



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

## การพัฒนาระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ

### Development of a steering control system for an autonomous tractor

ธีรวัฒน์ เจ๊ะเอน<sup>1</sup> ฉัตริน เรืองจอหอ<sup>1</sup> มงคล คธาพันธ์<sup>2</sup> กมลชนน วงศ์สถาน<sup>1</sup> และ พยุงศักดิ์ จุลยุเสน<sup>1\*</sup>Teerawat Jatuan<sup>1</sup>, Chattarin Ruangchoho<sup>1</sup>, Mongkol Kathapant<sup>2</sup>, Kamonchanon Vongstan<sup>1</sup>and Payungsak Junyusen<sup>1\*</sup><sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000<sup>1</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering,

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

<sup>2</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันท์ นครราชสีมา 30310<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Phanomwan College of Technology, Nakhon Ratchasima, 30310

Received: 13 มี.ค. 62

Revised: 25 เม.ย. 62

Accepted: 3 พ.ค. 62

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ ค่าเกณฑ์เหมาะสมของตัวควบคุม PID ถูกปรับจนโดยใช้วิธีการ Ziegler-Nichols มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ถูกวัดด้วยทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านถูกนำมาใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมกระทำบนพื้นคอนกรีตขัดมันขณะรถแทรกเตอร์จอดติดเครื่องยนต์อยู่กับที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านสามารถลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งได้ เมื่อสมรรถนะของตัวควบคุม PID ถูกนำมาเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุม P สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ได้อย่างราบเรียบ ดังนั้นระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวด้วยตัวควบคุม P สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

**คำสำคัญ :** รถแทรกเตอร์อัตโนมัติ วิธีการ Ziegler-Nichols ชุดบังคับเลี้ยว ตัวควบคุมแบบ PID

## Abstract

The objective of this study was to develop a steering control system for an autonomous tractor. Appropriate feedback gains of PID controllers were tuned using Ziegler-Nichols method. Steering angle of the tractor was measured with a position transducer. A low pass filter was employed in order to reduce noise from the transducer. Performance tests of the control system were conducted on a polished concrete floor with leaving the engine idling. The performance results showed that the low pass filter could reduce the noise. When the performance among the PID controllers was compared, the P controller could steer the tractor smoothly. Therefore, the steering control system with P controller could be applied for practical use.

**Keywords :** Autonomous tractor, Ziegler-Nichols method, Steering controller, PID controller

---

\*ติดต่อ: E-mail: payungs@sut.ac.th, โทรศัพท์ 044-224225

## 1. บทนำ

รถแทรกเตอร์มีบทบาทสำคัญต่อการเกษตรอย่างมาก เพราะถูกนำมาใช้เป็นต้นกำลังในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ตั้งแต่การเตรียมดิน การปลูก การดูแลรักษา การเก็บเกี่ยว ตลอดจนการขนส่งผลผลิต การควบคุมรถแทรกเตอร์เป็นเวลานาน อาจทำให้ผู้ขับเกิดความเมื่อยล้า ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลงหรือเกิดอันตรายได้ ดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนารถแทรกเตอร์ให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อสร้างความปลอดภัยและความสะดวกสบายในการทำงานของเกษตรกรในปัจจุบันการสร้างรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ไฮดรอลิก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเซนเซอร์ต่างๆ การพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติกระทำอย่างกว้างขวางในกลุ่ม

ประเทศพัฒนาแล้ว [1-3, 9] และกำลังริเริ่มในประเทศไทย [4-6]

