

การควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์สำหรับระบบเพนดูลัมผกผัน  
แบบฐานหมุนโดยใช้การควบคุมแบบเครือข่ายไร้สาย

EVENT-BASED LQR CONTROL FOR ROTARY INVERTED PENDULUM  
USING WIRELESS NETWORKED CONTROL SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M-027-208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EVENT-BASED LQR CONTROL FOR ROTARY INVERTED PENDULUM USING  
WIRELESS NETWORKED CONTROL SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2024  
KMITL-2024-EN-M-027-208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2024**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | การควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์สำหรับระบบเพนดูลัม<br>ผกผันแบบฐานหมุนโดยใช้การควบคุมแบบเครือข่ายไร้สาย |
| นักศึกษา                    | นางสาวใบตอง ทองสกุล   |
| รหัสประจำตัว                | 66016060  |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์   |
| พ.ศ.                        | 2567  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.อาจินต์ น่วมสำราญ   |

### บทคัดย่อ

การสื่อสารไร้สายสามารถส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของระบบควบคุม เนื่องจากความล่าช้า การสูญหายของแพ็กเก็ต และความไม่แน่นอนของการถ่ายโอนข้อมูล เพื่อรับมือกับความท้าทายดังกล่าววิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์สำหรับระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนโดยใช้การควบคุมแบบเครือข่ายไร้สาย โดยในระบบควบคุมมีการใช้เครือข่ายไร้สายเพื่อส่งข้อมูลระหว่างลูกตุ้มกลับหัวแบบหมุนซึ่งเป็นกระบวนการที่ไร้เสถียรภาพ และตัวควบคุมผ่านเครือข่าย Wi-Fi ตามมาตรฐาน IEEE 802.11n ซึ่งเป็นระบบเครือข่ายไร้สายที่ทำงานโดยชิป CYW43439 ของบอร์ดพัฒนา Raspberry Pi Pico W โหนดไร้สายประกอบด้วยโหนดเซ็นเซอร์ โหนดแอคชูเอเตอร์ โหนดแอคเซสพอยต์ และโหนดตัวควบคุม ซึ่งส่งและรับข้อมูลผ่านโพรโตคอลการสื่อสาร TCP/IP กลไกการควบคุมตามเหตุการณ์ที่นำเสนอช่วยให้อัลกอริทึมการควบคุมสามารถปรับอัตราการอัปเดตการควบคุมตามการเปลี่ยนแปลงของระบบและสถานะเครือข่าย เพื่อให้มั่นใจว่ามีการใช้ทรัพยากรเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันสามารถรักษาประสิทธิภาพการควบคุมผลการทดลองของฮาร์ดแวร์ในลูป (HIL) ในคอร์เนลแบบเรียลไทม์ของ MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ที่นำเสนอสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบและสร้างความยืดหยุ่นต่อการรบกวนที่เกิดจากเครือข่าย แม้ว่าความล่าช้าของเครือข่ายจะเกิน 10 มิลลิวินาที แต่ยังคงสามารถรักษาสมดุลของระบบลูกตุ้มผกผันฐานหมุนได้

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Thesis</b>         | Event-based LQR control for Rotary Inverted Pendulum using wireless networked control system |
| <b>Student</b>        | Ms. Baitong Thongsakul   |
| <b>Student ID.</b>    | 66016060   |
| <b>Degree</b>         | Master of Engineering  |
| <b>Program</b>        | Electrical and Computer Engineering  |
| <b>Year</b>           | 2024   |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assoc.Prof.Dr.Arjin Numsomran  |

## ABSTRACT

Wireless communication can adversely affect the performance of control systems due to delays, packet losses, and data transfer uncertainty. To address these challenges, this thesis presents an event-based Linear Quadratic Regulator (LQR) control approach for a rotary inverted pendulum system utilizing a Wireless Networked Control System (WNCS). To facilitate the control system, a WNCS is employed to transmit data between the rotary inverted pendulum, unstable process, and the controller via IEEE 802.11n Wi-Fi, a wireless network communication executing in the CYW43439 wireless chip of the Raspberry Pi Pico W development board. The wireless node consists of a sensor node, actuator node, access point node, and controller node, which transmit and receive data via the TCP/IP communication protocol. The event-triggering mechanism is integrated into the control loop. It allows the control algorithm to adaptively adjust the control update rate based on the system's dynamics and network conditions, ensuring efficient utilization of network resources while maintaining satisfactory control performance. The experimental results of hardware in the loop (HIL) in the MATLAB/Simulink real-time kernel show that the proposed event-based LQR control technique can achieve stabilizing and improve resilience to network induced disturbances. Although the network delay exceeds 10 msec, the balance of the rotating base inverse pendulum system can still be maintained.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อาจินต์ น่วมสำราญ ที่ให้ความอนุเคราะห์รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้การช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงสอนวิธีการทำงานที่ดีทำให้ผู้วิจัยรู้จักการพัฒนาตนเองในด้านการทำงานให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ขอขอบคุณคณะอาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่สั่งสอนวิชาความรู้ ถ่ายทอดประสบการณ์ต่าง ๆ และนำความรู้เหล่านั้นมาใช้ในการทำวิจัยนี้

สำหรับคุณประโยชน์และคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดา มารดาผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้ามาตลอดจนถึงทุกวันนี้

ใบตอง ทองสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญตาราง.....  | VII  |
| สารบัญรูป.....  | VIII |
| รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....  | X    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....   | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....   | 2    |
| 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....   | 2    |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....  | 2    |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย.....   | 3    |
| 1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....  | 3    |
| บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....  | 4    |
| 2.1 ระบบควบคุมเครือข่าย (Networked control system).....   | 4    |
| 2.1.1 วิวัฒนาการของเทคโนโลยีเครือข่าย.....  | 4    |
| 2.1.2 ผลการหน่วงเวลาของเครือข่าย.....   | 6    |
| 2.1.3 การชดเชยความล่าช้า.....   | 6    |
| 2.1.4 การควบคุมความทนทานต่อข้อผิดพลาดในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย.....                                       | 7    |
| 2.2 ระบบควบคุมสมองกลฝังตัว.....   | 7    |
| 2.3 ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน (Rotary Inverted pendulum).....   | 8    |
| 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....   | 8    |
| 2.4.1 ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR).....  | 8    |
| 2.4.2 การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ (State feedback) โดยวิธี<br>Linear Quadratic Regulator (LQR)..... | 9    |
| บทที่ 3 ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน.....  | 14   |
| 3.1 ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน.....  | 14   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน .....                   | 15   |
| 3.2.1 สมการสถานะเชิงเส้น.....  | 15   |
| 3.2.2 สมมติฐานของระบบ.....   | 16   |
| 3.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพนดูลัมแบบฐานหมุน .....                   | 16   |
| 3.3 ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR) .....                                    | 22   |
| 3.4 กลไกการควบคุมแบบตามเหตุการณ์ (Event-based control).....                  | 23   |
| <br>   |      |
| บทที่ 4 การออกแบบระบบการควบคุมเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนบนเครือข่ายไร้สาย ..... | 25   |
| 4.1 เครือข่ายไร้สาย (Wireless network).....                                  | 25   |
| 4.2 โหนดเซนเซอร์ (Sensor node) .....   | 27   |
| 4.3 โหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ (Sensor and actuator node) .....                  | 29   |
| 4.4 โหนดจุดเข้าใช้งาน (Access point node) .....                              | 31   |
| 4.5 โหนดตัวควบคุม (Controller node).....                                     | 33   |
| <br>   |      |
| บทที่ 5 การทดลองระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย .....                              | 41   |
| 5.1 การเตรียมทรัพยากรวิจัยสำหรับการทดลองระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย .....      | 41   |
| 5.2 การทดลองตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ภายใต้เครือข่ายไร้สาย ..... | 43   |
| <br>   |      |
| บทที่ 6 บทสรุป .....   | 47   |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย .....   | 47   |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ .....   | 47   |
| 6.3 ปัญหาและอุปสรรค .....  | 47   |
| 6.4 งานวิจัยในอนาคต .....  | 48   |
| เอกสารอ้างอิง .....  | 49   |
| <br>   |      |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ .....         | 54   |
| 1.1ก Raspberry Pi Pico W .....   | 54   |
| 1.2ก MD13S 13Amp DC Motor Driver .....                                       | 60   |
| 1.3ก DC motor by MAXON MOTOR และ E5 Optical Kit Encoder .....                | 63   |
| 1.4ก Magnetoelectric Incremental Rotary Encoder.....                         | 65   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| ภาคผนวก ข.....  | 68   |
| โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ .....                       | 68   |
| 1.1ข Virtual studio code.....                                       | 68   |
| 1.2ข MATLAB Simulink Desktop Real-Time .....                        | 69   |
| 1.3ข Wireshark.....   | 71   |
| ภาคผนวก ค.....  | 73   |
| ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ ..... | 73   |
| ประวัติผู้เขียน.....  | 81   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของระบบเพนดูลัมแบบฐานหมุน.....           | 17   |
| ตารางที่ 1.1ก พารามิเตอร์คุณสมบัติของชิป CYW43439.....                    | 58   |
| ตารางที่ 1.2ก ฟังก์ชันการทำงานของไดรฟ์มอเตอร์ MD13S.....                  | 61   |
| ตารางที่ 1.3ก ปุ่มการทำงานของไดรฟ์มอเตอร์ MD13S.....                      | 62   |
| ตารางที่ 1.4ก ฟินและการทำงานของไดรฟ์มอเตอร์ MD13S.....                    | 63   |
| ตารางที่ 1.5ก พารามิเตอร์คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง MAXON.....           | 63   |
| ตารางที่ 1.6ก คุณสมบัติของ Magnetolectric Incremental Rotary Encoder..... | 66   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมเครือข่าย .....   | 6    |
| รูปที่ 3.1 ชุดจำลองระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน .....   | 15   |
| รูปที่ 4.1 เครือข่ายการควบคุมเครือข่ายไร้สายของระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน .....                 | 25   |
| รูปที่ 4.2 ข้อมูลแพ็กเก็ตเกิดการเริ่มต้นการสื่อสารระหว่างโหนดตัวควบคุมและโหนดจุดเข้าใช้งาน.....  | 26   |
| รูปที่ 4.3 ข้อมูลแพ็กเก็ตเกิดการเริ่มต้นการสื่อสารระหว่างโหนดเซ็นเซอร์และโหนดจุดเข้าใช้งาน ..... | 26   |
| รูปที่ 4.4 ข้อมูลแพ็กเก็ตเกิดการสื่อสารระหว่างโหนดผ่านโปรโตคอล ARP .....                         | 26   |
| รูปที่ 4.5 กราฟแสดงจำนวนแพ็กเก็ตที่กระหว่างการสื่อสารในแต่ละช่วงวินาที.....                      | 27   |
| รูปที่ 4.6 กราฟแสดงจำนวนแพ็กเก็ตที่ผิดพลาดระหว่างการสื่อสารในแต่ละช่วงวินาที.....                | 27   |
| รูปที่ 4.7 แผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์การเชื่อมต่อในโหนดเซ็นเซอร์.....                              | 28   |
| รูปที่ 4.8 กราฟแสดงช่วงเวลาการสื่อสารในหน่วยมิลลิวินาทีของโหนดเซ็นเซอร์ .....                    | 28   |
| รูปที่ 4.9 ตัวอย่างแพ็กเก็ตเกิดการสื่อสารระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ .....                              | 29   |
| รูปที่ 4.10 แผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์การเชื่อมต่อในโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ .....                   | 30   |
| รูปที่ 4.11 กราฟแสดงช่วงเวลาการสื่อสารในหน่วยมิลลิวินาทีของโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ .....          | 30   |
| รูปที่ 4.12 ตัวอย่างแพ็กเก็ตเกิดการสื่อสารของโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ .....                        | 31   |
| รูปที่ 4.13 แผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์การเชื่อมต่อในโหนดจุดเข้าใช้งาน .....                        | 32   |
| รูปที่ 4.14 ตัวอย่างแพ็กเก็ตเกิดการสื่อสารของโหนดจุดเข้าใช้งาน .....                             | 32   |
| รูปที่ 4.15 ตัวอย่างแพ็กเก็ตส่งการสื่อสารของโหนดจุดเข้าใช้งาน.....                               | 33   |
| รูปที่ 4.16 แผนภาพโหนดต่าง ๆ ในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย .....                                   | 34   |
| รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมสำหรับโหนดตัวควบคุมบน Simulink Desktop Realtime.....                    | 34   |
| รูปที่ 4.18 พารามิเตอร์สำหรับบล็อกแพ็กเก็ตเอาต์พุตในโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ .....                 | 35   |
| รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์สำหรับบล็อกสตรีมอินพุตในโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ.....                       | 36   |
| รูปที่ 4.20 พารามิเตอร์สำหรับบล็อกแพ็กเก็ตเอาต์พุตในโหนดเซ็นเซอร์ .....                          | 37   |
| รูปที่ 4.21 พารามิเตอร์สำหรับบล็อกสตรีมอินพุตในโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ.....                       | 38   |
| รูปที่ 4.22 แผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์การเชื่อมต่อในโหนดจุดเข้าใช้งาน .....                        | 39   |
| รูปที่ 4.23 ตัวอย่างแพ็กเก็ตเกิดการสื่อสารระหว่างโหนดเซ็นเซอร์และโหนดควบคุม .....                | 39   |
| รูปที่ 4.24 ตัวอย่างแพ็กเก็ตเกิดการสื่อสารระหว่างโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับและโหนดควบคุม .....       | 40   |
| รูปที่ 5.1 ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน .....   | 42   |
| รูปที่ 5.2 แผนภาพตำแหน่งระยะทางของโหนดในเครือข่ายไร้สาย .....                                    | 43   |
| รูปที่ 5.3 ผลการตอบสนองการทดลองของระบบควบคุมภายใต้เครือข่ายไร้สาย ( $\theta$ ).....              | 44   |
| รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนองการทดลองของระบบควบคุมภายใต้เครือข่ายไร้สาย ( $\alpha$ ).....              | 45   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.5 สัญญาณควบคุมการทดลองในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย.....                     | 45   |
| รูปที่ 5.6 ผลการทดลองแปรผันตามเวลาในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย.....                  | 46   |
| รูปที่ 5.7 Network schedule ของเซ็นเซอร์/ตัวขับ (โหนด 1) และเซ็นเซอร์ (โหนด 2)..... | 46   |
| รูปที่ 1.1ก บอร์ด Raspberry pi Pico W.....  | 54   |
| รูปที่ 1.2ก ฟินบอร์ด Raspberry pi Pico W.....                                       | 57   |
| รูปที่ 1.3ก ไดอะแกรมการทำงานในชิพ CYW43439.....                                     | 58   |
| รูปที่ 1.4ก บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ MD13S.....  | 60   |
| รูปที่ 1.5ก ไดอะแกรมบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ MD13S.....                                    | 61   |
| รูปที่ 1.6ก มอเตอร์กระแสตรง MAXON DC motor.....                                     | 64   |
| รูปที่ 1.7ก ตัวเข้ารหัส E5 Optical Kit Encoder.....                                 | 65   |
| รูปที่ 1.8ก ตัวเข้ารหัส Magnetolectric Incremental Rotary.....                      | 67   |
| รูปที่ 1.1ข Visual studio interface.....  | 68   |
| รูปที่ 1.2ข Real-Time Execution in Run in Kernel Mode.....                          | 70   |
| รูปที่ 1.3ข Wireshark captures packets interface.....                               | 71   |

