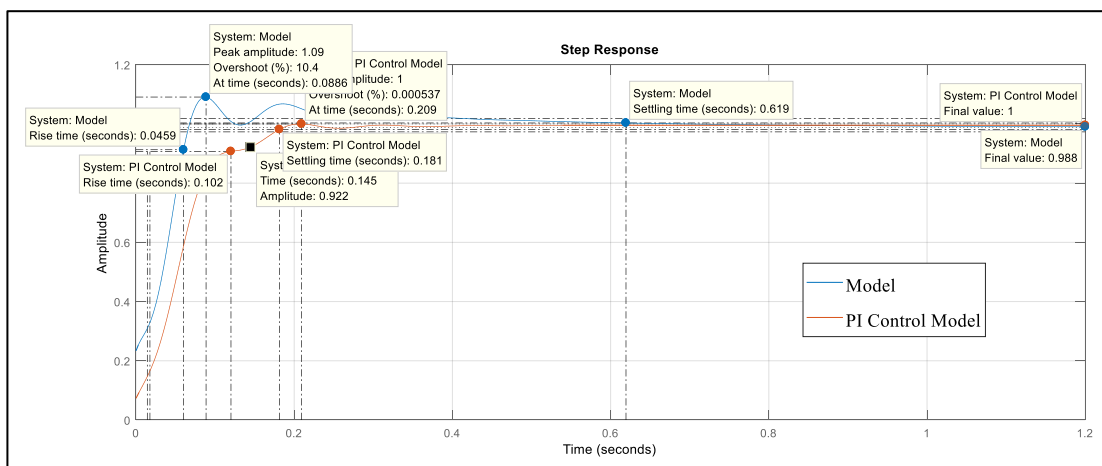
ภาพที่ 134 ทดลองค่าพารามิเตอร์ PI ที่ได้ กับตัวแทนระบบเลี้ยวจากซ้ายไปขวา

จากสมการที่ 3.54 เป็นสมการตัวแทนระบบบังคับเลี้ยวแบบวงเลี้ยวที่ 1 เมื่อนำสมการไปหาค่าการควบคุมแบบ PI จะได้ค่า เกณฑ์นี้ คือ $K_p=1.2381$ และ $K_i=24.4861$ จากนั้นจึงได้ทดสอบเปรียบเทียบดังภาพที่ 135



ภาพที่ 135 ทดลองค่าพารามิเตอร์ PI ที่ได้ กับตัวแทนระบบเลี้ยวแบบวงเลี้ยวที่ 1

จากสมการที่ 3.55 เป็นสมการตัวแทนระบบบังคับเลี้ยวแบบวงเลี้ยวที่ 2 เมื่อนำสมการไปหาค่าการควบคุมแบบ PI จะได้ค่า เกณฑ์นี้ คือ $K_p=0.3378$ และ $K_i=16.2322$ จากนั้นจึงได้ทดสอบเปรียบเทียบดังภาพที่ 136

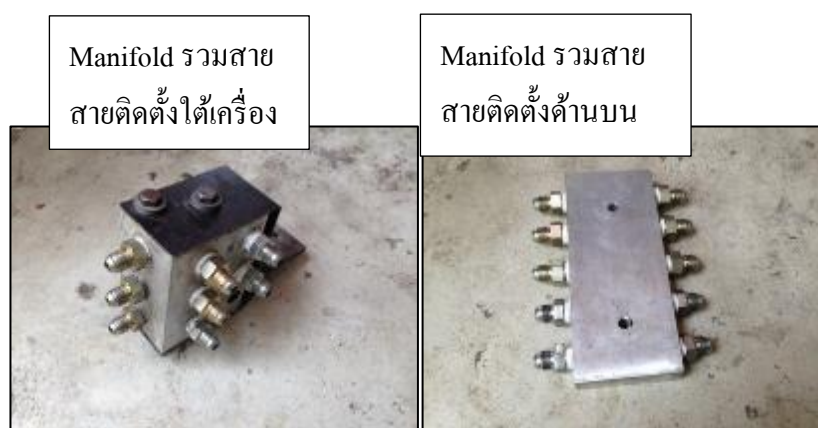


ภาพที่ 136 ทดลองค่าพารามิเตอร์ PI ที่ได้ กับตัวแทนระบบเลี้ยวแบบวงเลี้ยวที่ 2

3.6 ปรับปรุงชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนฯ

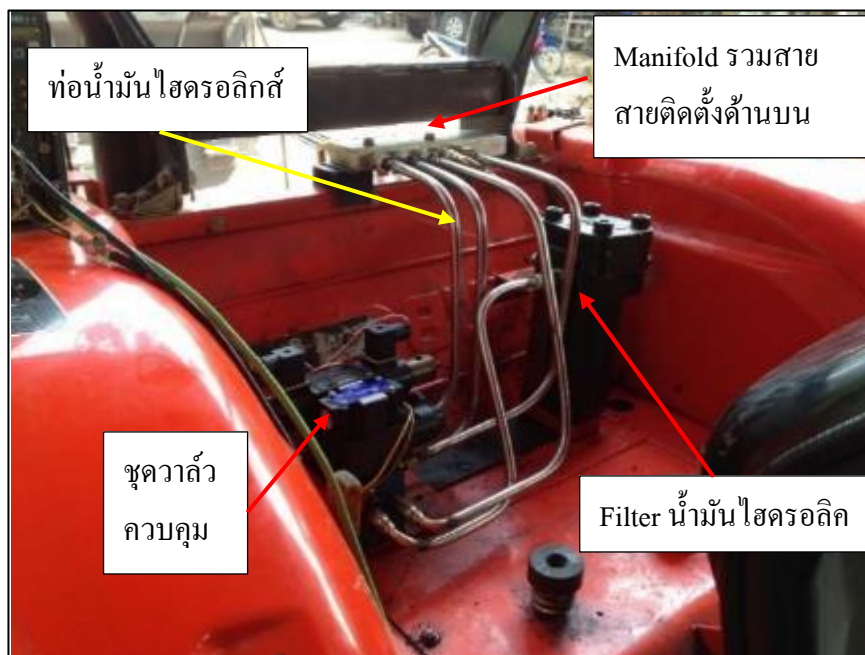
3.6.1 ปรับปรุงระบบไฮดรอลิกส์เดิม

เนื่องจากระบบไฮดรอลิกส์เดิมนั้นมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ไม่เป็นระเบียบเรียบร้อยแต่ก็ได้มีการทดสอบแล้วว่าระบบไฮดรอลิกส์ที่ออกแบบและติดตั้งไปนั้นใช้ได้ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิด ออกแบบปรับปรุงระบบเดิมให้ดูดีขึ้นด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งจุดติดตั้งใหม่ ดังภาพ 3.29 และเปลี่ยนท่อใหม่ให้เป็นท่อสแตนเลสตัดเพื่อความเรียบร้อยและง่ายต่อการตรวจสอบซ่อมแซม ซึ่งในระบบเดิมนั้นล๊อคใช้ข้อต่อจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นข้อต่อทางเดียว หรือสองทาง ทำให้เก็บสายไฮดรอลิกส์ ได้ยาก ดังนั้นจึงได้ออกแบบใหม่ ทำจุดเชื่อมต่อให้อยู่ในชุดเดียวกัน หรือ เรียกว่า Manifold ดังภาพที่ -



ภาพที่ 137 ชุด Manifold ที่ออกแบบใหม่

หลังจากติดตั้งพร้อมกับท่อแล้วก็ทำให้เพิ่มพื้นที่ว่างมากขึ้นและเป็นระเบียบ ดังภาพที่ 138



ภาพที่ 138 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งชุดไฮดรอลิกส์(ปรับปรุง)



ภาพที่ 139 แสดงถึงการวางท่อไฮดรอลิกส์

3.7. ทำการทดสอบชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนในภาคสนามภายใต้พื้นที่ที่มีความลาดเอียงและการเตรียมดินต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับ และประเมินผล

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ออกแบบและติดตั้งระบบบังคับเลี้ยวอัตโนมัติลงบนรถแทรกเตอร์เสร็จเรียบร้อยแล้วนั้น ในลำดับถัดไปจึงเป็นการทดลองระบบที่ได้ติดตั้งไปเพื่อเก็บข้อมูลวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นและปรับปรุงการทดลองต่อไป

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อต้องการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

ออกแบบการทดลอง

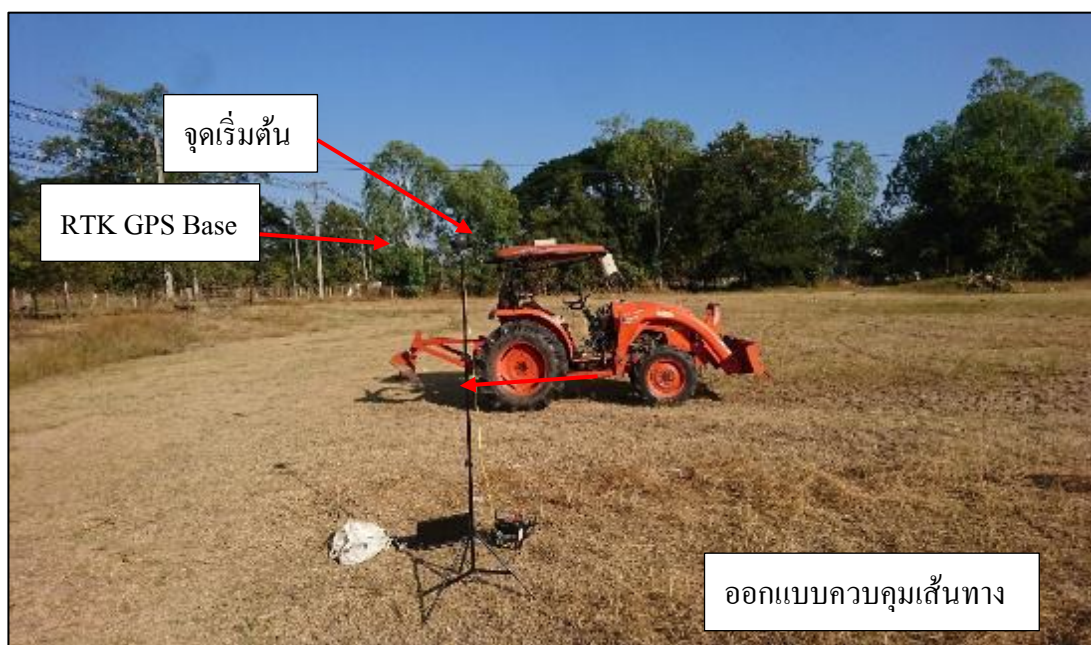
ในการทดลองผู้วิจัยต้องการให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงให้ได้ก่อนโดยออกแบบให้เคลื่อนที่จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 เป็นเส้นตรง โดยที่ติดตั้งรถแทรกเตอร์ไว้ที่จุด H ตอนเริ่มต้น เมื่อปล่อยรถแทรกเตอร์ออกไปรถแทรกเตอร์จะเคลื่อนที่จากจุด H ไปยังจุดที่ 1 เองอัตโนมัติ เมื่อถึงจุดที่ 1 รถแทรกเตอร์จะถูกควบคุมให้วิ่งเป็นเส้นตรง เมื่อมาถึงจุดที่ 2 รถแทรกเตอร์จะวิ่งกลับมายังจุด H อัตโนมัติ ในการทดลองนี้จะสนใจวิเคราะห์เฉพาะช่วงจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 เท่านั้น ในการทดลองครั้งนี้ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่คงที่เท่ากับ 0.2 m/s ผลจากการออกแบบเส้นทางในโปรแกรมดังแสดงใน

Error! Reference source not found. 140



ภาพที่ 140 ออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ผ่านโปรแกรม Qground control

ภาพที่ 141 การออกแบบเส้นทางนั้น ระยะทางจากจุดที่ 1 และ 2 ห่างกัน ประมาณ 90 เมตร แต่ละจุดของ Waypoint นั้นถ้าหากทราบพิกัด Latitude, Longitude ที่แน่นอนสามารถกำหนดตำแหน่งโดยกรอกพิกัดจุดลงไปได้เลย แต่ในการทดลองนี้เน้นการทดลองให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ป็นเส้นตรงให้ได้ก่อนจึงไม่จำเป็นต้องทราบพิกัดที่แน่นอน เพียงแต่กำหนดจุดจากกราฟฟิคในโปรแกรมได้เลยและในการกำหนดต้องคำนึงถึงสิ่งกีดขวางต่างๆที่ในแผนที่อาจมองไม่เห็นเนื่องแผนที่อาจจะยังไม่อัปเดต สำหรับการเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์นั้นผู้วิจัยจะเก็บออกมาในหน่วยของแรงดันไฟฟ้า(Voltage) เนื่องจากมีความสะดวกมากกว่า และก่อนหน้านี้ผู้วิจัยได้มีการทดลองหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมที่เหมาะสมแล้ว ดังนั้นในการทดลองนี้จึงกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆในโปรแกรมไว้คงที่ก่อนเพื่อให้สามารถตีกรอบในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สนใจแล้วจึงวิเคราะห์และปรับปรุงค่าไปเรื่อยๆ

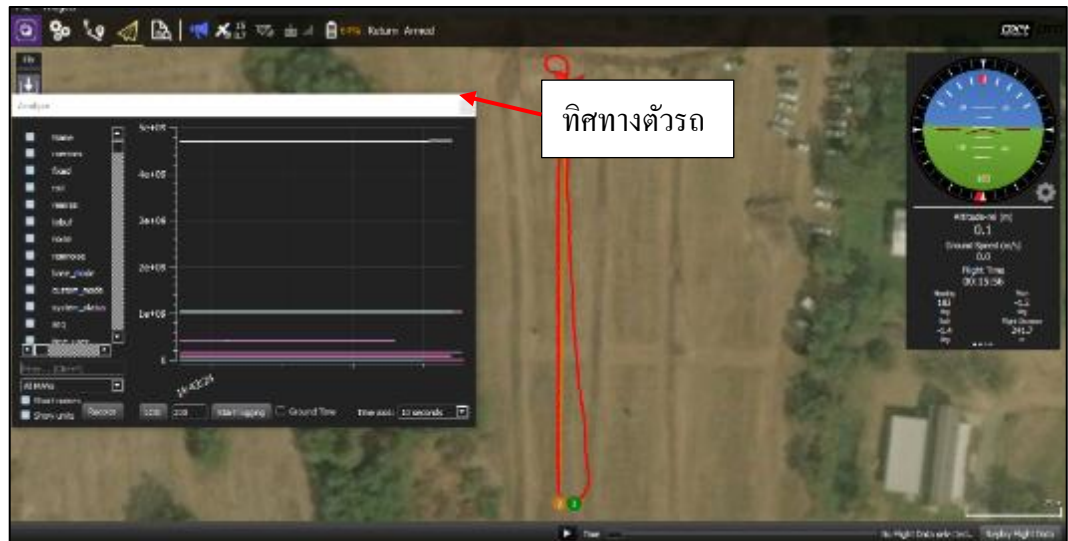


ภาพที่ 141 จุด H หรือจุดเริ่มต้นของรถแทรกเตอร์

เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้และชุดควบคุมได้นำเอาระบบที่สำเร็จมาแล้วมาประยุกต์ใช้แต่ใช้กับรถของเล่นที่มีขนาดเล็กและระบบการเลี้ยวนั้นมีมวลและความเฉื่อยน้อยมากทำให้ขับเคลื่อนการเลี้ยวด้วย Servomotor นั้นมีความแม่นยำมาก แต่เมื่อนำเอาสัญญาณควบคุมนี้มาประยุกต์ใช้กับรถแทรกเตอร์ซึ่งมีมวลและความเฉื่อยของระบบบังคับเลี้ยวที่มีค่ามากจึงทำให้ระบบที่จะควบคุมนั้นอาจตอบสนองต่อสัญญาณที่ช้า อีกทั้งระบบควบคุมที่นำมาใช้นั้นมีการควบคุมความเร็วความเร็วด้วยทำให้ระบบยิ่งแม่นยำมากขึ้น แต่บนรถแทรกเตอร์ไม่ได้นำระบบนี้มาใช้ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ต้องล๊อคคันเร่งและเกียร์ค้างไว้ ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงเพื่อต้องการทราบองศาตำแหน่งการเลี้ยวของล้อที่เหมาะสมที่ระบบควบคุมจะทำให้รถแทรกเตอร์เดินทางตามเส้นตรงที่กำหนดเส้นทางด้วย GPS

3.7.1. การทดลองที่ 1 ทดลองเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์เบื้องต้น

การทดลองนี้ต้องการข้อมูลมาวิเคราะห์เบื้องต้นก่อนจึงได้กำหนดความกว้างของมุมล้อที่ตำแหน่งซ้ายสุดที่ประมาณ 1.2 V และขวาสุดที่ 4.5 V ตำแหน่งกึ่งกลางอยู่ที่ 2.72 V และใช้พารามิเตอร์การควบคุมคงที่ การทดลองนี้ใช้เวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรม Qground control ดังภาพที่ 142



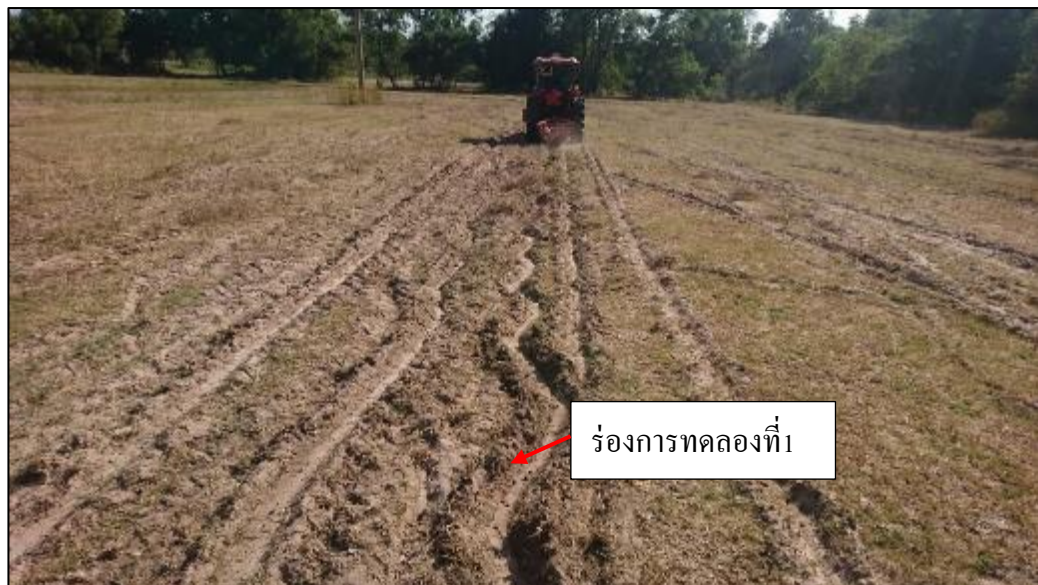
ภาพที่ 142 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 1

จากภาพที่ 142 ภาพขยายจากกราฟฟิกในโปรแกรม ลูกศรสีแดงแสดงถึงรถแทรกเตอร์และหัวลูกศรแสดงถึงทิศของรถ เส้นสีแดงแสดงถึงเส้นทางที่รถวิ่งจริง เส้นสีเหลืองคือเส้นทางที่กำหนด ในช่วงแรกจากจุด H ไปยังจุดที่ 1 ไม่ได้กำหนดเส้นทางดังนั้นในช่วงนี้รถแทรกเตอร์จะมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เมื่อถึงจุดที่ 1 รถแทรกเตอร์จะเคลื่อนที่เป็นแนวเดียวกับเส้นตรงระหว่างจุดที่ 1 กับ 2 แต่ก็มีอาการส่ายไปมาอยู่ตลอดตามแนวเส้น เมื่อถึงจุดที่ 2 แล้วไปยัง จุดที่ 3 จุดนี้คือคำสั่งให้รถวิ่งกลับไปยังจุด H เหมือนเดิม ซึ่งหมายถึงจบภารกิจ

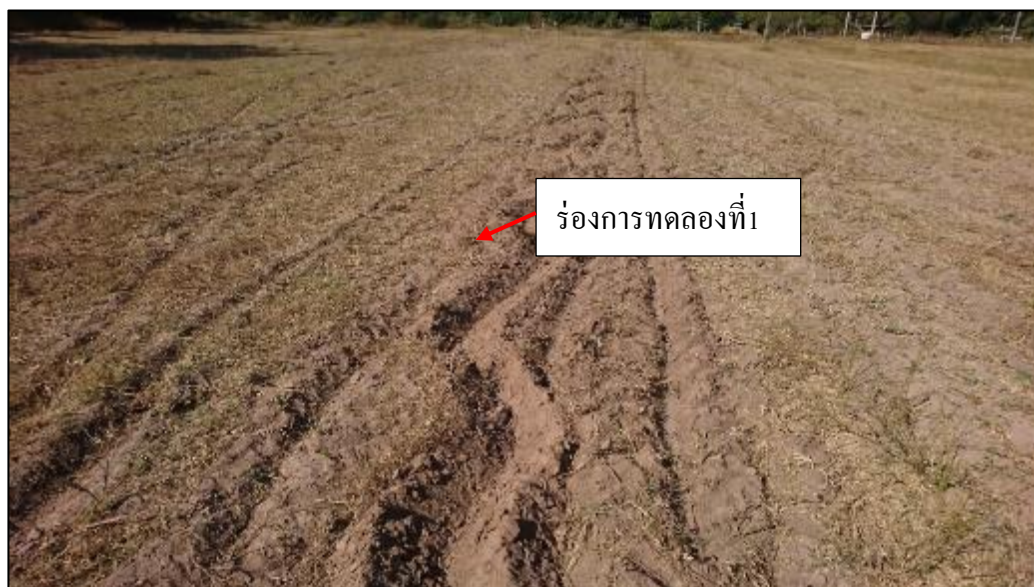


ภาพที่ 143 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 1

จากภาพที่ 143 เป็นการทดลองบนพื้นที่จริง จะเห็นได้ว่าร่องรอยของการไถนั้นมีลักษณะการแกว่งไปมาตามแนวระยะของเส้นทางจากจุดที่ 1 ไปยัง จุดที่ 2 และเคลื่อนที่ตามเส้นที่กำหนดไว้ ดังนั้นการทดลองนี้แสดงว่ารถแทรกเตอร์มีการเคลื่อนไปในทิศทางที่ถูกต้องแต่มีการแกว่งอยู่ตลอดเวลาระหว่างเส้นทางตลอดเวลา

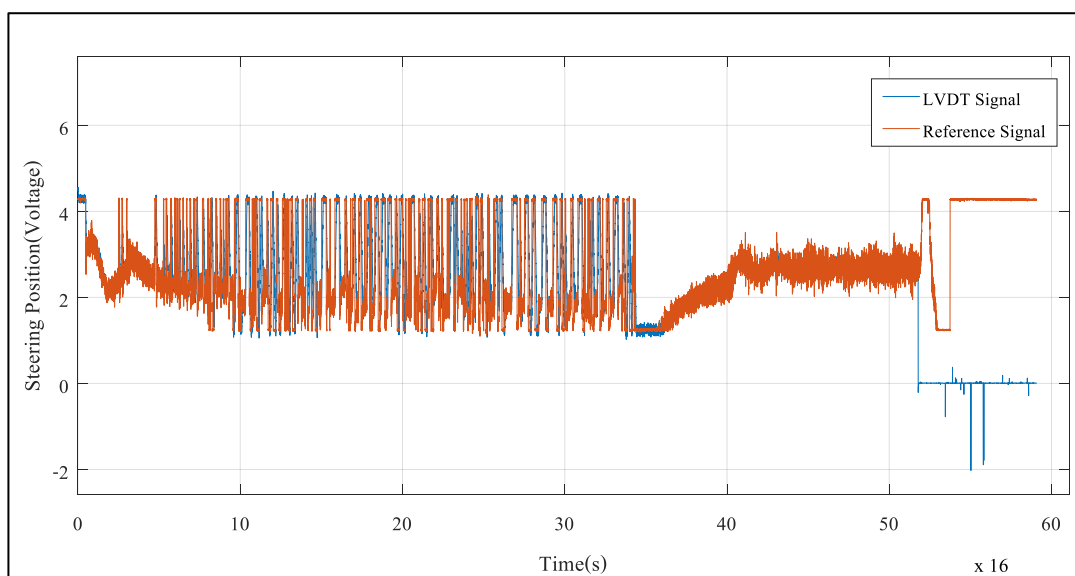


ภาพที่ 144 ภาพรวมเส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 1



ภาพที่ 145 รายละเอียดเส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 1

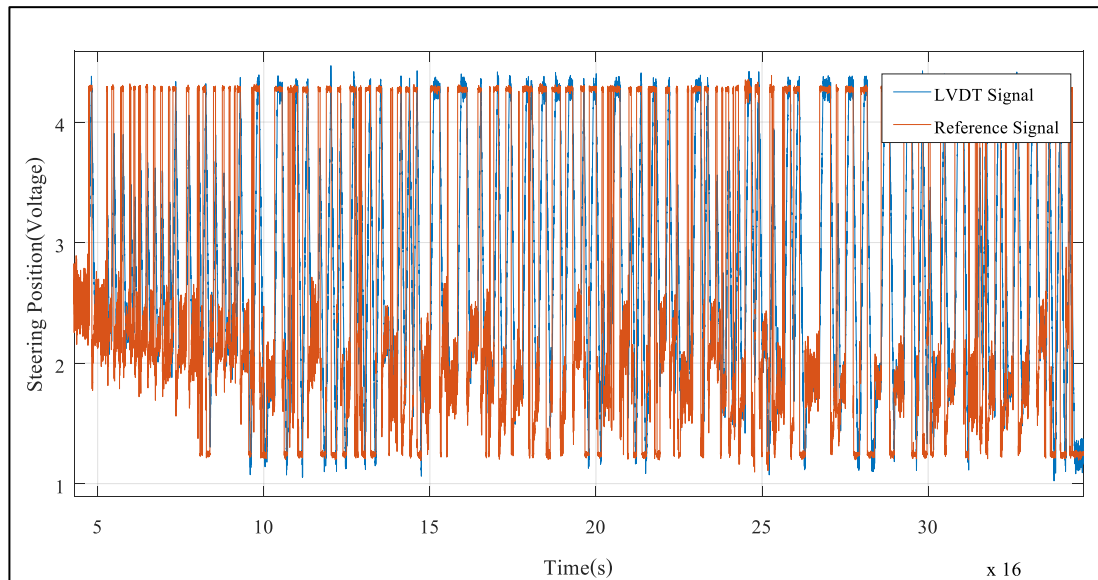
จากผลการทดลองจริงจึงได้นำข้อมูลที่เก็บได้จากโปรแกรม มาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของการส่ายไปมาดังภาพที่ 146 สีแสดง คือ สัญญาณอ้างอิง และสีฟ้าคือสัญญาณวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของล้อ (LVDT)



ภาพที่ 146 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อของการทดลองที่ 1