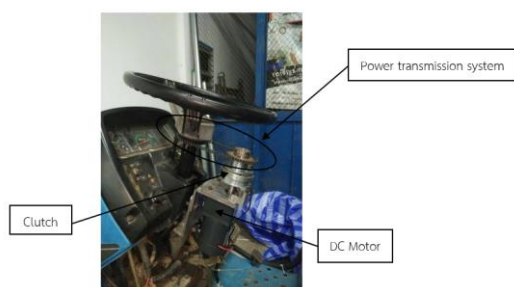
ระบบบังคับเลี้ยวอัตโนมัติเป็นกลไกสำคัญของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ ซึ่งมักประกอบด้วยชุดบังคับเลี้ยวและตัวควบคุมการเลี้ยว โดยชุดบังคับเลี้ยวเป็นกลไกที่ทำหน้าที่บังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ตามคำสั่งการเลี้ยวจากตัวควบคุม การพัฒนาระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติยังเป็นงานที่ท้าทาย ปัจจุบันคณะวิจัยได้พัฒนาชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก [6] ชุดบังคับเลี้ยวนี้สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์บนพื้นคอนกรีต พื้นหญ้า และพื้นดิน ได้อย่างราบเรียบ อย่างไรก็ตามการบังคับเลี้ยวยังถูกดำเนินการผ่านก้านควบคุม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบควบคุมการบังคับ

เลี้ยวของรถแทรกเตอร์อย่างอัตโนมัติ และทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม

## 2. วิธีการการวิจัย

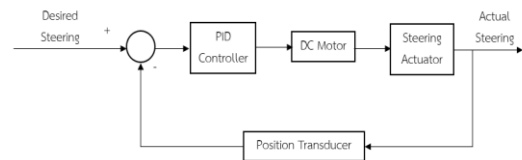
### 2.1 การออกแบบระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

ชุดบังคับเลี้ยวถูกติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ Mitsubishi รุ่น MT 190D [6] โดยใช้มอเตอร์เกียร์กระแสตรงขนาด 60 W เป็นต้นกำลัง ส่งผ่านกำลังด้วยชุดเฟืองโซ่เพื่อหมุนแกนพวงมาลัย และตัดต่อกำลังด้วยคลัตช์เพื่อความสะดวกในการบังคับด้วยมือ ดังแสดงในรูปที่ 1



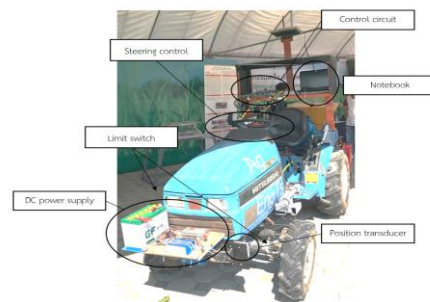
รูปที่ 1 ชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

ระบบควบคุมแบบวงรอบปิดถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการทำงานของชุดบังคับเลี้ยวอย่างอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2 การทำงานของระบบควบคุมเริ่มจากการเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวที่ต้องการกับค่ามุมเลี้ยวจริงของรถแทรกเตอร์ที่ได้จากทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง (Position Transducer) ข้อมูลนี้จะป้อนเข้าตัวควบคุม PID เพื่อคำนวณค่ามุมเลี้ยวชดเชยและส่งสัญญาณที่สัมพันธ์กับค่ามุมนี้ไปบังคับมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) ให้เลี้ยวเพื่อควบคุมระบบบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ (Steering actuator)

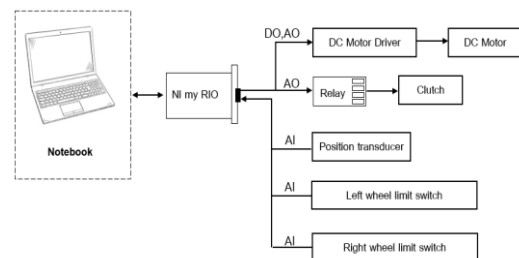


รูปที่ 2 ระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติบนรถแทรกเตอร์ อุปกรณ์วัดมุมต่างๆ ถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบพกพาโดยผ่านบอร์ด NI myRIO ทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง ยี่ห้อ AMETEK รุ่น PT-420-60 ถูกนำมาใช้เพื่อวัดค่ามุมเลี้ยว แผนผังของระบบวัดมุมสำหรับชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4 โปรแกรมควบคุมถูกพัฒนาขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ