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

|          |   |
|----------|---|
| WNCS     | Wireless Networked Control System                 |
| TCP/IP   | Transmission Control Protocol/Internet Protocol   |
| IEEE     | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| V        | Voltage   |
| A        | Ampere  |
| LQR      | Linear-quadratic regulator                        |
| ECU      | Electronic control unit                           |
| ARP      | Address Resolution protocol                       |
| DHCP     | Dynamic Host Configuration Protocol               |
| $\alpha$ | Alpha   |
| $\theta$ | Theta   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบควบคุมมีแนวโน้มที่จะใช้งานทางด้านเครือข่ายไร้สาย (WNCS) มากขึ้นซึ่งประกอบด้วยเซ็นเซอร์ (Sensor) และตัวขับ (Actuator) ที่สื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สาย แทนที่การเชื่อมต่อแบบมีสายแบบจุดต่อจุดทั่วไป เนื่องจากประโยชน์ในการลดต้นทุนการใช้งาน การบำรุงรักษา และความยืดหยุ่นทำให้ระบบควบคุมเครือข่ายไร้สายกลายเป็นเทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานในระบบควบคุมที่สำคัญเช่น ระบบไฟฟ้าของยานยนต์ ระบบควบคุมการบิน ระบบการจัดการอาคาร และระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม [1-2] ซึ่งความท้าทายหลักในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย คือการออกแบบระบบการสื่อสารและการควบคุมโดยคำนึงถึงปฏิสัมพันธ์ที่จะเกิดขึ้น [3] ความล่าช้าในการสื่อสาร การสูญเสียแพ็กเก็ตเกิดของข้อมูล และการอัปเดตแบบไม่เป็นระยะซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะในระบบควบคุมได้

ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน (Rotary Inverted pendulum) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่เป็นที่นิยมต่อการนำมาทดสอบสมรรถภาพของตัวควบคุม เนื่องด้วยคุณลักษณะของระบบที่มีความไม่เชิงเส้นสูง ได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมได้ง่ายจึงมักนำประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมอยู่เสมอ นอกเหนือไปกว่านั้นระบบระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนตามแบบของฟูรุตะและคณะ [4-5] ได้มีการออกแบบจำลองให้แกนสามารถถูกแทนที่ด้วยโหนดสื่อสารทำให้สามารถหมุนได้รอบ 360 องศา อีกทั้งนำเสนออัลกอริทึมการควบคุมการป้อนกลับสถานะแบบเปิด-ปิดเพื่อแกว่งเพนดูลัมให้อยู่ในตำแหน่งที่ตั้งตรง นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR) [6-7] เพื่อรักษาเพนดูลัมให้อยู่ในตำแหน่งที่ตั้งตรง

เพื่อแก้ปัญหาความไม่เสถียรของการอัปเดตการวัดแบบไม่เป็นระยะในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สายมีการประยุกต์ใช้กลไกตามเหตุการณ์ [8-9] โดยอภิปรายถึงการช่วยปรับปรุงเสถียรภาพและความทนทานของระบบควบคุมที่ถูกรบกวนหรือเครือข่ายที่ล่าช้าในตัวขับไร้สายได้ อีกทั้งจัดการกับการอัปเดตค่าที่ช้าและไม่เป็นช่วง วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR) ตามเหตุการณ์สำหรับระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนโดยใช้ระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย เพื่ออำนวยความสะดวกในกระบวนการควบคุม จึงมีการใช้ระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย เพื่อส่งข้อมูลระหว่างเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนและตัวควบคุมด้วยเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11n (Wi-Fi) ที่ทำงานอยู่ในชิปไร้สาย CYW43439 ของบอร์ดพัฒนา Raspberry Pi Pico W โหนดไร้สายประกอบด้วยโหนดเซ็นเซอร์ (Sensor) โหนดตัวขับ (Actuator) โหนดจุดเข้าใช้งาน (Access point) และโหนดตัวควบคุม (Controller) ซึ่งส่งและรับข้อมูลผ่านโปรโตคอลการสื่อสารที่ซีพีไอพี (TCP/IP) กลไกการทริก

เกอร์เหตุการณ์ถูกรวมเข้ากับลูปควบคุม ช่วยให้อัลกอริทึมการควบคุมสามารถปรับอัตราการอัปเดตเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมตามไดนามิกของระบบและสถานะเครือข่าย เพื่อให้มั่นใจว่ามีการใช้ทรัพยากรเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันก็รักษาประสิทธิภาพการควบคุมที่น่าพอใจ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11n แบบ WiFi4 ซึ่งทำงานอยู่บนชิป CYW43439
2. ศึกษาและออกแบบชุดทดลองเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน (Rotary Inverted pendulum)
3. ศึกษากระบวนการควบคุมแบบเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ (Event-Based Linear Quadratic Regulator)
4. หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับเครือข่ายแบบไร้สาย
5. ทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมผ่านการออกแบบบน Simulink Desktop Real-Time

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1. ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (Linear Quadratic Regulator) แบบปกติยังไม่สามารถควบคุมให้สมรรถนะที่ต้องการภายใต้ระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย
2. เมื่อนำกลไกตามเหตุการณ์มาใช้ร่วมกับการควบคุมเชิงเส้นกำลังสองสามารถทำให้การควบคุมมีความคงทนต่อการสูญเสียแพ็กเก็ต
3. การประมาณโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน (Rotary Inverted pendulum) สามารถประมาณให้เป็นปริภูมิสถานะ
4. ความล่าช้าในการสื่อสารและการอัปเดตการวัดแบบไม่เป็นระยะสามารถดำเนินการได้ดีโดยใช้ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ (Event-Based LQR)

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พยายามแก้ไขปัญหาความล่าช้า ความไม่เสถียรของการอัปเดตการวัดแบบไม่เป็นระยะในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย (WNCS) โดยเมื่อระบบควบคุมเครือข่ายไร้สายกำลังดำเนินการ โหนดเซนเซอร์ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของการอัปเดตไว้ได้ โหนดควบคุมอาจไม่สามารถคำนวณได้ทันหรือคำนวณสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไป อีกทั้งอาจส่งสัญญาณไปให้โหนดตัวขับที่ช้าเกินไป จึงมีแนวคิดที่หากให้โหนดควบคุมทำงานเมื่อได้รับค่ามาจะช่วยแก้ปัญหาที่กล่าวมาได้ ด้วยเหตุนี้จึงนำกลไกการอ้างอิงตามเหตุการณ์มาใช้ในระบบควบคุมร่วมกับตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. การจำลองและทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมชุดจำลองกระบวนการเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน (Rotary Inverted pendulum)
2. การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน (Rotary Inverted pendulum) ในรูปปริภูมิสถานะ
3. การปรับจูนพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ (Event-Based LQR) โดยอ้างอิงจากสมการริชคาตี (Riccati equation)
4. การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ (Event-Based LQR) บน MATLAB/Simulink Desktop Real-Time
5. ดำเนินการควบคุมเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11n บนชิป CYW43439

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการวิจัย ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา
- บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์
- บทที่ 3 ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน
- บทที่ 4 ทฤษฎีและการออกแบบตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์
- บทที่ 5 การทดลองระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย
- บทที่ 6 บทสรุป

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องของระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย เพื่อแสดงให้เห็นถึงประวัติความเป็นมาในอดีตจนถึงปัจจุบัน ตั้งแต่การเริ่มต้นของระบบควบคุม ระบบควบคุมแบบเครือข่าย ระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย และระบบควบคุมสมองกลฝังตัว รวมทั้งตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย

### 2.1 ระบบควบคุมเครือข่าย (Networked control system)

ต้นกำเนิดของระบบควบคุมสามารถย้อนกลับไปถึงปี ค.ศ. 1868 เมื่อการวิเคราะห์ไดนามิกของลูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางถือกำเนิดขึ้นโดยนักฟิสิกส์ J. C. Maxwell [10] อีกหนึ่งความสำเร็จที่สำคัญในระบบควบคุมเกิดขึ้นเมื่อพี่น้องตระกูลไรท์ทำการบินทดสอบสำเร็จเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1903 [11] ความสำเร็จที่สำคัญต่อมาคือระบบควบคุมการบินโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุม ซึ่งได้รับการออกแบบเพื่อกำจัดความซับซ้อน ความแปรปรวน และน้ำหนักของวงจรถักไถ่ของระบบควบคุมการบินแบบไฮโดรเมคานิกส์โดยใช้วงจรไฟฟ้า วิทยาการขั้นต่อไปคือระบบควบคุมแบบกระจายส่วน (DCS) ที่เปิดตัวในปี ค.ศ. 1975 เนื่องจากความต้องการที่เพิ่มขึ้นของงานทางอุตสาหกรรมได้ส่งเสริมให้เกิดการผลักดันขีดจำกัดของการควบคุมแบบจุดต่อจุด จึงเห็นได้ชัดว่าระบบควบคุมเครือข่ายเป็นวิธีในการบรรลุการควบคุมระยะไกล

เมื่อมีการถือกำเนิดของเทคโนโลยีเครือข่าย การเข้าถึงอินเทอร์เน็ตที่สะดวกและราคาถูกลงได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นประโยชน์อย่างมหาศาล การพัฒนาและการวิจัยเพิ่มเติมในระบบควบคุมเครือข่ายได้รับแรงหนุนจากการเพิ่มขึ้นอย่างมากจากการใช้งานระบบไร้สายในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ปัจจุบันระบบควบคุมเครือข่ายกำลังเคลื่อนเข้าสู่การเป็นระบบควบคุมเครือข่ายแบบกระจายส่วน [12] ซึ่งต้องอาศัยความพยายามในการวิจัยจากหลากหลายสาขาวิชาเพื่อจุดมุ่งหมายในการสร้างโครงสร้างเครือข่ายและส่วนประกอบที่สามารถรวมเซ็นเซอร์แบบกระจายส่วน ตัวกระตุ้นแบบกระจายส่วน และอัลกอริทึมควบคุมแบบกระจายส่วนผ่านเครือข่ายการสื่อสารในลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ [13]

#### 2.1.1 วิทยาการของเทคโนโลยีเครือข่าย

ARPANET ซึ่งพัฒนาโดยสำนักงานโครงการวิจัยขั้นสูงของกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1969 เป็นเครือข่ายแพ็กเก็ตสวิตชิงเครือข่ายแรกของโลกและถือเป็นจุดเริ่มต้นของอินเทอร์เน็ต ในช่วงปี ค.ศ. 1988 มีการกำเนิดของฟิลด์บัส ซึ่งเป็นระบบเครือข่ายอุตสาหกรรมสำหรับการควบคุมแบบกระจายส่วนแบบเรียลไทม์ ฟิลด์บัสเป็นคำทั่วไปที่อธิบายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

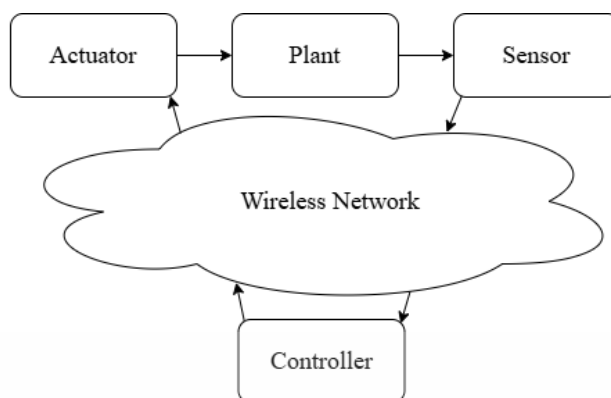
เครือข่ายการสื่อสารดิจิทัลทางอุตสาหกรรมสมัยใหม่ที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อแทนที่มาตรฐานสัญญาณแอนะล็อก 4–20 มิลลิแอมป์ที่มีอยู่ เครือข่ายนี้เป็นบัสอนุกรมมัลติดีร็อบแบบสองทิศทางที่ใช้เพื่อเชื่อมโยงอุปกรณ์แบบแยกส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมการผลิตแบบอัตโนมัติ และได้รับการส่งเสริมครั้งแรกในปี ค.ศ. 1989 โดยกระทรวงศึกษาธิการและการวิจัยแห่งสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี (BMBF) [14]

เครือข่ายพื้นที่ควบคุม (CAN) เป็นหนึ่งในมาตรฐานฟิลด์บัสอื่นๆ ซึ่งเป็นโปรโตคอลการสื่อสารมัลติมาสเตอร์แบบบอชิงโครนัสที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานที่ต้องการความสมบูรณ์ของข้อมูลสูงและอัตราส่งข้อมูลสูงถึง 1 Mb/s ซึ่ง CAN เปิดตัวในปี 1980 โดย Robert Bosch สำหรับใช้ในการเชื่อมต่อหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (ECU) สำหรับการใช้งานในยานยนต์ [15] เครือข่ายการสื่อสารอื่นที่ใช้ในระบบควบคุมคือ อีเทอร์เน็ตซึ่งได้พัฒนาเป็นโปรโตคอลและเลเยอร์ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายที่สุดในปัจจุบัน สาเหตุหลักมาจากต้นทุนที่ต่ำของส่วนประกอบของเครือข่ายและความเข้ากันได้กับโครงสร้างพื้นฐานอีเทอร์เน็ตที่มีอยู่ [16] สวิตช์อีเทอร์เน็ตกลายเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีแนวโน้มสูงสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมแบบเรียลไทม์ เนื่องจากการกำจัดความไม่แน่นอนในอีเทอร์เน็ตแบบเดิม [17]

แรงจูงใจเบื้องหลังของระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย (WNCS) ดังรูปที่ 2.1 เกิดจากการปฏิบัติการแบบเคลื่อนที่ การติดตั้งที่ยืดหยุ่น และการปรับใช้อย่างรวดเร็วในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ระบบทางหลวงอัตโนมัติ โรงงาน ฯลฯ ความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วในรับรู้ของฮาร์ดแวร์ การสื่อสาร และการประมวลผลที่ใช้พลังงานต่ำส่งผลให้เกิดความหลากหลายของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีวางจำหน่ายทั่วไป [18] Colandaairaj และคณะ [19] แสดงให้เห็นหลักการของการออกแบบซึ่งผสมผสานเทคโนโลยีการสื่อสารเข้ากับทฤษฎีการควบคุม สามารถปรับปรุงทั้งประสิทธิภาพการควบคุมและการสื่อสารภายในมาตรฐานระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11b ได้โดยการปรับอัตราการสื่อสารสัญญาณ Matkurbanov และคณะ [20] นำเสนอการสำรวจและวิเคราะห์ฟิลด์บัสไร้สายพร้อมการเปรียบเทียบและการทดสอบภาคปฏิบัติของเทคโนโลยีฟิลด์บัสไร้สายโดยรวมและการเลือกเครือข่ายขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันที่ต้องการ เครือข่ายและตัวกลางการสื่อสารทุกชนิดสามารถลดประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้

งานวิจัยของระบบควบคุมเครือข่ายไร้สายส่วนใหญ่ [3] อิงตามมาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นหลัก และรองรับอัตราส่งข้อมูล 1, 2, 11, 54 Mbps IEEE 802.11 ใช้ Carrier Sense Multiple Access พร้อมการหลีกเลี่ยงการชนกัน (CSMA/CA) เป็นโปรโตคอล Medium Access Control (MAC) อย่างไรก็ตาม โปรโตคอลที่ใช้การยืนยัน เช่น CSMA/CA ไม่เหมาะสำหรับการสื่อสารแบบเรียลไทม์ เนื่องจากต้องมีการรับรองการสื่อสารกันระหว่างโหนด และไม่รับประกันความล่าช้าของแพ็กเก็ต เหตุนี้จึงนำไปสู่การวิจัยเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมเครื่องข่าย