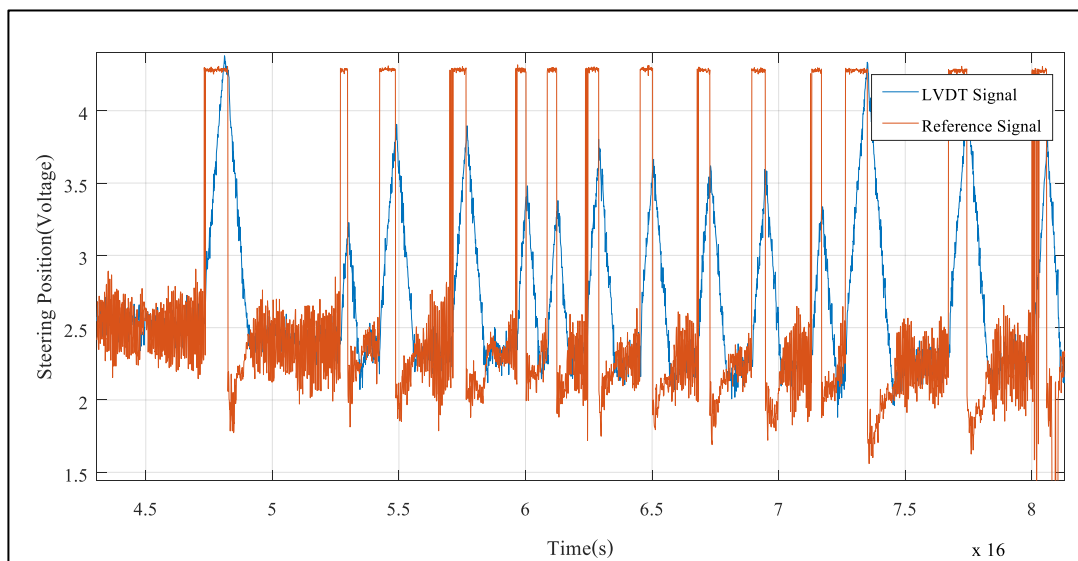
จากภาพที่ 146 แสดงถึงกราฟการเคลื่อนตำแหน่งของล้อโดยรวมทั้งการทดลองจากกราฟจะเห็นว่าในช่วงตำแหน่งจากจุด H ไปยังจุดที่ 1 กราฟของ LVDT signal และ Reference signal สัญญาณ LVDT มีการลู่อเข้าหาสัญญาณ Reference signal ลักษณะสัญญาณจะไม่แกว่งไปมามากนักมีการค่อยๆปรับ

ทิศทางของรถแทรกเตอร์เรื่อยๆจนมาถึงตำแหน่งจุดที่อยู่ในช่วง 1 และ 2 สัญญาณมีการแกว่งสลับไปมาอย่างมากจนเมื่อสิ้นสุดจุดที่ 2 แล้วสัญญาณก็กลับมาอยู่ในลักษณะเหมือนเดิมและรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่กลับไปยังจุด H เป็นอันสิ้นสุดการทดลองที่ 1



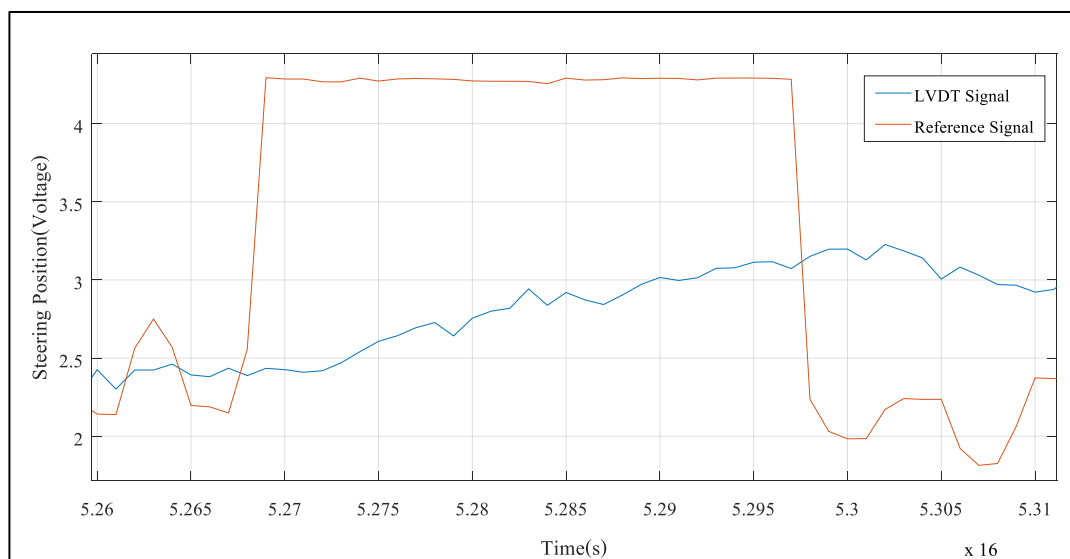
ภาพที่ 147 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงจุดที่ 5 ไป 25 ของการทดลองที่ 1

จากนั้นจึงได้ขยายกราฟการทดลองตามภาพที่ 148 เป็นการขยายช่วงเวลาที่ 5 และ 25 ค่าตำแหน่งของล้ออยู่ระหว่างประมาณ 1.2-4.5 V มีการแกว่งสลับของล้อไปมากระหว่างการทดลอง ซึ่งนี่คือสาเหตุว่าทำไมรถถึงวิ่งสลับไปมาอยู่ตลอดเวลา



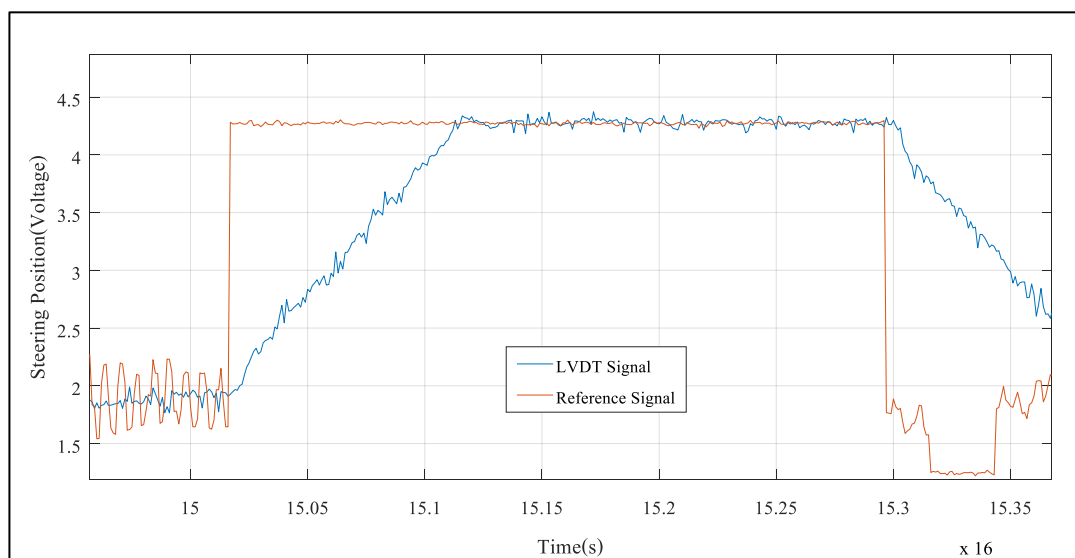
ภาพที่ 148 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของล้อเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ช่วงจุดที่ 4.5ไป 8 ของการทดลองที่ 1

จากนั้นจึงได้ขยายกราฟการทดลองตามลงไปอีกจากภาพที่ 149 เป็นการขยายช่วงเวลาที่ 4.5 และ 8 จากภาพจะเห็นผลตอบสนองของล้อต่อสัญญาณ Reference signal ซึ่งอธิบายได้ว่าอาการส่ายไปมาของล้อเกิดจากสัญญาณ Reference signal นั้นมีความชันมากเกินไปทำให้ล้อเลี้ยวตามไม่ทันระบบควบคุมจึงพยายามสั่งมากขึ้นเรื่อยๆจึงเกิดเป็นความชันที่มาก



ภาพที่ 149 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 1

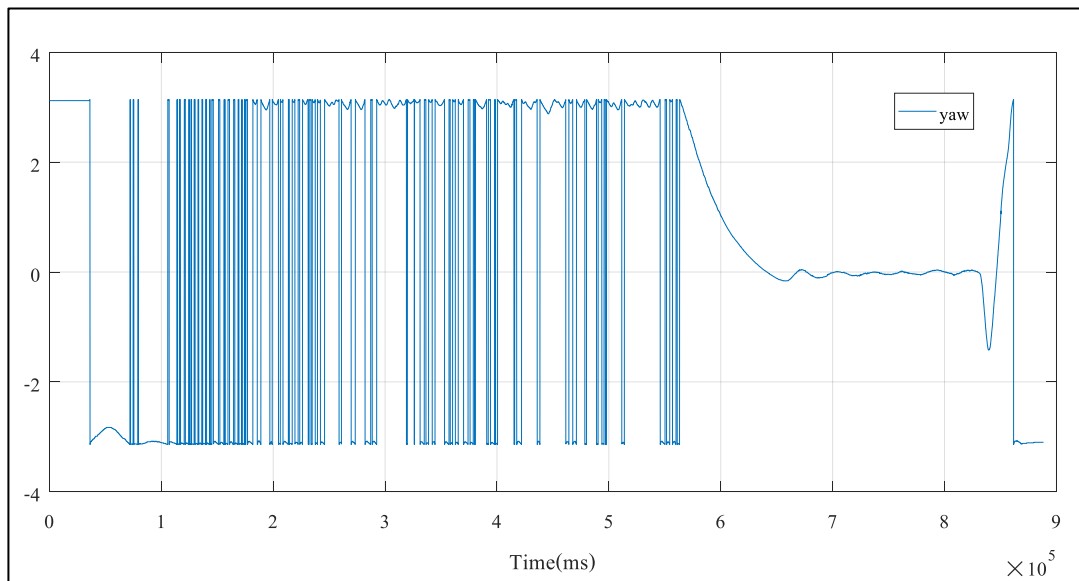
จากนั้นจึงได้ขยายกราฟการทดลองตามลงไปอีกจากภาพที่ 150 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Reference signal กับสัญญาณ LVDT signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ของล้อ เพื่อดูผลการทำงานทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล้อนี้น้อยมากจนทำให้ล้อนั้นเลี้ยวตามไม่ทัน



ภาพที่ 150 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่มีย่านมากของการทดลองที่ 1

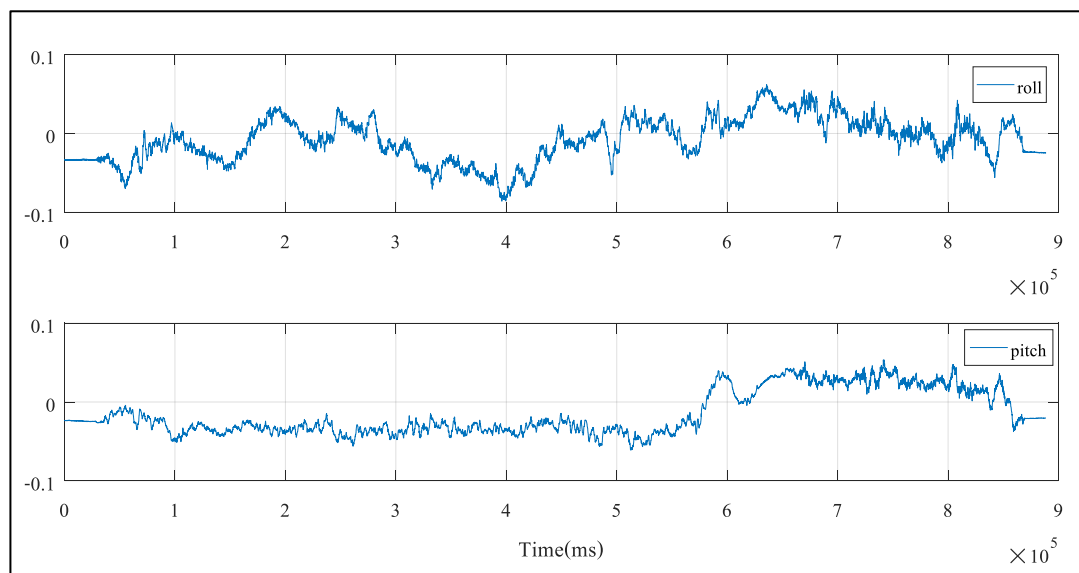
จากนั้นจึงได้ขยายกราฟการทดลองตามลงไปอีกจากภาพที่ 151 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Reference Signal กับสัญญาณ LVDT Signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณอ้างอิงไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงานทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าเมื่อระบบควบคุมใช้เวลาสั่งคำสั่งที่มากขึ้นก็ทำให้ล้อนั้นมีการเลี้ยวได้ถึงตำแหน่งที่กำหนด

ค่าที่เก็บจากโปรแกรม Qground control นั้น จะประกอบไปด้วย ค่า roll pitch yaw ค่า Servomotor output ค่า velocity กราฟค่า roll pitch และ yaw ที่เก็บมาได้จากโปรแกรมนั้นไม่ได้ระบุหน่วยมาให้มีค่า อยู่ในช่วง -3 ถึง 3 แต่ทางผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อหาความหมายของค่านี้แล้วซึ่งหมายถึงการหมุนมุมค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 3 หมายถึง 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านขวา และค่าที่อยู่ในช่วง 0 จนถึง -3 หมายถึง การหมุนมุมจาก 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านซ้าย

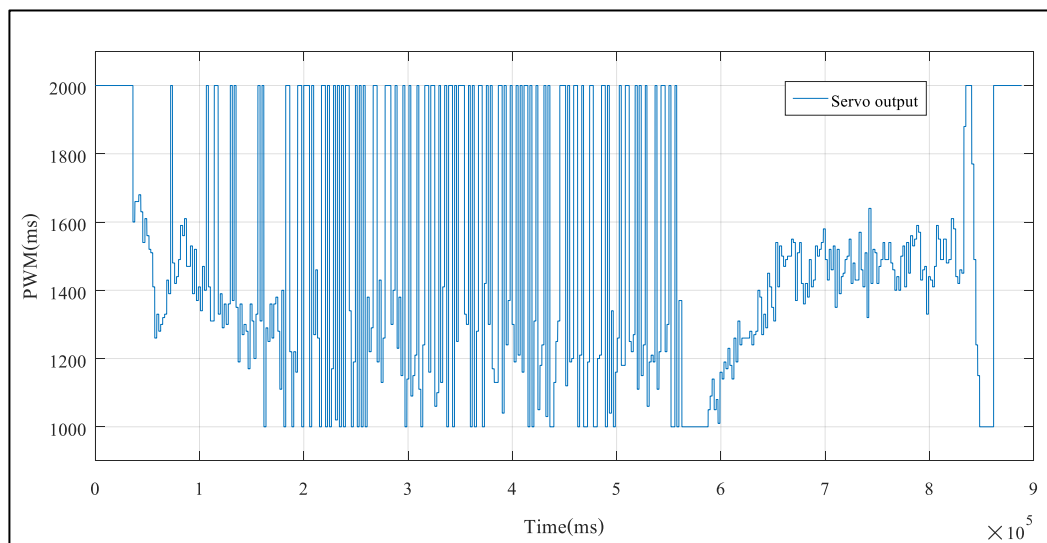


ภาพที่ 151 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 1

จากภาพที่ 151 กราฟค่ามุม yaw ในช่วงจุดที่ H ถึงจุดที่ 1 มุม yaw แกว่งไปมาระหว่าง 3 และ -3 แต่เมื่อถึงช่วงระหว่างจุดที่ 1 และ 2 ค่าจะสลับกลับไปมาแต่มีความถี่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดจุดที่ 2 การแกว่งก็จะหายไปส่วนภาพที่ค่ามุม roll และ pitch มีค่าน้อยมากดังภาพที่ 3.125

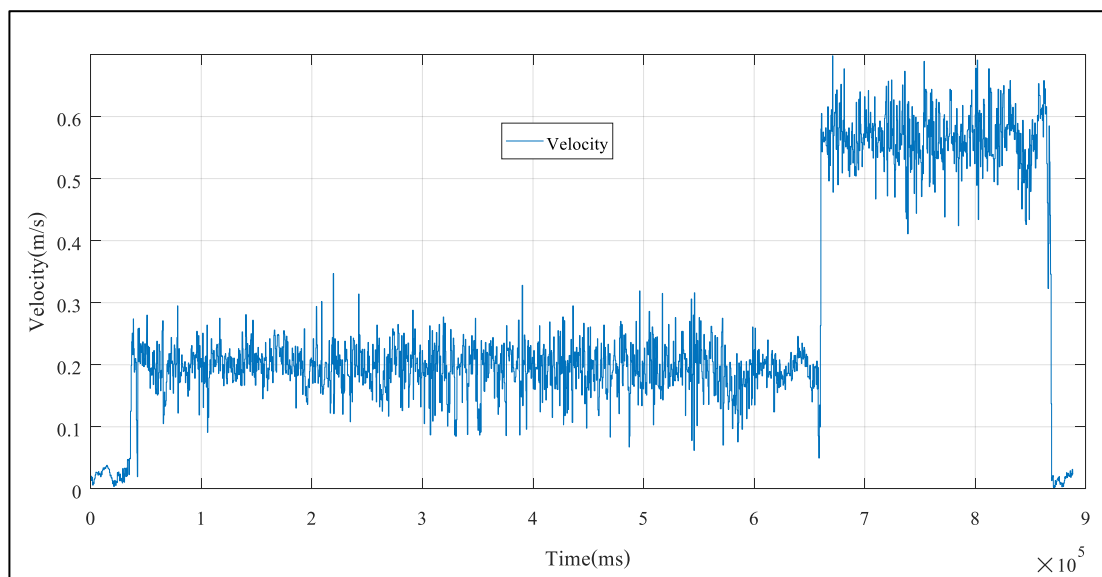


ภาพที่ 152 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 1



ภาพที่ 153 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor ของการทดลองที่ 1

จากภาพที่ 153 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณ ที่ใช้สั่ง Servomotor ซึ่งในที่นี้เราใช้สัญญาณนี้เพื่อให้เป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับควบคุมตำแหน่งล้อ จากกราฟอธิบายได้ว่าปัญหาการส่ายของล้อหลักๆแล้วมาจากสัญญาณนี้ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ส่งไปมีความชันที่มากไม่มีการไล่ระดับจึงทำให้ล้อเคลื่อนตำแหน่งไม่ทัน ในการทดลองนี้ใช้ความเร็วประมาณ 0.2 m/s ดังError! Reference source not found.154



ภาพที่ 154 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 1

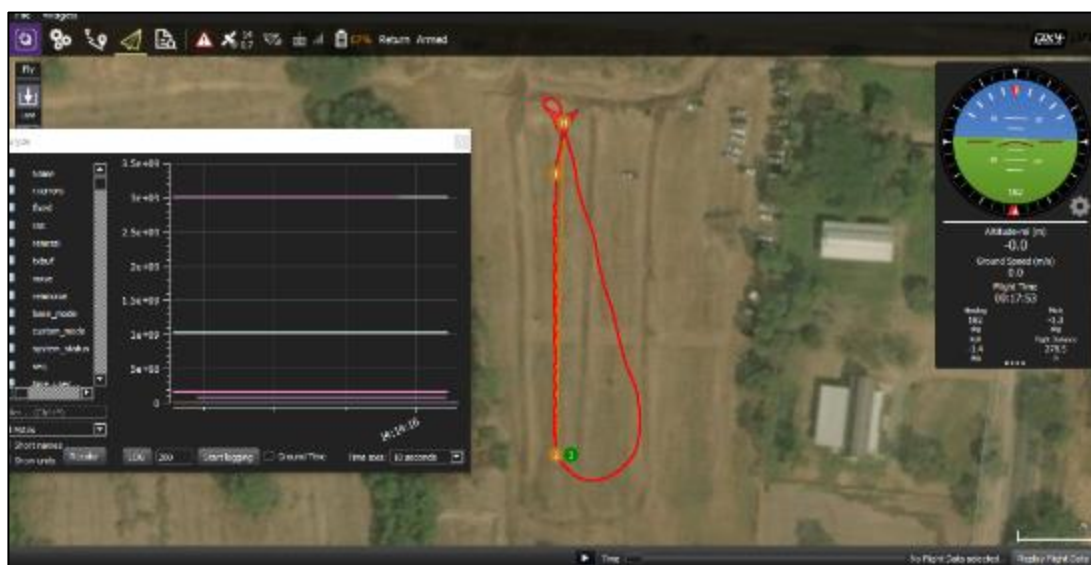
สรุปจากการทดลองที่ 1 ผลคือการส่ายไปมาของรถแทรกเตอร์นั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากสัญญาณที่ส่งมาจากตัวควบคุมมีการสั่งค่าที่เร็วมากเกินไปจึงส่งผลให้ล้อของรถแทรกเตอร์นั้นเคลื่อนที่ตามไม่ทันจึงเกิดอาการส่ายเกิดขึ้นและยังมุมการเลี้ยวกว้างเท่าใหรยังทำให้ร่องการเคลื่อนที่นั้นกว้างกว่าเดิม ซึ่งวิธี

แก้ไขนั้นต้องเข้าไปแก้ไขในตัวโปรแกรมชุดควบคุมภายใน ภายในเล่มนี้จะศึกษาเฉพาะการนำเอาชุดควบคุมนี้ มาใช้งานและปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆที่โปรแกรมมีมาให้เท่านั้นแต่จะไม่มีแก้ไขโปรแกรมข้างในซึ่ง อาจจะแก้ไขและศึกษาในอนาคต

ดังนั้นในการทดลองต่อไปผู้วิจัยได้เห็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้รถแทรกเตอร์เลี้ยวล้อไม่ทัน จึงได้คิด การทดลองขึ้นมาโดยใช้การลดระยะการเลี้ยวหรือมุมมองการเลี้ยวของรถลดลงเพื่อต้องการให้การเลี้ยวของ ล้อตอบสนองต่อสัญญาณ Reference signal ของล้อ

3.7.2 การทดลองที่ 2 ปรับมุมล้อโดยยังไม่มีกรองสัญญาณ

การทดลองนี้ใช้ความกว้างของตำแหน่งการเลี้ยวที่ตำแหน่งซ้ายสุดที่ประมาณ 2.3 V และขวาสุด ที่ 3.1 V ตำแหน่งกึ่งกลางอยู่ที่ 2.72 V การทดลองนี้ใช้เวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรม Qground control ดังภาพที่ 155



ภาพที่ 155 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่2

จากภาพที่ 155 ภาพขยายจากกราฟฟิกในโปรแกรม ลูกศรสีแดงแสดงถึงรถแทรกเตอร์และหัว ลูกศรแสดงถึงทิศของรถ เส้นสีแดงแสดงถึงเส้นทางที่รถวิ่งจริง เส้นสีเหลืองคือเส้นทางที่กำหนด ในช่วงแรก จากจุด H ไปยังจุดที่ 1 ไม่ได้กำหนดเส้นทางดังนั้นในช่วงนี้รถแทรกเตอร์จะมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เมื่อถึงจุดที่ 1 รถแทรกเตอร์จะเคลื่อนที่เป็นแนวเดียวกับเส้นตรงระหว่างจุดที่ 1 กับ 2 แต่ก็มีอาการส่ายไป มาอยู่ตลอดตามแนวเส้น เมื่อถึงจุดที่ 2 แล้วไปยัง จุดที่ 3 จุดนี้คือคำสั่งให้รถวิ่งกลับไปยังจุด H เหมือนเดิม ซึ่ง หมายถึงจบภารกิจ

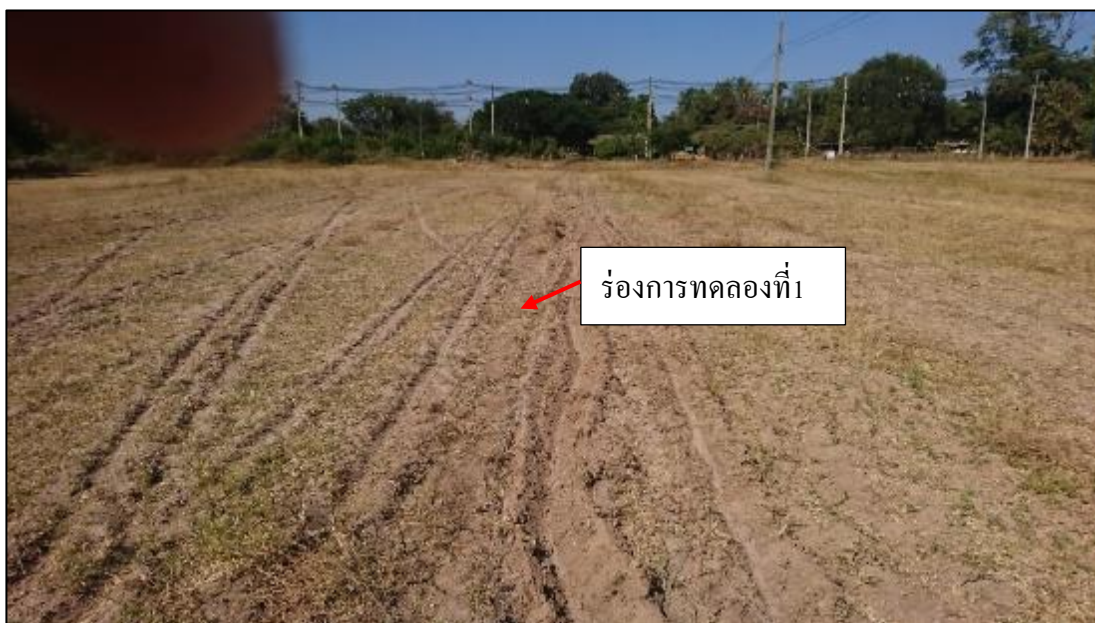


ภาพที่ 156 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่2

จากภาพที่ 156 เป็นการทดลองบนพื้นที่จริง จะเห็นได้ว่าร่องรอยของการไถนั้นมีลักษณะการแกว่งไปมาที่น้อยลงกว่าการทดลองที่ 1 ตามแนวระยะของเส้นทางจากจุดที่ 1 ไปยัง จุดที่ 2 และเคลื่อนที่ตามเส้นที่กำหนดไว้ ดังนั้นการทดลองนี้แสดงว่ารถแทรกเตอร์มีการเคลื่อนไปในทิศทางที่ถูกต้อง