รูปที่ 4 แผนผังของระบบวัดมุมสำหรับชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

## 2.2 การสอบเทียบมุมเลี้ยว

การสอบเทียบมุมเลี้ยวจะดำเนินการโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์และระยะของสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งจากตำแหน่งการหักเลี้ยวขวาสุดไปซ้ายสุดด้วยการลดระยะของสายเคเบิลลงครึ่งละประมาณ 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 5

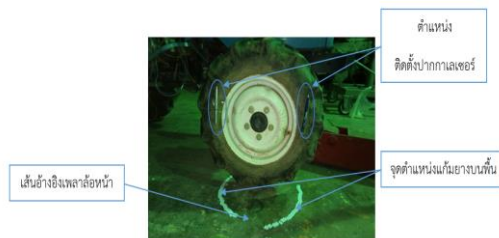
มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1

$$\alpha = 90 - \left( \frac{\alpha_L + \alpha_R}{2} \right) \quad (1)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์

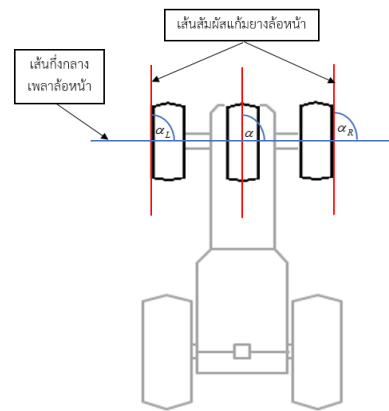
$\alpha_L$  คือ มุมระหว่างเส้นสัมผัสแก้มยางด้านนอกล้อหน้าซ้ายกับเส้นกึ่งกลางเพลาล้อหน้า

$\alpha_R$  คือ มุมระหว่างเส้นสัมผัสแก้มยางด้านนอกล้อหน้าขวากับเส้นกึ่งกลางเพลาล้อหน้า



รูปที่ 5 การสอบเทียบมุมเลี้ยว

รูปที่ 6 แสดงวิธีการวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ เส้นสัมผัสแก้มยางหาได้โดยการถ่ายตำแหน่งของแก้มยางด้วยปากกาเลเซอร์ลงบนพื้นราบ ลูกตั้งถูกนำมาระบุเส้นกึ่งกลางเพลลา ไม่บรรทัดครึ่งวงกลมถูกนำมาวัดมุมเลี้ยว



รูปที่ 6 วิธีการการวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์

## 2.3 การหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step response

ตัวควบคุมแบบ PID ดังสมการที่ 2 ถูกนำมาใช้ควบคุมการทำงานของชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ ค่าตัวแปร  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  ถูกปรับจูนด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols เพราะมีความสะดวกและไม่ต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [8,10-12]

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

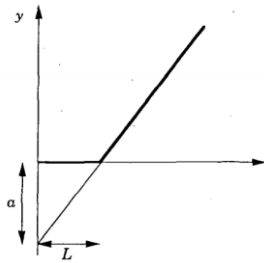
เมื่อ  $G_c(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน

$K_p$  คือ อัตราขยายเชิงปรับส่วน

$T_i$  คือ ค่าเวลาคงตัว

$T_d$  คือ เวลาที่ใช้ในการอนุพันธ์

ค่าตัวแปร  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  คำนวณจากผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ด้วยการพิจารณาค่าคงที่  $\alpha$  และ  $L$  ดังแสดงในรูปที่ 7 และตารางที่ 1