### 2.1.2 ผลการหน่วงเวลาของเครื่องข่าย

ในเครื่องข่ายสามารถเกิดการสื่อสารที่ไม่น่าเชื่อถือหรือไม่สามารถกำหนดได้ในแง่ของความล่าช้า ความไม่แน่นอน และการสูญเสียของข้อมูล [21] ในระบบควบคุมเครื่องข่ายไร้สายที่ไวต่อเวลา หากเวลาหน่วงเกินขีดจำกัดเวลาที่ยอมรับได้ที่ระบุไว้ ระบบที่ต้องการควบคุมหรืออุปกรณ์อาจได้รับความเสียหายหรือมีประสิทธิภาพลดลง การประยุกต์ใช้งานของฮาร์ดแวร์เรียลไทม์หรือซอฟต์แวร์เรียลไทม์จึงต้องคำนึงถึงเวลาเป็นสำคัญ

### 2.1.3 การขดเขยความล่าช้า

วิธีการทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่แตกต่างกันถูกนำมาใช้เพื่อการขดเขยความล่าช้าในระบบควบคุมเครื่องข่าย [22] มีการนำเสนอเทคนิคขั้นสูงหลายประการที่ขดเขยหรือลดความล่าช้าของเครื่องข่าย ซึ่งอาจเพียงพอที่จะประยุกต์ใช้แบบเรียลไทม์ที่ หนึ่งในวิธีที่เหมาะสมที่สุดจะแก้ปัญหาคือการใช้วิธีแก้ปัญหาลำดับสอง-เกาส์เซียน (LQG) โดยที่เมทริกซ์อัตราขยาย LQG จะถูกเลือกอย่างเหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากสถิติความล่าช้าของเครื่องข่าย [23] วิธีการเข้าคิวบัฟเฟอร์เป็นหนึ่งในวิธีการยอคนิยมที่เปลี่ยนระบบควบคุมเครื่องข่ายให้เป็นระบบที่ไม่แปรผันตามเวลาเพื่อบรรเทาความล่าช้า [24] ใน [25] นักวิจัยเสนอกลยุทธ์การจัดคิวเพื่อรับมือกับความล่าช้าของเครื่องข่ายและการหลุดของแพ็กเก็ตสำหรับทั้งกระบวนการที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ข้อดีของวิธีนี้การนี้คือ ไม่จำเป็นต้องออกแบบตัวควบคุมการคาดการณ์ที่มีอยู่ใหม่และไม่มีข้อกำหนดของการชิงโครโนซ์ อีกทั้งมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยจากสภาพเครื่องข่ายที่ไม่ดี เช่น แพ้คเกจสูญหาย วิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพจะพิจารณาความล่าช้าเป็นการก่อกวนในระบบ และใช้การควบคุมที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดผลกระทบจากการก่อกวนและรักษาประสิทธิภาพของระบบไว้ ในทศวรรษที่ผ่านมา มีการเสนอเทคนิคเพิ่มเติม เช่น ทฤษฎีไม่เป็นเชิงเส้นและการก่อกวน [26] ตัวอย่างเทคนิคการ

ควบคุมบางประเภทได้รับการพัฒนาสำหรับการใช้งานเฉพาะประเภท เทคนิคเหล่านี้รวมถึงตัวแปรคลื่น [27] และการควบคุมกลไกตามเหตุการณ์

#### 2.1.4 การควบคุมความหนาทันต่อข้อผิดพลาดในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย

สาย

Patankar นำเสนอแบบจำลองใน [28] สำหรับระบบควบคุมเครือข่ายที่ทนต่อข้อผิดพลาดโดยใช้การสื่อสารโปรโตคอลที่อ้างอิงตามการกระตุ้นเวลา Huo และคณะ [29] ศึกษาการจัดการกับเวลาและการออกแบบการควบคุมสำหรับการควบคุมความหนาทันต่อข้อผิดพลาดที่มีสมรรถนะที่ดี โดยใช้แนวคิด  $H_\infty$  Wang และคณะ [30] นำเสนอแนวทางการตรวจจับข้อผิดพลาดสำหรับระบบควบคุมเครือข่าย โดยการพิจารณาอิทธิพลของความล่าช้าที่เกิดจากเครือข่ายที่ไม่รู้จักและสุ่มเป็นข้อบกพร่องแบบทวิคูณ Zhu และ Zhou [31] ประยุกต์ใช้วิธีการตรวจจับข้อผิดพลาดโดยอาศัยตัวสังเกตการณ์ของสถานะกับระบบควบคุมเครือข่ายที่มีความล่าช้าระยะยาวที่ไม่แน่นอนโดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบเดิม ขั้นตอนในการควบคุมระบบผ่านเครือข่ายโดยใช้แนวคิดของระบบควบคุมเครือข่ายแบบแพ็กเก็ตข้อมูลซึ่งอธิบายโดย Klinkhieo และคณะ ใน [32]

#### 2.2 ระบบควบคุมสมองกลฝังตัว

ระบบควบคุมเป็นหนึ่งในประเด็นที่สำคัญของระบบสมองกลฝังตัว ซึ่งกำลังกลายเป็นจุดสนใจของการวิจัยและพัฒนาอย่างกว้างขวางทั้งในด้านวิชาการและอุตสาหกรรม ปัญหาในการออกแบบร่วมกันเป็นประเด็นสำคัญซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานการณ์และข้อกังวลที่แตกต่างกันออกไป [33] ซึ่งประเด็นนี้ทำให้นักวิจัยการควบคุมสามารถมุ่งเน้นไปที่การออกแบบการควบคุมทั้งหมด โดยไม่ต้องคำนึงถึงรายละเอียดของกระบวนการนำไปปฏิบัติจริง ในขณะเดียวกันนักวิจัยการวิเคราะห์แบบเรียลไทม์สามารถมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาทฤษฎีการจัดการกับเวลา โดยไม่จำเป็นต้องเข้าใจถึงผลกระทบของการจัดการเวลาที่มีต่อเสถียรภาพของระบบ ข้อจำกัดของประเด็นนี้คือการใช้ทรัพยากรในการคำนวณที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพในการควบคุม มีการวิจัยซึ่งนำเสนอแนวทางการออกแบบร่วมกันเพื่อรวมอัลกอริทึมการควบคุมและการคำนวณแบบเรียลไทม์ในลักษณะที่มีการประสานงานกัน [34]

ความท้าทายที่สำคัญคือการบรรลุถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการควบคุมในขณะที่ต้องรับมือกับทรัพยากรการคำนวณที่จำกัด ซอฟต์แวร์จึงถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์และจำลองว่าประสิทธิภาพการควบคุมได้รับผลกระทบจากเวลาอย่างไร [35] การกำหนดค่าเวลาชั่วคราวมักไม่ประสบผลสำเร็จในการควบคุมของซอฟต์แวร์แบบสมองกลฝังตัว เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความซับซ้อนของระบบและข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์

มีการเสนอแง่มุมในการใช้งานสำหรับการออกแบบอัลกอริทึมการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด เช่น Model Predictive Control (MPC) สำหรับระบบสมองกลฝังตัว [36] ใน [37] ผู้เขียนเสนอวิธีการพัฒนาเพื่อสร้างซอฟต์แวร์ควบคุมแบบสมองกลฝังตัวในขณะเดียวกันก็จัดการกับข้อจำกัดและความปลอดภัยของระบบ อีกทั้งมีผู้ศึกษาอัลกอริทึมตัวควบคุมซึ่งถูกนำมาใช้บนคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาการเขียนโปรแกรมระดับสูงที่สื่อสารกับระบบที่ต้องการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ [38] จากวรรณกรรมข้างต้นที่กล่าวมา พบเห็นถึงข้อจำกัดเกี่ยวกับการเชื่อมต่อกับระบบสำหรับการนำอัลกอริทึมการควบคุมไปใช้งานบนแพลตฟอร์มฮาร์ดแวร์แบบสมองกลฝังตัว ในบทที่ 3 จะมีการนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่เชื่อมกับระบบทเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนผ่านทางเครือข่ายไร้สายโดยอาศัยการสื่อสารจากโหนดต่าง ๆ

## 2.3 ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน (Rotary Inverted pendulum)

ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนประกอบด้วยแขนแบนที่มีเดือยอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งและมีเพลาโลหะอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ปลายเดือยถูกติดตั้งที่ด้านบนของเพลาเกียร์รับน้ำหนักของชุดฐานเซอร์โวโรตารี ตัวต่อลูกตุ้มถูกยึดไว้บนเพลาโลหะ และเพลามีการติดตั้งเครื่องเข้ารหัสความละเอียดสูงเพื่อวัดมุม ผลลัพธ์ที่ได้คือแขนหมุนในแนวนอนโดยมีลูกตุ้มอยู่ที่ปลาย จากระบบดังกล่าวนี้สามารถนำไปสู่การเรียนรู้ทักษะการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติสำหรับวิศวกรรมเครื่องกลและการบินและอวกาศ ในขณะที่ออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้แท่งเพนดูลัมตั้งสมดุลในตำแหน่งที่ตั้งตรงโดยการหมุนหรือเปลี่ยนมุมที่ฐาน (Inverted Pendulum) และแกว่งลูกตุ้มขึ้นเพื่อรักษาให้อยู่ในตำแหน่งที่ตั้งตรง ซึ่งระบบนี้มีการประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าสองล้อ (Segway) ที่ปรับสมดุลตัวเองและหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ (Humanoid) ใช้หลักการที่คล้ายกันเพื่อรักษาเสถียรภาพขณะเคลื่อนที่ซึ่งนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น

## 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR)

ตัวควบคุม LQR หรือ Linear Quadratic Regulator เป็นวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่เป็นเชิงเส้นโดยคำนึงถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวบ่งชี้สมรรถนะ (Performance index) เพื่อให้ได้ซึ่งผลตอบสนองตามที่ต้องการ อาทิเช่น ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น (stability) มากขึ้น หรือมีสมรรถนะในด้านผลตอบสนองที่เร็ว และมีปริมาณการใช้พลังงานที่น้อย

การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี Linear Quadratic Regulator นั้นผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบดังหัวข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ (State feedback)

### โดยวิธี Linear Quadratic Regulator (LQR)

หลักการของวิธีควบคุมด้วยวิธี Linear Quadratic Regulator จะใช้วิเคราะห์ระบบที่เป็นเชิงเส้นและต้องคำนึงถึงค่าตัวบ่งชี้สมรรถนะ (Performance index) ให้เหมาะสม ซึ่งตัวบ่งชี้สมรรถนะจะอยู่ในรูปสถานะ (state) และสัญญาณควบคุม (Control signal) ดังนี้

สมการตัวบ่งชี้สมรรถนะ

$$J(x_0, k_0, u(\cdot)) = m(x_N) + \sum_{k=k_0}^{N-1} L(x_k, u_k, k) \quad (2.1)$$

ในระบบที่เวลาวิฤตแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ตัวบ่งชี้สมรรถนะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$J = x_N^* S x_N + \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^* Q x_k + u_k^* R u_k) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $J$  เป็นฟังก์ชันต้นทุนพหุนาม (Quadratic cost function)  
 $S$  เป็นฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function) ของสถานะสุดท้าย  
 $Q$  เป็นฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function) ของสถานะ  
 $R$  เป็นฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function) ของสัญญาณควบคุมที่ใช้  
 และเป็นเมทริกซ์บวกเสมอ

$x$  เป็นเวกเตอร์สถานะที่มีมิติ  $n$

$u$  เป็นเวกเตอร์สัญญาณควบคุมที่มีมิติ  $r$

เมื่อพิจารณาสมการ 2.2 ที่สถานะคงตัว (steady state)  $N$  เข้าใกล้ค่าอนันต์แล้ว พจน์  $x_N^* S x_N$  มีค่าเป็นศูนย์ จะสามารถเขียนสมการตัวบ่งชี้สมรรถนะใหม่ได้เป็น

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x_k^* Q x_k + u_k^* R u_k) \quad (2.3)$$

สมการระบบสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ  $x_k, u$  และ  $k$  ได้ดังนี้

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, k)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบเวลาวิฤตแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถเขียนได้เป็น

$$x_{k+1} = Gx_k + Hu_k \quad (2.4)$$

โดย  $x_k$  คือ เวกเตอร์สถานะมิติ  $n$

$u_k$  คือ เวกเตอร์สัญญาณควบคุมมิติ  $r$

$G$  คือ เมทริกซ์มิติ  $n \times n$

$H$  คือ เมทริกซ์มิติ  $n \times r$

หลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal) คือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสมการบ่งชี้สมรรถนะ โดยการหาค่าต่ำสุดของ จากการหาอนุพันธ์เทียบกับศูนย์ เริ่มแรกหาค่าที่จุดปลายสุด ต่อมาจึง หาค่าย้อนกลับมาที่จุด  $N-1, N-2$  ไปตลอดจนถึงจุดเริ่มต้น นั่นคือค่าศูนย์ให้  $J_{opt}(x_i, i)$  เป็นตัวบ่งชี้สมรรถนะที่เหมาะสมที่สุดจาก  $x$  ที่  $i$  และกำหนดให้

$$J_{opt}(x_N, N) = x_N^* S x_N \triangleq x_N^* P_N x_N$$

$$\text{เนื่องจาก } J(x_{N-1}, N-1) = (x_{N-1}^* Q x_{N-1} + u_{N-1}^* R u_{N-1}) + J_{opt}(x_N, N)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } J_{opt}(x_{N-1}, N-1) = \min_{u_{N-1}} [(x_{N-1}^* Q x_{N-1} + u_{N-1}^* R u_{N-1}) + J_{opt}(x_N, N)]$$

$$J_{opt}(x_{N-1}, N-1) = \min_{u_{N-1}} [x_{N-1}^* Q x_{N-1} + u_{N-1}^* R u_{N-1} + J_{opt}(Gx_{N-1}, Hu_{N-1})]$$

$$J_{opt}(x_{N-1}, N-1) = \min_{u_{N-1}} [x_{N-1}^* Q x_{N-1} + u_{N-1}^* R u_{N-1} + (Gx_{N-1}, Hu_{N-1})^* P_N (Gx_{N-1} + Hu_{N-1})] \quad (2.5)$$

โดยที่  $P_N$  เป็นบวก (Positive definite)

จากสมการที่ 2.5 พิจารณาพจน์ที่ติดตัว  $u_{N-1}$  คือ

$$\{u_{N-1}^* R u_{N-1} + u_{N-1}^* H^* P_N G x_{N-1} + u_{N-1}^* H^* P_N H u_{N-1} + x_{N-1}^* G^* P_N H u_{N-1}\} \quad (2.6)$$

หาค่าต่ำสุดโดยการหาอนุพันธ์เทียบ จากสมการ 2.6 สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial J(x_{N-1}, N-1)}{\partial u_{N-1}} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
2Ru_{N-1} + 2H^*P_NHu_{N-1} + 2H^*P_NGx_{N-1} &= 0 \\
2\left((R + H^*P_NH)u_{N-1} + H^*P_NGx_{N-1}\right) &= 0 \\
(R + H^*P_NH)u_{N-1} &= -H^*P_NGx_{N-1}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.7 จะได้  $u_{N-1}$  คือ

$$u_{N-1} = -(R + H^*P_NH)^{-1} H^*P_NGx_{N-1} \tag{2.8}$$

ซึ่งพจน์  $(R + H^*P_NH)^{-1}$  สามารถผกผัน (Inverse) ได้เนื่องจาก  $R$  เป็นค่าบวกเสมอ (Positive definite) และ  $P_N$  เป็นค่ากึ่งบวก (Positive semi-definite)