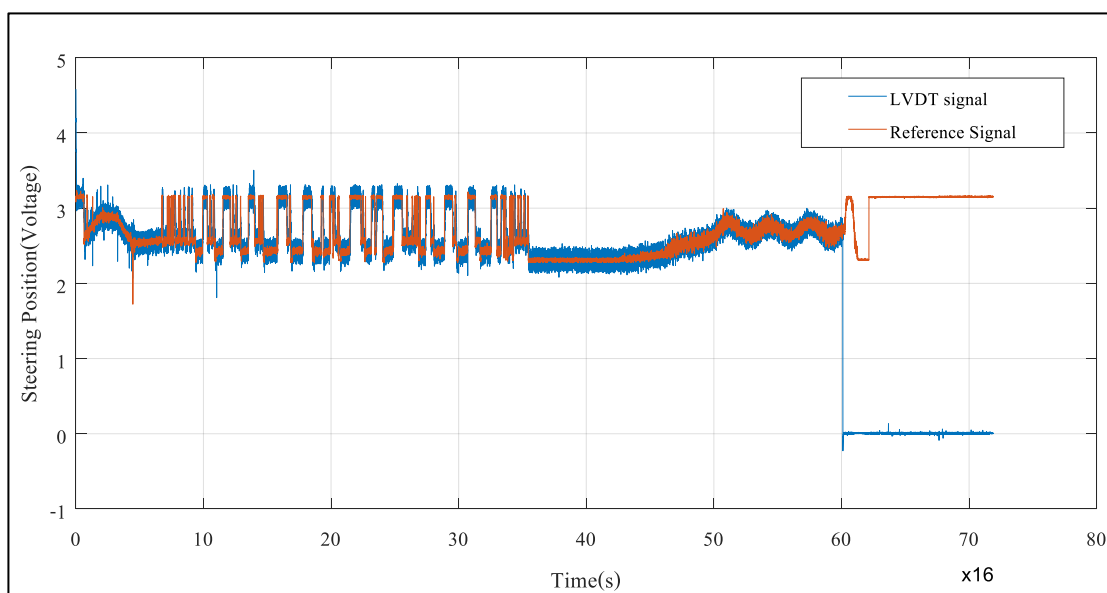


ภาพที่ 157 เส้นทางเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 2



ภาพที่ 158 เส้นทางเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 2

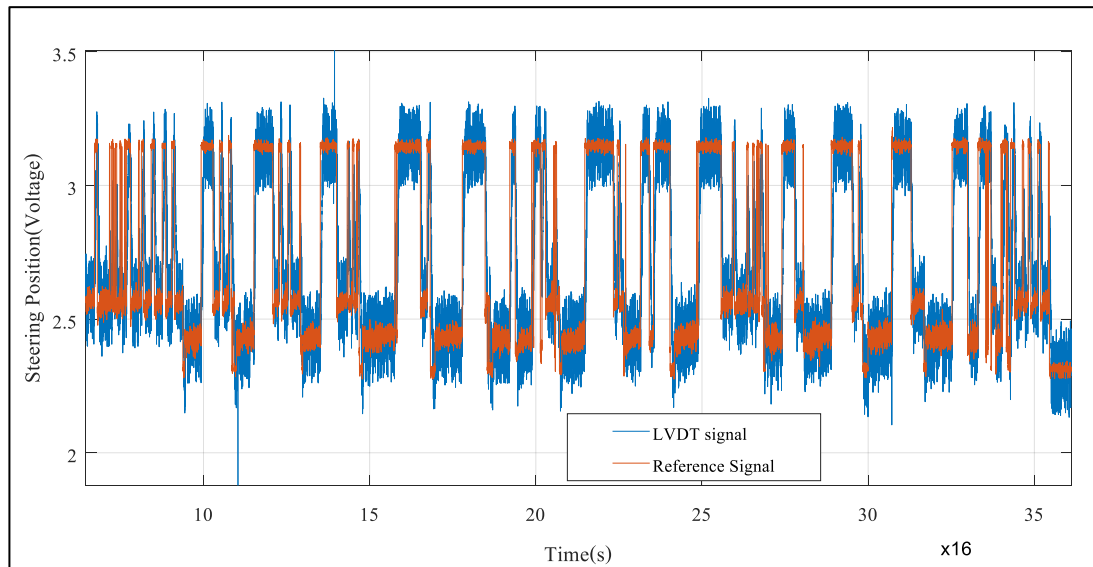
จากผลการทดลองจริงจึงได้นำข้อมูลที่เก็บได้จากโปรแกรม มาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของการส่ายไปมาดังภาพที่ 159 สีแสด คือ สัญญาณอ้างอิง และสีฟ้าคือสัญญาณวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของล้อ (LVDT)



ภาพที่ 159 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อ ของการทดลองที่ 2

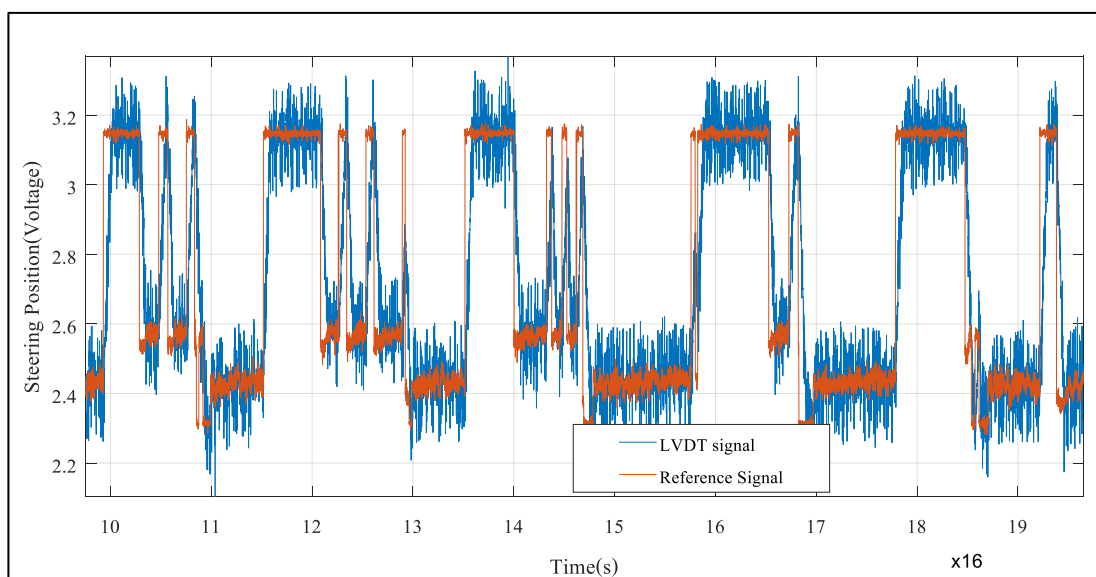
จากภาพที่ 159 แสดงถึงกราฟการเคลื่อนตำแหน่งของล้อโดยรวมทั้งการทดลองจากกราฟจะเห็นว่าในช่วงตำแหน่งจากจุด H ไปยังจุดที่ 1 กราฟของ LVDT Signal และ Reference signal สัญญาณ LVDT มีการลู่เข้าหาสัญญาณ Reference signal ลักษณะสัญญาณจะไม่แกว่งไปมามากนักมีการค่อยๆปรับทิศทาง

ของรถแทรกเตอร์เรื่อยๆจนมาถึงตำแหน่งจุดที่อยู่ในช่วง 1 และ 2 สัญญาณมีการแกว่งสลับไปมาอย่างมากจนเมื่อสิ้นสุดจุดที่ 2 แล้วสัญญาณก็กลับมาอยู่ในลักษณะเหมือนเดิมและรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่กลับไปยังจุด H เป็นอันสิ้นสุดการทดลองที่ 2



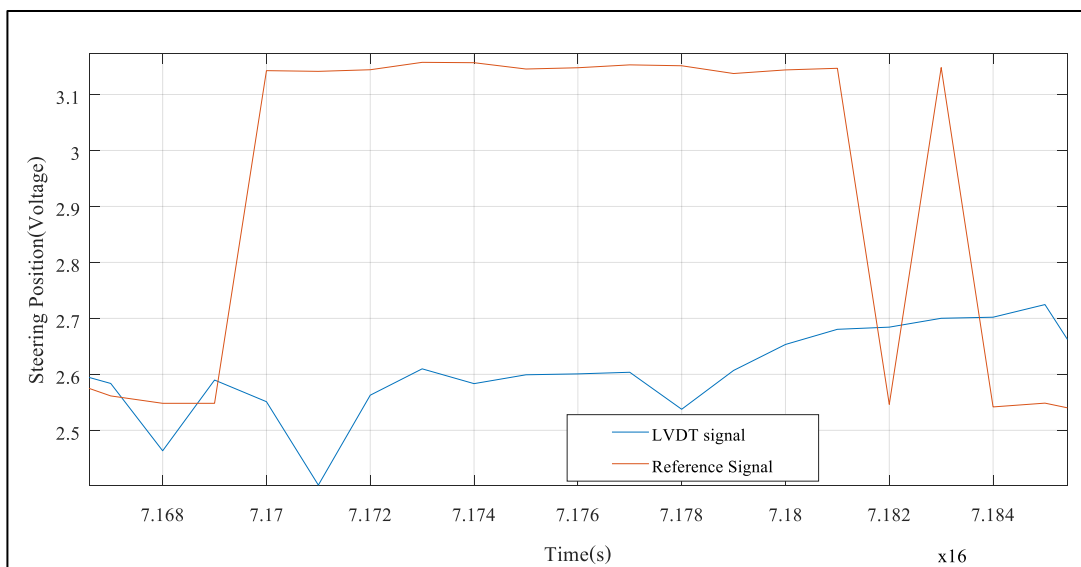
ภาพที่ 160 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 10 ไป 35 ของการทดลองที่ 2

จากนั้นจึงได้ขยายกราฟการทดลองตามภาพที่ 160 เป็นการขยายช่วงเวลา 5 และ 35 ค่าตำแหน่งของล้ออยู่ระหว่างประมาณ 2.3-3.15 V มีการแกว่งสลับของล้อไปมากระหว่างการทดลอง ซึ่งนี่คือสาเหตุว่าทำไมรถถึงวิ่งสลับไปมาอยู่ตลอดเวลา



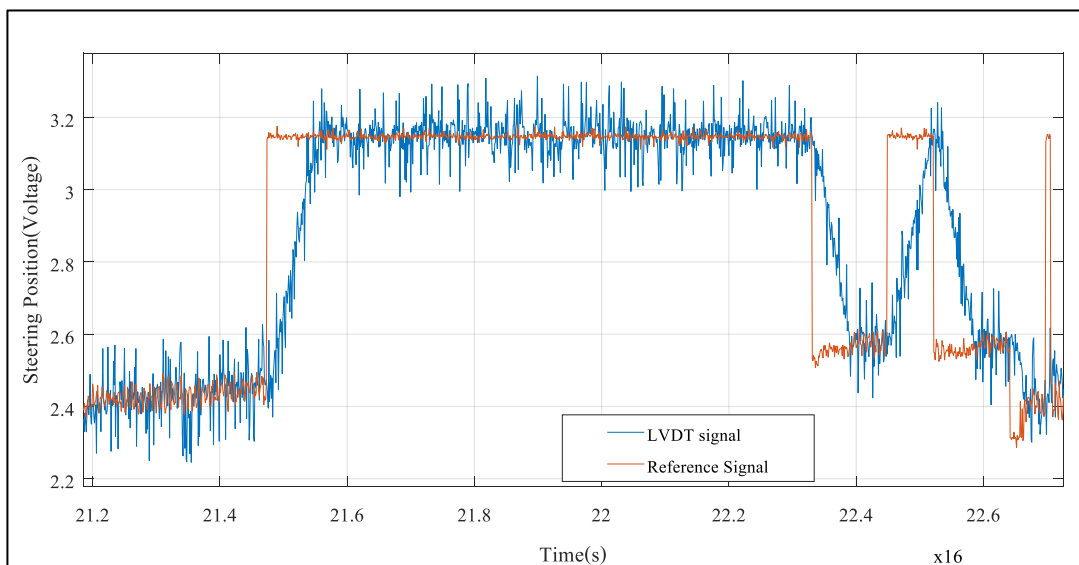
ภาพที่ 161 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 10 ไป 19 ของการทดลองที่ 2

ภาพที่ 161 เป็นการขยายช่วงที่ 10 และ 19 จากภาพจะเห็นผลตอบสนองของล้อต่อสัญญาณ Reference signal ซึ่งอธิบายได้ว่าหลังจากมีการปรับระยะตำแหน่งมุมของล้อให้ลดลงแล้วผลที่ได้คือ การเลี้ยวตามสัญญาณอ้างอิงของล้อมีอาการที่ดีขึ้นแต่อาการส่ายไปมาของล้อเกิดจากสัญญาณ Reference signal ที่มีความชันมากเกินไปแล้วทำให้ล้อเลี้ยวตามไม่ทันก็ยังคงมีอยู่ แต่อยู่ในช่วงเวลาที่น้อยมาก



ภาพที่ 162 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT
พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 2

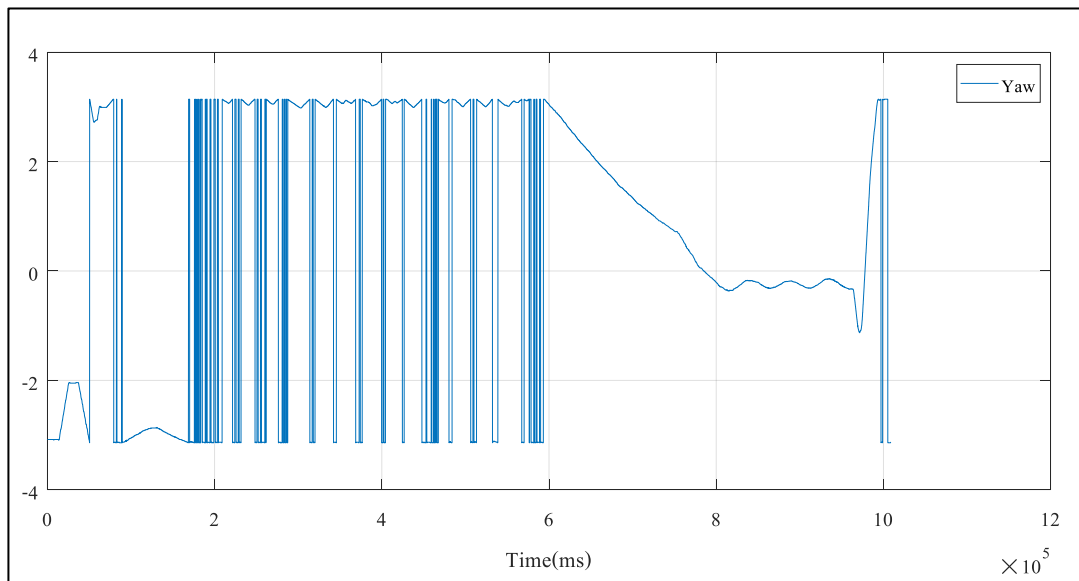
จากภาพที่ 162 **Error! Reference source not found.**แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงานทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล้อนั้นค่าน้อยมากจนทำให้ล้อนั้นเลี้ยวตามไม่ทันนั้นยังคงมีอยู่



ภาพที่ 163 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT
พิจารณาช่วงเวลาที่ค่ามากของการทดลองที่ 2

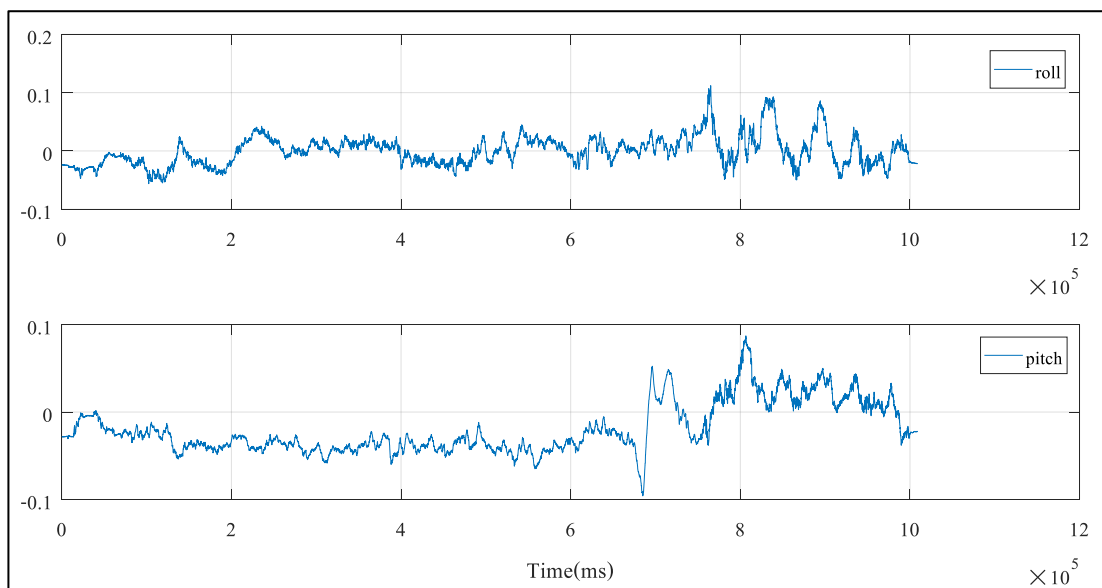
จากภาพที่ 163 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Reference signal กับสัญญาณ LVDT โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงานทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล้อที่มีค่าที่มากทำให้ล้อล้อมีการเลี้ยวที่ดีขึ้น

ค่าที่เก็บจากโปรแกรม Qground control นั้น จะประกอบไปด้วย ค่า roll pitch yaw ค่า Servomotor output ค่า velocity กราฟค่า roll pitch และ yaw ที่เก็บมาได้จากโปรแกรมนั้นไม่ได้ระบุหน่วยมาให้มีค่า อยู่ในช่วง -3 ถึง 3 แต่ทางผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อหาความหมายของค่านี้แล้วซึ่งหมายถึงการหมุนมุมค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 3 หมายถึง 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านขวา และค่าที่อยู่ในช่วง 0 จนถึง -3 หมายถึง การหมุนมุมจาก 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านซ้าย

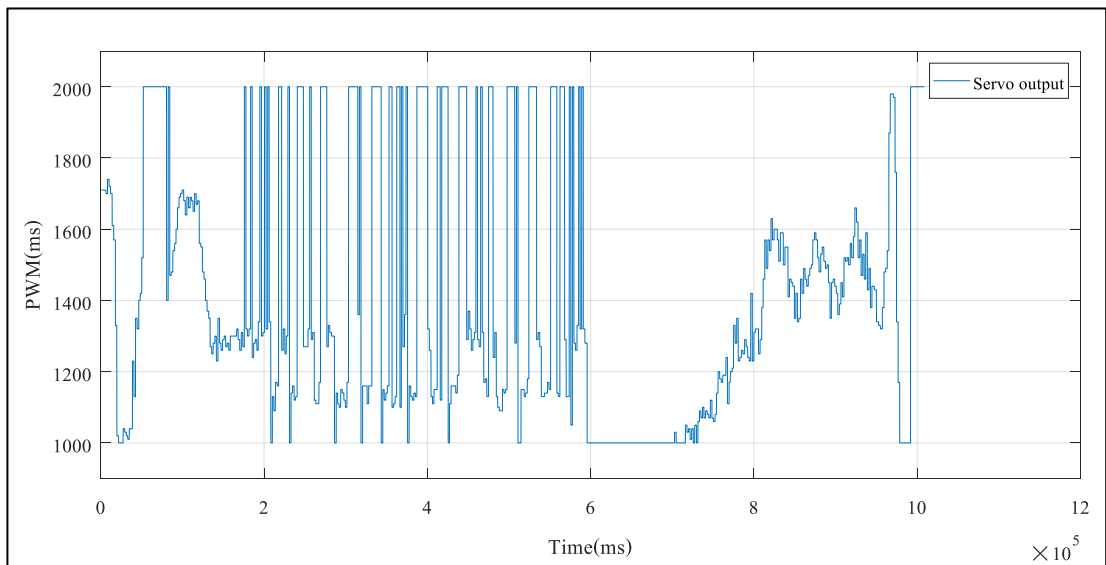


ภาพที่ 164 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 2

ภาพที่ 164 กราฟค่ามุม yaw ในช่วงจุดที่ H ถึงจุดที่ 1 มุม Yaw แกว่งไปมาระหว่าง 3 และ -3 แต่เมื่อถึงช่วงระหว่างจุดที่ 1 และ 2 ค่าจะสลับกลับไปมาแต่มีความถี่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดจุดที่สองการแกว่งก็จะหายไปส่วนภาพที่ค่ามุม roll และ pitch มีค่าที่น้อยมาก

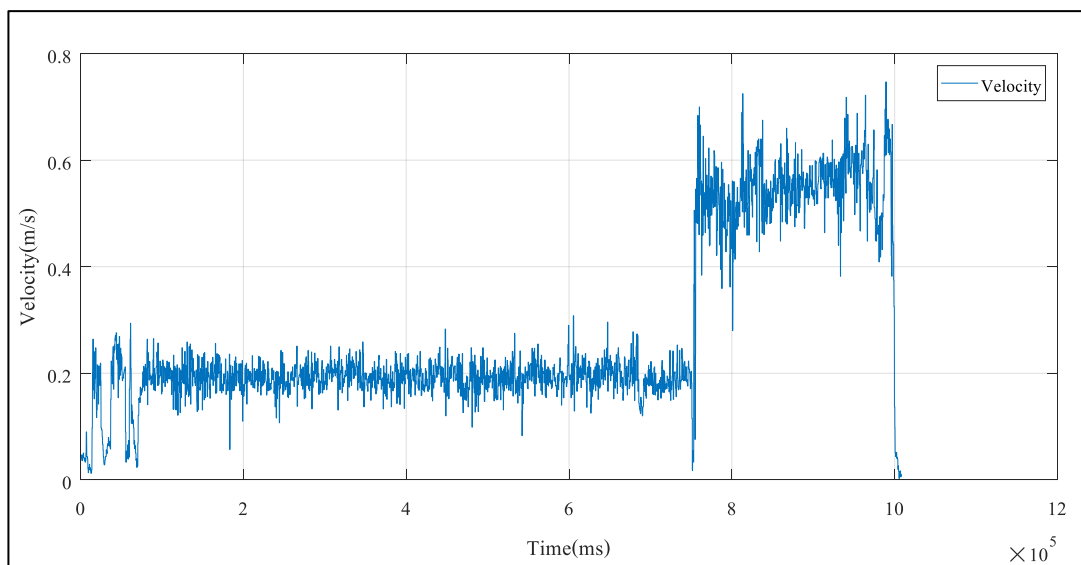


ภาพที่ 165 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 2



ภาพที่ 166 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor ของการทดลองที่ 2

จากภาพที่ 166 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณ ที่ใช้สั่ง Servomotor ซึ่งในที่นี้เราใช้สัญญาณนี้เพื่อให้เป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับควบคุมตำแหน่งล้อ จากกราฟอธิบายได้ว่าปัญหาการส่ายของล้อหลักๆแล้วมาจากสัญญาณนี้ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ส่งไปมีความชันที่มากไม่มีการไล่ระดับจึงทำให้ล้อเคลื่อนตำแหน่งไม่ทันในการทดลองนี้ใช้ความเร็วประมาณ 0.2 m/s ดังภาพที่ 167



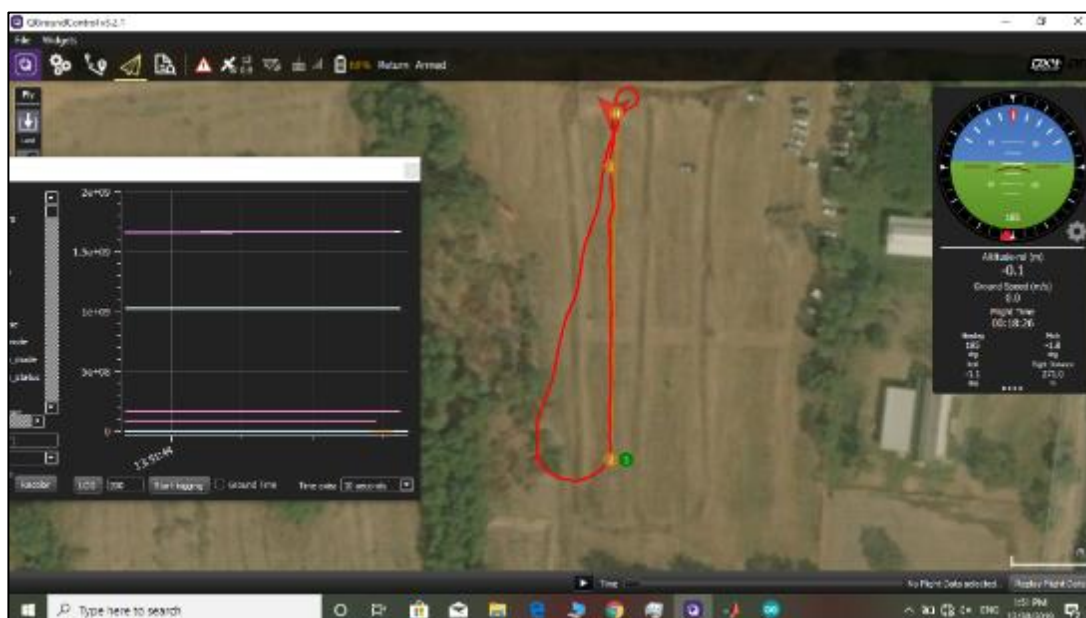
ภาพที่ 167 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 2

สรุปจากการทดลองที่ 2 ผลคือรถยังมีการส่ายไปมาแต่มีค่าลดลงน้อยกว่าการทดลองที่ 1 เป็นผลอันเนื่องมาจากสัญญาณที่ส่งมาจากตัวควบคุมถูกปรับให้ขอบเขตของการส่ายมีค่าน้อยลง และอาการการส่ายที่เร็วมากเกินไปยังคงส่งผลให้ล้อของรถแทรกเตอร์นั้นเคลื่อนที่ตามไม่ทันจึงเกิดอาการส่ายเกิดขึ้น ในการทดลองต่อไปจึงได้ทดลองโดยการเพิ่มการกรองสัญญาณเพื่อให้การควบคุมได้นิ่งยิ่งขึ้นและปรับปรุงขึ้นไปเรื่อยๆ

3.7.3 การทดลองที่ 3 ปรับมุมล้อและมีการกรองสัญญาณ

การทดลองนี้ใช้ความกว้างของตำแหน่งการเลี้ยวที่ตำแหน่งซ้ายสุดที่ประมาณ 2.3V และขวาสุดที่ 3.1V ตำแหน่งกึ่งกลางอยู่ที่ 2.72V และเพิ่มตัวกรองสัญญาณเพื่อกรองให้สัญญาณเรียบขึ้น การทดลองนี้ใช้เวลาประมาณ 20 นาที ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรม Qground control ดังภาพที่ 168

Error! Reference source not found.