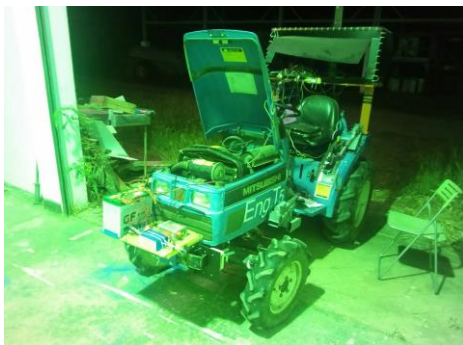


รูปที่ 7 การวัดผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดตามวิธี Ziegler-Nichols step response[10]

ตารางที่ 1 การหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบต่างๆ

| Controller | $K_p$   | $T_i$ | $T_d$ |
|------------|---------|-------|-------|
| P          | $1/a$   | -     | -     |
| PI         | $0.9/a$ | $3L$  | -     |
| PID        | $1.2/a$ | $2L$  | $L/2$ |

การหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมทำโดยการเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg การทดสอบทำบนพื้นคอนกรีตขัดมันขณะรถแทรกเตอร์ติดเครื่องยนต์จอดอยู่กับที่ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได

## 2.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID ถูกทำดังนี้

1) การทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุตขั้นบันไดที่ 20 deg

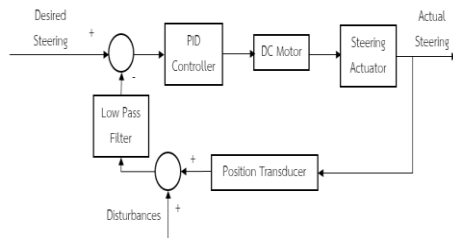
2) การทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่อง มุมเลี้ยวที่ใช้ในการทดสอบได้มาจากการสร้างเส้นทางของรถแทรกเตอร์กรณีรถเคลื่อนที่กลับเลี้ยวหัวแปลงแบบทางปลา [5] ค่าพารามิเตอร์การสร้างเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบทางปลาแสดงในตารางที่ 2 การทดสอบทำบนพื้นคอนกรีตขัดมันขณะรถแทรกเตอร์ติดเครื่องยนต์จอดอยู่กับที่ ดังแสดงในรูปที่ 8

ตารางที่ 2 ตัวแปรสำหรับการสร้างเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบทางปลา

| Parameters                              | Value                 |
|-----------------------------------------|-----------------------|
| ความถี่ในการเก็บข้อมูล ( $\Delta T_k$ ) | 0.05 s                |
| ตำแหน่งเริ่มต้นบนแกน X ( $X_i$ )        | 0 m                   |
| ตำแหน่งเริ่มต้นบนแกน Y ( $Y_i$ )        | 0 m                   |
| ทิศทางหน้ารถเริ่มต้น ( $\theta_i$ )     | 0°                    |
| มุมเลี้ยวเริ่มต้น ( $\alpha_i$ )        | 0°                    |
| ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางเพลลา            | 1.5 m                 |
| ล้อหน้าและล้อหลัง ( $L$ )               |                       |
| ความเร็วรถแทรกเตอร์ ( $V_k$ )           | 0.2 m s <sup>-1</sup> |
| ความเร็วการเลี้ยว ( $\omega_a$ )        | 13° s <sup>-1</sup>   |
| มุมเลี้ยวสูงสุด ( $\alpha_f$ )          | 30°                   |

## 2.5 วิธีลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter)

สัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งทำให้ค่ามุมเลี้ยวที่อ่านได้ไม่ราบเรียบ สัญญาณรบกวนนี้เกิดจากความไม่เสถียรของแรงดันไฟฟ้าของตัวแปลงไฟกระแสตรง ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความแปรปรวนของค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน

สมการที่ 3 แสดงการคำนวณหาค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านตัวกรองสัญญาณ

$$\alpha_{LPF}(n) = (1-a)\alpha_{PT}(n) + a\alpha_{LPF}(n-1) \quad (3)$$

โดย  $\alpha_{LPF}$  คือ มุมเลี้ยวจากตัวกรอง (deg)