จากรูปแผนผังระบบควบคุมแบบป้อนกลับสถานะจะได้ว่า

$$u_{N-1} = -K_{N-1}x_{N-1} \tag{2.9}$$

เมื่อสมการที่ 2.8 และ 2.9 จะได้ค่า  $K_{N-1}$  ดังนี้

$$K_{N-1} = [R + H^*P_NH]^{-1} H^*P_NG$$

จากสมการ 2.6 เมื่อหาอนุพันธ์อันดับสองเทียบ  $u_{N-1}$  จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 J(x_{N-1}, N-1)}{\partial u_{N-1}^2} = R + H^*P_NH \tag{2.10}$$

เนื่องจาก  $R$  เป็นค่าบวกเสมอ และ  $P_N$  เป็นค่ากึ่งบวก ดังสมการที่ 2.10 เป็นบวกแน่นอน ค่า  $J_{opt}$  ที่ได้จึงเป็นค่าต่ำสุด เมื่อแทนค่าจากสมการ 2.9 ลงในสมการ 2.5 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
J_{opt}(x_{N-1}, N-1) &= x_{N-1}^* Q x_{N-1} + x_{N-1}^* K_{N-1}^* R K_{N-1} x_{N-1} + x_{N-1}^* (G - H K_{N-1})^* P_N (G - H K_{N-1}) x_{N-1} \\
J_{opt}(x_{N-1}, N-1) &= x_{N-1}^* [Q + K_{N-1}^* R K_{N-1} + (G - H K_{N-1})^* P_N (G - H K_{N-1})] x_{N-1} \\
J_{opt}(x_{N-1}, N-1) &\triangleq x_{N-1}^* P_{N-1} x_{N-1}
\end{aligned}$$

$$ดังนั้น P_{N-1} = Q + K_{N-1}^* R K_{N-1} + (G - H K_{N-1})^* P_N (G - H K_{N-1}) \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่  $N-2$  ทำตามขั้นตอน  $N-1$  สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} J_{opt}(x_{N-2}, N-2) &= \min_{u_{N-2}} [(x_{N-2}^* Q x_{N-2} + u_{N-2}^* R u_{N-2}) + J_{opt}(x_{N-1}, N-1)] \\ J_{opt}(x_{N-2}, N-2) &= \min_{u_{N-2}} [x_{N-2}^* Q x_{N-2} + u_{N-2}^* R u_{N-2} + J_{opt}((Gx_{N-2}, Hu_{N-2}), N-1)] \\ J_{opt}(x_{N-2}, N-2) &= \min_{u_{N-2}} [x_{N-2}^* Q x_{N-2} + u_{N-2}^* R u_{N-2} + (Gx_{N-2}, Hu_{N-2})^* P_{N-1} (Gx_{N-2} + Hu_{N-2})] \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อแทน  $u_{N-2} = -K_{N-2} x_{N-2}$  ลงในสมการ 2.12 จะได้

$$\begin{aligned} J_{opt}(x_{N-2}, N-2) &= x_{N-2}^* Q x_{N-2} + x_{N-2}^* K_{N-2}^* R K_{N-2} x_{N-2} + x_{N-2}^* (G - HK_{N-2})^* P_{N-1} (G - HK_{N-2}) x_{N-2} \\ J_{opt}(x_{N-2}, N-2) &= x_{N-2}^* [Q + K_{N-2}^* R K_{N-2} + (G - HK_{N-2})^* P_{N-1} (G - HK_{N-2})] x_{N-2} \\ J_{opt}(x_{N-2}, N-2) &\triangleq x_{N-2}^* P_{N-2} x_{N-2} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } P_{N-2} = Q + K_{N-2}^* R K_{N-2} + (G - HK_{N-2})^* P_{N-1} (G - HK_{N-2}) \quad (2.13)$$

จากสมการข้างต้นที่กล่าวมาสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้คือ

$$u_i = -K_i x_i$$

$$K_i = [R + H^* P_{i-1} H]^{-1} H P_{i-1} G \quad (2.14)$$

$$P_i = Q + K_i^* R K_i + (G - HK_i)^* P_{i-1} (G - HK_i) \quad (2.15)$$

$$J_{opt}(x_i, i) = x_i^* P_i x_i \quad (2.16)$$

แทนค่า จากสมการที่ 2.14 ลงในสมการที่ 2.15 สามารถเขียนได้เป็น

$$P_i = Q + G^* P_{i-1} G - G^* P_{i-1} H [R + H^* P_{i-1} H]^{-1} H^* P_{i-1} G \quad (2.17)$$

สมการ 2.17 เรียกว่าสมการรีคาติ (Riccati equation)

จาก [39] สมการที่ 7-36 พบว่า

$$\begin{aligned} J_{opt} &= x_N^* S x_N + \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^* Q x_k + u_k^* R u_k) \\ J_{opt} &= x_0^* P_0 x_0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสถานะคงตัว (steady state) และ  $N$  เข้าสู่ค่าอนันต์แล้ว  $P_0 = P =$  ค่าคงที่ ดังนั้นจากสมการที่ 2.18 สามารถเขียนได้เป็น

$$J_{opt} = x_0^* P x_0$$

และเช่นเดียวกันจากสมการที่ 2.14 และ 2.15 จะได้ว่า  $K$  คงที่ก็ต่อเมื่อ  $P$  คงที่เมื่อ  $P_{i+1} = P_i = P$  สามารถเขียนได้เป็น

$$P = G^* P G - G^* P H (R + H^* P H)^{-1} H^* P G + Q \quad (2.19)$$

$$K = (R + H^* P H)^{-1} H^* P G \quad (2.20)$$

วิธีการหาค่า  $K$  จึงสามารถทำได้ดังต่อไปนี้ คือ

1. แก้สมการหาค่า  $P$  ได้จากสมการที่ 2.19 โดยที่  $P$  เป็นค่าบวกเสมอ (Positive definite)
2. แทนค่า  $P$  ที่ได้จากข้อหนึ่งลงในสมการที่ 2.20 จึงสามารถหาค่า  $K$  ที่ได้จาก การหาค่าต่ำสุดของสมการบังชี้สมรรถนะ

ในบทที่สองวรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง มีการนำเสนอส่วนของการทบทวนวรรณกรรม ในหัวข้อระบบควบคุมเครือข่าย วิวัฒนาการของเทคโนโลยีไร้สายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ผลจากการหน่วงเวลาของเครือข่าย การขัดเซยความล่าช้า การควบคุมความหนาทวนต่อข้อผิดพลาด และกล่าวถึงปัญหาและความท้าทายในการประยุกต์ระบบควบคุมสมองกลฝังตัว ในส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึง ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้สมการรีคาติเพื่อหาพารามิเตอร์ที่ต้องการ

## บทที่ 3

### ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน

บทนี้กล่าวถึงองค์ประกอบของการทำงานของระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน การได้มาซึ่งโมเดลทางคณิตศาสตร์ การประมาณให้เป็นโมเดลปริภูมิสถานะ และการออกแบบระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนกับเครือข่ายไร้สาย

#### 3.1 ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน

เพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนหรือเพนดูลัมฟูรตตะถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี 1992 ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งโตเกียว โดยคัตสึฮิสะ ฟูรตตะ [4] เป็นระบบที่ซับซ้อนและไม่เชิงเส้นที่ได้รับความสนใจในทฤษฎีระบบควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เนื่องจากการมีอยู่ของความไม่เชิงเส้นในพลศาสตร์ เช่น พจน์ไซน์ (Sine) และโคไซน์ (Cosine) ที่ปรากฏในสมการการเคลื่อนที่ในระบบ [40] นอกจากนี้ การหมุนของแขนที่ได้รับผลกระทบจากแรงบิดที่ใช้ ยังส่งผลต่อลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบอีกด้วย โดยความยาวของแขนคือ  $l_r$  และเพนดูลัมคือ  $l_p$  แขนและเพนดูลัมผกผันของระบบมีโมเมนต์ความเฉื่อย  $J_r$  และ  $J_p$  ซึ่งสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางมวลของส่วนประกอบแต่ละส่วน ข้อต่อในการหมุนแต่ละข้อต่ออยู่ภายใต้การหน่วงแบบหนืดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงที่สอดคล้องกันซึ่งแสดงเป็น  $D_r$  และ  $D_p$  โดยที่  $D_p$  แสดงถึงการหน่วงที่มาจากแบริงของมอเตอร์กระแสตรง และเกิดจากการประกบหมุดระหว่างแขนหมุนและเพนดูลัมผกผัน

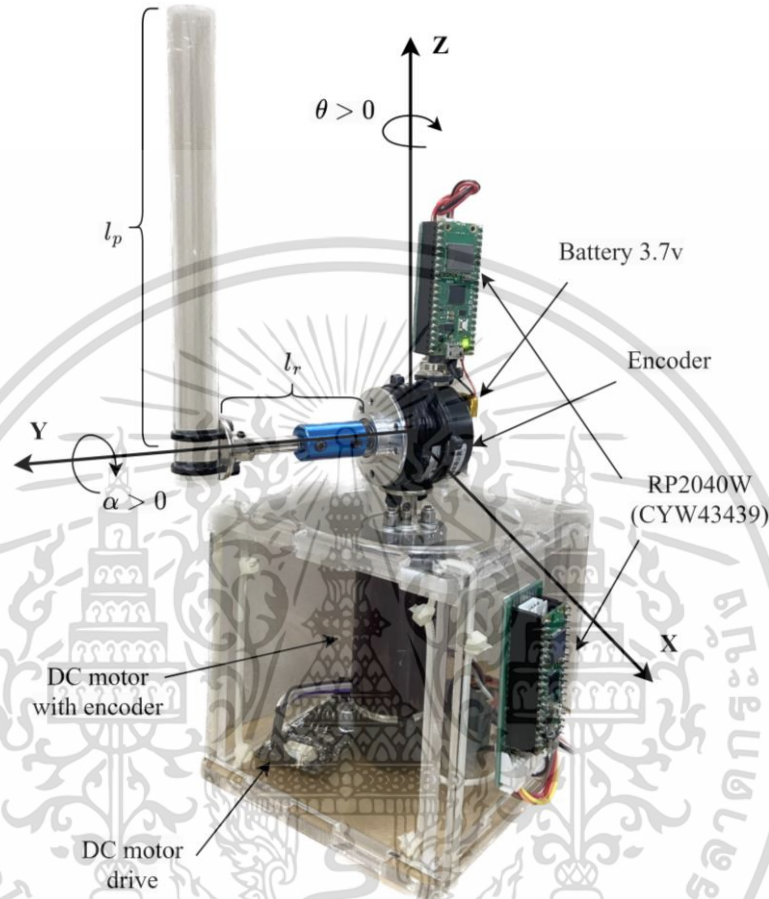
เมื่อแขนของเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW) เมื่อมองจากด้านบน ภายในระนาบแนวนอน มุมที่วัดได้  $\theta$  จะเพิ่มขึ้นในเชิงบวก เมื่อแรงดันไฟฟ้าควบคุม  $v_m$  ที่จ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรงเป็นค่าบวก แรงบิด (Torque) ที่มอเตอร์กระแสตรงจะนำไปใช้กับ แขนของเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนเป็นบวกในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ภายในระนาบแนวนอน มุมที่วัดได้ของเพนดูลัม  $\alpha$  จะเพิ่มขึ้นในเชิงบวกเมื่อหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เมื่อมองจากด้านบน ภายในระนาบแนวตั้ง และเป็นศูนย์เมื่อห้อยลงด้านล่างในตำแหน่งสมดุลที่มั่นคง

หน่วยทดลองระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนนี้ได้ถูกออกแบบและติดตั้งโหนดการสื่อสารไร้สายในแกน Z เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของสายเคเบิลที่ทำให้ตัวหมุนหมุนได้ 360 องศาอย่างอิสระ แทนที่มอเตอร์เหวนสลีปแบบเดิมเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้ มอเตอร์กระแสตรงพร้อมตัวเข้ารหัสโดย MAXON MOTOR, แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 30 V, กระแสไฟฟ้าที่กำหนด 2.72 A และตัวเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) (ตัวเอ็นโค้ดเดอร์รหัสชุดออปติคัล E5) โดย US Digital E5-500-157 single-ended ตัวเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) ซึ่งหมุนไปตามแกน Z วัดมุมของมอเตอร์กระแสตรง ตั้งค่ามุมบวกของพินตามเข็มนาฬิกา ซึ่งให้ 2,000 จำนวนนับต่อรอบใน

โหนดการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส (500 จำนวนนับต่อรอบ) ไดรฟ์มอเตอร์กระแสตรงโดย Cytron เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่บนเว็บไซต์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Technologies Co.ltd สามารถรองรับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ได้ตั้งแต่ 6 V ถึง 30 VDC กระแสสูงสุดต่อเนื่องสูงสุด 13 A และจุดสูงสุด 30 A (10 วินาที) ควบคุมความเร็วความถี่ PWM สูงสุด 20 KHz (ความถี่เอาต์พุตจริงเหมือนกับความถี่อินพุต)



รูปที่ 3.1 ชุดจำลองระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน

### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน

#### 3.2.1 สมการสถานะเชิงเส้น

สมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นสามารถแสดงเป็นสมการปริภูมิสถานะเวลาต่อเนื่องได้  
ดังนี้

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = C_c x(t) + D_c u(t) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $x(t)$  และ  $\dot{x}(t)$  เป็นเวกเตอร์สถานะ(State vector)  $u(t)$  เวกเตอร์อินพุต (Input vector) และ  $y(t)$  เวกเตอร์เอาต์พุต (Output vector)  $A_c$  เป็นเมทริกซ์ของระบบ (System matrix)  $B_c$  เป็นเมทริกซ์อินพุต  $C_c$  เป็นเมทริกซ์เอาต์พุต  $D_c$  เป็นเมทริกซ์ป้อนกลับ ล่วงหน้า ซึ่งเวกเตอร์สถานะ และเวกเตอร์เอาต์พุต ระบุไว้ดังนี้

$$x(t) = [\theta(t) \quad \alpha(t) \quad \dot{\theta}(t) \quad \dot{\alpha}(t)]^T \quad (3.3)$$

$$y(t) = [\theta(t) \quad \alpha(t)]^T \quad (3.4)$$

### 3.2.2 สมมติฐานของระบบ

- 1) เพลามอเตอร์และแขนที่ 1 ถือว่าเชื่อมต่อกันอย่างแน่นหนาและแข็งอย่างไม่มีสิ้นสุด
- 2) แขนเพนดูลัม ถือว่าแข็งอย่างไม่มีที่สิ้นสุด
- 3) แกนพิกัดของแขน 1 และแขน 2 เป็นแกนหลักโดยที่โมเมนต์ความเฉื่อยเป็นแนวทแยง
- 4) ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์ถือว่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามส่วนนี้อาจเพิ่มเข้ากับโมเมนต์ความเฉื่อยของแขน 1 ได้
- 5) พิจารณาเฉพาะการหน่วง (Damping) ที่มีความหนืดเท่านั้น การหน่วงรูปแบบอื่นๆ ทั้งหมดเช่น คูลอมบ์ (Coulomb) จะถูกละเลยไป

### 3.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพนดูลัมแบบฐานหมุน

ในส่วนนี้จะอภิปรายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพนดูลัมแบบฐานหมุน [41] การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยใช้สองเทคนิคเป็นหลัก ได้แก่ วิธีนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler) และออยเลอร์-ลากรองจ์ (Euler-Lagrange) ในวิทยานิพนธ์นี้มีการใช้เทคนิคออยเลอร์-ลากรองจ์ (Euler-Lagrange) ซึ่งใช้พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ในการกำหนดสมการการเคลื่อนที่ของระบบ สมการผลลัพธ์ให้แสดงในรูปแบบปิดในแง่ของแรงบิดและการกระจัด สมการออยเลอร์-ลากรองจ์เป็นดังแสดง