ภาพที่ 168 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 3



ภาพที่ 169 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 3

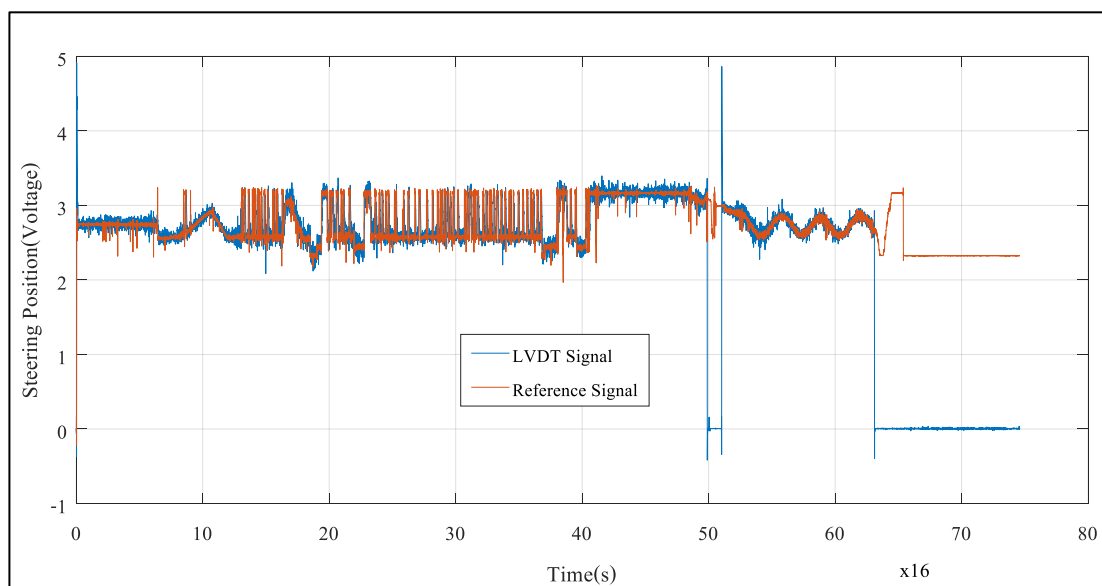
จากภาพที่ 169 ในช่วงแรกจากจุด H ไปยังจุดที่ 1 รถจะมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเส้นตรง เหมือนกับการทดลองก่อนหน้านี้แต่เมื่อถึงจุดที่รถแทรกเตอร์วิ่งเป็นแนวเดียวกับเส้นตรงระหว่างจุดที่ 1 กับ 2 รถแทรกเตอร์ก็มีการส่ายไปมาอยู่ตลอดตามแนวเส้นเมื่อถึงจุดที่ 2 แล้วไปยังจุดที่ 3 จุดนี้คือคำสั่งให้รถวิ่ง กลับไปยังจุด H เหมือนเดิม

จากภาพที่ 169 เป็นการทดลองบนพื้นที่จริงจะเห็นได้ว่าร่องรอยของการไถนั้นมีลักษณะการ แกว่งไปมาตามแนวระยะของเส้นทางจากจุดที่ 1 ไปยัง จุดที่ 2 แต่มีอาการที่ดีขึ้นจากการทดลองก่อนหน้านี้ แต่ก็ยังไม่เห็นผลได้อย่างชัดเจนเหมือนกับการปรับมุมการเลี้ยวของล้อ



ภาพที่ 170 เส้นทางการเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 3

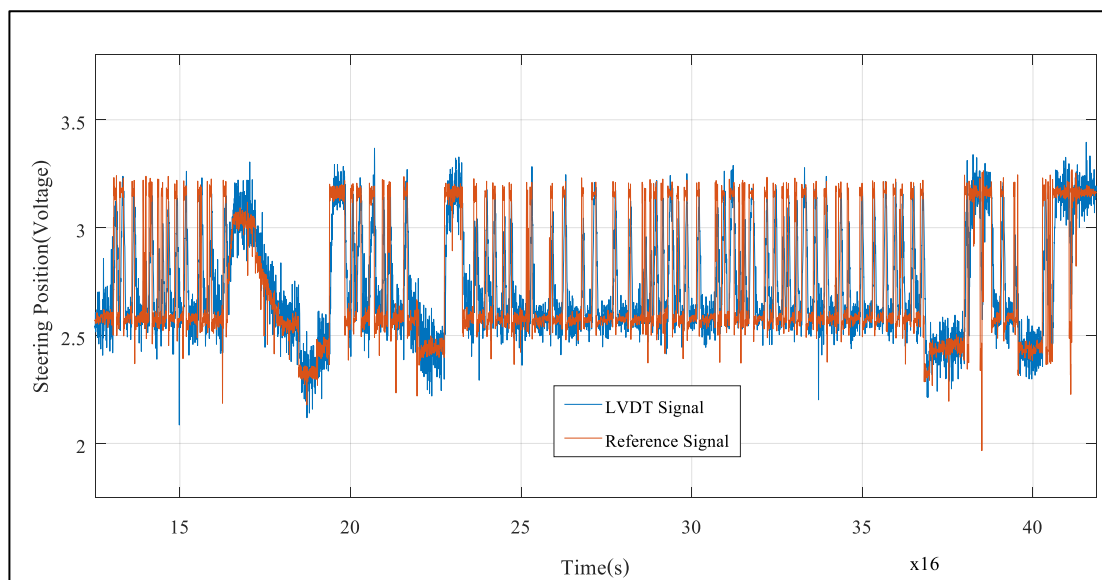
จากภาพที่ 170 จะเห็นได้ว่าเส้นทางการเคลื่อนที่นั้นมีการแกว่งไปมาตามแนวเส้นตรงตลอดซึ่งเกิดจากสัญญาณที่สั่งการเลี้ยวมีค่าแกว่งไปมาแต่ดีขึ้นกว่าการทดลองที่ 1 และ 2



ภาพที่ 171 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อของการทดลองที่ 3

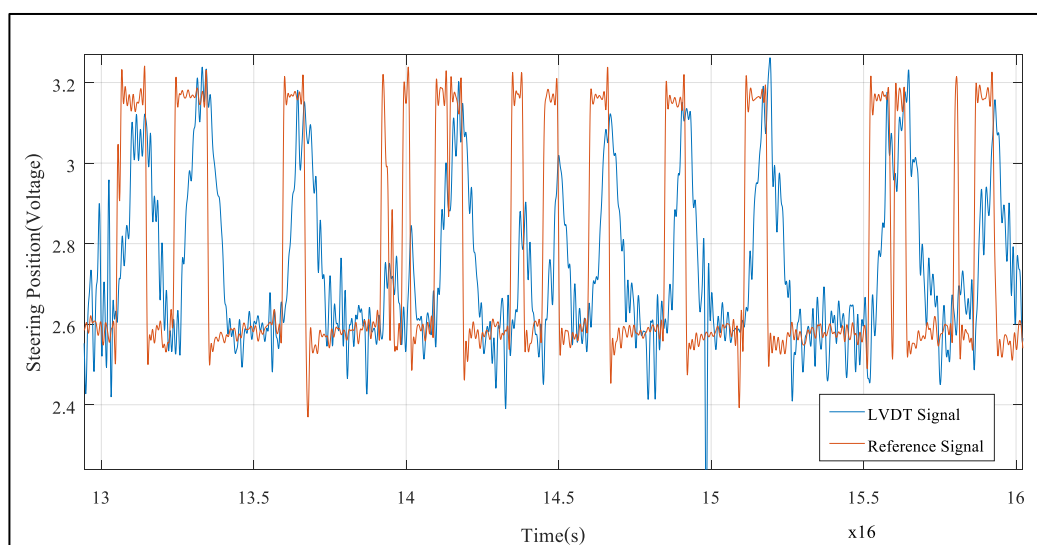
จากภาพที่ 171Error! Reference source not found. ภาพการเคลื่อนตำแหน่งของล้อโดยรวมทั้งการทดลองจากกราฟจะเห็นว่าในช่วงที่จาก H ไปยังจุดที่ 1 กราฟของ LVDT signal และ Reference signal เมื่อพิจารณาแล้วสัญญาณ LVDT signal มีการลู่เข้าหาสัญญาณ Reference signal

เมื่อมาถึงจุดที่อยู่ในช่วง 1 และ 2 สัญญาณก็ยังคงมีการแกว่งไปมาอยู่ตลอดเส้นทางการทดลอง เมื่อสิ้นสุดจุดที่ 2 แล้วสัญญาณกลับมาเหมือนเดิมและวิ่งกลับไปยังจุด H



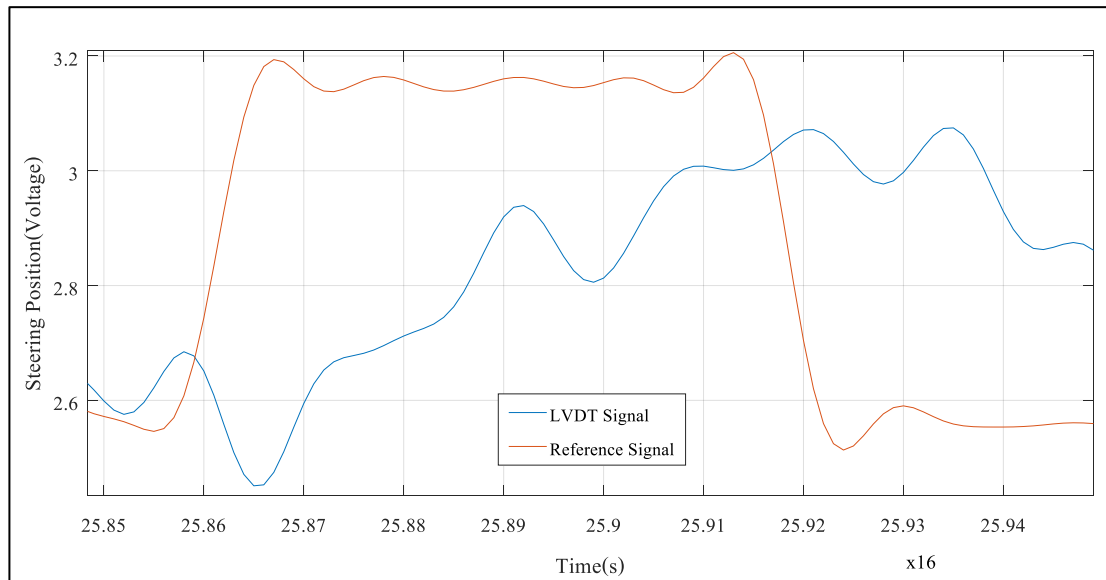
ภาพที่ 172 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลาที่ 15 ไป 20 การทดลองที่ 3

จากนั้นจึงได้ขยายกราฟการทดลองตามภาพที่ 172 เป็นการขยายช่วงเวลาที่ 15 และ 40 ค่าตำแหน่งของล้ออยู่ระหว่างประมาณ 2.3-3.15 V มีการแกว่งสลับของล้อไปมาเหมือนเดิมระหว่างการทดลอง ซึ่งนี่คือสาเหตุว่าทำไมรถถึงวิ่งสลับไปมาอยู่ตลอดเส้นทาง



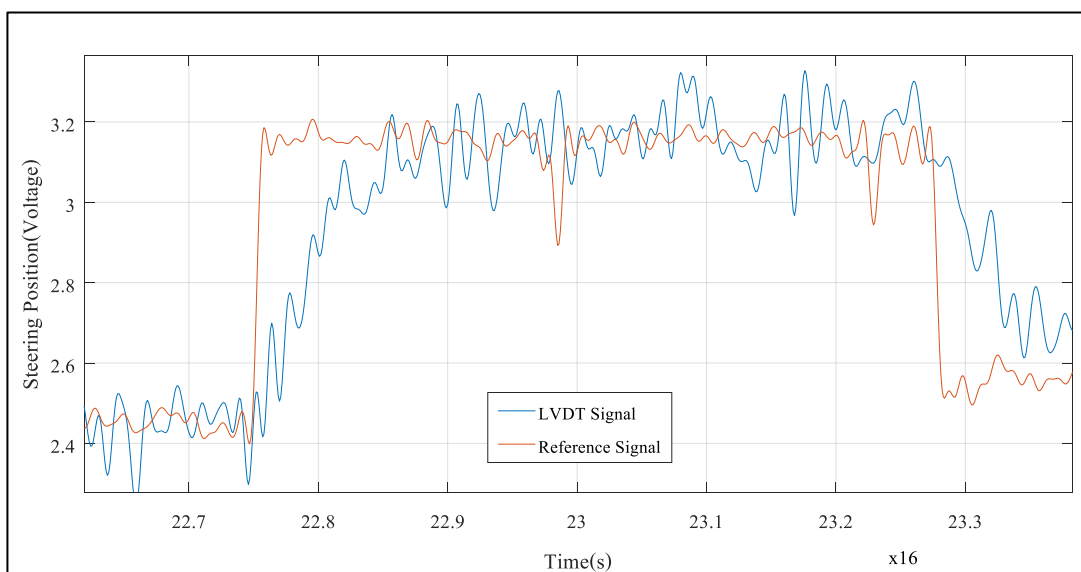
ภาพที่ 173 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลาที่ 13 ไป 16 ของการทดลองที่ 3

จากภาพที่ 173 เป็นการขยายช่วงที่ 13 และ 16 จากภาพจะเห็นผลตอบสนองของล้อต่อสัญญาณ Reference signal ซึ่งอธิบายได้ว่าอาการส่ายไปมาของล้อเกิดจากสัญญาณ Reference signal นั้นมีความชันมากเกินไปทำให้ล้อเลี้ยวตามไม่ทันนั้นยังคงมีอยู่ การแก้ไขคือต้องทำให้สัญญาณนี้มีความชันที่ลดลง



ภาพที่ 174 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT
พิจารณาช่วงเวลาที่มีค่าน้อยของการทดลองที่ 3

จากภาพที่ 174 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Reference signal กับสัญญาณ LVDT signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงาน ทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล้อนั้นมีค่าน้อยมากจนทำให้ล้อนั้นเลี้ยวตามไม่ทันนั้นยังคงมีอยู่

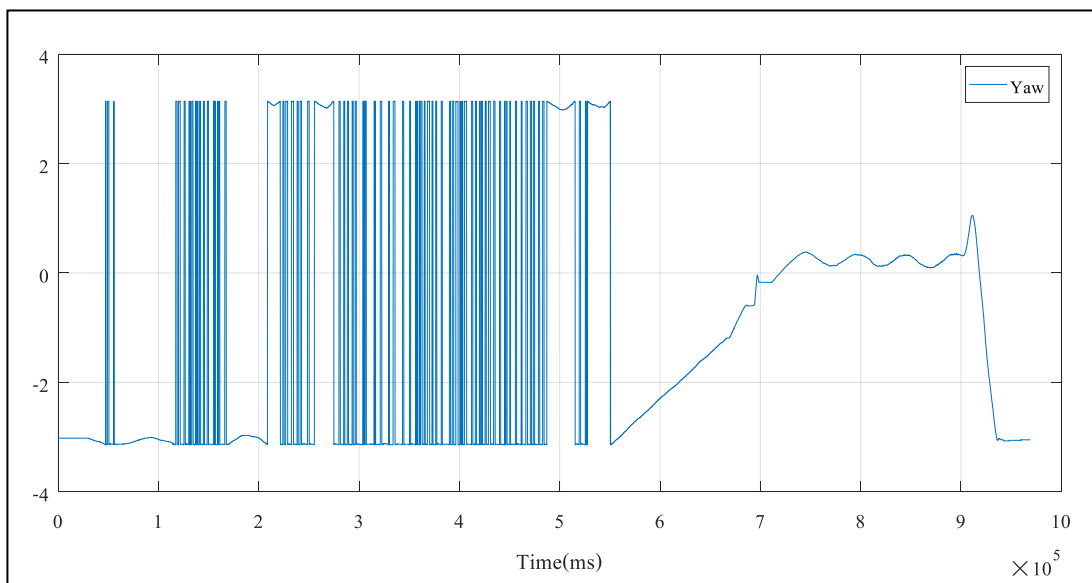


ภาพที่ 175 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT
พิจารณาช่วงเวลาที่มีความมากของการทดลองที่ 3

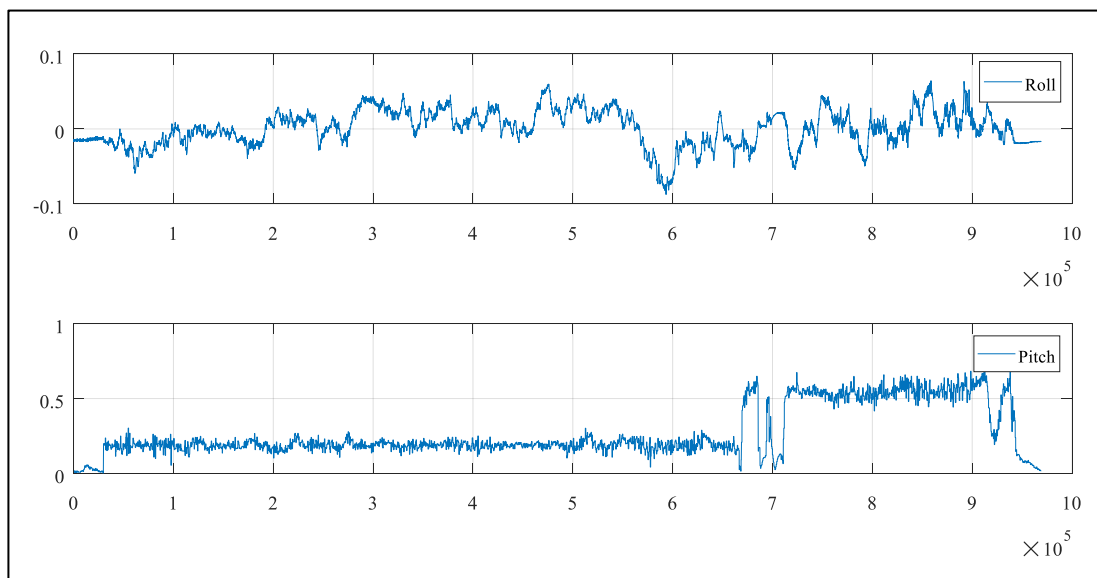
จากภาพที่ 175 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Reference signal กับสัญญาณ LVDT signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงาน ทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล่อมามากทำให้ล้อล้อมีการเลี้ยวตามได้ดีขึ้น

ค่าที่เก็บจากโปรแกรม Qground control นั้น จะประกอบไปด้วย ค่า roll pitch yaw ค่า Servomotor output ค่า velocity กราฟค่า roll pitch และ yaw ที่เก็บมาได้จากโปรแกรมนั้นไม่ได้ระบุหน่วยมาให้มีค่า อยู่ในช่วง -3 ถึง 3 แต่ทางผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อหาความหมายของค่านี้แล้วซึ่งหมายถึง การหมุนมุมค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 3 หมายถึง 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านขวา และค่าที่อยู่ในช่วง 0 จนถึง -3 หมายถึง การหมุนมุมจาก 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านซ้าย

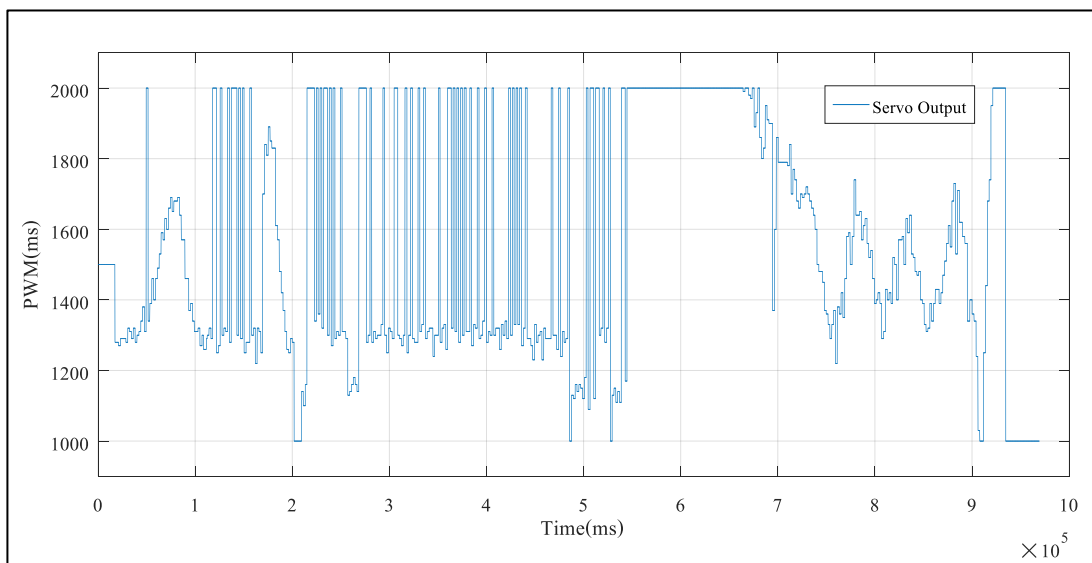
จากError! Reference source not found. 176-177 กราฟค่ามุม yaw ในช่วงจุดที่ H ถึง จุดที่ 1 มุม yaw แกว่งไปมาระหว่าง 3 และ -3 แต่เมื่อถึงช่วงระหว่างจุดที่1และ2 ค่าจะสลับกลับขึ้นมาแต่มีความถี่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดจุดที่2การแกว่งก็จะหายไปส่วนภาพที่ ค่ามุม roll และ pitch มีค่าที่น้อยมาก



ภาพที่ 176 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 3

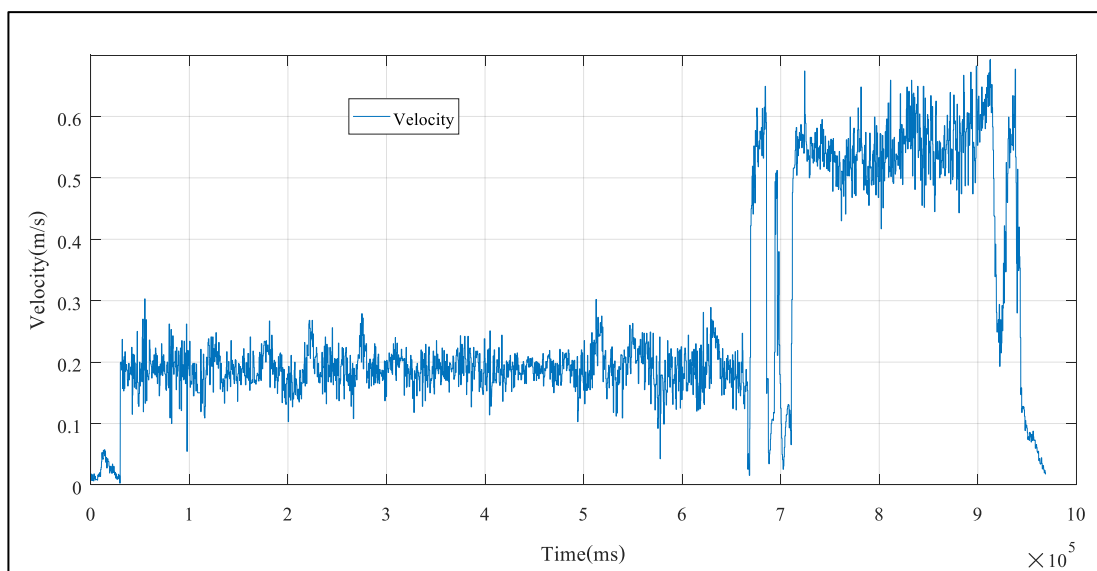


ภาพที่ 177 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 3



ภาพที่ 178 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor ของการทดลองที่ 3

จากภาพที่ 178 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณ ที่ใช้สั่ง Servomotor ซึ่งในที่นี้เราใช้สัญญาณนี้เพื่อให้เป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับควบคุมตำแหน่งล้อ จากกราฟอธิบาย ได้ว่าปัญหาการส่ายของล้อหลักๆแล้วมาจากสัญญาณนี้ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ส่งไปมีความชันที่สูงมากไม่มีการไล่ระดับจึงทำให้ล้อเคลื่อนตำแหน่งไม่ทันในการทดลองนี้ใช้ความเร็วประมาณ 0.2 m/s ดังภาพที่ 179



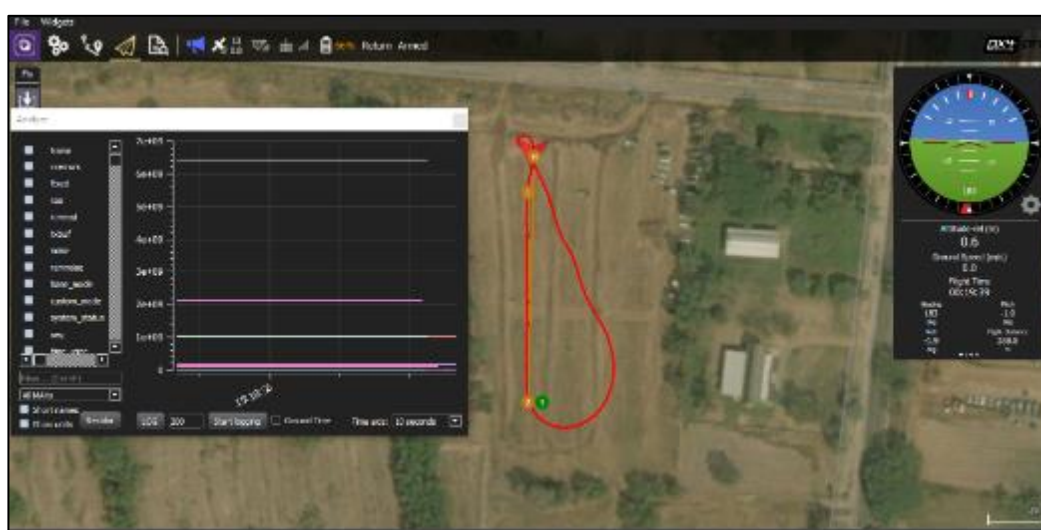
ภาพที่ 179 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 3

สรุปจากการทดลองที่ 3 ผลคือรถยังมีการส่ายไปมาแต่มีค่าลดลงน้อยกว่าการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นผลอันเนื่องมาจากสัญญาณที่ส่งมาจากตัวควบคุมถูกปรับให้ขอบเขตของการส่ายมีค่าที่น้อยลง และมีการไล่ระดับจึงทำให้ล้อเคลื่อนตำแหน่งไม่ทันในการทดลองนี้ใช้ความเร็วประมาณ 0.2 m/s ดังภาพที่ 179

การกรองสัญญาณ และอาการการสั่นค่าที่เร็วมากเกินไปยังคงส่งผลให้ล้อของรถไถนั้นเคลื่อนที่ตามไม่ทันจึงเกิดอาการส่ายเกิดขึ้น ในการทดลองต่อไปจึงได้ทดลองโดยการลดมุมของล้อลงอีกแลพร้อมกับการกรองสัญญาณเพื่อให้การควบคุมได้นิ่งยิ่งขึ้น

3.7.4 การทดลองที่ 4 ปรับมุมล้อลดลงและมีการกรองสัญญาณ

การทดลองนี้ใช้ความกว้างของตำแหน่งการเลี้ยวที่ตำแหน่งซ้ายสุดที่ประมาณ 2.3 V และขวาสุดที่ 3.1 V ตำแหน่งกึ่งกลางอยู่ที่ 2.72 V การทดลองนี้ใช้เวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรม Qground control ดังภาพที่ 180



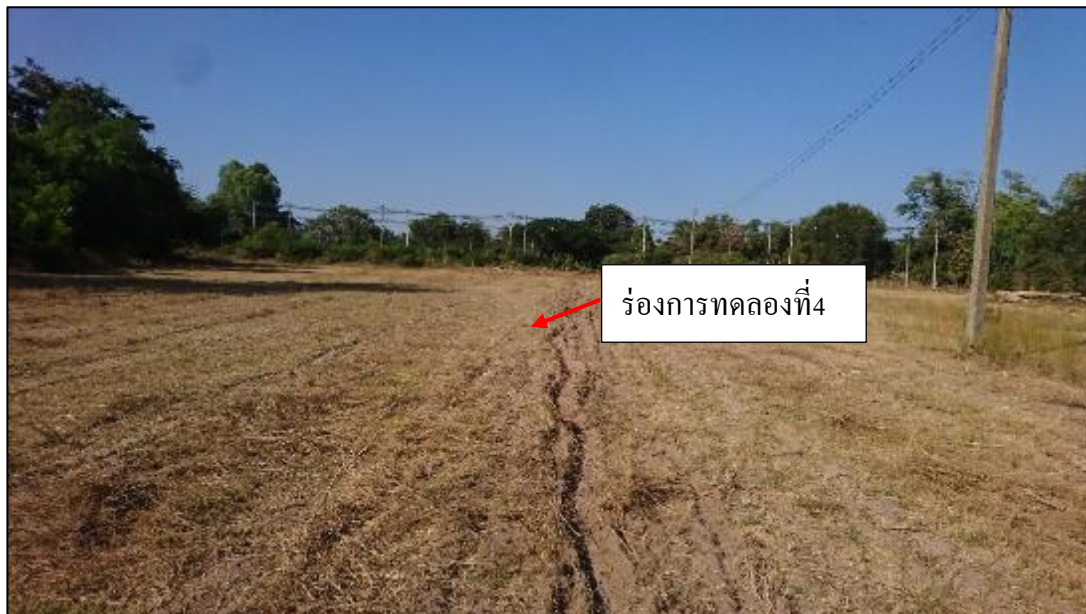
ภาพที่ 180 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่4