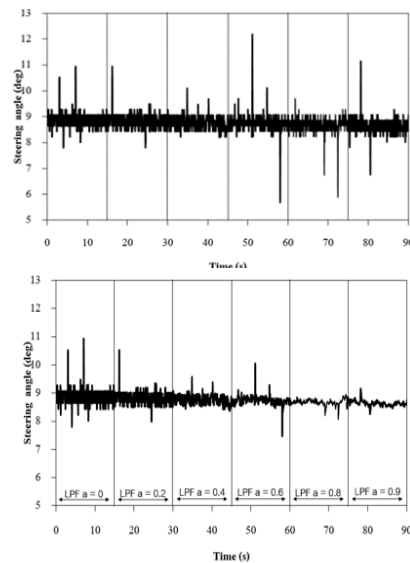
$\alpha_{PT}$  คือ มุมเลี้ยวจากการวัด (deg)

$a$  คือ ค่าคงที่ของตัวกรอง (0-1)

$n$  คือ รอบการคำนวณ

ความแปรปรวนของมุมเลี้ยวขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของตัวกรอง รูปที่ 10 แสดงผลการลดความแปรปรวนของมุมเลี้ยว โดยกราฟด้านบนแสดงค่ามุมเลี้ยวก่อนผ่านตัวกรองสัญญาณ ส่วนกราฟด้านล่างแสดงค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านตัวกรองสัญญาณ เมื่อกำหนดค่าคงที่ของตัวกรองเท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 0.9 จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าความแปรปรวนของมุมเลี้ยวมีค่า

ลดลงเมื่อค่าคงที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อค่าคงที่เข้าใกล้ 1 จะทำให้ระบบควบคุมตอบสนองช้าลง ดังนั้นค่าคงที่เท่ากับ 0.8 จึงถูกเลือกใช้ เพราะสามารถลดความแปรปรวนของมุมเลี้ยวและรักษาการตอบสนองของระบบควบคุมให้เพียงพอต่อการใช้งานได้



รูปที่ 10 ความแปรปรวนของมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ (บน: ค่ามุมเลี้ยวก่อนผ่านตัวกรองสัญญาณ ล่าง: ค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านตัวกรองสัญญาณ เมื่อกำหนดค่าคงที่ของตัวกรองเท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 0.9)

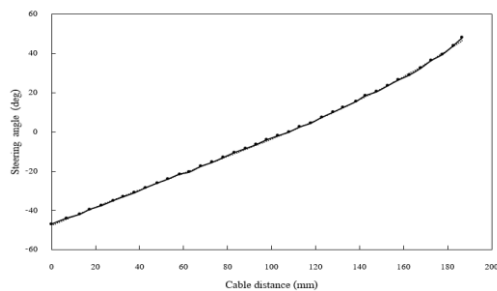
## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 3.1 ผลการสอบเทียบมุมเลี้ยว

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์และระยะของสายเคเบิล สมการพหุนามกำลังสามถูกนำมาสร้างเส้นแนวโน้ม ดังแสดงสมการที่ 4

$$\alpha_{PT} = (7 \times 10^{-6})(L_{PT})^3 - 0.0012(L_{PT})^2 + 0.4935L_{PT} - 47.776 \quad (4)$$

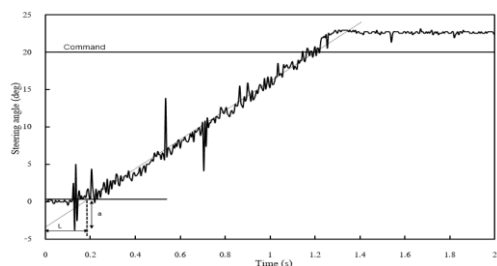
โดยที่  $L_{PT}$  คือ ระยะสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง (mm)



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวและระยะสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง

### 3.2 ผลการหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step response

รูปที่ 12 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อชุดบังคับเลี้ยวทำงาน ความแปรปรวนของมุมเลี้ยวมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะชุดบังคับเลี้ยวและทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบสามารถหาค่าคงที่  $a$  และ  $L$  ได้เท่ากับ 4.0 deg และ 0.2 s ตามลำดับ ดังนั้นค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบต่างๆ สามารถคำนวณได้ตามตารางที่ 3



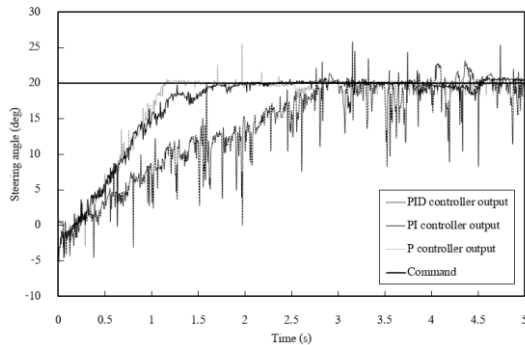
รูปที่ 12 ผลการตอบสนองของระบบแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรของตัวควบคุมของระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

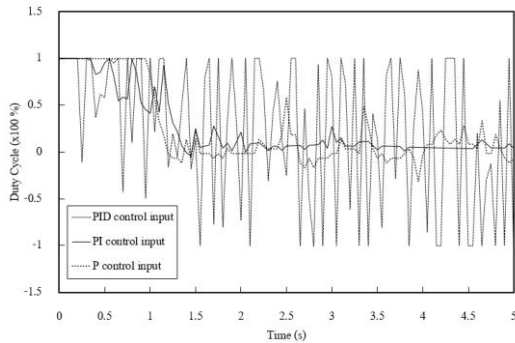
| Controller | $K_p$ | $T_i$ (min) | $T_d$ (min) |
|------------|-------|-------------|-------------|
| P          | 0.25  | -           | -           |
| PI         | 0.225 | 0.01        | -           |
| PID        | 0.3   | 0.00667     | 0.001667    |

### 3.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

รูปที่ 13 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg จากรูปพบว่าตัวควบคุม P มีช่วงเวลารอขึ้นและช่วงเวลาที่เร็วที่สุด เพราะสัญญาณควบคุมแปรผันตรงกับสัญญาณความผิดพลาดของระบบควบคุม ตัวควบคุม PI มีความผิดพลาดคงตัวน้อยที่สุด เพราะระบบควบคุมค่อยๆ ปรับสัญญาณควบคุมเพื่อบังคับให้มุมเลี้ยวเข้าใกล้ค่าที่กำหนดไว้ ส่วนตัวควบคุม PID ทำให้ระบบควบคุมตอบสนองช้าที่สุด และเกิดการกระตุกของชุดบังคับเลี้ยวอย่างรุนแรง เพราะส่วนอนุพันธ์ตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งอย่างรวดเร็วตรงกับ[7] ทำให้เกิดความแปรปรวนของมุมเลี้ยวอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 14 จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุม P ทำให้ระบบมีการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมอื่น ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 13 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg

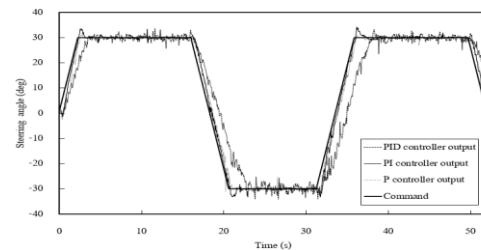


รูปที่ 14 ค่าสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg

ตารางที่ 4 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได

| Controller | $T_r$ (s) | $e_{ss}$ (deg) |
|------------|-----------|----------------|
| P          | 1.175     | 5.56           |
| PI         | 2.025     | 2.45           |
| PID        | 2.845     | 11.68          |

ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 15 จากรูปจะเห็นว่า ตัวควบคุม P และ PI มีการตอบสนองใกล้เคียงกัน แต่ตัวควบคุม PI มีการพุ่งเกินมากกว่า ส่วนตัวควบคุม PID ทำให้ระบบควบคุมตอบสนองช้า และเกิดการกระตุกของชุดบังคับเลี้ยว จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุม P ทำให้ระบบมีการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมอื่น



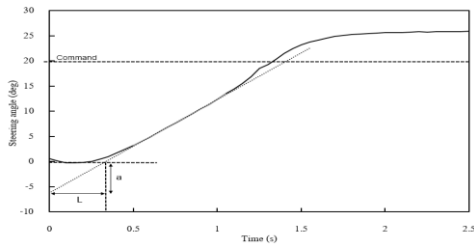
รูปที่ 15 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่อง

ผลการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดและแบบต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม P มีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมอื่น

### 3.4 สมรรถนะของตัวควบคุม PID เมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน

#### 3.4.1 ผลการหาค่าเกินของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step response

รูปที่ 16 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได จากผลการทดสอบสามารถหาค่าคงที่  $a$  และ  $L$  ได้เท่ากับ 6.2 deg และ 0.3 s ตามลำดับ ดังนั้นค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบต่างๆ สามารถคำนวณได้ตามตารางที่ 5 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านสามารถลดสัญญาณรบกวนจากทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งได้



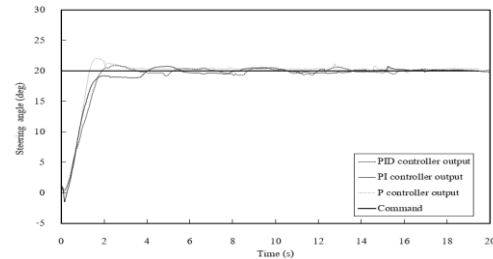
**รูปที่ 16** ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน โดยการเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg

**ตารางที่ 5** ค่าตัวแปรของตัวควบคุมของระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติเมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน

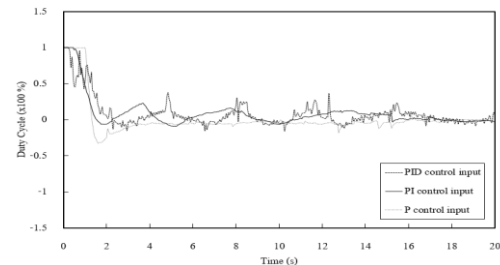
| Controller | $K_p$  | $T_i$ (min) | $T_d$ (min) |
|------------|--------|-------------|-------------|
| P          | 0.161  | -           | -           |
| PI         | 0.1446 | 0.01675     | -           |
| PID        | 0.193  | 0.0112      | 0.0028      |

#### 3.4.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

รูปที่ 17 แสดงผลการตอบสนองและรูปที่ 18 แสดงค่าสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน จากการเปรียบเทียบผลการตอบสนองพบว่า ตัวควบคุม P ทำให้ระบบมีการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมอื่น เพราะมีช่วงเวลาขึ้นและความผิดพลาดน้อยกว่าดังแสดงในตารางที่ 4 เนื่องจากค่าสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมมีค่าราบเรียบกว่าค่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมอื่นดังแสดงในรูปที่ 18



**รูปที่ 17** ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg



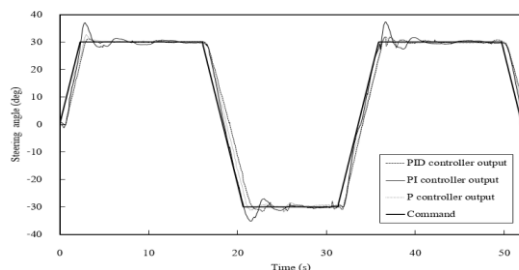
**รูปที่ 18** ค่าสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg