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = f_i \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\mathcal{L} = T - V$  เป็นตัวดำเนินการลากรองจ์  $T$  เป็นพลังงานจลน์ของระบบ  $V$  เป็นพลังงานศักย์ของระบบ  $q$  เป็นพิกัดทั่วไป (Generalized coordinates)  $f$  เป็นแรงที่กระทำของในพิกัดของระบบ

พิกัดทั่วไปที่เลือกไว้สำหรับระบบนี้คือ  $\theta$  และ  $\alpha$  ซึ่งแสดงถึงแขนหมุนและการกระจัดเชิงมุมของเพนดูลัมตามลำดับ ระบบสามารถถูกอธิบายได้ว่าเป็นข้อต่อเพนดูลัมซึ่งมีความยาว  $l_p$  เชื่อมต่อกับปลายแขนหมุน โมเมนต์ความเฉื่อยของเพนดูลัมและแขนหมุนรอบจุดศูนย์กลางมวลคือ  $J_p$  และ  $J_r$  ตามลำดับ มุมเพนดูลัม  $\alpha$  จะเป็นศูนย์และเมื่ออยู่ในแนวตั้งอย่างสมบูรณ์แบบในตำแหน่งตั้งตรง และมีค่าเป็นบวกในทิศทวนเข็มนาฬิกาเมื่อมองจากภายนอก ระบบ พารามิเตอร์ของระบบเพนดูลัมแบบฐานหมุนอธิบายไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของระบบเพนดูลัมแบบฐานหมุน

|                   | คำอธิบาย                               | ขนาด                      |
|-------------------|--|---------------------------|
| มอเตอร์กระแสตรง   |  |                           |
| $R_m$             | ตัวต้านทานขาออก                        | 1.2 Ohm                   |
| $K_t$             | แรงบิดคงที่                            | 0.0389 Nm/A               |
| $K_m$             | ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ            | 0.0389 V/(rad/s)          |
| แขนหมุน           |  |                           |
| $m_r$             | มวลของแขนหมุน                          | 0.1032 kg                 |
| $l_r$             | ความยาวแขนหมุน                         | 0.06 m                    |
| $D_r$             | ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง               | 0 Nms/rad                 |
| $J_r$             | โมเมนต์ความเฉื่อย                      | $5.7E-5 \text{ kgm}^2$    |
| โมดูลเพนดูลัมหมุน |  |                           |
| $m_p$             | มวลลิงค์เพนดูลัม                       | 0.0308 kg                 |
| $l_p$             | ความยาวแขนหมุน (หมุนไปที่ปลายแท่งโลหะ) | 0.14 m                    |
| $D_p$             | ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง               | 0 Nms/rad                 |
| $J_p$             | โมเมนต์ความเฉื่อย                      | $2.3843E-6 \text{ kgm}^2$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จลนศาสตร์ของระบบได้รับจาก:

$$X = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r \cos \theta \\ L_r \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_r \dot{\theta} \sin \theta \\ L_r \dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_r \sin \theta + \frac{l_p}{2} \cos \alpha \sin \theta \dot{\alpha} + \dots \\ l_r \sin \theta - \frac{l_p}{2} \sin \alpha \cos \theta \\ \frac{l_p}{2} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_r \sin \dot{\theta} + \frac{l_p}{2} \cos \alpha \sin \theta \dot{\alpha} + \frac{l_p}{2} \sin \alpha \cos \theta \dot{\theta} \\ l_r \sin \dot{\theta} - \frac{l_p}{2} \cos \alpha \cos \theta \dot{\alpha} + \frac{l_p}{2} \sin \alpha \sin \theta \dot{\theta} \\ -\frac{l_p}{2} \sin \alpha \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

พลังงานจลน์ทั้งหมดของระบบหาได้จากผลรวมของพลังงานจลน์ของเพนดูลัมและ  
แขนหมุน ได้ดังนี้

$$T = T_{arm} + T_{pendulum} \quad (3.10)$$

$$T = \frac{1}{2}(m_p \ell_r^2 + J_r + m_p \frac{\ell_p^2}{4} \sin^2 \alpha) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}(m_p \frac{\ell_p^2}{4} + J_p) \dot{\alpha}^2 - \frac{1}{2} m_p \ell_r \ell_p \dot{\theta} \dot{\alpha} \cos \alpha \quad (3.11)$$

พลังงานศักย์ทั้งหมดของระบบได้รับเป็น:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = V_{arm} + V_{pendulum} \quad (3.12)$$

$$V = 0 + (-m_p g) \left( \frac{\ell}{2} - \frac{\ell}{2} \cos \alpha \right) \quad (3.13)$$

ลากรองจ์  $\mathcal{L}$  ของระบบหาได้จากการลบพลังงานจลน์ทั้งหมดด้วยพลังงานศักย์ทั้งหมดของระบบ โดยกำหนดเป็น

$$\mathcal{L} = T - V \quad (3.14)$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \left( m_p \frac{\ell^2}{p} + J_r + m_p \frac{\ell^2}{4} \sin^2 \alpha \right) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \left( m_p \frac{\ell^2}{p} + J_p \right) \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_p L_p L_p \dot{\theta} \dot{\alpha} \cos \alpha + m_p g \left( \frac{\ell}{2} - \frac{\ell}{2} \cos \alpha \right) \quad (3.15)$$

ฟังก์ชันการกระจายของ Rayleigh ที่ใช้สำหรับระบบนี้ได้มาจาก

$$R = \frac{1}{2} D_r \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} D_p \dot{\alpha}^2 \quad (3.16)$$

โดยที่  $D_r$  คือค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงความหนืดของแขนหมุนและ  $D_p$  คือค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงความหนืดของเพนดูลัม

สมการของระบบลากรองจ์ได้รับเป็น:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\theta}} = \tau \quad (3.17)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\alpha}} = 0 \quad (3.18)$$

นอกจากนี้ ในส่วนการแก้สมการเชิงเส้นที่จุดปฏิบัติการ ( $\alpha=0$ ), สมการการเคลื่อนที่มีลักษณะดังนี้ (3.18)~ (3.19)

$$(m_p l_r^2 + J_r) \ddot{\theta} - \frac{1}{2} m_p l_p l_r \ddot{\alpha} + B_r \dot{\theta} = \tau \quad (3.19)$$

$$-\frac{1}{2} m_p l_p l_r \ddot{\theta} + (J_p + \frac{1}{4} m_p l_p^2) \ddot{\alpha} - \frac{m_p l_p g \alpha}{2} + B_p \dot{\alpha} = 0 \quad (3.20)$$

การแก้เทอมความเร่ง ได้สมการดังนี้

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J_T} \left( - \left( J_p + \frac{1}{4} m_p l_p^2 \right) D_r \dot{\theta} - \frac{1}{2} m_p l_p l_r D_p \dot{\alpha} + \frac{1}{4} m_p^2 l_p^2 l_r + \left( J_p + \frac{1}{4} m_p l_p^2 \right) \tau \right) \quad (3.21)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{J_T} \left( \frac{1}{2} m_p l_p l_r D_r \dot{\theta} - (J_r + m_p l_p^2) D_p \dot{\alpha} + \frac{1}{2} m_p l_p g - \frac{1}{2} m_p l_p l_r \tau \right) \quad (3.22)$$

โดยที่

$$J_T = J_p m_p l_r^2 + J_r J_p + \frac{1}{4} J_r m_p l_p^2 \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการข้างต้นแสดงถึงแรงบิดที่เกิดจากระบบเซอร์โวโรตารี (Direct-drive rotary servo) ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรง พลศาสตร์ของตัวขับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้:

$$\tau = K_t \left( \frac{V_m - K_m \dot{\theta}}{R_m} \right) \quad (3.24)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ที่ได้รับจากข้างต้นสามารถแสดงในรูปแบบของปริภูมิสถานะได้ สำหรับระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน สถานะของระบบคือ  $z = [\theta \ \alpha \ \dot{\theta} \ \dot{\alpha}]^T$  และ เอาต์พุตคือ  $y = [\theta \ \alpha]^T$  ปริภูมิสถานะพร้อมไดนามิกของตัวควบคุมได้รับจาก:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{31} \\ b_{41} \end{bmatrix} [V_m] \quad (3.25)$$

โดยที่

$$a_{32} = \frac{m_p^2 \ell_p^2 \ell_r g}{4J_t} \quad (3.26)$$

$$a_{33} = \frac{-D_r}{J_t} \left( J_p + \frac{m_p \ell_p^2}{4} \right) - \frac{K_t^2}{R_m} \left( \frac{K_t}{J_t R_m} \left( J_p + \frac{1}{4} m_p \ell_p^2 \right) \right) \quad (3.27)$$

$$a_{34} = \frac{-m_p \ell_r D_p \ell_p}{2J_t} \quad (3.28)$$

$$a_{42} = \frac{m_p g \ell_p}{2J_t} (J_r + m_p \ell_r^2) \quad (3.29)$$

$$a_{43} = -\frac{m_p \ell_p \ell_r D_r}{2J_t} - \frac{K_t^2}{R_m} \left( \frac{K_t}{2J_t R_m} m_p \ell_p \ell_r \right) \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_{44} = \frac{-D_p}{J_t} (J_r + m_p L_r^2) \quad (3.31)$$

$$b_{31} = \frac{K_t}{J_t R_m} (J_p + \frac{1}{4} m_p \ell_p^2) \quad (3.32)$$

$$b_{41} = \frac{K_t}{J_t R_m} (\frac{1}{2} m_p \ell_p \ell_r) \quad (3.33)$$

และเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดดังในตารางที่ 3.1 จะได้แบบจำลองปริภูมิสถานะสำหรับระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน นำเสนอในรูปของปริภูมิสถานะดังสมการ (3.34)

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 56.26 & -0.41 & 0 \\ 0 & 730.15 & -1.37 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 259.54 \\ 862.31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

### 3.3 ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR)

ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองใช้ฟังก์ชันต้นทุนพหุนาม (Quadratic cost function) เพื่อคำนวณเมทริกซ์อัตราป้อนกลับสถานะป้อนกลับที่เหมาะสมที่สุด  $K$

$$u(t) = Kx(t) \quad (3.35)$$

เมื่อฟังก์ชันต้นทุนพหุนามคือ

$$J_k = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3.36)$$

อัตราป้อนกลับสถานะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะลดฟังก์ชันต้นทุนพหุนามให้เหลือน้อยที่สุด:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทริกซ์อัตราป้อนกลับที่เหมาะสมที่สุดได้รับการแก้ไขโดยสมการริกคาติ:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3.38)$$

การปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR) ตามสมการ (3.36) เมทริกซ์อัตราป้อนกลับที่เหมาะสมที่สุดตามน้ำหนักที่เลือก ได้แก่:

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.2 \end{bmatrix} \quad R = [4] \quad (3.39)$$

จากสมการ (3.37) เป็นที่ชัดเจนว่าเมทริกซ์  $K$  ถูกควบคุมโดยเมทริกซ์  $A, B, Q$  และ  $R$  ซึ่ง  $A$  และ  $B$  ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าและพารามิเตอร์ของระบบ ซึ่งควรเลือก  $Q$  และ  $R$  ตามเกณฑ์ประสิทธิภาพโดยประมาณและการประเมินเมทริกซ์  $K$  อย่างไรก็ตามสามารถทำได้โดยตรงโดยใช้คำสั่งในโปรแกรม MATLAB

$$K = \text{lqr}(A, B, Q, R) \quad (3.40)$$

น้ำหนักในสมการ (3.39) ส่งผลให้เกิดผลป้อนกลับ  $K$  ดังนี้

$$K = [-1.5811 \quad 13.5568 \quad -0.5680 \quad 0.9367] \quad (3.41)$$

### 3.4 กลไกการควบคุมแบบตามเหตุการณ์ (Event-based control)

ระบบจะถือว่ามีเสถียรภาพเมื่อการป้อนกลับสถานะคงที่ [44] เมทริกซ์  $K$  พร้อมกลยุทธ์การตามเหตุการณ์ คือ

$$u(k) = K\hat{x}(k) \quad (3.42)$$

โดยที่ค่าสุดท้ายของการอัปเดตการวัด หรือค่าสุดท้ายของข้อผิดพลาดระหว่างค่าอ้างอิงและค่าอัปเดตการวัด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (3.43)$$

ดังนั้น สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองแบบตามเหตุการณ์คือ

$$u(k) = Kx(k) - Ke(k) \quad (3.44)$$

บทสรุปท้ายบทที่ 3 ได้มีการกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน เพื่อให้ได้มาซึ่งปริภูมิสถานะของระบบ อีกทั้งการหาพารามิเตอร์สำหรับการป้อนกลับในตัวควบคุม แอนคิควาร์ ซึ่งในบทต่อไป จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองเพื่อการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบนี้

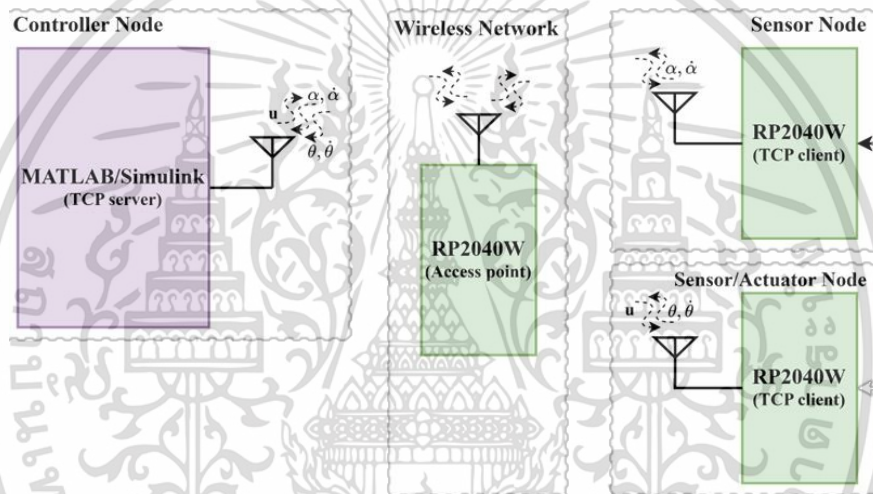


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การออกแบบระบบการควบคุมเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนบน เครือข่ายไร้สาย

บทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบในการออกแบบระบบการควบคุมเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนบนเครือข่ายไร้สาย ประกอบไปด้วย โหนดเซนเซอร์ โหนดตัวขับ โหนดจุดเข้าใช้งานและ โหนดตัวควบคุม ให้เป็นไปตามความต้องการรวมถึงการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละหนดให้ตรงตามกับคุณลักษณะ



รูปที่ 4.1 เครือข่ายการควบคุมเครือข่ายไร้สายของระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน

### 4.1 เครือข่ายไร้สาย (Wireless network)

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมภายใต้เครือข่ายไร้สาย IEEE802.11n บนบอร์ดพัฒนาสมองกลฝังตัว Raspberry Pi Pico Wireless (RP2040W) ซึ่งใช้ชิปไร้สาย CYW43439 ที่โปรแกรมด้วยภาษา C/C++ และ CmakeLists ที่ให้การเข้าถึงทรัพยากรที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยการใช้ Programmable Input Output (PIO) ถือเป็นจุดเด่นของชิป RP2040 ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้ในการอ่านตัวเข้ารหัสเพื่อความแม่นยำ การจัดการเครือข่ายไร้สายใช้ไลบรารี LwIP และสื่อสารบนโปรโตคอลที่ซีพีไอดี (TCP/IP) ในเครือข่ายการควบคุมไร้สาย เริ่มจากโหนดตัวควบคุมแพร่ข้อความผ่านโปรโตคอล Address resolution protocol (ARP) เพื่อถามถึงที่อยู่ MAC address ของโหนดจุดเข้าใช้งานซึ่งคือ Raspberry Pi Pico Wireless เมื่อมีการตอบกลับ จึงเริ่มเข้าสู่การสื่อสารผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรโตคอล Dynamic host configuration protocol (DHCP) ต้นรูปที่ 4.2 ซึ่งโหนดเซิร์ฟเวอร์จะมีการเริ่มต้นการสื่อสารเช่นเดียวกับโหนดตัวควบคุม ดังรูปที่ 4.3