ภาพที่ 181 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่4

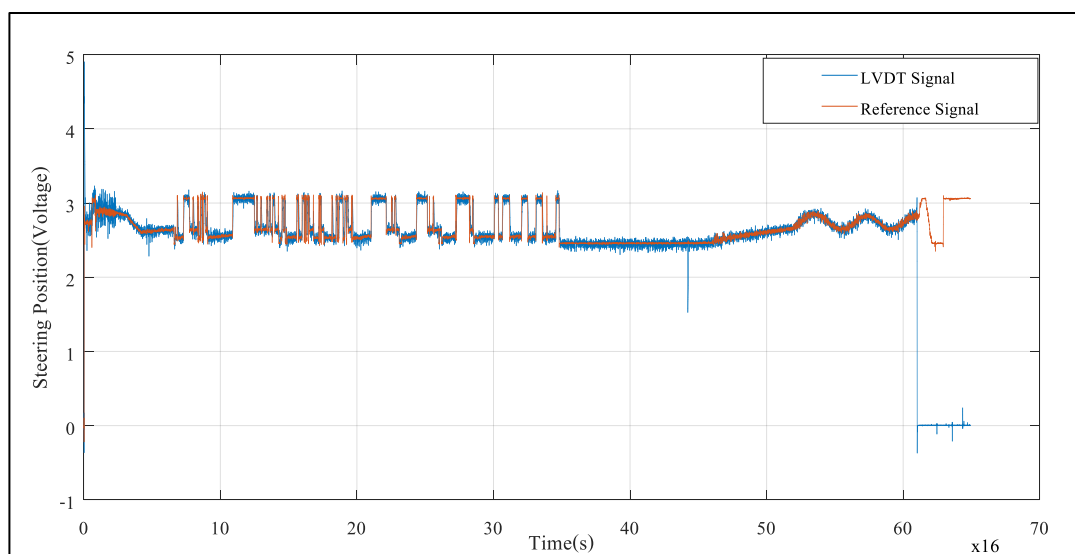
จากภาพที่ 181 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่4 ในช่วงแรกจากจุด H ไปยังจุดที่ 1 รถแทรกเตอร์จะมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเส้นตรงแต่เมื่อถึงจุดที่1 รถแทรกเตอร์

เคลื่อนที่เป็นแนวเดียวกับเส้นตรงระหว่างจุดที่ 1 กับ 2 แต่ก็มีอาการส่ายไปมาอยู่ตลอดตามแนวเส้น เมื่อถึงจุดที่ 2 แล้วไปยัง จุดที่ 3 จุดนี้คือคำสั่งให้รถวิ่งกลับไปยังจุด H เหมือนเดิม และเคลื่อนที่ในเส้นทางที่ถูกต้อง



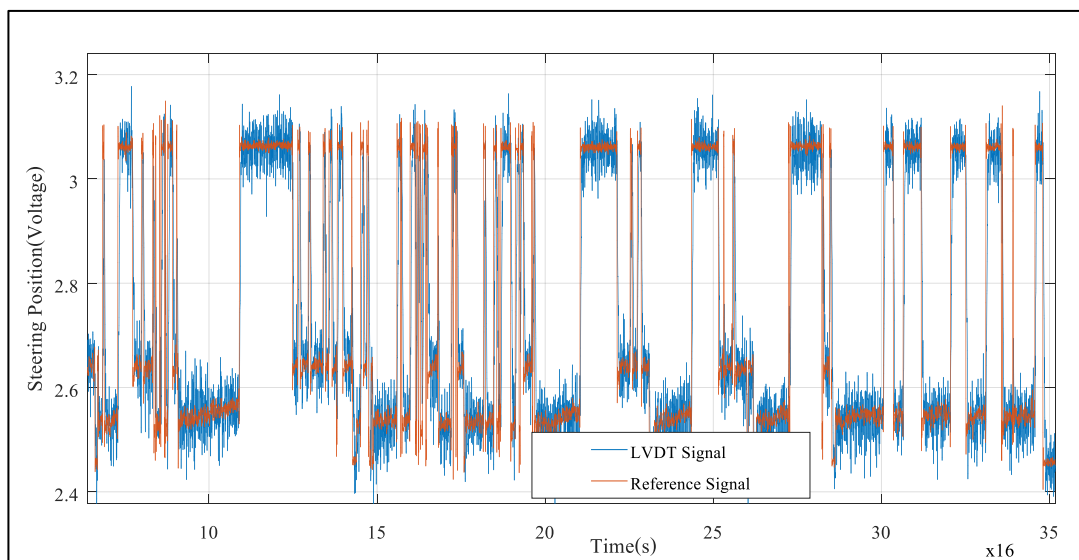
ภาพที่ 182 เส้นทางเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 4

จากผลการทดลองจริงจึงได้นำข้อมูลที่เก็บได้จากโปรแกรม มาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของการส่ายไปมาดังภาพที่ 183 สีแสด คือ สัญญาณอ้างอิง และสีฟ้าคือสัญญาณวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของล้อ (LVDT)



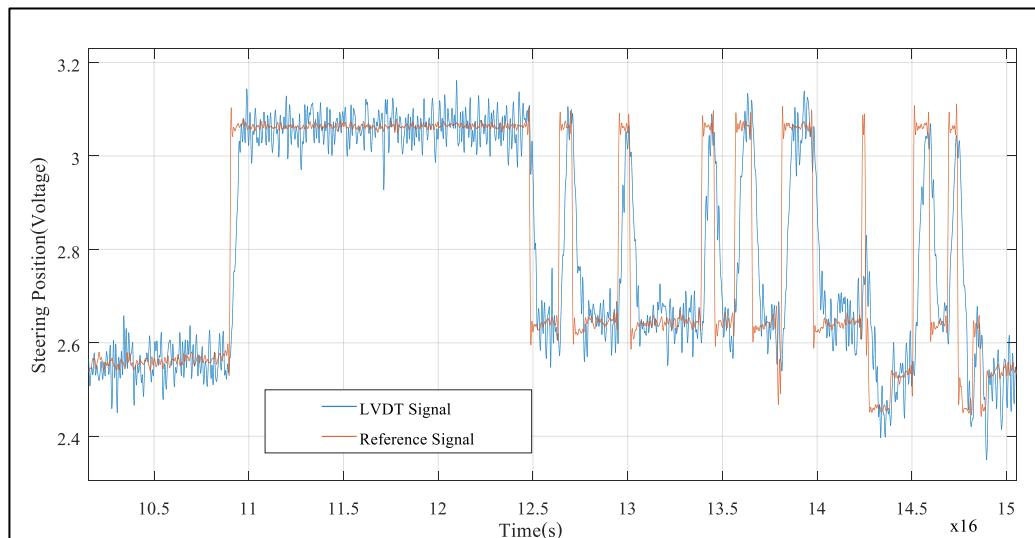
ภาพที่ 183 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อของการทดลองที่ 4

จากภาพที่ 183 แสดงถึงกราฟการเคลื่อนตำแหน่งของล้อโดยรวมทั้งการทดลองจากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงตำแหน่งจากจุด H ไปยังจุดที่ 1 กราฟของ LVDT Signal และ Reference Signal สัญญาณ LVDT มีการลู่อเข้าหาสัญญาณ Reference signal ลักษณะสัญญาณจะไม่แกว่งไปมามากนักมีการค่อยๆปรับทิศทางของรถแทรกเตอร์เรื่อยๆจนมาถึงตำแหน่งจุดที่อยู่ในช่วง 1 และ 2 สัญญาณมีการแกว่งสลับไปมาอย่างมากจนเมื่อสิ้นสุดจุดที่ 2 แล้วสัญญาณกลับมามีลักษณะเหมือนเดิมและรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่กลับไปยังจุด H เป็นอันสิ้นสุดการทดลองที่ 4



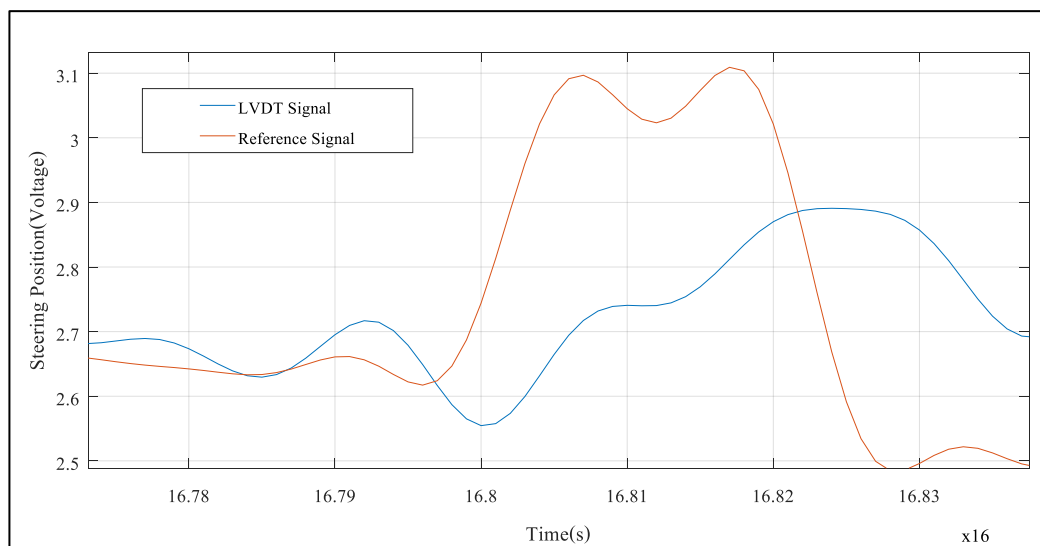
ภาพที่ 184 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 5 ไป 35 ของการทดลองที่ 4

จากนั้นจึงได้ขยายกราฟการทดลองตามภาพที่ 185 เป็นการขยายช่วงเวลา 5 และ 35 ค่าตำแหน่งของล้ออยู่ระหว่างประมาณ 2.45-3.06 V มีการแกว่งสลับของล้อไปมากระหว่างการทดลอง ซึ่งนี่คือสาเหตุที่ทำให้รถถึงวิ่งสลับไปมาอยู่ตลอดเวลา



ภาพที่ 185 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 10 ไป 15 ของการทดลองที่ 4

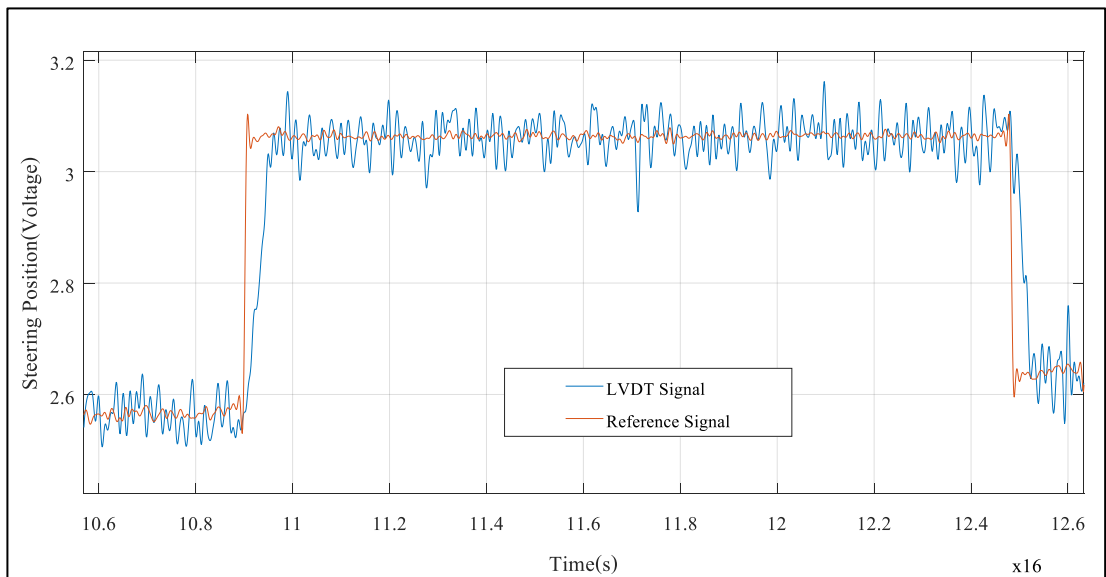
จากภาพที่ 185 เป็นการขยายช่วงที่ 10 และ 15 จากภาพจะเห็นผลตอบสนองของล้อต่อสัญญาณ Reference Signal ซึ่งอธิบายได้ว่าหลังจากมีการปรับระยะตำแหน่งมุมของล้อให้ลดลงแล้วผลที่ได้คือการเลี้ยวตามสัญญาณอ้างอิงของล้อมีอาการที่ดีขึ้นแต่อาการส่ายไปมาของล้อเกิดจากสัญญาณ Reference signal ที่มีความชันมากเกินไปแล้วทำให้ล้อเลี้ยวตามไม่ทันก็ยังคงมีอยู่ แต่อยู่ในช่วงเวลาน้อยมาก



ภาพที่ 186 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT

พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 4

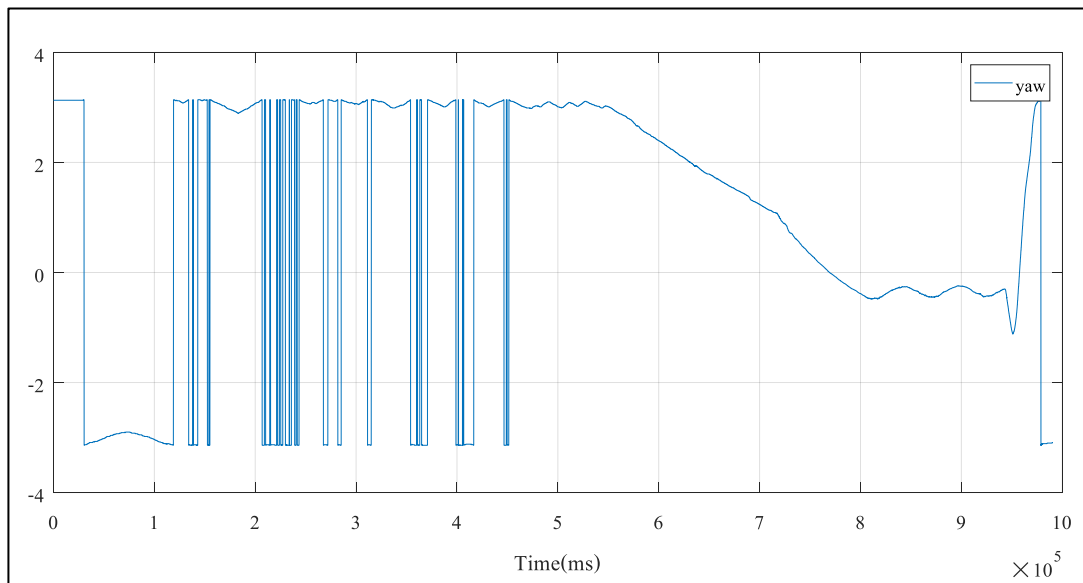
จากภาพที่ 186 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงานทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล้อนั้นค่าน้อยมากจนทำให้ล้อนั้นเลี้ยวตามไม่ทันนั้นยังคงมีอยู่



ภาพที่ 187 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT พิจารณาช่วงเวลาที่ค่ามากของการทดลองที่ 4

จากภาพที่ 187 **Error! Reference source not found.**แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Reference signal กับสัญญาณ LVDT signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงานทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล้อนาค่าที่มากทำให้ล้อล้อมีการเลี้ยวตามได้ดีขึ้น

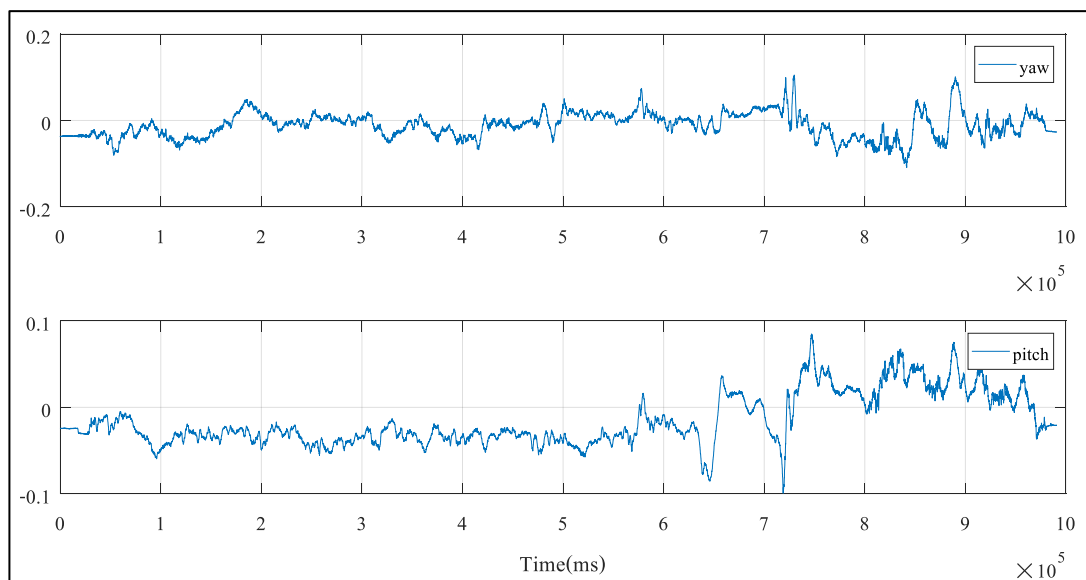
ค่าที่เก็บจากโปรแกรม Qground control นั้น จะประกอบไปด้วย ค่า roll pitch yaw ค่า Servomoter output ค่า velocity กราฟค่า roll pitch และ yaw ที่เก็บมาได้จากโปรแกรมนั้นไม่ได้ระบุหน่วยมาให้มีค่า อยู่ในช่วง -3 ถึง 3 แต่ทางผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อหาความหมายของค่านี้แล้วซึ่งหมายถึงการหมุนมุมค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 3 หมายถึง 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านขวา และค่าที่อยู่ในช่วง 0 จนถึง -3 หมายถึง การหมุนมุมจาก 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านซ้าย



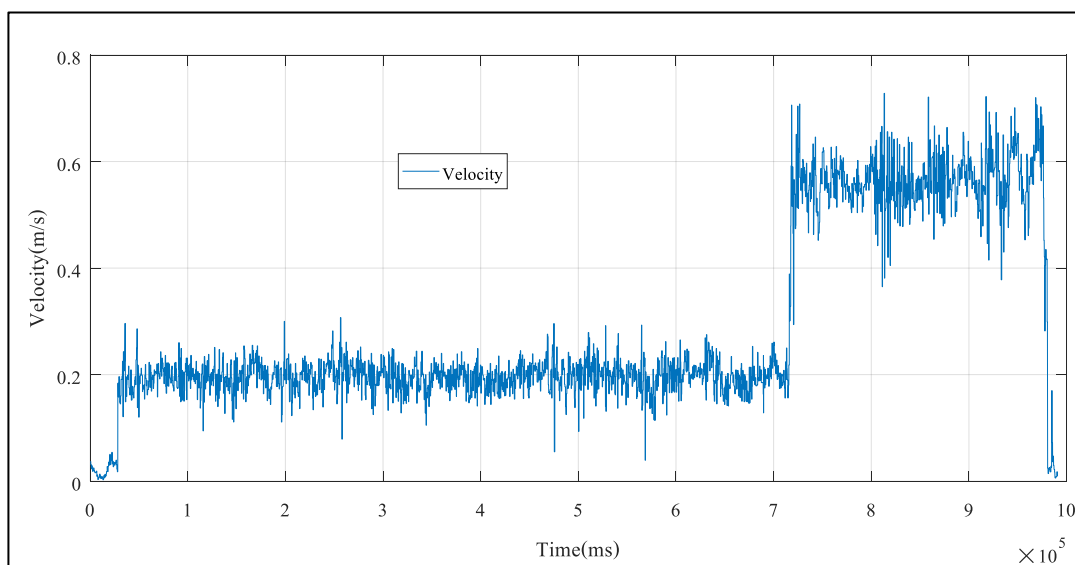
ภาพที่ 188 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 4

จากภาพที่ 188 กราฟค่ามุม yaw ในช่วงจุดที่ H ถึงจุดที่ 1 มุม Yaw แกว่งไปมาระหว่าง 3 และ -3 แต่เมื่อถึงช่วงระหว่างจุดที่ 1 และ 2 ค่าจะสลับกลับไปมาแต่มีความถี่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดจุดที่สองการแกว่งก็จะหายไปส่วนภาพที่ ค่ามุม roll และ pitch มีค่าที่น้อยมากดัง

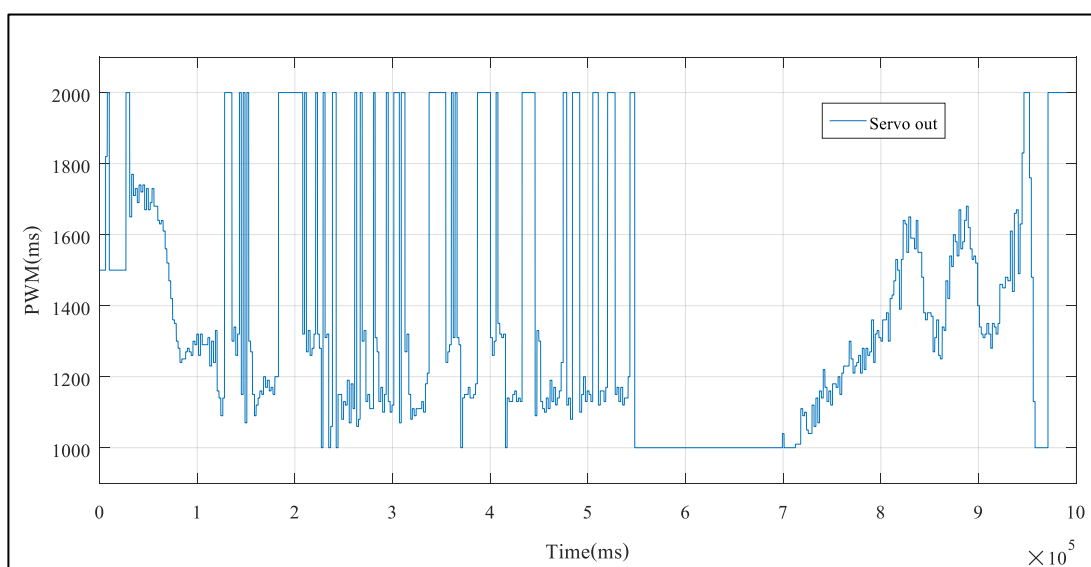
Error! Reference source not found.189



ภาพที่ 189 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 4



ภาพที่ 190 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 4



ภาพที่ 191 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor การทดลองที่ 4

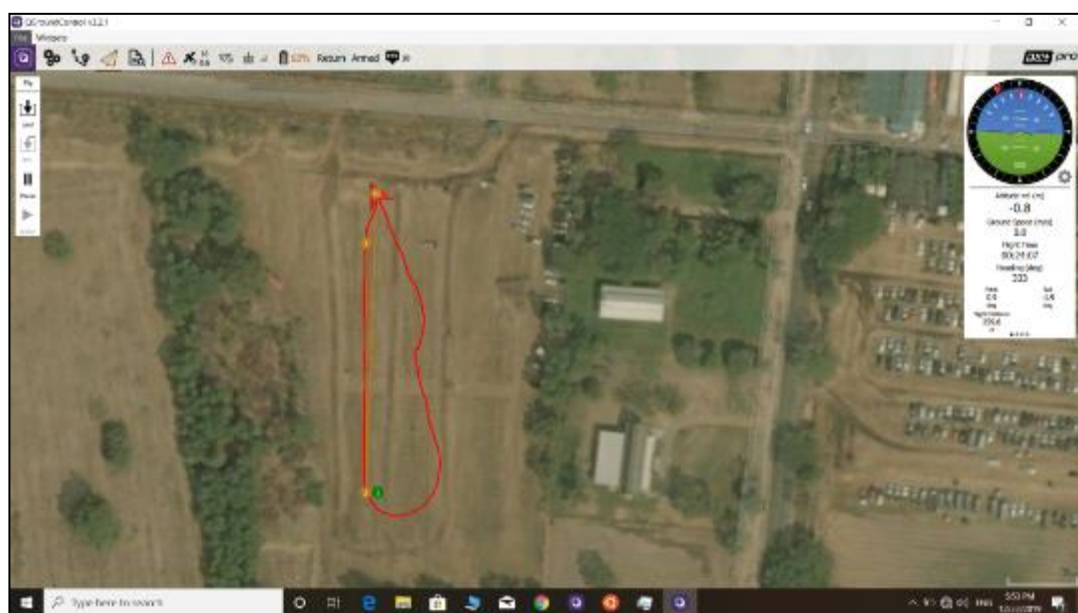
จากภาพที่ 191 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณที่ใช้สั่ง Servomotor ซึ่งในที่นี้เราใช้สัญญาณนี้เพื่อให้เป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับควบคุมตำแหน่งล้อ จากกราฟอธิบายได้ว่าปัญหาการส่ายของล้อหลักๆแล้วมาจากสัญญาณนี้ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ส่งไปมีความชันที่สูงมากไม่มีการไล่ระดับจึงทำให้ล้อเคลื่อนตำแหน่งไม่ทันในการทดลองนี้ใช้ความเร็วประมาณ 0.2 m/s ดังภาพที่ 190 ข้างต้น

สรุปจากการทดลองที่ 4 ผลคือรถยังมีการส่ายไปมาแต่มีค่าลดลงน้อยกว่าการทดลองที่ 1 ถึง 3 เป็นผลอันเนื่องมาจากสัญญาณที่ส่งมาจากตัวควบคุมถูกปรับให้ขอบเขตของการส่ายมีค่าที่น้อยลง และมีการกรองสัญญาณ และอาการการสั่งค่าที่เร็วมากเกินไปยังคงส่งผลให้ล้อของรถแทรกเตอร์นั้นเคลื่อนที่ตามไม่ทัน

จึงเกิดการส่ายเกิดขึ้น ในการทดลองต่อไปจึงได้ทดลองโดยใช้ RTK GPS พร้อมกับการกรองสัญญาณเพื่อให้การควบคุมได้นิ่งยิ่งขึ้น

3.7.5 การทดลองที่ 5 ทดลองด้วย RTK GPS และมีการกรองสัญญาณ

การทดลองนี้ใช้ความกว้างของตำแหน่งการเลี้ยวที่ตำแหน่งซ้ายสุดที่ประมาณ 2.3 V และขวาสุดที่ 3.1 V ตำแหน่งกึ่งกลางอยู่ที่ 2.72 V การทดลองนี้ใช้เวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรม Qground control ดังภาพที่ 192