**ตารางที่ 6** ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได

| Controller | $T_r$ (s) | $e_{ss}$ (deg) |
|------------|-----------|----------------|
| P          | 1.3       | 0.74           |
| PI         | 4.1       | 0.76           |
| PID        | 1.95      | 1.035          |

ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 19 จาก

รูปพบว่าตัวควบคุม PI ทำให้เกิดการพุ่งเกินที่มากเกินไปและมีเวลาเข้าที่ช้า ตัวควบคุม P และ PID มีการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน แต่การกระตุกของชุดบังคับเลี้ยวยังสามารถสังเกตได้จากตัวควบคุม PID ดังนั้น ตัวควบคุม P จึงเป็นตัวควบคุมที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เพราะสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ได้อย่างราบเรียบโดยไม่เกิดการกระตุกของชุดบังคับเลี้ยว



รูปที่ 19 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน

#### 4. สรุป

ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวถูกออกแบบให้สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MT190D ได้อย่างอัตโนมัติ ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านสามารถลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งได้ การบังคับเลี้ยวด้วยตัวควบคุม P สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ได้อย่างราบเรียบ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย ภายใต้การดำเนินงานในโครงการวิจัยการพัฒนารถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. Computers and Electronics in Agriculture 2000;25 (1-2):169–94.
- [2] Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, Dickson M. Agricultural automatic guidance research in North America. Computers and Electronics in Agriculture 2000;25 (1-2):155–67.
- [3] Torii T. Research in autonomous agricultural vehicles in Japan. Computers and Electronics in Agriculture 2000;25 (1-2):133–53.
- [4] เกรียงไกร แซ่มสีม่วง มนุศักดิ์ จานทอง และ กระวี ตรีอำรรค. การพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับนำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 2560; 23(1):39-54.
- [5] วีรวัฒน์ เจเถื่อน พยุงศักดิ์ จุลยุเสน คชา วาทกิจ และจรรยาศักดิ์ สมพงษ์. การจำลองระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง.การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17, วันที่ 22 มิถุนายน 2559, จังหวัดกรุงเทพมหานคร; 2559.
- [6] ฉัตริน เรืองจอหอ วีรวัฒน์ เจเถื่อน กมลชนน วงศ์สถาน และพยุงศักดิ์ จุลยุเสน. การ

- ออกแบบชุดบังคับลิ้นสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5, วันที่ 14 ธันวาคม 2561, จังหวัดขอนแก่น; 2561.
- [7] เอกสารประกอบการเรียนการสอน ลักษณะสมบัติของตัวควบคุม PID. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 3 มกราคม 2562]. เข้าถึงได้จาก: [jitkomut.eng.chula.ac.th/ee331/6.pdf](http://jitkomut.eng.chula.ac.th/ee331/6.pdf)
- [8] José E N, et al. Hybrid steering control for intelligent vehicle navigation. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 2007 April 10-14; Roma, Italy.
- [9] ศูนย์ข้อมูลและการคาดการณ์เทคโนโลยีสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี .รายงานการคาดการณ์นวัตกรรมอุตสาหกรรม กลุ่มเกษตรแม่นยำ. (สื่อออนไลน์)[เข้าถึงเมื่อ วันที่ 3 มกราคม 2562]. เข้าถึงได้จาก: [stiic.sti.or.th/wp-content/uploads/2018/01/IIO\\_precision-farming\\_10.pdf](http://stiic.sti.or.th/wp-content/uploads/2018/01/IIO_precision-farming_10.pdf)
- [10] Åström K, Hägglund T. PID Controllers Theory Design and Tuning , 2nd ed. , Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.
- [11] กองพันธ์ อารีรักษ์. ระบบควบคุม. นครราชสีมา:มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2560.
- [12] ยุทธนา กันทะพะเยา และเฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์. การควบคุมของเหลวโดยใช้โปรแกรม LabVIEW. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 1, วันที่ 8-10 กันยายน 2559, จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ; 2559.