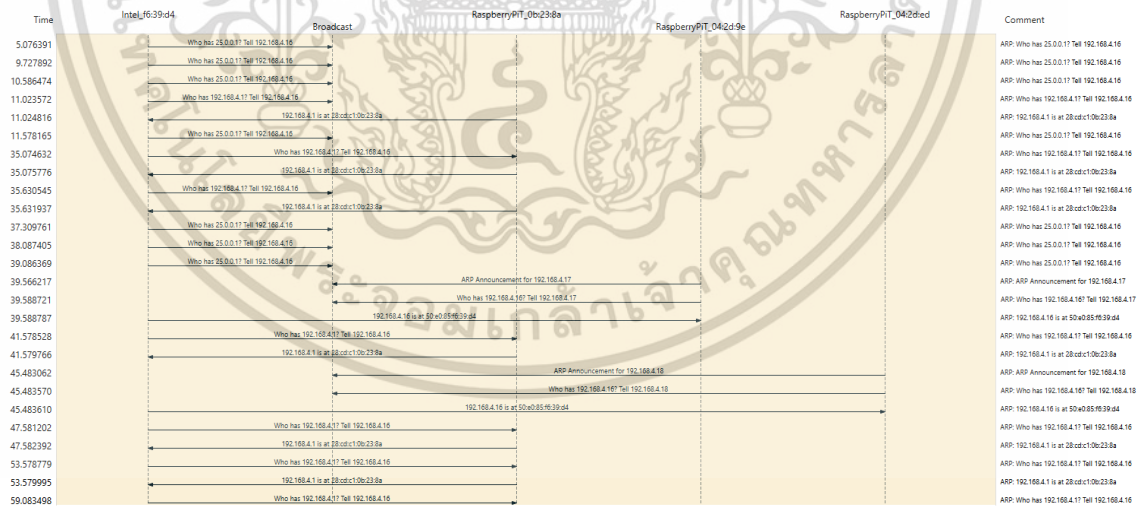
| No. | Time     | Source                | Destination     | Protocol | Length | Info                                     |
|-----|----------|-----------------------|-----------------|----------|--------|--|
| 1   | 0.000000 | Intel_f6:39:d4        | Broadcast       | ARP      | 42     | Who has 192.168.4.1? Tell 192.168.4.16   |
| 2   | 0.002388 | RaspberryPiT_0b:23:8a | Intel_f6:39:d4  | ARP      | 42     | 192.168.4.1 is at 28:cd:c1:0b:23:8a      |
| 6   | 0.036273 | 0.0.0.0               | 255.255.255.255 | DHCP     | 364    | DHCP Request - Transaction ID 0xd08a4805 |
| 7   | 0.038821 | 192.168.4.1           | 255.255.255.255 | DHCP     | 316    | DHCP ACK - Transaction ID 0xd08a4805     |

รูปที่ 4.2 ข้อมูลแพ็กเก็ตการเริ่มต้นการสื่อสารระหว่างโหนดตัวควบคุมและโหนดจุดเข้าใช้งาน

| No.  | Time      | Source                | Destination            | Protocol | Length | Info                                      |
|------|-----------|-----------------------|------------------------|----------|--------|---|
| 1555 | 39.560679 | 192.168.4.1           | 255.255.255.255        | DHCP     | 316    | DHCP Offer - Transaction ID 0x23356384    |
| 1556 | 39.564043 | 0.0.0.0               | 255.255.255.255        | DHCP     | 350    | DHCP Request - Transaction ID 0x23356384  |
| 1557 | 39.565003 | 192.168.4.1           | 255.255.255.255        | DHCP     | 316    | DHCP ACK - Transaction ID 0x23356384      |
| 1558 | 39.566217 | RaspberryPiT_04:2d:9e | Broadcast              | ARP      | 42     | ARP Announcement for 192.168.4.17         |
| 1559 | 39.588721 | RaspberryPiT_04:2d:9e | Broadcast              | ARP      | 42     | Who has 192.168.4.16? Tell 192.168.4.17   |
| 1560 | 39.588787 | Intel_f6:39:d4        | RaspberryPiT_04:2d:... | ARP      | 42     | 192.168.4.16 is at 50:e0:85:f6:39:d4      |
| 1634 | 41.578528 | Intel_f6:39:d4        | RaspberryPiT_0b:23:... | ARP      | 42     | Who has 192.168.4.1? Tell 192.168.4.16    |
| 1635 | 41.579766 | RaspberryPiT_0b:23:8a | Intel_f6:39:d4         | ARP      | 42     | 192.168.4.1 is at 28:cd:c1:0b:23:8a       |
| 1733 | 45.278987 | 0.0.0.0               | 255.255.255.255        | DHCP     | 350    | DHCP Discover - Transaction ID 0x72b68090 |
| 1734 | 45.278987 | 192.168.4.1           | 255.255.255.255        | DHCP     | 316    | DHCP Offer - Transaction ID 0x72b68090    |
| 1736 | 45.380423 | 0.0.0.0               | 255.255.255.255        | DHCP     | 350    | DHCP Request - Transaction ID 0x72b68090  |
| 1737 | 45.381296 | 192.168.4.1           | 255.255.255.255        | DHCP     | 316    | DHCP ACK - Transaction ID 0x72b68090      |

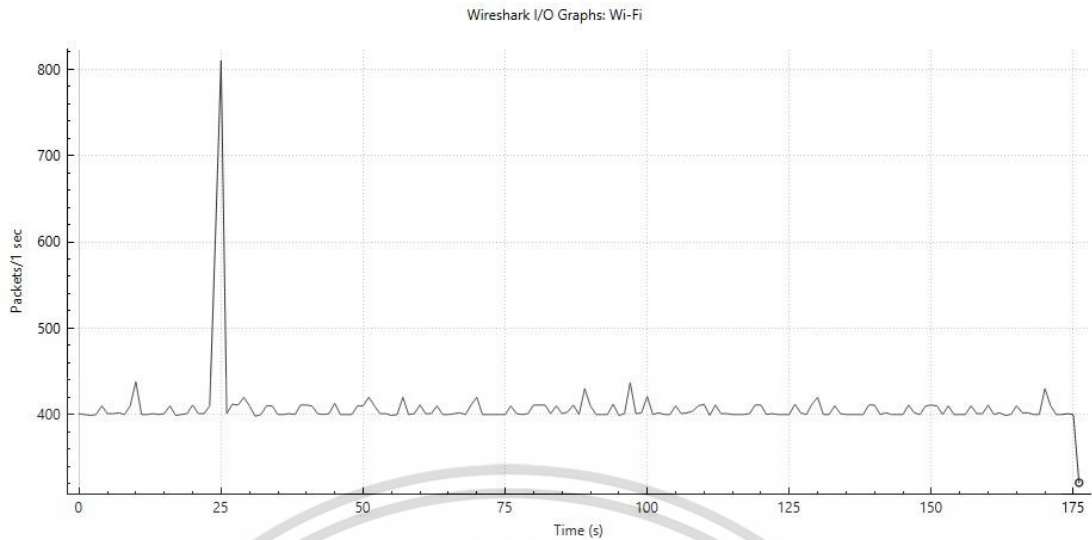
รูปที่ 4.3 ข้อมูลแพ็กเก็ตการเริ่มต้นการสื่อสารระหว่างโหนดเซิร์ฟเวอร์และโหนดจุดเข้าใช้งาน

ในระหว่างการสื่อสารระหว่างโหนดจะมีการสื่อสารผ่านโปรโตคอล Address resolution protocol (ARP) เพื่อถามถึงที่อยู่ MAC address ใน IP address ดังกล่าวอยู่เสมอดังแสดงในรูปที่รูปที่ 4.4

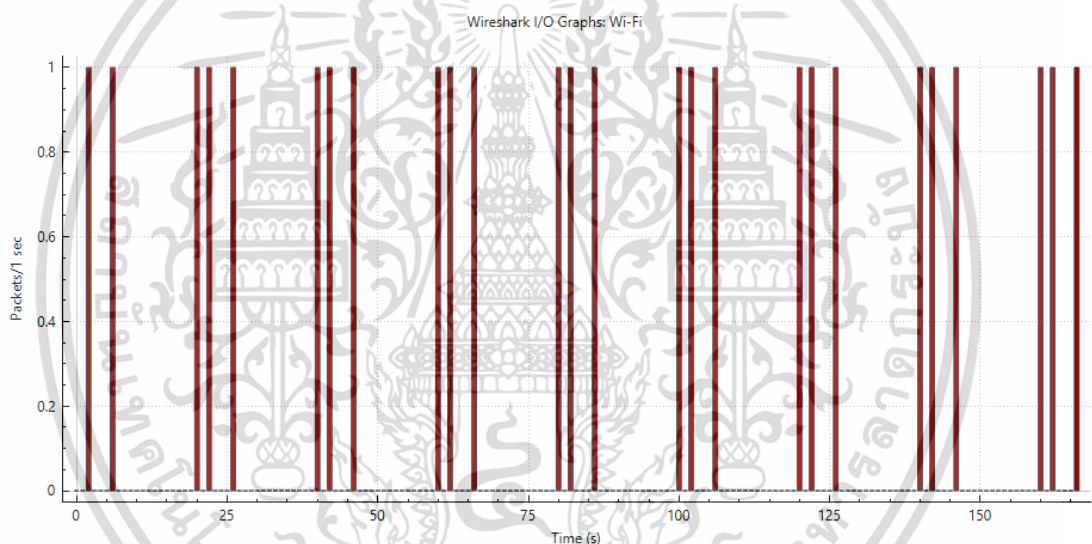


รูปที่ 4.4 ข้อมูลแพ็กเก็ตการสื่อสารระหว่างโหนดผ่านโปรโตคอล ARP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงจำนวนแพ็กเก็ตระหว่างการสื่อสารในแต่ละช่วงวินาที



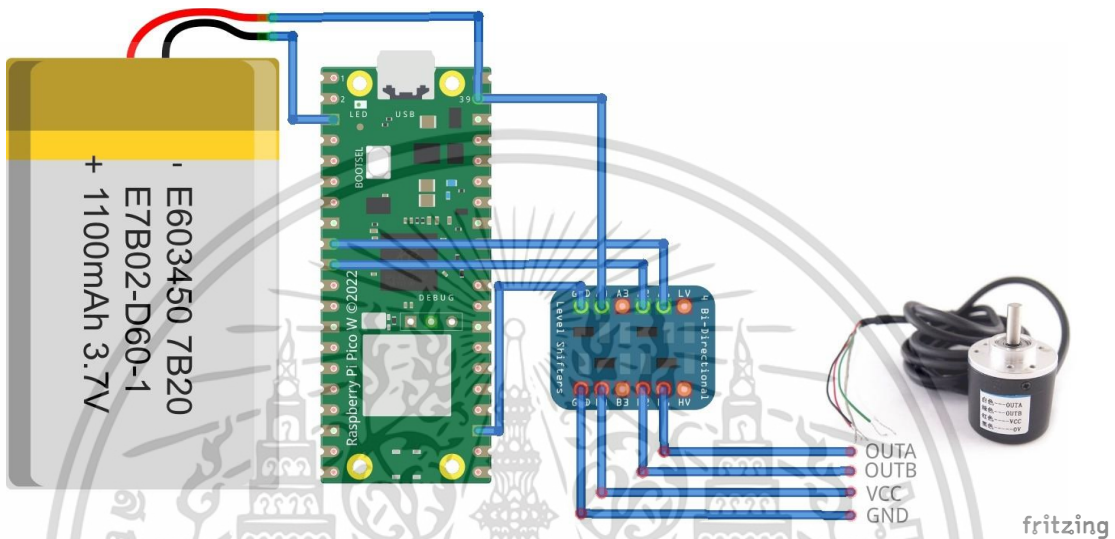
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงจำนวนแพ็กเก็ตที่ผิดพลาดระหว่างการสื่อสารในแต่ละช่วงวินาที

ตัวอย่างการเก็บแพ็กเก็ตในระหว่างการสื่อสาร ดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดในการสื่อสารในแต่ละวินาที ซึ่งค่าเฉลี่ยของแพ็กเก็ต อยู่ที่ 400 แพ็กเก็ตต่อวินาที ในขณะทีรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงจำนวนแพ็กเก็ตที่ผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างการสื่อสารในแต่ละช่วงวินาที พบว่ามีปริมาณโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.15 แพ็กเก็ตต่อวินาที

## 4.2 โหนดเซนเซอร์ (Sensor node)

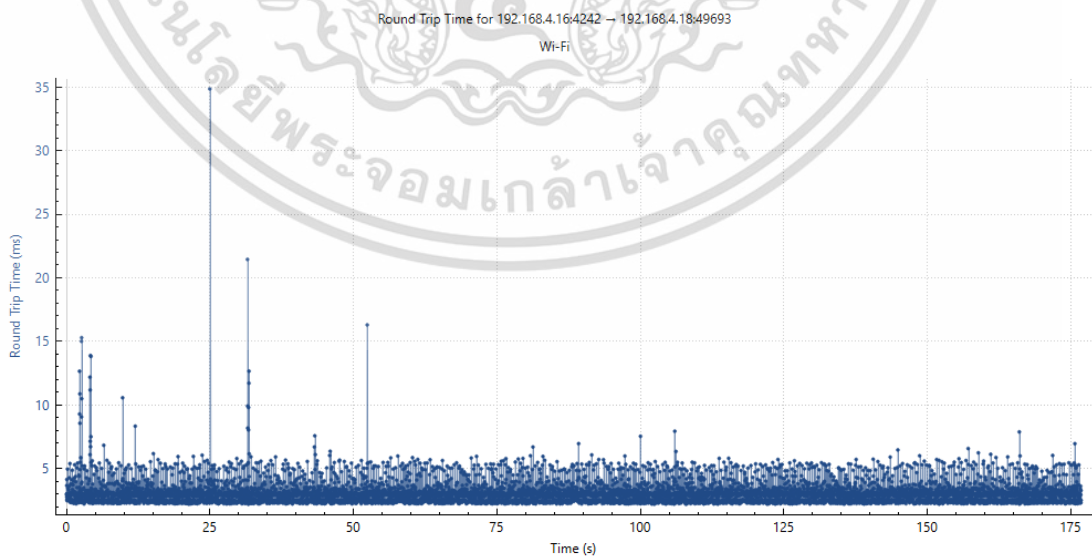
โหนดเซนเซอร์ประกอบไปด้วย Raspberry Pi Pico W แบตเตอรี่ชาร์จพลาย ขนาด 3.7 V โลจิกเลเวลชิฟเตอร์ (Logic level shifter) และตัวเข้ารหัสสำหรับการอ่านค่า  $\alpha, \alpha$  ดังแผนภาพที่ 4.7 ตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ารหัสมีคุณสมบัติอยู่ที่ 2400 พัลส์ต่อรอบ โหนดเซ็นเซอร์จะอ่านสัญญาณพัลส์ตัวเข้ารหัสซึ่งตั้งโปรแกรมไว้โดยใช้ PIO เพื่อลดการใช้ทรัพยากรของโหนดควบคุม ระหว่างการควบคุมแบบไร้สายพัลส์ที่อ่านจากตัวเข้ารหัสจะถูกคำนวณก่อนที่จะส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยังโหนดตัวควบคุม ซึ่งจะมีระยะระหว่างการสื่อสารดังแสดงรูปที่ 4.8 ตัวอย่างแพ็คเกจการสื่อสารแสดงถึงการติดต่อระหว่างโหนดเซ็นเซอร์และโหนดตัวควบคุม ที่มีขนาด 128 ไบต์ผ่านโปรโตคอล TCP/IP ดังแสดงในรูปที่ 4.9