ภาพที่ 192 ภาพจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 5

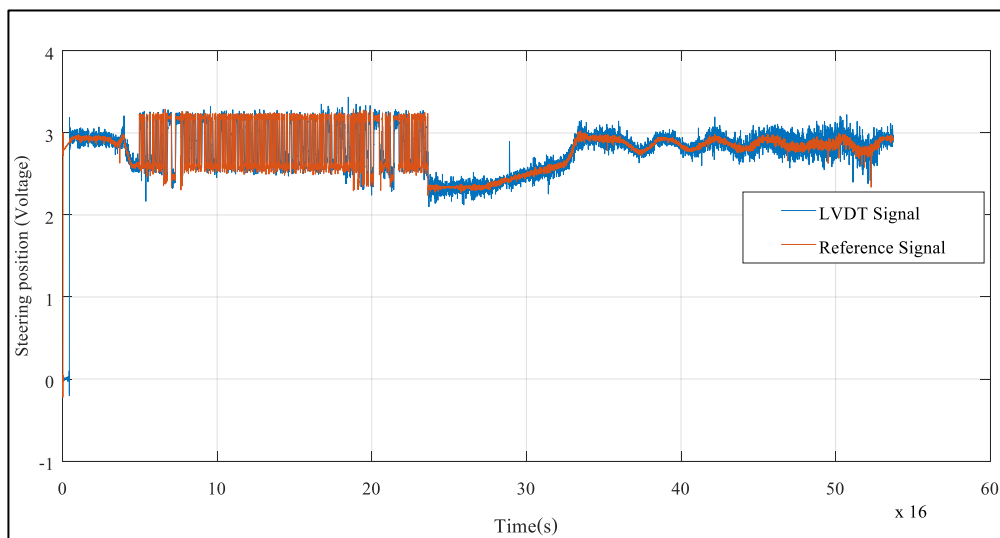


ภาพที่ 193 ภาพขยายจากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 5

จากภาพที่ 193 ในช่วงแรก จากจุด H ไปยังจุดที่ 1 รถแทรกเตอร์จะมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเส้นตรงแต่เมื่อถึงจุดที่ 1 รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่เป็นแนวเดียวกับเส้นตรงระหว่างจุดที่ 1 กับ 2 แต่ก็มีอาการส่ายไปมาอยู่ตลอดตามแนวเส้น เมื่อถึงจุดที่ 2 แล้วไปยัง จุดที่ 3 จุดนี้คือคำสั่งให้รถวิ่งกลับไปยังจุด H เหมือนเดิมและเคลื่อนที่ในเส้นทางที่ถูกต้อง



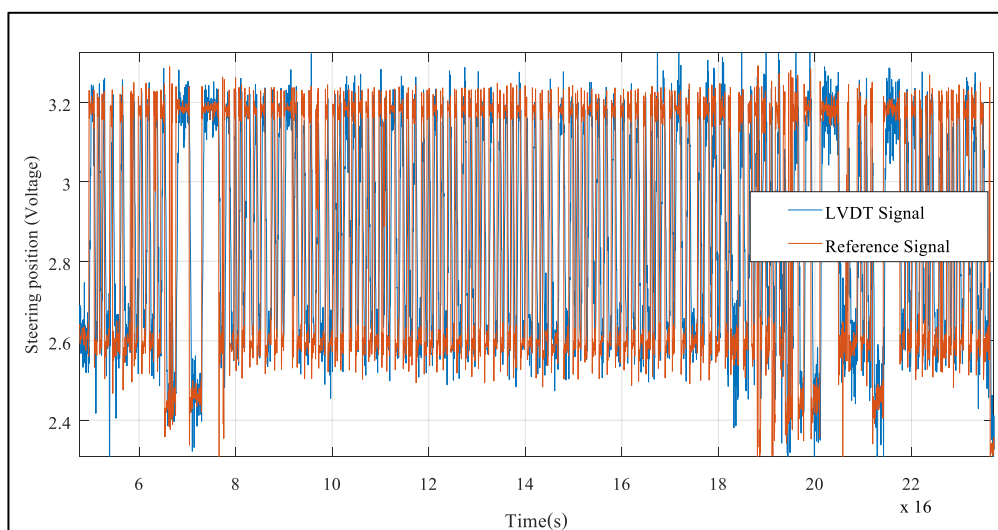
ภาพที่ 194 เส้นทางเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 5



ภาพที่ 195 กราฟแสดงตำแหน่งของล้อของการทดลองที่ 5

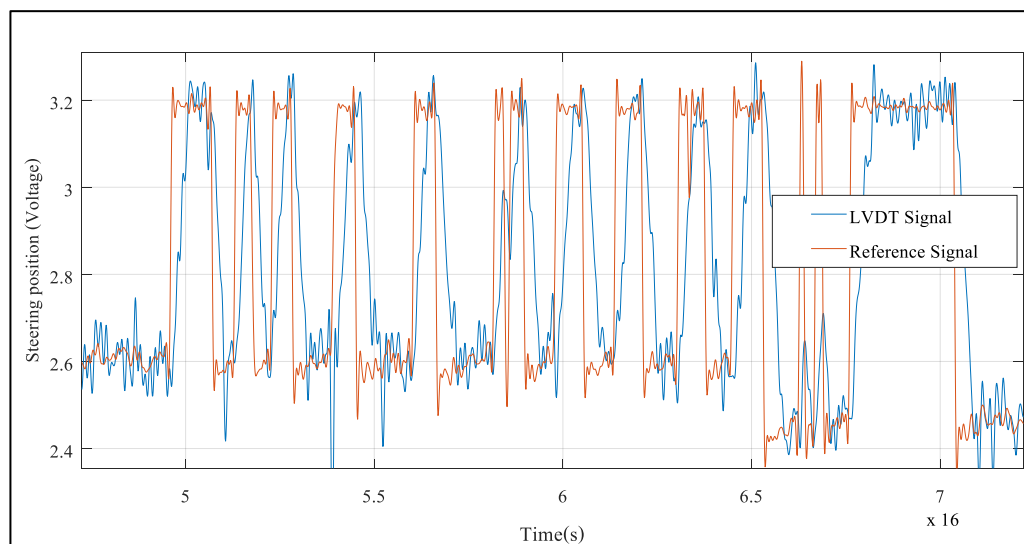
จากผลการทดลองจริงจึงได้นำข้อมูลที่เก็บได้จากโปรแกรม มาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของการส่ายไปมาดังภาพที่ 195 สีแสด คือ สัญญาณอ้างอิง และสีฟ้าคือสัญญาณวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของล้อ (LVDT)

จากภาพที่ 196 แสดงถึงกราฟการเคลื่อนตำแหน่งของล้อโดยรวมทั้งการทดลองจากกราฟจะเห็นว่าในช่วงตำแหน่งจากจุด H ไปยังจุดที่ 1 กราฟของ LVDT Signal และ Reference signal สัญญาณ LVDT มีการลู่อเข้าหาสัญญาณ Reference signal ลักษณะสัญญาณจะไม่แกว่งไปมามากนักมีการค่อยๆปรับทิศทางของรถแทรกเตอร์เรื่อยๆจนถึงตำแหน่งจุดที่อยู่ในช่วง 1 และ 2 สัญญาณมีการแกว่งสลับไปมาอย่างมาจนเมื่อสิ้นสุดจุดที่ 2 แล้วสัญญาณกลับมาอยู่ในลักษณะเหมือนเดิมและรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่กลับไปยังจุด H เป็นอันสิ้นสุดการทดลองที่ 5



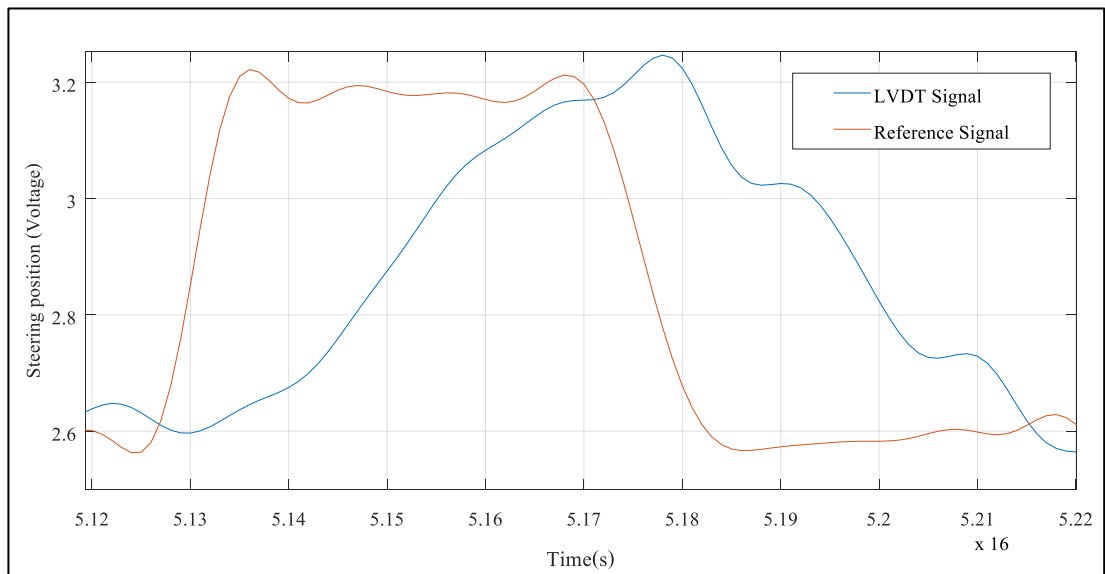
ภาพที่ 196 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 5 ไป 21 ของการทดลองที่ 5

จากนั้นจึงได้ขยายกราฟการทดลองตามภาพที่ 196 เป็นการขยายช่วงเวลา 5 และ 35 ค่าตำแหน่งของล้ออยู่ระหว่างประมาณ 2.3-3.15 V มีการแกว่งสลับของล้อไปมากระหว่างการทดลอง ซึ่งนี่คือสาเหตุว่าทำไมรถถึงวิ่งสลับไปมาอยู่ตลอดเวลา



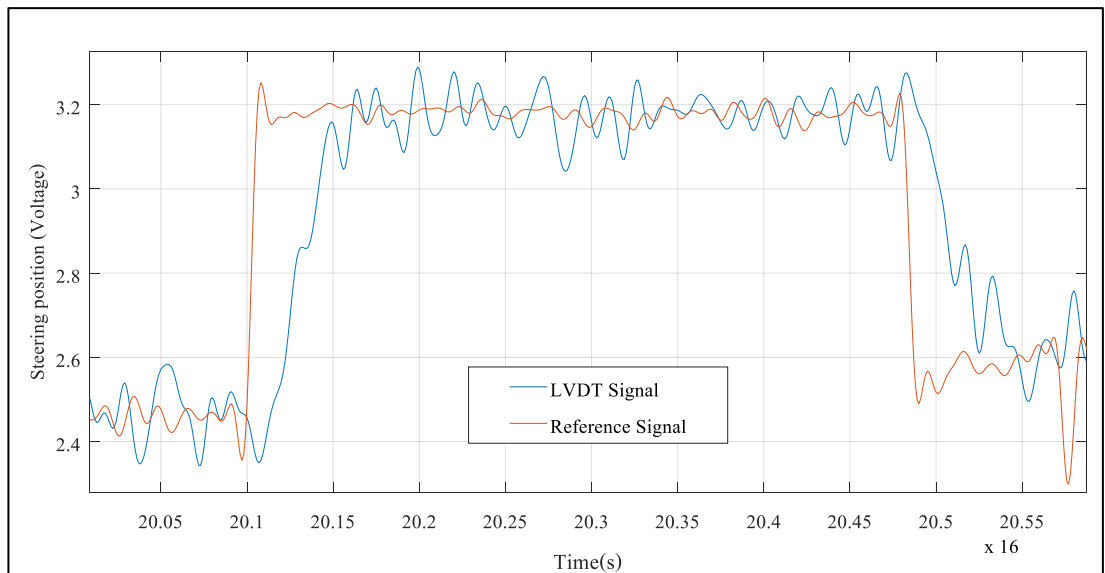
ภาพที่ 197 ภาพขยายกราฟแสดงตำแหน่งของล้อช่วงเวลา 5 ไป 7 ของการทดลองที่ 5

จากภาพที่ 197 เป็นการขยายช่วงที่ 5 และ 7 จากภาพจะเห็นผลตอบสนองของล้อต่อสัญญาณ Reference signal ซึ่งอธิบายได้ว่าหลังจากมีการปรับระยะตำแหน่งมุมของล้อให้ลดลงแล้วผลที่ได้คือ การเลี้ยวตามสัญญาณอ้างอิงของล้อมีอาการที่ดีขึ้นแต่อาการส่ายไปมาของล้อเกิดจากสัญญาณ Reference signal ที่มีความชันมากเกินไปแล้วทำให้ล้อเลี้ยวตามไม่ทันก็ยังคงมีอยู่ แต่อยู่ในช่วงเวลาที่น้อยมาก



ภาพที่ 198 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT
พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 5

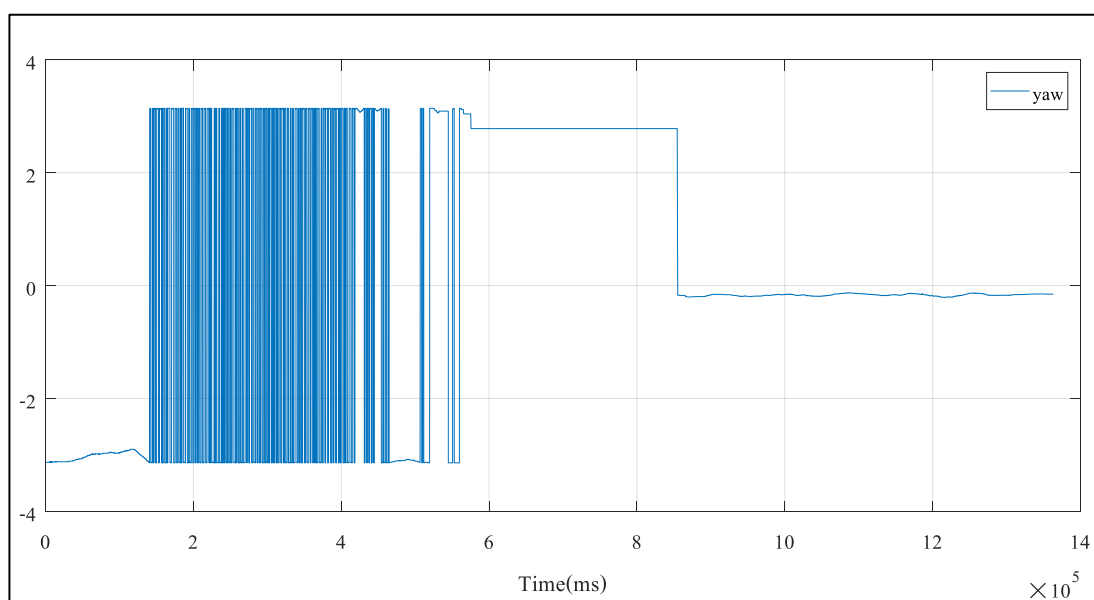
จากแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Reference signal กับสัญญาณ LVDT signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงานทั้งสอง สัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล้อนี้น้อยมากจนทำให้ล้อนั้นเลี้ยวตามไม่ทันนั้นยังคงมีอยู่



ภาพที่ 199 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณ LVDT
พิจารณาช่วงเวลาที่ค่าน้อยของการทดลองที่ 5

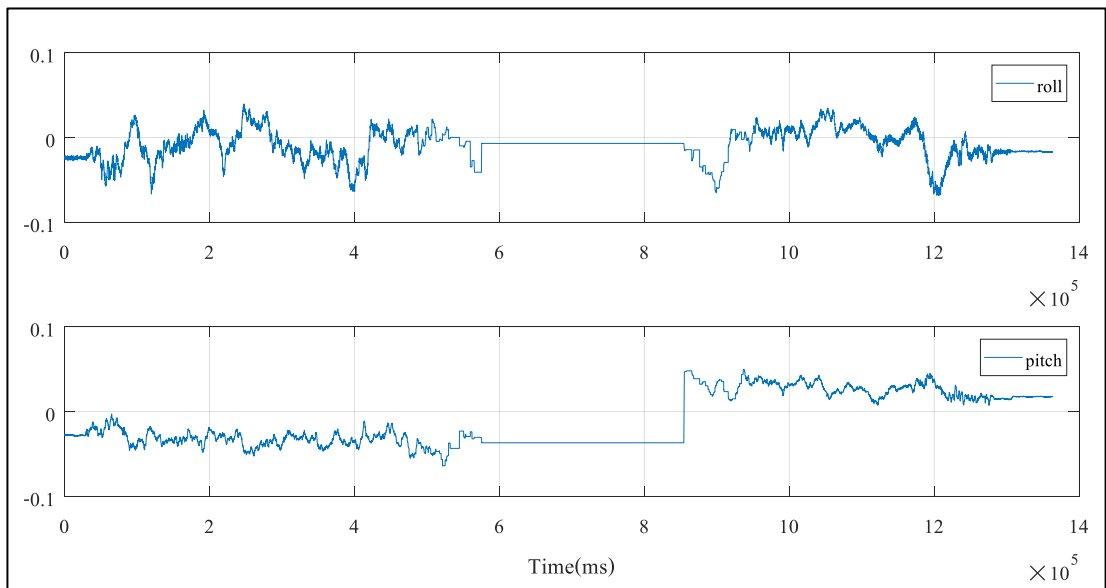
จากภาพที่ 199 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Reference signal กับสัญญาณ LVDT signal โดยเลือกพิจารณาจากการตามสัญญาณ Reference signal ไม่ทันของล้อเพื่อดูผลการทำงาน ทั้งสองสัญญาณจะสังเกตได้ว่าค่าช่วงเวลาของการสั่งล้อนี้น่าจะทำให้ล้อมีการเลี้ยวตามได้ดีขึ้น

ค่าที่เก็บจากโปรแกรม Qground control นั้น จะประกอบไปด้วย ค่า roll pitch yaw ค่า Servomotor output ค่า velocity กราฟค่า roll pitch และ yaw ที่เก็บมาได้จากโปรแกรมนั้นไม่ได้ระบุหน่วยมาให้มีค่า อยู่ในช่วง -3 ถึง 3 แต่ทางผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อหาความหมายของค่านี้แล้วซึ่งหมายถึง การหมุนมุมค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 3 หมายถึง 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านขวา และค่าที่อยู่ในช่วง 0 จนถึง -3 หมายถึง การหมุนมุมจาก 0 ถึง 180 องศา ไปทางด้านซ้าย

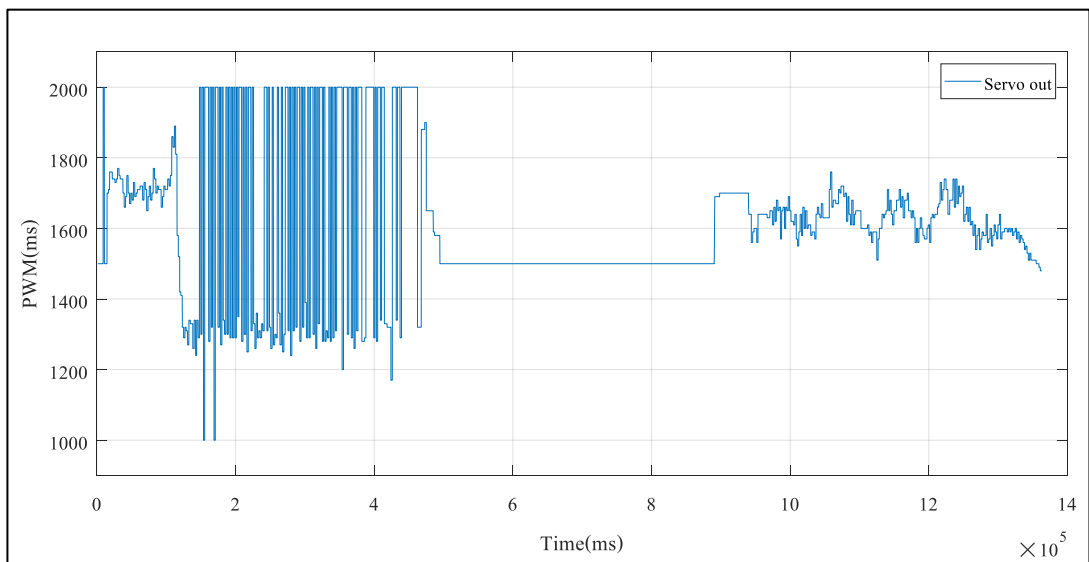


ภาพที่ 200 ทิศทางของมุม yaw ของการทดลองที่ 5

จากภาพที่ 200 กราฟค่ามุม yaw ในช่วงจุดที่ H ถึงจุดที่ 1 มุม Yaw แกว่งไปมาระหว่าง 3 และ -3 แต่เมื่อถึงช่วงระหว่างจุดที่ 1 และ 2 ค่าจะสลับกลับขึ้นมาแต่มีความถี่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดจุดที่สองการแกว่งก็จะหายไปส่วนภาพที่ ค่ามุม roll และ pitch มีค่าที่น้อยมากดังภาพที่ 201

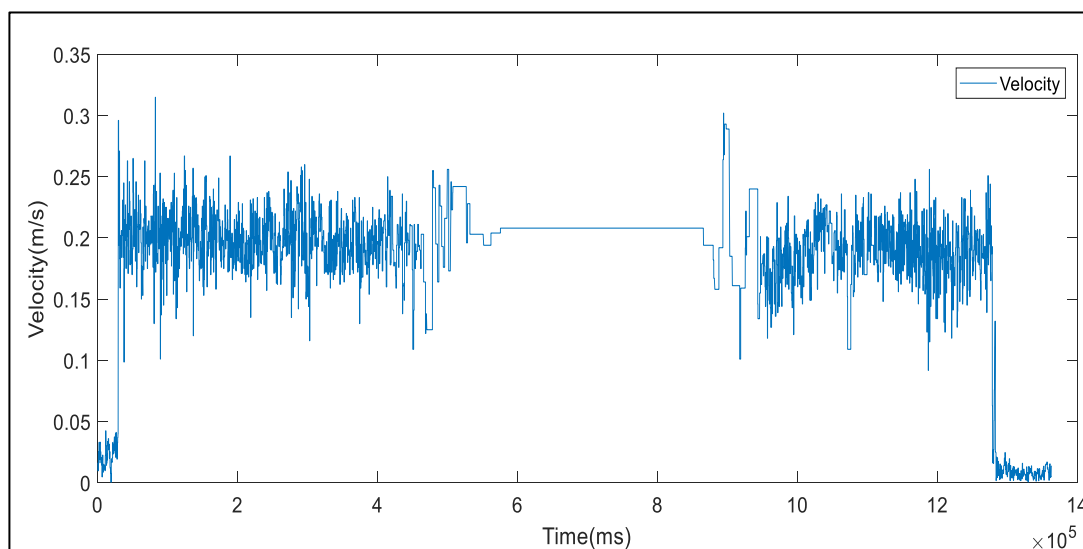


ภาพที่ 201 ทิศทางของมุม roll และ pitch ของการทดลองที่ 5



ภาพที่ 202 สัญญาณส่งไปควบคุม Servomotor ของการทดลองที่ 5

จากภาพที่ 202 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณ ที่ใช้สั่ง Servomotor ซึ่งในที่นี้เราใช้สัญญาณนี้เพื่อให้เป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับควบคุมตำแหน่งล้อ จากกราฟอธิบายได้ว่าปัญหาการส่ายของล้อหลักๆแล้วมาจากสัญญาณนี้ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ส่งไปมีความชันที่สูงมากไม่มีการไล่ระดับจึงทำให้ล้อเคลื่อนตำแหน่งไม่ทันในการทดลองนี้ใช้ความเร็วประมาณ 0.2 m/s ดังภาพที่ 203



ภาพที่ 203 ความเร็วของรถของการทดลองที่ 5

สรุปจากการทดลองที่ 5 ผลคือรถยังมีการส่ายไปมาแต่มีค่าลดลงน้อยกว่าการทดลองก่อนหน้านี้เป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนมาใช้ RTK GPS ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมมีความละเอียดที่มากขึ้น ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของการเคลื่อนที่ แต่อย่างไรก็ตามอาการส่ายของล้อหรือในสัญญาณควบคุมก็ตามยังคงไม่หมดไป

สรุปผลการทดลองที่ 1 ถึง 5

จากการทดลองข้างต้นผู้วิจัยได้ทำการวัด Standard deviation (เมตร) ของแต่ละครั้งที่ทำการทดลองพบว่าผลการทดลองนั้นมียุทธศาสตร์ที่ลดลงเรื่อยๆ และความแม่นยำในการเคลื่อนที่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น ดังตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการทดลองในรูปแบบต่างๆแบบที่ใช้ GPS ธรรมดา

ตำแหน่งล้อ(V)	LOWPASS filter	Standard deviation (เมตร)
1.4-4.4	-	0.215601
1.4-4.4	มีการfilterสัญญาณ	0.22501
2.3-3.1	-	0.14253
2.3-3.1	มีการfilterสัญญาณ	0.138992

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการทดลองในรูปแบบต่างๆแบบที่ใช้ RTK GPS

ตำแหน่งล้อ(V)	LOWPASS filter	Standard deviation (เมตร)
2.3-3.1	มีการfilter สัญญาณ	0.11529

3.7.6 การทดลองที่ 6 ทดลองให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่เป็นแนว

จุดประสงค์ของการทดลอง

เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของ GPS และเส้นทางเคลื่อนที่ของรถของรถแทรกเตอร์

ออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบเส้นทางจำเป็นต้องทำที่ละแถว จำนวน 5 แถว เนื่องจากมุมการเลี้ยวของรถที่กำหนดมีค่าน้อยทำให้ขณะการเลี้ยวหรือการกลับรถต้องใช้พื้นที่มาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้การวิ่งทีละแถว โดยที่เมื่อเสร็จแล้วก็ Offset ระยะห่างของแถวไปเรื่อยๆจนครบ สามแถว offset ค่าระยะห่างระหว่างแถวได้ตามต้องการโดยการเลื่อนจุดหรือ waypoint และสังเกตระยะห่างระหว่างจากได้จากโปรแกรมแต่โปรแกรมเองก็จะมีคลาดเคลื่อนจากการเซตตำแหน่ง และถ้ารู้ตำแหน่งของแถวที่ชัดเจนสามารถกรอกค่า Latitude และ Longitude ลงในโปรแกรมได้เลย

ในแต่ละแถวจะประกอบไปด้วยจุดต่างๆ ดังแสดงใน

Figure 204 จุด H หมายถึงจุด Home ซึ่งในการเซตรถตอนแรกต้องนำรถมาตั้งไว้จุดนี้ และให้ทิศทางของรถหรือหัวลูกศรไปยังจุดที่ 1 จุดที่ 1 หมายถึง waypoint จุดแรกที่รถจะเริ่มทำภารกิจเมื่อรถถึงจุดนี้แล้วรถก็จะวิ่งไปยังจุดที่ 2 โดยอัตโนมัติ เมื่อรถไปถึงจุดที่ 2 แล้วจะมีคำสั่งให้รถวิ่งกลับมาที่จุด H เหมือนเดิมที่คำสั่ง ณ จุดที่ 3