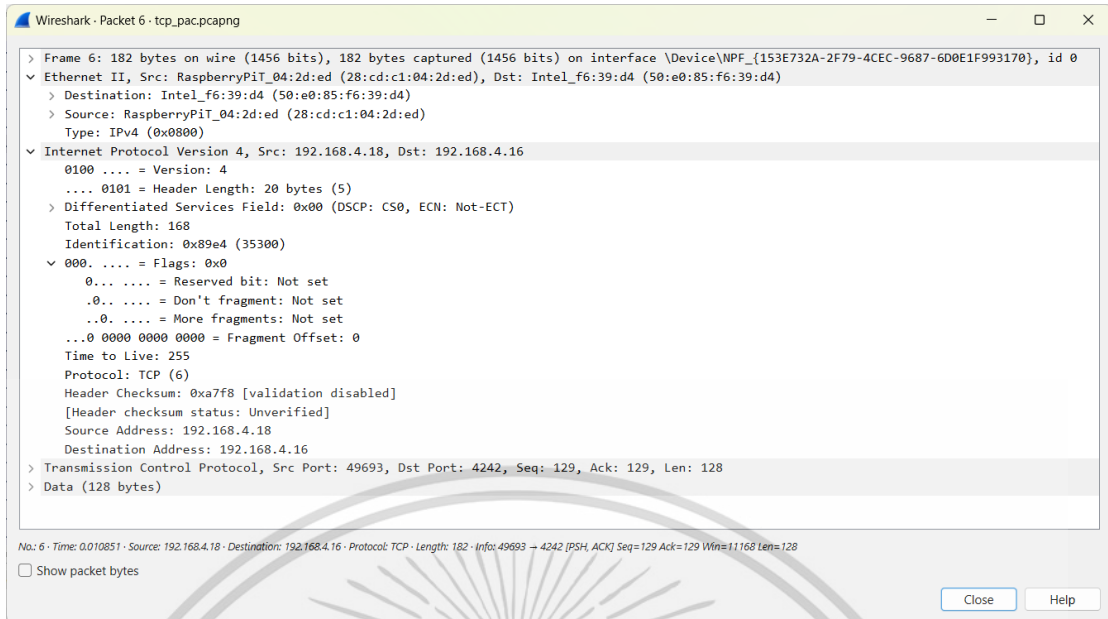
รูปที่ 4.7 แผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์การเชื่อมต่อในโหนดเซ็นเซอร์

ที่มาของรูป <https://fritzing.org/>



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงช่วงเวลาการสื่อสารในหน่วยมิลลิวินาทีของโหนดเซ็นเซอร์

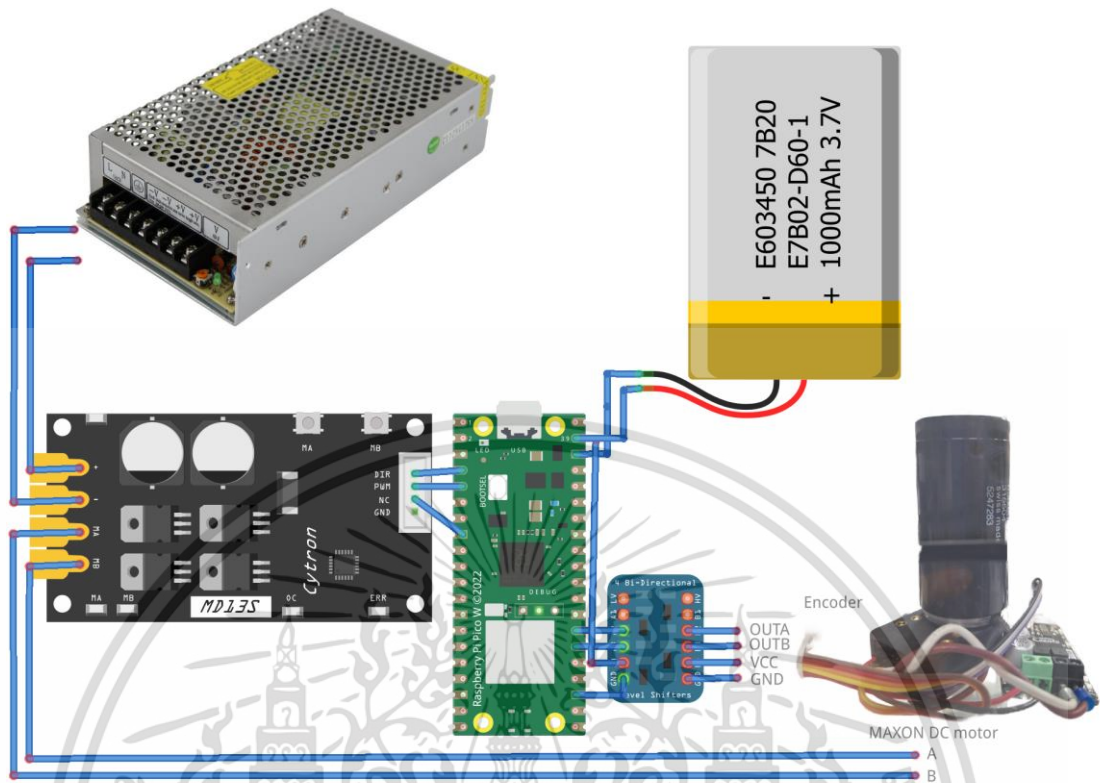
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างแพ็กเก็ตการสื่อสารระหว่างโหนดเซ็นเซอร์

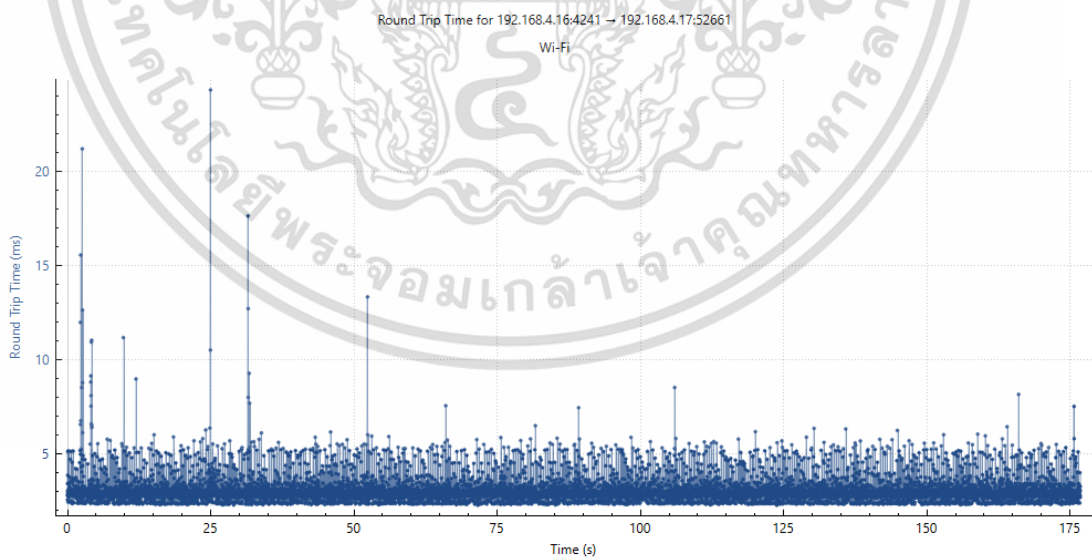
### 4.3 โหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ (Sensor and actuator node)

โหนดเซ็นเซอร์และตัวขับประกอบไปด้วย Raspberry Pi Pico W แบบเตอรีซ์ฟหลาย ขนาด 3.7 V สวิตซ์ซฟหลายขนาด 12 V โลจิกเลเวลชิฟเตอร์ (Logic level shifter) มอเตอร์กระแสตรง ไดรฟ์มอเตอร์ (Motor drive) และตัวเข้ารหัสสำหรับการอ่านค่า  $\theta, \dot{\theta}$  ดังแผนภาพที่ 4.10 ตัวเข้ารหัสมีคุณสมบัติอยู่ที่ 2000 พัลส์ต่อรอบ โหนดเซ็นเซอร์และตัวขับเช่นเดียวกับโหนดเซ็นเซอร์จะอ่านสัญญาณพัลส์ตัวเข้ารหัสซึ่งตั้งโปรแกรมโดยใช้ PIO ซึ่งตัวเข้ารหัสต่ออยู่กับมอเตอร์กระแสตรง ในด้านทรัพยากรเช่นเดียวกับโหนดเซ็นเซอร์ ระหว่างการควบคุมแบบไร้สายพัลส์ที่อ่านจากตัวเข้ารหัส จะถูกคำนวณก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโหนดตัวควบคุม ซึ่งจะมีระยะระหว่างการสื่อสารดังแสดงรูปที่ 4.11 ตัวอย่างแพ็กเก็ตการสื่อสารแสดงถึงการติดต่อระหว่างโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับและโหนดตัวควบคุม ที่มีขนาด 128 ไบต์ผ่านโปรโตคอล TCP/IP ดังแสดงในรูปที่ 4.12



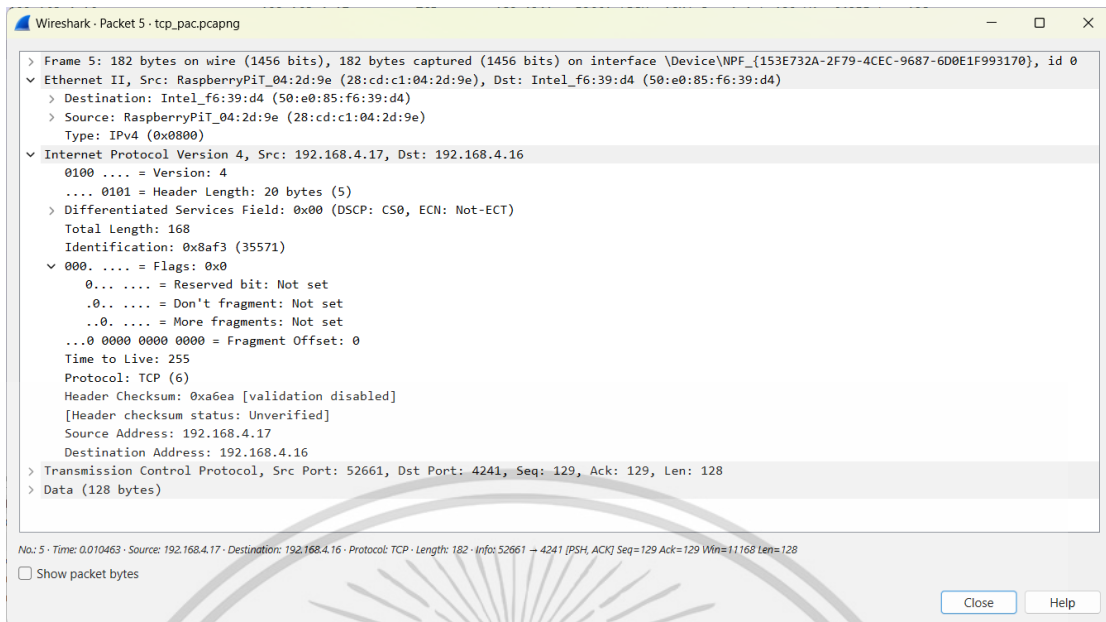
fritzing

รูปที่ 4.10 แผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์และตัวขับ  
ที่มาของรูป <https://fritzing.org/>



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงช่วงเวลาการสื่อสารในหน่วยมิลลิวินาทีของไมโครคอนโทรลเลอร์และตัวขับ

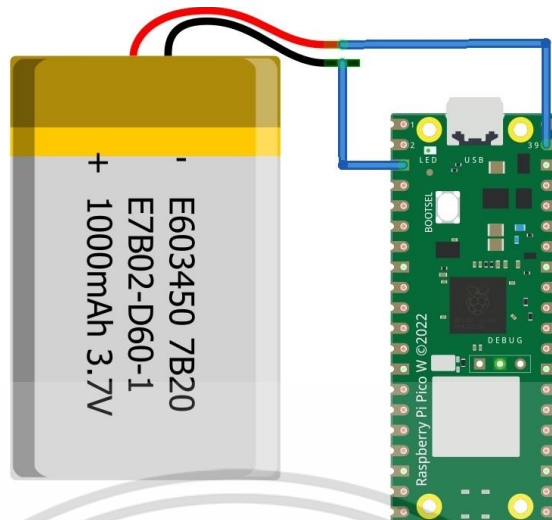
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างแพ็กเก็ตการสื่อสารของโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ

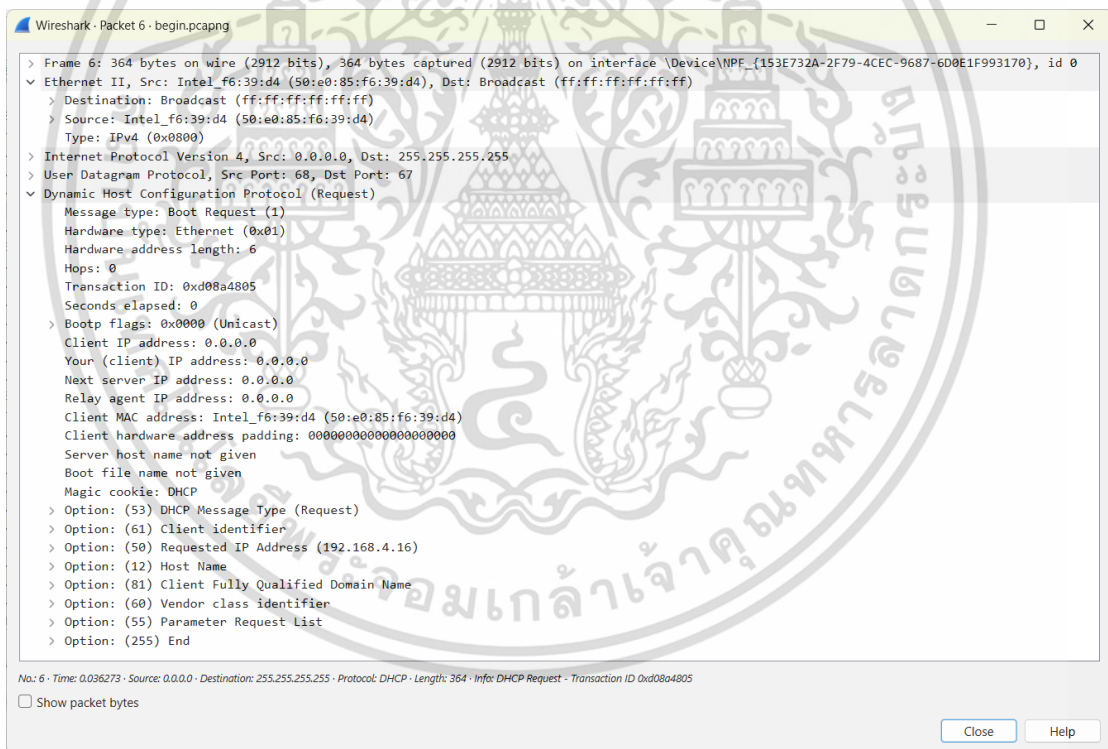
#### 4.4 โหนดจุดเข้าใช้งาน (Access point node)