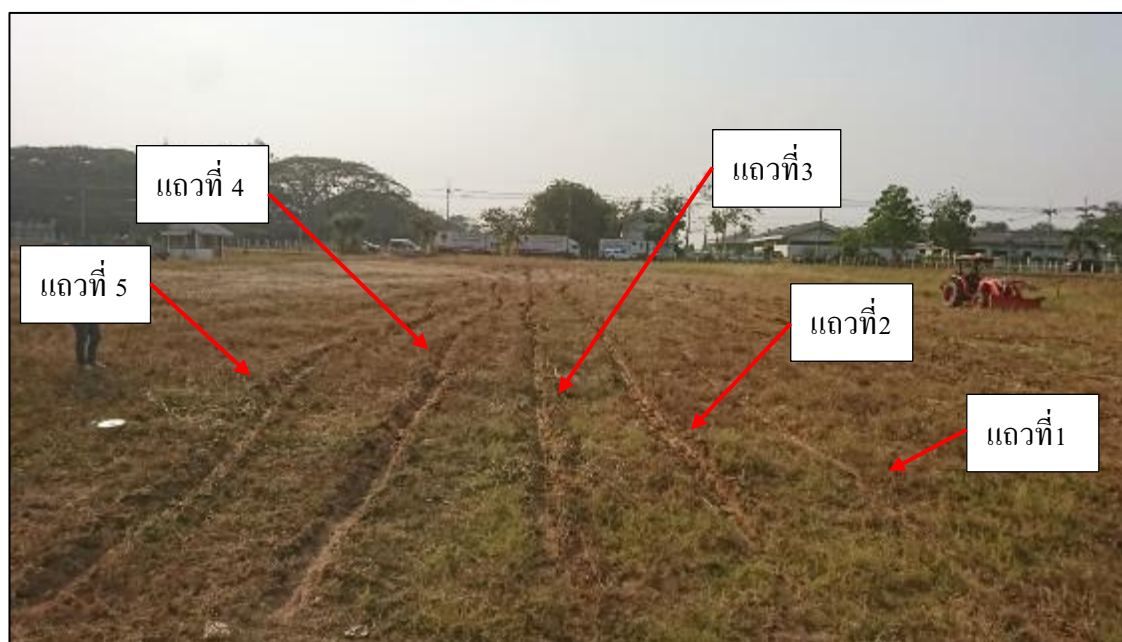


ภาพที่ 204 ภาพเส้นทางการเดินของรถแทรกเตอร์จากโปรแกรม Qground control ของการทดลองที่ 6

ในการทดลองในมีทั้งหมด 5 แถว แต่ละแถวห่างกัน 1.5 เมตร และยาวประมาณ 55 เมตร มีการกำหนด waypoint ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 7 ตำแหน่ง Waypoint ของแต่ละแถวในการทดลองที่ 6

แถวที่	Waypoint 1 = Latitude, Longitude	Waypoint 2= Latitude, Longitude
แถวที่ 1	16.4695721,102.8127512	16.4695721,102.8122182
แถวที่ 2	16.4695589,102.8127512	16.4695589,102.8122178
แถวที่ 3	16.4695460,102.8127512	16.4695460,102.8122193
แถวที่ 4	16.4695332,102.8127512	16.4695332,102.8122193
แถวที่ 5	16.4695203,102.8127512	16.4695203,102.8122206



ภาพที่ 205 เส้นทางเคลื่อนที่บนพื้นที่จริงของการทดลองที่ 6

จากผลการทดลองจะได้ร่องแสดงแนวเส้นทางการเคลื่อนตัวของรถแทรกเตอร์ ดังภาพที่ 205 ร่องที่ 1 อยู่ด้านขวามือ และไล่ลำดับมาเรื่อยๆ จนถึงแถวที่ 5 ด้านซ้ายมือ ตามลำดับ จากแถวที่ ร่องค่อนข้างไม่ลึก แต่ก็สามารถวัดเก็บข้อมูลได้ จากภาพ จะเห็นได้ว่าแถวที่ 2 ถึงแถวที่ 3 ลักษณะค่อนข้างตรง และระยะห่างที่สม่ำเสมอ แต่ในแถวที่ 1 แถวที่ 4 และแถวที่ 5 ร่องมีลักษณะที่ไม่ตรง ซึ่งไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัด แต่ก็ได้สันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดจากการตั้งค่าของโปรแกรมที่ไม่เหมาะสมสำหรับแถวนั้นๆ เนื่องจากระดับพื้นที่ที่ใช้ทดลองมีความไม่สม่ำเสมอ

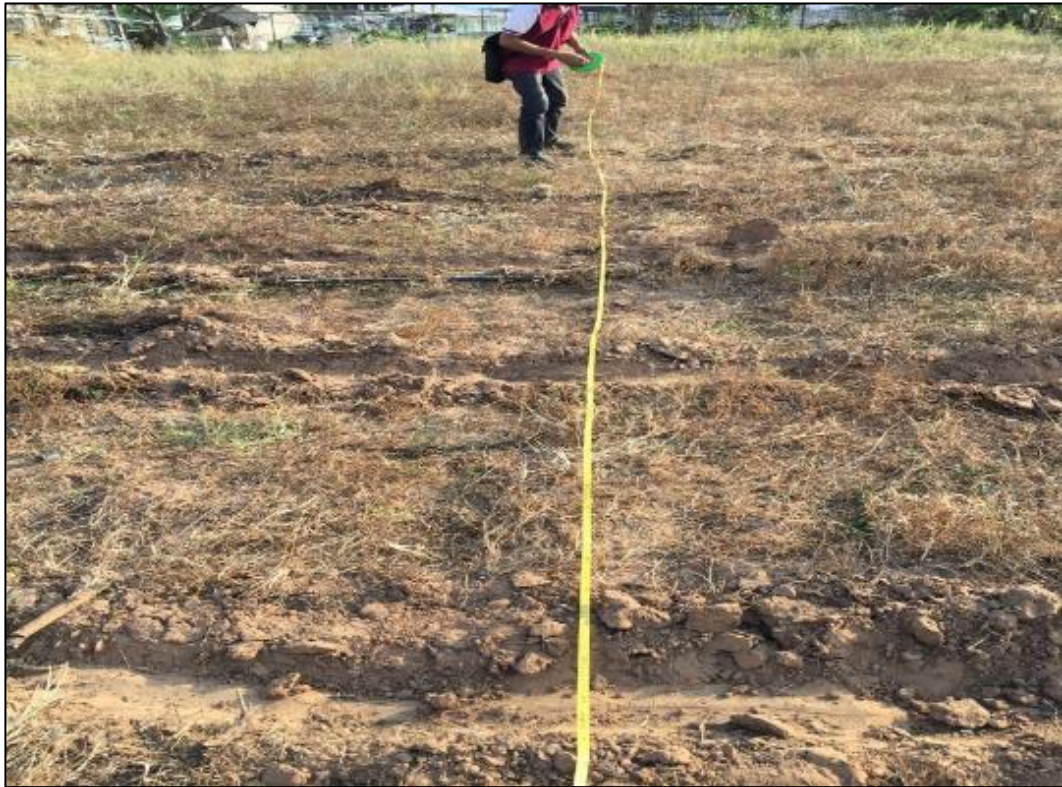
การวัดค่าและเก็บผล

ในการเก็บค่าการทดลองเพื่อต้องการทราบความแม่นยำของร่องและความเที่ยงตรง แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถระบุตำแหน่งที่รู้ชัดเจนลงบนพื้นที่จริงได้เพื่อนำมาเป็นเส้นอ้างอิงในการวัดเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ ดังนั้นในการวัดครั้งนี้จึงใช้การสมมุติว่ามีเส้นอ้างอิงที่เป็นเส้นตรงและขนานกับร่องแทน ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้ทราบข้อมูลระยะห่างระหว่างแถว และสามารถนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานได้

การเก็บค่าการทดลองจะทำการเก็บค่าทุกๆ 3 เมตร โดยที่ ร่องมีความยาวทั้งหมดประมาณ 55 เมตร การวัดจะทำการวัดครั้งเดียวทั้ง 5 แถวโดยเริ่มวัดจากเส้นอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ดังภาพที่ 206



ภาพที่ 206 การเส้นอ้างอิงการวัดค่าเก็บข้อมูลของการทดลองที่ 6



ภาพที่ 207 ลักษณะการวัดค่าเก็บข้อมูลของการทดลองที่ 6

ผลจากการทดลอง

เมื่อทำการทดลองและเก็บค่าได้เป็นที่เรียบร้อยแล้วได้ผลการวัดค่าเก็บข้อมูลดังตารางที่ 3.6
ค่าที่มีการเก็บได้มีทั้งหมด 20 ค่า ในแต่ละแถว

ตารางที่ 8 ระยะที่วัดได้จากการทดลองของการทดลองที่ 6 (เมตร)

ข้อมูลที่	แถวที่1	แถวที่2	แถวที่3	แถวที่4	แถวที่5
1	1.3	2.2	3.48	4.8	6.1
2	0.92	2.24	3.47	4.77	6.44
3	0.84	2.1	3.48	4.95	6.8
4	0.46	2.1	3.45	4.97	6.3
5	0.37	1.85	3.67	4.68	5.97
6	0.57	2.3	3.53	4.43	6.48
7	0.62	2.15	3.45	4.54	6.56
8	0.63	2.15	3.52	4.75	6
9	0.5	2.1	3.45	5.05	6.15
10	0.57	1.75	3.48	5.16	6.5
11	0.62	2	3.57	4.86	6.16
12	0.66	2.14	3.6	4.77	6.15
13	0.78	2.06	3.45	4.95	6.6
14	0.5	2	3.5	4.56	6.13
15	0.52	2.03	3.8	5.06	6.2
16	0.66	2.03	3.55	5	6.65
17	0.53	2	3.45	4.6	6.2
18	0.6	1.95	3.64	4.85	6.2
19	0.6	1.95	3.75	5.32	6.54
20	0.2	2.3	3.45	5.2	7

เมื่อนำค่าของแต่ละแถวมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่า STD และ Average ดัง พบว่าแถวที่ 1-5 มีค่า STD เท่ากับ 0.223227,0.139473,0.104986,0.23511,0.277987 (เมตร) ตามลำดับ จากข้อมูล ทำให้สอดคล้องกับภาพที่ 3 ว่า แถวที่ 2-3 นั้น ค่อนข้างตรง ส่วนแถวที่ 1,4,5 ไม่ตรงเท่าที่ควร

ตารางที่ 9 ค่า Standard deviation และ Average ของแต่ละแถวของการทดลองที่ 6 (เมตร)

การวัดค่า	แถวที่1	แถวที่2	แถวที่3	แถวที่4	แถวที่5
Standard deviation	0.223227	0.139473	0.104986	0.23511	0.277987
Average	0.6225	2.07	3.537	4.8635	6.3565

จากนั้นนำค่าของแต่ละแถวมาลบกันเพื่อหาระยะห่างระหว่างแถวจากตารางที่ 9 จะพบว่า ค่าเฉลี่ยระยะห่างของแต่ละแถวมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่เซตไว้ในโปรแกรมคือ มีระยะห่างในแต่ละแถวที่ 1.5 เมตร

ตารางที่ 10 ระยะห่างระหว่างแถวของการทดลองที่ 6 (เมตร)

ข้อมูลที่	แถวที่ 1 และ แถวที่ 2	แถวที่ 2 และ แถวที่ 3	แถวที่ 3 และ แถวที่ 4	แถวที่ 4 และ แถวที่ 5
1	0.9	1.28	1.32	1.3
2	1.32	1.23	1.3	1.67
3	1.26	1.38	1.47	1.85
4	1.64	1.35	1.52	1.33
5	1.48	1.82	1.01	1.29
6	1.73	1.23	0.9	2.05
7	1.53	1.3	1.09	2.02
8	1.52	1.37	1.23	1.25
9	1.6	1.35	1.6	1.1
10	1.18	1.73	1.68	1.34
11	1.38	1.57	1.29	1.3
12	1.48	1.46	1.17	1.38
13	1.28	1.39	1.5	1.65
14	1.5	1.5	1.06	1.57

ตารางที่ 11 ระยะห่างระหว่างแถวของการทดลองที่ 6 (เมตร) (ต่อ)

ข้อมูลที่	แถวที่ 1 และ แถวที่ 2	แถวที่ 2 และ แถวที่ 3	แถวที่ 3 และ แถวที่ 4	แถวที่ 4 และ แถวที่ 5
15	1.51	1.77	1.26	1.14
16	1.37	1.52	1.45	1.65
17	1.47	1.45	1.15	1.6
18	1.35	1.69	1.21	1.35
19	1.35	1.8	1.57	1.22
20	2.1	1.15	1.75	1.8
Average	1.4475	1.467	1.3265	1.493

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละแถวนั้นถึงแม้จะเซตค่าต่างๆที่เหมือนกันแต่ผลที่ได้กลับไม่เหมือนกันนั้นอาจเกิดจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น พื้นที่ในการทดสอบ และข้อจำกัดหลาย ๆ อย่าง รวมไปถึง พารามิเตอร์ต่าง ๆ จากโปรแกรมที่ยังไม่ได้ทดสอบปรับค่าอีกมาก ซึ่งในการทดลองนี้ปรับเฉพาะค่าที่ทราบเท่านั้น ส่วนรายละเอียดอื่น ๆ ยังต้องใช้เวลาศึกษาอีกมาก

จากผลที่เก็บค่ามาวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าเมื่อวัดค่า Standard deviation ของข้อมูลนั้นมีการกระจายตัวที่ไม่มาก และผลที่ได้จากค่าระยะห่างระหว่างแถวเฉลี่ยแล้วมีค่าใกล้เคียงกับค่าระยะห่างที่เซตไว้ในโปรแกรม อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการวัดนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่ตามสภาพพื้นที่และผู้ที่วัดค่า

3.8 ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

อุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร จะใช้เทคโนโลยี GPS ติดตั้งพร้อมกับเครื่องจักรทางการเกษตรหลังจากการใช้เทคโนโลยีโดรนโดยใช้กล้องที่ติดอยู่กับโดรนทำงานร่วมกับแพลตฟอร์มเพื่อเก็บข้อมูลภาคสนาม อาทิ พื้นที่ผิวของที่ดิน และประมวลผลออกมาเป็นโปรไฟล์ได้ทันทีเพื่อการวางแผนการชลประทาน สามารถระบุและจัดการพืชที่ผิดปกติและพืชที่ไม่แข็งแรงได้อย่างง่ายดาย บริการเหล่านี้จะช่วยวางแผนวงจรการเพาะปลูก แก้ไขพื้นที่ที่มีปัญหาได้ทันทีและจัดการเขตข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการให้บริการสามารถแบ่งออกเป็นการให้บริการก่อนการเพาะปลูก อาทิ การวิเคราะห์ชลประทาน และการให้บริการระหว่างการเพาะปลูก อาทิ ความสูงของพืช การนับจำนวนพืช การวิเคราะห์สุขภาพของพืช และการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาด ผู้ประกอบการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร โดยวางแผนจะรับงานจากกลุ่มลูกค้าหลักซึ่งเป็นกลุ่มโรงงานน้ำตาลที่รับอ้อยจากเกษตรกร โดยโรงงานน้ำตาลจะติดต่อเพื่อสำรวจแปลงอ้อยและผลผลิตอ้อยของเกษตรกรที่มีความประสงค์ใช้บริการแล้วจะทำการจัดคิว พร้อมทั้งจ้างผู้ให้บริการเพื่อมารับงานและดำเนินการตรวจวัด มีทั้งการชำระค่าบริการเป็นเงินสดและเงินเชื่อ ในด้านพื้นที่และรูปแบบการให้บริการมีการวางแผนพื้นที่เฉลี่ย 880,000 ไร่ต่อปี

ตารางที่ 3 ลักษณะการดำเนินธุรกิจ

ลักษณะการดำเนินธุรกิจและรูปแบบการให้บริการ	จำนวน (ราย)	พื้นที่ให้บริการ	จำนวนพื้นที่
- ให้บริการติดตั้งเครื่องอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร - ให้บริการให้คำแนะนำ ควบคุมและติดตามการทำงานของเครื่องจักรทางการเกษตร แบบอัตโนมัติ/กึ่งอัตโนมัติ ซึ่งประกอบด้วยระบบ AI สำหรับเสนอแนะแผนการทำงาน ควบคุมบันทึกและแสดงผลการทำงานของเครื่องจักรเกษตร	1	- พื้นที่รับจ้าง	ลูกค้าโรงงาน (พื้นที่ตั้งแต่ 100,000 ไร่ขึ้นไป) 200,000 ไร่/ครั้ง 4 ครั้ง/ปี ลูกค้ารายย่อย 500-2,000 ไร่/ครั้ง

อัตราค่าบริการและการชำระเงิน

อัตราค่าบริการการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรประเภทต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4 การให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร เป็นการให้บริการแบบองค์รวม ซึ่งประกอบด้วยให้บริการบินแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรเพื่อตรวจสอบสภาพ การให้บริการอ่านและแปลผล การให้บริการก่อนการเพาะปลูก อาทิ GIS และการวัดพื้นที่ แบบจำลองผิวดิน การวัดปริมาณ และการวิเคราะห์ชลประทาน การให้บริการอ่านและแปลผล การให้บริการระหว่างการเพาะปลูก และให้บริการวิเคราะห์และให้คำแนะนำในระหว่างการเก็บเกี่ยว

ตารางที่ 4 การให้บริการและอัตราค่าบริการ

ประเภทการให้บริการ	อัตราค่าบริการ
บริการติดตั้งเครื่องอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร	ลูกค้าโรงงาน (ตั้งแต่ 100,000 ไร่ขึ้นไป) อัตรา 12.5 บาท/ไร่ ลูกค้ารายย่อย 500-2,000 ไร่ อัตรา 15 บาท/ไร่
บริการให้คำแนะนำก่อนการเพาะปลูก	
บริการให้คำแนะนำระหว่างการเพาะปลูก	
บริการให้คำแนะนำหลังการเพาะปลูก	

1.3 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการให้บริการของอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร จะแตกต่างกันตามประเภทสภาพของพื้นที่ให้บริการ ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ ประกอบด้วย

ความจุ: 16,000 mAh

แรงดันไฟฟ้า: 22.2 V

พลังงาน: 355.2 Wh

ในการสำรวจแต่ละครั้ง ทางบริษัทจะจัดการสำรวจให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยที่ แบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรจะสำรวจได้พื้นที่ประมาณ 200

ไร่ ต่อแบตเตอรี่ 1 ก้อน และแบตเตอรี่จะถูกนำไปชาร์จไฟ โดยแบตเตอรี่ 1 ก้อน สามารถใช้สำรวจได้ 625 ไร่ ก่อนจะไม่สามารถชาร์จไฟได้อีก โดยประมาณการการสำรวจต่อวัน อยู่ที่ 1,500 ไร่

คิดเป็นอัตราการใช้พลังงาน 1.776 วัตต์/ไร่ เมื่อใช้สำหรับการสำรวจ จำนวน 1,500 ไร่ ต่อวัน คิดเป็น 2,667 วัตต์ต่อวัน จำนวนวันสำรวจประมาณ 20 วันต่อเดือน คิดเป็น 53,280 วัตต์ต่อเดือน จำนวน 220,000 ไร่ ต่อรอบ คิดเป็น 390,720 วัตต์ต่อรอบ และในหนึ่งปี สำรวจทั้งสิ้น 4 รอบ คิดเป็น 1,562,880 วัตต์ต่อปี

สำหรับค่าไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดยใช้ไฟฟ้าด้วยสูตรดังต่อไปนี้

กำลังไฟฟ้า (วัตต์) $\times$ จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า $\div$ 1,000 $\times$ จำนวนชั่วโมงที่ใช้ใน 1 วัน = จำนวนหน่วยต่อวัน (ยูนิต)

ดังนั้น จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ต่อวัน คิดเป็น $(2,667 \times 1) / 1,000 \times 1 = 2.667$ หน่วย และจำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน คิดเป็น 53.34 หน่วย

วิธีการคำนวณค่าไฟฟ้าที่อ้างอิงจาก การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ประกอบด้วย

- 35 หน่วยแรก เหนารวมทั้งสิ้นเป็นจำนวนเงิน 85.21 บาท
- 115 หน่วยต่อไป หน่วยละ 1.1236 บาท
- 250 หน่วยต่อไป หน่วยละ 2.1329 บาท
- ส่วนที่เกินกว่า 400 หน่วย หน่วยละ 2.4226 บาท

ดังนั้น ค่าไฟต่อเดือน คิดเป็น $85.21 + ((53.34 - 35) \times 1.1236) = 105.82$ บาท และคิดเป็น 1,270 บาทต่อปี

ตารางที่ 5 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรในกิจกรรมต่างๆ

ขนาดของไร่	เวลาที่ใช้ต่อวัน (ชั่วโมง)	พลังงานที่ใช้ (วัตต์)	แบตเตอรี่ที่ใช้ (ประมาณการ)
200 ไร่	5	355.2	1
500 ไร่	5	888	2.5
1,000 ไร่	5	1,776	5
1,500 ไร่	5	2,664	7.5

1.4 การซ่อมบำรุงรายปีและการซ่อมบำรุงรักษาระยะยาว

การซ่อมบำรุงแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร ประกอบไปด้วย การซ่อมบำรุงก่อนเริ่มต้นฤดูกาล และการซ่อมบำรุงระหว่างการปฏิบัติงาน สำหรับผู้ประกอบการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร จะมีค่าซ่อมบำรุงก่อนฤดูกาลเตรียมดิน ระหว่างปฏิบัติงาน สำหรับการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ฟ่วงต่อ การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ในการวิเคราะห์และอ่านค่านอกพื้นที่ ประกอบไปด้วยการซ่อมบำรุงระหว่างการปฏิบัติงาน การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ในการวิเคราะห์และอ่านค่าภายในสถานที่ ประกอบไปด้วยการซ่อมบำรุงระหว่างการปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตาม ค่าซ่อมบำรุงเหล่านี้ ทางบริษัทได้มีการทำประกันที่ครอบคลุมมูลค่าของตัวแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร ทางศูนย์ประกันจะเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่าย จึงไม่มีส่วนที่ทางบริษัทต้องรับผิดชอบ ในส่วนของค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ต่างๆ ส่วนอุปกรณ์ที่ไม่ได้มีการทำประกัน บริษัทได้คิดรวมเป็นค่าเสื่อมในส่วนของ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนแล้ว

1.5 การใช้แรงงาน

ผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตร มีจำนวนวันทำงานเฉลี่ยต่อปี 200 วัน มีการใช้แรงงานในการขับแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรอ่านค่าและประมวลผล ซ่อมบำรุง และบริหารจัดการ รวมเป็นค่าแรงงานทั้งหมดต่อปีเท่ากับ 1,440,000 บาทต่อปี และคิดเป็นค่าแรงงานเฉลี่ยต่อไร่เท่ากับ 1.64 บาทต่อไร่ ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 6 ผู้ประกอบการมีการใช้แรงงานส่วนผู้เชี่ยวชาญของผู้ประกอบการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรนอกเหนือจากผู้ให้บริการนอกสถานที่อีก 4 ตำแหน่ง ได้แก่ วิศวกรคอมพิวเตอร์ ฝ่ายจัดการข้อมูล วิศวกรไฟฟ้า และฝ่ายขาย โดยวิศวกรคอมพิวเตอร์และวิศวกรไฟฟ้า ทำงานสำหรับโครงการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรคิดเป็นร้อยละ 20 ของการทำงานทั้งหมด ฝ่ายขายทำงานสำหรับโครงการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรคิดเป็นร้อยละ 50 ของการทำงานทั้งหมด และฝ่ายจัดการข้อมูล ทำงานสำหรับโครงการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรคิดเป็นร้อยละ 100 ของการทำงานทั้งหมด รวมทั้งสิ้นเป็นค่าแรงทั้งหมดต่อปีเท่ากับ 750,000 บาทต่อปี ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การใช้แรงงานของผู้ประกอบการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร

ประเภทการใช้แรงงาน	แบบ อุปกรณ์ ควบคุม และติดตามเครื่องจักรกลเกษตร
--------------------	--

ประเภทการใช้แรงงาน	แบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร
จำนวนผู้ให้บริการนอกสถานที่ (คน)	8
จำนวนวันทำงานเฉลี่ยต่อปี (วัน)	200
ค่าแรงงานนักสำรวจต่อคนต่อเดือน (บาท)	15,000
ค่าแรงงานรวมต่อปี (บาท)	
- แรงงานจ้าง	1,440,000
ค่าแรงงานเฉลี่ยต่อไร่ (บาท)	
- แรงงานจ้าง	1.64

ตารางที่ 7 การใช้แรงงานส่วนผู้เชี่ยวชาญของผู้ประกอบการระบบควบคุมอัตโนมัติ/กึ่งอัตโนมัติในการเกษตร
อ้อย

จำนวนพนักงาน (คน)	
- วิศวกรคอมพิวเตอร์	1 (ใช้เวลาทำงาน 20%)
- ฝ่ายจัดการข้อมูล	1 (Full time)
- วิศวกรไฟฟ้า	1 (20%)
- ฝ่ายขาย	1 (50%)
จำนวนวันทำงานเฉลี่ยต่อปี (วัน)	200
ค่าแรงงานต่อคนต่อเดือน (บาท)	
- วิศวกรคอมพิวเตอร์	50,000
- ฝ่ายจัดการข้อมูล	30,000
- วิศวกรไฟฟ้า	50,000
- ฝ่ายขาย	25,000
ค่าแรงงานต่อคนต่อเดือนสำหรับโครงการ (บาท)	
- วิศวกรคอมพิวเตอร์	10,000

- ฝ่ายจัดการข้อมูล	30,000
- วิศวกรไฟฟ้า	10,000
- ฝ่ายขาย	12,500
ค่าแรงงานต่อคนต่อปีสำหรับโครงการ (บาท)	
- วิศวกรคอมพิวเตอร์	120,000
- ฝ่ายจัดการข้อมูล	360,000
- วิศวกรไฟฟ้า	120,000
- ฝ่ายขาย	150,000

ผลการวิเคราะห์ทางการเงินในการลงทุนการให้บริการระบบควบคุมอัตโนมัติ/กึ่งอัตโนมัติในการเกษตรอ้อยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการวิเคราะห์ทางการเงินในการลงทุนการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดผลการศึกษาใน 4 ประเด็น ได้แก่ การลงทุนในแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรและอุปกรณ์ที่สำคัญ

ต้นทุนและรายได้ จุดคุ้มทุน และความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งในการวิเคราะห์ทางการเงินทั้ง 4 ประเด็นจะคำนวณจากค่าใช้จ่ายและรายได้ของผู้ประกอบการต้นแบบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์ทางการเงินในการลงทุนการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร

1.1 การลงทุนในแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรและอุปกรณ์ที่สำคัญ

ในการลงทุนการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร ผู้ประกอบการจะต้องลงทุนทั้งหมดในค่าสร้างโรงเรือน และแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตร เป็นจำนวนเงิน 72,000 บาท โดยในการซื้อแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตร มี 1 นั้น มีราคาเท่ากับ 50,000 บาทต่อเครื่อง และซื้อเป็นจำนวน 8 เครื่อง ซึ่งคิดเป็นจำนวนเงิน 400,000 บาท (ตารางที่ 8) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโรงเรือนเก็บแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรและอุปกรณ์ต่อพ่วง จากการสัมภาษณ์ พบว่าผู้ประกอบการใช้โรงเรือนนี้เพื่อเก็บอุปกรณ์หลายอย่าง ซึ่งสัดส่วนการใช้โรงเรือนสำหรับการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรพบว่าการสร้างโรงเรือนใช้ประมาณในการก่อสร้างทั้งหมด 72,000 บาท มีอายุการใช้งาน 1 ปี

2) ค่าใช้จ่ายในการซื้อแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรและอุปกรณ์การเกษตรอื่น ๆ ในการลงทุนค่าเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ คิดเป็นมูลค่าทั้งหมด 4,960,000 บาท แบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรมีอายุการใช้งาน 1 ปี และ แบตเตอรี่มีอายุการใช้งาน 50,000 ไร่ โดยมูลค่าแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรมือ 1 เครื่องละ 50,000 บาท ส่วนอุปกรณ์ต่อพ่วง ได้แก่ แบตเตอรี่ มีมูลค่า 12,000 บาท

3) ค่าอุปกรณ์อ่านค่านอกสถานที่ ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ โดยคิดเป็นมูลค่าทั้งหมด 1,360,000 บาท คอมพิวเตอร์มีอายุการใช้งาน 3 ปี และ ซอฟต์แวร์มีอายุการใช้งาน 1 ปี โดยมูลค่าคอมพิวเตอร์ มือ 1 เครื่องละ 100,000 บาท ส่วนอุปกรณ์ต่อพ่วง ได้แก่ ซอฟต์แวร์ มีมูลค่า 70,000 บาท

4) ค่าอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูลในสถานที่ ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ โดยคิดเป็นมูลค่าทั้งหมด 715,000 บาท คอมพิวเตอร์มีอายุการใช้งาน 3 ปี และ ซอฟต์แวร์มีอายุการใช้งาน 1 ปี โดยมูลค่าคอมพิวเตอร์ มือ 1 เครื่องละ 525,000 บาท ส่วนอุปกรณ์ต่อพ่วง ได้แก่ ซอฟต์แวร์ มีมูลค่า 190,000 บาท

ตารางที่ 8 ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Costs) สำหรับผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตร

รายการ	มูลค่าต่อหน่วย	จำนวน	มูลค่ารวม (บาท)	มูลค่าซาก (บาท)	อายุการใช้งาน (ปี)
1. โรงเรือนเก็บแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรและอุปกรณ์	72,000	1	72,000	0	1
2. แบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร และอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่นๆ					
- แบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร	50,000	8	400,000	0	1
- แบตเตอรี่	12,000	80	960,000	0	50,000 ไร่
3. อุปกรณ์อ่านค่านอกสถานที่					
- คอมพิวเตอร์	100,000	8	800,000	5,000	3
- ซอฟต์แวร์	70,000	8	560,000	0	1
4. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ในสถานที่					

รายการ	มูลค่าต่อหน่วย	จำนวน	มูลค่ารวม (บาท)	มูลค่าซาก (บาท)	อายุการใช้งาน (ปี)
- คอมพิวเตอร์	525,000	1	525,000	10,000	3
- ซอฟต์แวร์	190,000	1	190,000	0	1
รวมทั้งหมด			3,507,000		

1.2 ต้นทุนและรายได้

จากการศึกษา พบว่าผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร สามารถให้บริการอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรจำนวนพื้นที่เฉลี่ย 880,000 ไร่ต่อปี โดยคิดเป็น 12.5 บาทต่อไร่ โดยมีต้นทุนการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร การเกษตรทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 11,000,000 บาทต่อปี ซึ่งแบ่งออกเป็นต้นทุนการผลิต 2 ประเภท คือ ต้นทุนคงที่ทั้งหมดเท่ากับ 2,822,383 บาทต่อปี หรือคิดเป็น 3.21 บาทต่อไร่ และต้นทุนผันแปรทั้งหมดเท่ากับ 2,191,270 บาทต่อปี หรือคิดเป็น 2.491 บาทต่อไร่

สำหรับรายได้รวมทั้งหมดจากการให้บริการอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรเท่ากับ 11,000,000.00 บาทต่อปี หรือคิดเป็น 12.5 บาทต่อไร่ ผู้ประกอบการจึงมีกำไรสุทธิจากการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรเท่ากับ 5,986,346.40 บาทต่อปี หรือคิดเป็น 6.80 บาทต่อไร่ (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 ต้นทุนการผลิตและรายได้ของผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร

รายการ	บาท/ปี	บาท/ไร่/ปี
รายได้จากการสำรวจแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร (รวบรวมข้อมูลครั้งละ 220,000 ไร่ ราคา 12.5 บาทต่อครั้งต่อไร่ รอบการสำรวจ 4 ครั้งต่อปี)	11,000,000.00	12.5
รวมรายได้	11,000,000.00	
1. ต้นทุนผันแปร		
1.1 ค่าแรงงาน	2,190,000.00	2.49

รายการ	บาท/ปี	บาท/ไร่/ปี
1.2 ค่าพลังงาน	1,270.00	0.001
2. ต้นทุนคงที่		
2.1 ค่าเสื่อมราคา	2,621,667.00	2.98
2.3 ดอกเบี้ยเงินกู้ (5,000,000 บาท ดอกเบี้ย ร้อยละ 5)	200,716.60	0.23
รวมต้นทุน	5,013,653.60	5.70
กำไรสุทธิ	5,986,346.40	6.80
จำนวนพื้นที่ (ไร่)	880,000	

3.1.3 จุดคุ้มทุน

จากต้นทุนและรายได้ของผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตร การเกษตรเฉลี่ยต่อปีและต่อไร่ สามารถนำมาวิเคราะห์จุดคุ้มทุนในการให้บริการต่อปี ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จุดคุ้มทุน (Break-even point)} &= \frac{\text{ต้นทุนคงที่ทั้งหมด}}{\text{ราคาต่อหน่วย} - \text{ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย}} \\
 &= \frac{2,822,383.6}{12.5 - 2.5} \\
 &= 282,238.36 \text{ ไร่ต่อปี}
 \end{aligned}$$

ซึ่งหมายความว่าผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรควรให้บริการอย่างน้อย 282,238.36 ไร่ต่อปี จึงจะคุ้มทุน หรือมีรายได้เท่ากับต้นทุนทั้งหมดพอดี หากผู้ประกอบการต้องการมีกำไรจะต้องให้บริการมากกว่า 282,239 ไร่ต่อปี ขึ้นไป

3.1.4 ความคุ้มค่าในการลงทุน

จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนของผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรพบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของปีที่ 1 เท่ากับ 2,100,818.64 บาท มีค่าเป็นบวก หมายความว่ามูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนของผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุม

และติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตรมีค่ามากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนที่เป็นค่าการลงทุนและค่าดำเนินงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในปีที่ 1

อัตราส่วนผลตอบแทนต่อทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 2.194 เท่า หมายความว่าการลงทุนของผู้ประกอบการให้บริการแบบอุปกรณ์ควบคุมและติดตามเครื่องจักรกลเกษตรการเกษตร 1 บาท จะได้ผลตอบแทน 2.194 บาท หรือมีผลกำไรเท่ากับ 1.194 บาท และเมื่อพิจารณาอัตราผลตอบแทนภายในของการลงทุน (IRR) พบว่า มีค่าเท่ากับร้อยละ 70.70 ซึ่งมีความมากกว่าอัตราดอกเบี้ยของเงินลงทุนร้อยละ 5 แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมในการลงทุน

จากผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 อัตราส่วน มีทิศทางไปทางเดียวกันแสดงว่าการลงทุนมีความคุ้มค่า

3.9 การยื่นจดทรัพย์สินทางปัญญา

ได้ประสานงานเบื้องต้นกับสำนักทรัพย์สินทางปัญญา มหาวิทยาลัยขอนแก่นแล้ว และอยู่ระหว่างการกำหนดข้อถือสิทธิ ซึ่งจะขอยื่นจดอนุสิทธิบัตรหลังจากเสร็จสิ้นโครงการ

บทที่ 4 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการศึกษา

ในขั้นตอนแรก การสำรวจภาคสนามพื้นที่ปลูกอ้อยในจังหวัดขอนแก่น เพื่อศึกษาช่วงของมูลาตเอียงและสภาพพื้นที่ที่มีการเตรียมดินก่อนปลูก พื้นที่ปลูกอ้อยที่มีความลาดเอียงในจังหวัดขอนแก่นมีค่าความลาดเอียงส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0-6 องศา ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เครื่องจักรทางการเกษตร เช่น รถแทรกเตอร์ สามารถเข้าไปทำงานได้ แต่ก็มีบางพื้นที่ที่ภูมิประเทศติดภูเขาหรือเป็นที่ราบสูง ทำให้มีการจัดการไร่อ้อยของเกษตรกรชาวไร่อ้อยเป็นไปได้ยากเพราะมีความลาดเอียงสูง ซึ่งจำเป็นต้องลงพื้นที่สำรวจภาคสนามเพื่อเก็บข้อมูลการจัดการไร่อ้อยของเกษตรกรในพื้นที่นั้นๆ ให้ทราบถึงขั้นตอนการปฏิบัติงานและแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ที่มีความลาดเอียงสูง

จากการสำรวจแปลงและสัมภาษณ์เกษตรกร โดยละเอียด จำนวน 5 ราย ในพื้นที่ อ.น้ำพอง อ.บ้านไผ่ และ อ.หนองเรือ พบว่า การกำหนดแถวการทำงานของเกษตรกร มี 2 รูปแบบ ได้แก่ การวางแผนแถวอ้อยแบบทิ้งน้ำ และการวางแผนตามแนวยาวของแปลง เพื่อลดรอบการกลับเลี้ยว โดยอุปสรรคในการทำงานในการกำหนดแถวอ้อยได้แก่ ระยะห่างระหว่างแถวไม่สม่ำเสมอ จำนวนแถวในแต่ละรอบที่ปลูกไม่คงที่ และความเสี่ยงต่อการพลิกคว่ำมีผลต่อการกำหนดแนวปลูก

ในการศึกษาไดนามิกส์ของตัวรถแทรกเตอร์ในกระบวนการปลูกอ้อยในสภาพความลาดเอียง พบว่า หากต้องการนำระบบกำหนดเส้นทางมาใช้เพื่อกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ เราจะต้องปรับมุมมองการเคลื่อนที่ของรถให้รับกับค่าความลาดเอียงที่อาจแตกต่างกันไป ดังนั้น เราจะต้องให้ความสนใจกับตัวแปรที่สำคัญ เช่น จุดหมุน มุมหมุนแนวนอน และมุมเลี้ยว ค่ามุมเลี้ยว คือ ค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ซึ่งอาจเกิดจากการไถของรถจากเส้นทางเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนเนินลาด และอาจทำให้เกิดค่าความเบี่ยงเบนระหว่างเส้นทางจริงที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ และเส้นทางที่ระบบกำหนดให้

ในส่วนของการพัฒนาชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์ และเซนเซอร์วัดความเร็วรถ ประกอบด้วย ชุดเซนเซอร์และกลไกสนับสนุนระบบบังคับทิศทางอัตโนมัติของรถแทรกเตอร์ (ชุดทดลองผลิต) ชุดประมวลผลและเขียนโปรแกรม และกลไกสนับสนุน (ชุดต้นแบบ) ซึ่งได้ออกแบบให้ระบบทำงานร่วมกัน

ผลรวมของการศึกษานี้สามารถแบ่งออกเป็นสองประเด็น คือ

1. ระบบการควบคุมที่ได้ออกแบบและติดตั้งไปซึ่งมีอยู่สองแบบคือ ระบบที่ใช้ Servomotor และระบบที่ไฮดรอลิกส์ แต่ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาไปที่ระบบไฮดรอลิกส์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ระบบไฮดรอลิกส์ที่ได้ออกแบบไปนั้นสามารถควบคุมตำแหน่งของการลื่นได้จากระบบควบคุมไม่ว่าจะเป็นระบบควบคุมพื้นฐานที่มีในโปรแกรมอยู่แล้วหรือระบบควบคุมที่มีการพัฒนาออกแบบใหม่ ระบบสามารถใช้งานได้บนพื้นที่ที่เรียบ ขรุขระ ใช้งานได้นาน ส่วนข้อมูล Input/Output ที่มีเก็บเพื่อนำมาหา Transfer function ด้วยวิธี System identification นั้น แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกหาสมการ Transfer function ในส่วนของการลื่นในแต่ละด้านผ่านวาล์วแต่ละด้านก่อน ส่วนที่สอง คือการหาสมการ Transfer function ของการควบคุมการลื่นโดยรวม ส่วนแรกนั้นต้องนำระบบที่ได้ไปจูนร่วมกับ PID controller ก่อนที่จะส่งสัญญาณควบคุมไปที่ชุดขับเคลื่อนเพื่อให้สามารถควบคุมความเร็ว ความคุมตำแหน่ง การลื่นของระบบได้ จากนั้นจึงจะได้การควบคุมการลื่นโดยรวมซึ่งหมายถึงส่วนที่สองแล้วก็เก็บข้อมูลที่หาสมการ Transfer function ส่วนที่สอง จากสมการที่ได้ทั้งหมดจากที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำมาวิเคราะห์แล้วพบว่าสามารถระบบนั้นสามารถควบคุมได้

2. การนำระบบการควบคุมการลื่นแบบอัตโนมัติมาใช้ทดลองบนพื้นที่จริง ซึ่งการทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็นแบบต่างๆแตกต่างกันออกไป เช่น ทดลองด้วย GPS แบบธรรมดา ทดลองด้วย RTK GPS ทดลองด้วยการปรับมุมการลื่นของล้อ ทดลองด้วยการใส่ LOWPASS filter สัญญาณ รวมถึงการปรับค่าต่างๆ ทั้งที่อยู่ในโปรแกรม Matlab Simulink และโปรแกรม Qground control ด้วย เป็นต้น ในการทดลองช่วงแรกแทรกเตอร์มีการส่ายไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ซึ่งอาจเกิดจากความแม่นยำ GPS ที่ใช้ จากนั้นได้ทำการทดลองด้วย RTK GPS แต่ก็ยังเจอปัญหาเดิมอยู่หลังจากนั้นได้ทดลองปรับค่ามุมการลื่นที่ลดลงเรื่อยๆ ผลปรากฏว่ารถมีอาการส่ายที่ลดลงเรื่อยๆ และเมื่อได้ทำการทดลองด้วย RTK GPS แล้วอาการส่ายก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและวิ่งได้เกือบจะเป็นเส้นตรง แต่ในการทดลองทั้งหมดนี้ได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม และ Filter สัญญาณร่วมด้วย ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการลื่นส่ายไปมานั้นเกิดจากความไม่สัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ควบคุมการลื่นจาก Pixhawk 3Pro และระบบการบังคับลื่น ส่วนปัจจัยอื่นนั้นก็ส่งผลด้วยแต่ยังไม่ชัดเจนมากนัก ส่วนตัวควบคุมแบบ PID Controller นั้นได้ทำการใช้ค่าที่เดิมตลอดและมีการปรับจูนมาแล้ว แต่ในอนาคตผู้วิจัยคิดว่าควรที่จะมีการหาค่า Gain PID controller ที่เหมาะสมกับแต่ละสภาพพื้นที่และมีการอัปเดตค่าตลอดเวลาเพื่อการควบคุมที่ดียิ่งขึ้น

4.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการเขียนโปรแกรมและการเชื่อมต่อกับโปรแกรม Matlab Simulink สำหรับบอร์ด Pixhawk เพื่อจะได้วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้นำเอาโปรแกรม

สำเร็จรูปสำหรับรถบังคับขนาดเล็กมาใช้ แต่พอนำเอามาใช้จริงบนรถขนาดใหญ่แล้วผลตอบสนองการเลี้ยวนั้น ช้าลงจึงทำให้การควบคุมไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้

5.2.2 ศึกษา นำสมการโมเดลของรถจริงมาโปรแกรมลงในบอร์ด Pixhawk และเพิ่มตัวควบคุมหลายๆ แบบเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ

5.2.3 ศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถ เช่น พื้นที่ พื้นดิน และสภาพอากาศเนื่องจากปัจจัยที่กล่าวมานี้เป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ยากและมีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถโดยตรง

5.2.4 ศึกษา โปรแกรมสำหรับควบคุมเส้นทางให้เชี่ยวชาญ เนื่องจากในโปรแกรมยังมีอีกหลายพารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยยังศึกษาไม่หมด

5.2.5 ศึกษา เซนเซอร์ชนิดอื่นๆ และปรับปรุงจุดติดตั้งเซนเซอร์ให้มีความเที่ยงตรงให้ข้อมูลที่แม่นยำมากขึ้นซึ่งจะสามารถทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

4.3 แนวทางการวิจัยในอนาคต

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยคิดว่าการควบคุมแบบ PID Controller นั้นสามารถควบคุมได้แต่ก็ยังไม่เสถียรเท่าที่ควรดังนั้นผู้วิจัยเห็นว่าควรวิจัยในเรื่องการสร้างหรือนำตัวควบคุมชนิดอื่นมาเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

บรรณานุกรม

- [1] Dwight Easterly, Testing of RTK-Level Satellite-Based Tractor Auto-Guidance Using a Visual Sensor System, Biological Systems Engineering, 1-1-2010.
- [2] M. F. Kocher, M. B. Smith, R. D. Grisso, L. L. Bashford, PERFORMANCE TESTS OF THREE-POINT MOUNTED IMPLEMENT GUIDANCE SYSTEMS, Precision Agriculture, VOL. 16(6): 595-603.
- [3] T. S. Stombaugh, AUTOMATIC GUIDANCE OF AGRICULTURAL VEHICLES AT HIGH FIELD SPEEDS, ASAE Meeting Presentation, UIUC-ENG 98-7002, Orlando, FL July 12-16, 1998.
- [4] Andrew Higgins, George Antony, Gary Sandell, Ian Davies, Di Prestwidge and Bill Andrew.. A Framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. Agricultural Systems Volume 82, Pages 99-105, 2004
- [5] F. Marinello, A. Pezzuolo, F. Gasparini, J. Arvidsson and L. Sartori. Application of the Kinect sensor for dynamic soil surface characterization. Precision Agric Volume 16, Pages 601-612, 2015
- [6] José Alexandre Melo Demattê¹, José Luiz Lortte Demattê¹, Evandro Roberto Alves, Roberto Negrão Barbosa and Jorge Luis Morelli¹. Precision agriculture for sugarcane management: a strategy applied for brazilian conditions. Acta Scientiarum Volume 36, Pages 111-117, 2014
- [7] ณัฐดนัย แชนประสิทธิ์, ปรียาภรณ์ ละอองปลิว, ประภาพรรณ อินทรโชติ. การสร้างชุดทดลองวัดความดันในห้องปฏิบัติการ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ; 2555.
- [8] Kyowa Strain Gauges, Kyowa corporation, 2013
- [9] Data Logger Technical Knowledge [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 24 เมษายน 2559]. จาก <http://www.wisco.co.th/main/content/datalogger-knowledge> , 2556
- [10] F.J. Mestas-Carrascosa, D. Verdu' Santano, J.E. Merono, M. Sanchez de la Orden and A. Garcia-Ferrer. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. Biosystems Engineering Volume 137, Pages 73-83, 2015
- [11] เสรี วงศ์พิเชษฐ, เอกสารประกอบการสอนวิชาแทรกเตอร์, 2012

- [12] Pushkar Hingwe, Jeng-Yu Wang, Meihua Tai, Masayoshi Tomizuka, Lateral Control of Heavy Duty Vehicles for Automated Highway System: Experimental Study on a Tractor Semi-trailer, California PATH Working Paper, 2000.
- [13] P. Hingwe, M. Tai and M. Tomizuka, Modelling and Robust Control of Power Steering System of Heavy Vehicles for AHS, Proceedings of the 1999 IEEE, USA *August 22-27, 1999.
- [14] Kwang-Mo Noh, Self-tuning controller for farm tractor guidance, Iowa State University Dissertation, 1990.
- [15] Jurken G., Robust Automatic SteeringControl for Look-Down Reference Systems, IEEE, 1991
- [16] M. G. Skarpetis, Robust Tracking and Disturbance Attenuation Controllers for Automatic Steering, IEEE, 2003
- [17] ACIL Allen, Precise positioning in the Agricultural sector, the Department of Industry, Innovation, Climate Change, Research and Tertiary Education, 2013.
- [18] James Hassall, Future Trends in Precision Agriculture, Nuffield Australia, 2009.
- [19] V.I. Adamchuk, T.S. Stombaugh, and R.R. Price, GNSS-Based Auto-Guidance in Agriculture, Site-Specific Management Guideline, 2008

- Adamchuk, V I, T S Stombaugh, and R R Price. 2008. "GNSS-Based Auto-Guidance in Agriculture." *Site Specific Management Guidelines* 1(46): 1–6.
- Association, Australian Controlled Traffic Farming. 2011. "Enhancing Resilience and Reducing GHG Emissions in Australian Crop Production, House Standing Committee on Primary Industries and Resources."
- Bhat, Chandra R., Sebastian Astroza, and Amin S. Hamdi. 2017. "A Spatial Generalized Ordered-Response Model with Skew Normal Kernel Error Terms with an Application to Bicycling Frequency." *Transportation Research Part B: Methodological* 95: 126–48.
- Bleazard, T. A. (2015). FACTORS INFLUENCING FARMERS' UTILIZATION OF AUTO-GUIDANCE. UTAH STATE UNIVERSITY.
- Chamen, Tim. 2015. "Controlled Traffic Farming – From Worldwide Research To Adoption In Europe And Its Future Prospects." *Acta Technologica Agriculturae* 18(3): 64–73.
- Chengqiang Yin, Q. S. (February 2018). Development of Electrohydraulic Steering Control System for. *Journal of Electrical and Computer Engineering*.
- Craig Peter Baillie,Craig Raymond Lobsey,J. Alex Thomasson Craig Peter Baillie. (July 2018). A review of the state of the art in agricultural automation. Part III: Agricultural machinery navigation systems. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Detroit, Michigan.
- Ellis, T, S Sedeghatpour, and C Hignett. 2010. "Soil and Yield Improvements from Controlled Traffic Farming CTF on a Red Chromosol Were Similar to CTF on a Swelling Black Vertosol." (1990): 1990–93.
- Guldner, Jürgen et al. 1999. "Robust Automatic Steering Control for Look-down Reference Systems with Front and Rear Sensors." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 7(1): 2–11.
- Hak-Jin Kim,Sung-Bo Shim,Soo-Hyun Park,Jung-Hun Kim,Young-Joo Kim Joon-Yong Kim. (2016). Development of Automated Guidance Tracking Sensor System Based on Laser Distance Sensors. *Journal of Biosystems Engineering*.
- Hassall, James, and Nuffield Australia. 2010. "Future Trends in Precision Agriculture A Report For." (0906).

- Hingwe, Pushkar, Jeng-yu Wang, Meihua Tai, and Masayoshi Tomizuka. 2000. "Lateral Control of Heavy Duty Vehicles for Automated Highway System : Experimental Study on a Tractor Semi-Trailer." *Transportation* (January).
- Jing-quan TAN, En-rong MAO, Zheng-he SONG, Zhong-xiang ZHU Jin-yi LIU. (2016). Proportional directional valve based automatic steering system for tractors. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*. China.
- Jiang, Baoping, Cunghen Gao, Yonggui Kao, and Zhen Liu. 2016. "Sliding Mode Control of Markovian Jump Systems with Incomplete Information on Time-Varying Delays and Transition Rates." *Applied Mathematics and Computation* 290: 66–79.
- Jordan M. Shockley, C. R. (February 2011). A Whole Farm Analysis of the Influence of Auto-Steer Navigation on Net Returns, Risk, and Production Practices. *Journal of Agricultural & Applied Economics*.
- K-M. Noh, and D. C. Erbach. 2013. "Self-Tuning Controller for Farm Tractor Guidance." *Transactions of the ASAE* 36(6): 1583–94.
- McPhee, John. 2009. "The Benefits of Controlled Traffic Farming to Assist Adaptation to Climate Change for Australian Production Industries." *Submission to House Standing Committee on Primary Industries and Resources*: 1–12.
- Myungwook Park, S. L. (June 2015). Development of Steering Control System for Autonomous Vehicle Using Geometry-Based Path Tracking Algorithm. *ETRI Journal*,.
- Shourui Wang, Jie Gao, Ling Zhao, and Hequan Miao Chengqiang Yin. (2019). Steering Tracking Control Based on Assisted Motor for Agricultural. *International Journal of Control, Automation and Systems*.
- Skarpetis, M. G., F. N. Koumboulis, and A. S. Ntellis. 2006. "Robust Tracking and Disturbance Attenuation Controllers for Automatic Steering." *14th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'06* (1): 1–6.
- Smart, Allen, Digney Paul, Griffiths Sam, and Miri Sayed. 2013. "Precise Positioning in the Mining Sector." (June).
- Thana Radpukdee Wisawa Mamaa. (2018). DEVELOPMENT OF A PID CONTROL LAW FOR AN ON/OFFACTUATOR WITH OPERATING SIGNAL SATURATION. . The 21st International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications.
- Wang Liang,Du Yuefeng, Song Zhenghe,Mao Enrong,Zhu Zhongxiang Hua Bo. ((2018).

Design and Experiment on Integrated Proportional Control Valve of Automatic Steering System. International Federation of Automatic Control.

Weiqiang Fu, G. W. (2015). Development of Tractor Automatic Steering. The 5th Annual IEEE International Conference on. Shenyang, China.

Zhang, Qin, JF John F Reid, and Noboru Noguchi. 1999. "Agricultural Vehicle Navigation Using Multiple Guidance Sensors." *Proceedings of the international conference on field and service robotics*: 293–98.

กระทรวงอุตสาหกรรม, สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล. 2557. "รายงานการผลิตอ้อยและน้ำตาลทราย 2557."

อ.ธนนต์ ศรีสกุล. (ม.ป.ป.). การออกแบบและทดสอบ วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล(HPF)ที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อมูลเชิงเทคนิคของอุปกรณ์

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลเชิงเทคนิครถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ Kubota รุ่น L4708

รถแทรกเตอร์ รุ่น	L4708SP
ระบบขับเคลื่อน	4WD
เครื่องยนต์	V2203-M-DI
แบบเครื่องยนต์	ดีเซล4สูบตั้ง,ไต่เรคอินเจคชั่น, ระบายความร้อนด้วยน้ำ
ปริมาตรกระบอกสูบ	2,197 ซีซี.
ความกว้างกระบอกสูบxช่วงชัก	87 x 92.4 มม
แรงม้าสูงสุด	47 แรงม้า
แรงบิดสูงสุด	149.8นิวตัน-เมตร /2,700 รอบ-นาที
ระบบเกียร์	คอนสแตนต์, เดินหน้า8เกียร์, ถอยหลัง8เกียร์
ระบบพวงมาลัย	ไฮดรอลิกสมบูรณ์แบบ
ระบบคลัตช์	ชนิดแห้งแผ่นเดียว
ระบบเบรก	แบบจานเบรกหลายแผ่นแช่น้ำมัน
ระบบควบคุมแขนยก	ควบคุมตำแหน่ง (Position Control)
อัตราการไหลน้ำมันปั๊มไฮดรอลิก	30.5 ลิตร/นาที
น้ำหนักยกสูงสุดที่ปลายแขนยก	1,300 กก.
ความเร็วรอบPTO ในเกียร์1	540 /2,259 รอบ/นาที
ความเร็วรอบPTO ในเกียร์2	750 /2,373 รอบ/นาที
ขนาดรถ ยาว x กว้าง x สูง	3,200 x 1,495 x 2,049 มม.
ขนาดล้อยาง	ล้อหน้า 8 - 18 / ล้อหลัง 13.6 - 26 มม.
ระยะระหว่างล้อหน้า-หลัง	1,925 มม.
ความกว้างช่วงล้อหน้า(L,R)	1,150 มม.
ความกว้างช่วงล้อหลัง(L,R)	1,155-1,225 มม.
ความเร็วเดินหน้า	2.4 - 27.1 กม./ชม.
ความเร็วเดินหน้า	2.3 - 24.2 กม./ชม.
ระดับต่ำสุดจากพื้น	390 มม.
ความจุถังน้ำมัน	48 ลิตร
รัศมีวงเลี้ยวแคบสุด	2.65 เมตร
น้ำหนักรถ (ไม่รวมเหล็กถ่วง)	1,490 กก.