โหนดจุดเข้าใช้งานประกอบไปด้วย Raspberry Pi Pico W แบตเตอรี่ขั้วพลาย ขนาด 3.7 V ดังแสดงในแผนภาพที่ 4.13 โดยมีหน้าที่หลัก เพื่อเป็นจุดเข้าใช้งานของ โหนดเซ็นเซอร์ โหนดตัวควบคุม โหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ โดยจะมีการใช้งาน โพรโตคอล DHCP เพื่อสร้างการเชื่อมต่อ โพรโตคอล ARP เพื่อถามหาถึงที่อยู่ MAC address ในแต่ละไอพี ซึ่งโหนดจุดเข้าใช้งานจะมีที่อยู่ IP address ที่ 192.168.4.1 ตัวอย่างแพ็กเก็ตการสื่อสาร ของโหนดจุดเข้าใช้งาน และโหนดตัวควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ผ่านโปรโตคอล DHCP



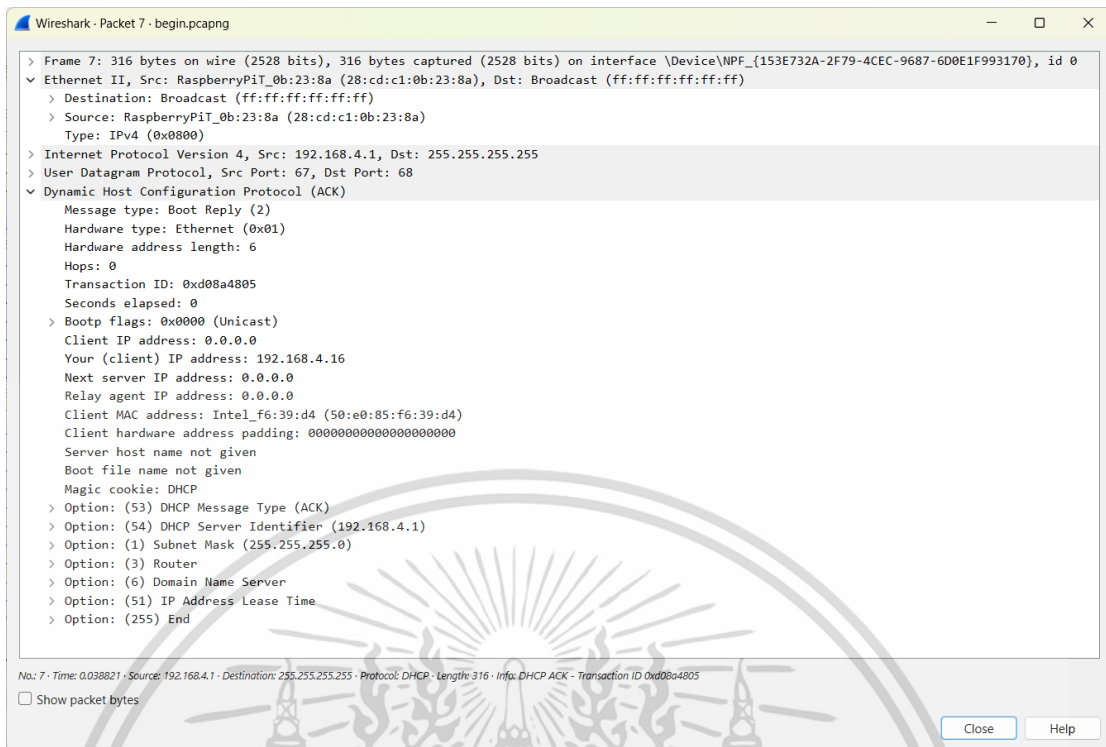
fritzing

รูปที่ 4.13 แผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์การเชื่อมต่อในโหมดจุดเข้าใช้งาน  
ที่มาของรูป <https://fritzing.org/>



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างแพ็กเก็ตที่รับการสื่อสารของโหมดจุดเข้าใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

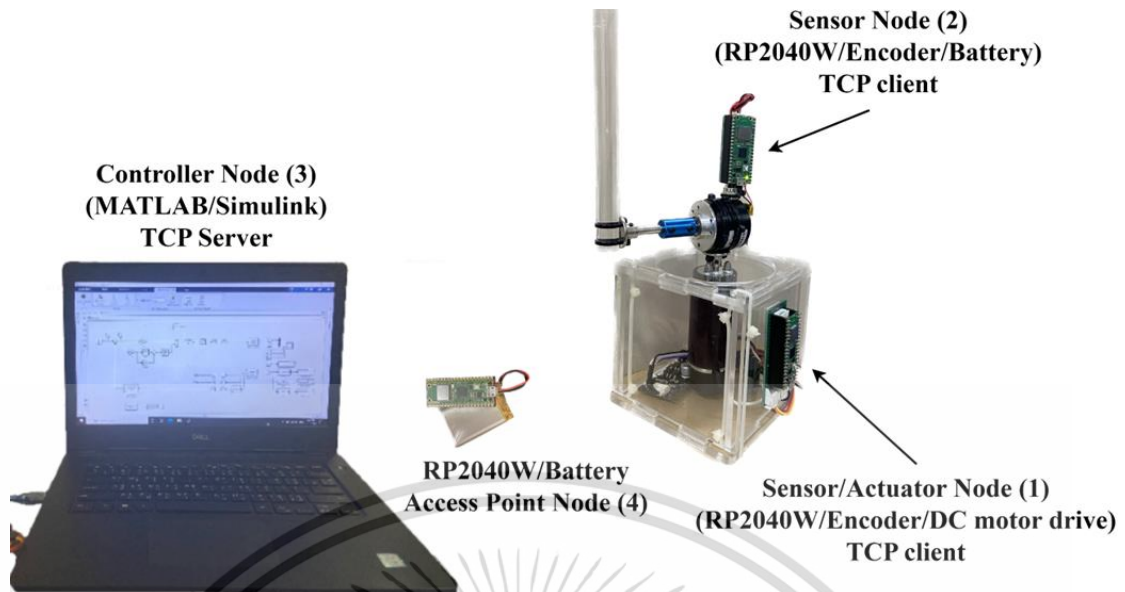


รูปที่ 4.15 ตัวอย่างแพ็กเก็ตที่ส่งการสื่อสารของโหนดจุดเข้าใช้งาน

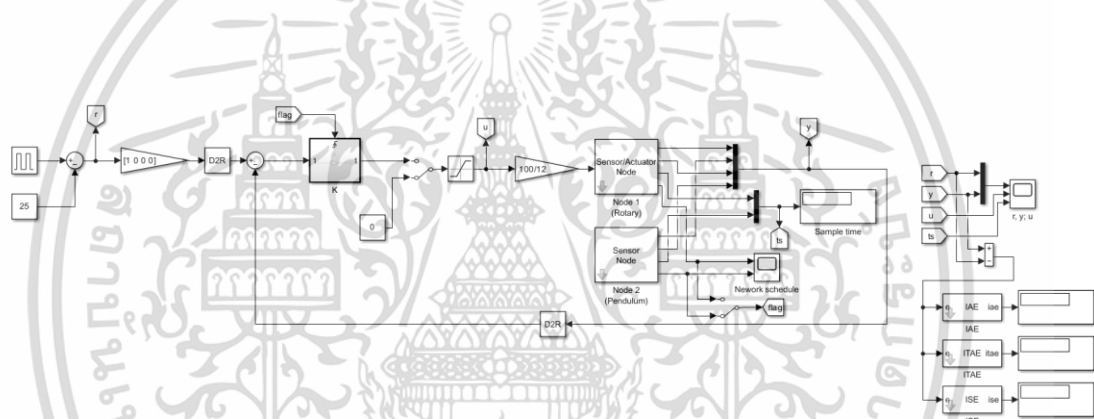
#### 4.5 โหนดตัวควบคุม (Controller node)

โหนดตัวควบคุมที่ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อนวกรเข้ากับ โหนดเซ็นเซอร์ โหนดเซนเซอร์ และตัว ขับเป็นดังแผนภาพที่ 4.16 โหนดตัวควบคุมถูกใช้เขียนอัลกอริทึมตัวควบคุมสำหรับการทดลอง MATLAB/Simulink บนคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบมาเพื่อดำเนินการแบบเรียลไทม์โดยใช้ Simulink Desktop Real-Time ในรูปที่ 4.17 ข้อดีคือสามารถดำเนินการแบบเรียลไทม์บนคอมพิวเตอร์ โดยรองรับอัตราการสุ่มตัวอย่างสูงสำหรับโหนดเคอร์เนลประมาณ 5 ไมโครวินาที ในขณะที่ MATLAB/Simulink รับแพ็กเก็ตข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ โดยใช้บล็อก "Stream Input" ซึ่งเป็นบล็อก Simulink Desktop Real-Time สำหรับการอ่านจากโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ เมื่อเหตุการณ์การวัดโหนดเซ็นเซอร์หรือแพ็กเก็ตมาถึง จะเกิดการทริกเกอร์การควบคุมป้อนกลับสถานะเพื่อส่งเอาต์พุตของตัวควบคุม ( $V_m$ ) ไปยังบล็อก "Packet output" เป็นกลไกอ้างอิงตามเหตุการณ์ ซึ่งจะส่งสัญญาณควบคุมโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ กระบวนการจึงถูกควบคุมเช่นนี้จนกว่ากระบวนการจะหยุดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

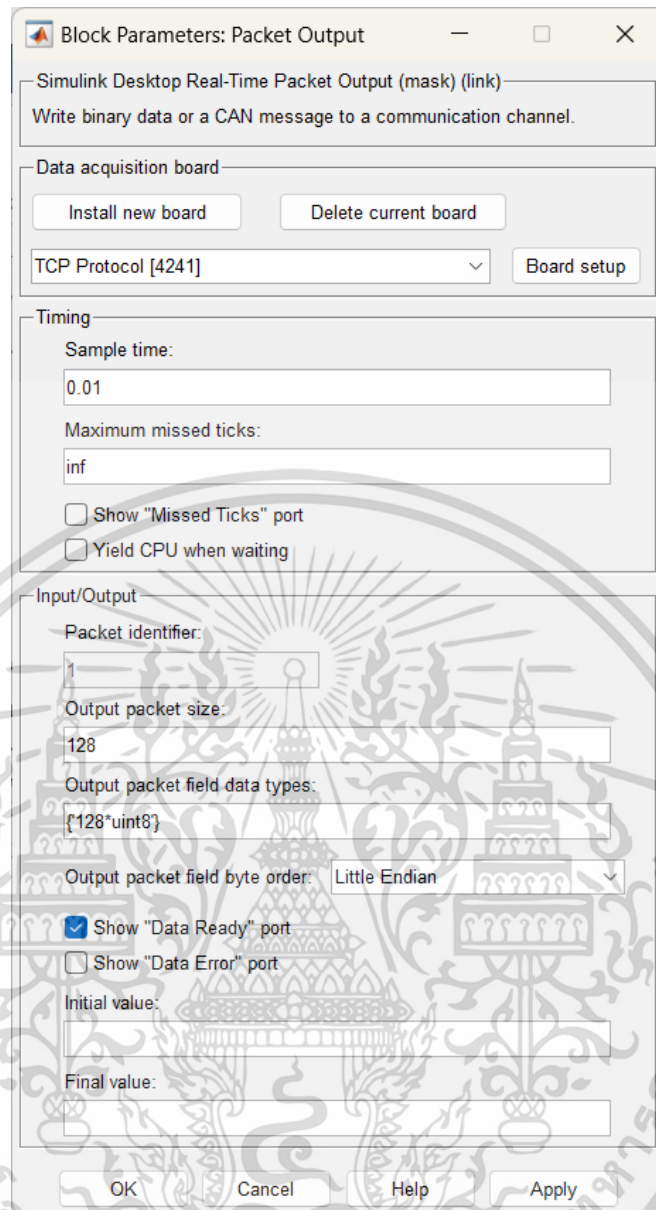


รูปที่ 4.16 แผนภาพโหนดต่าง ๆ ในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย



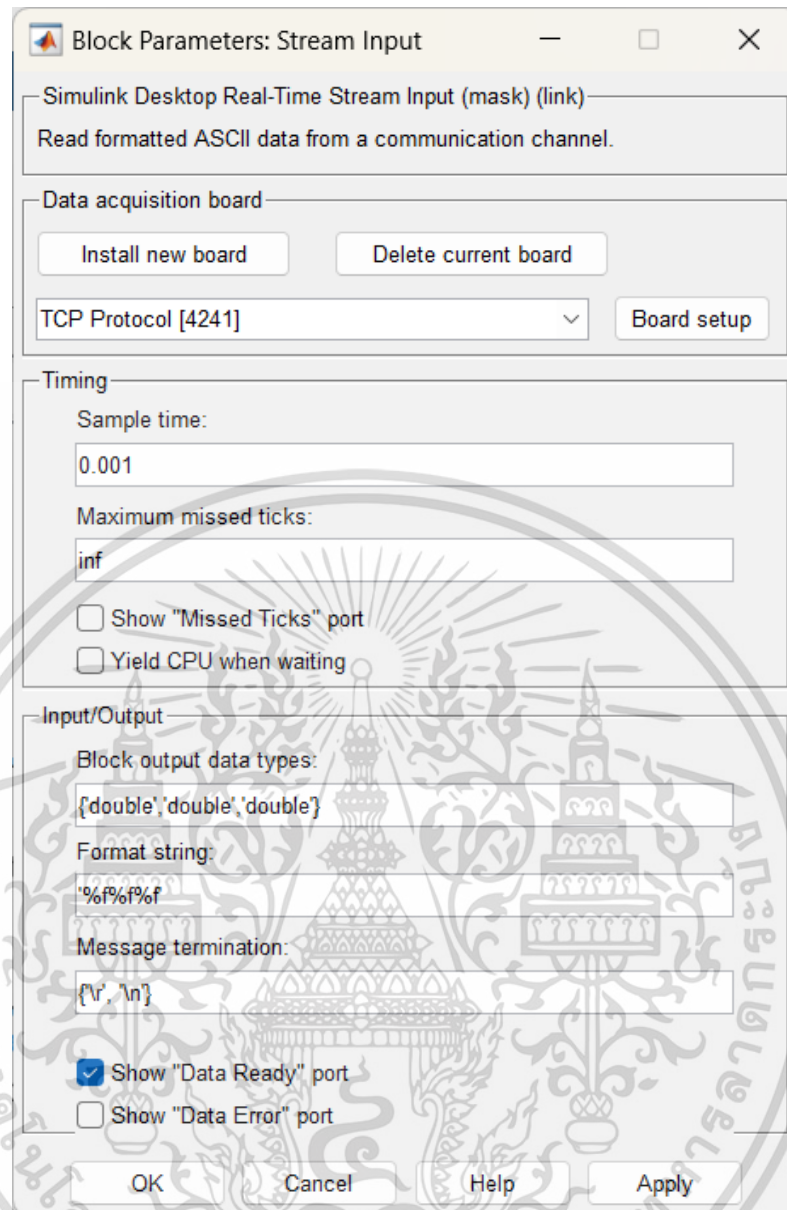
รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมสำหรับโหนดตัวควบคุมบน Simulink Desktop Realtime

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรม ค่าเป้าหมายของกระบวนการ ตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง โหนดเซนเซอร์ และโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ ซึ่งทั้งสองโหนดนี้ รับส่งแพ็กเก็ตกับโหนดตัวควบคุม ผ่านบล็อก “Stream input” และ “Packet output” ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์เป็น TCP เซิร์ฟเวอร์ บนพอร์ต 4242 และ 4241 ที่มีความถี่สำหรับโหนดเซนเซอร์อยู่ที่ 0.01 และโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับอยู่ที่ 0.01 ซึ่งจะแสดงการตั้งค่าอื่น ๆ ดังในรูปที่ 4.18-4.21



รูปที่ 4.18 พารามิเตอร์สำหรับบล็อกแพ็คเกจเกิดเอาต์พุตในโหมดเซนเซอร์และตัวขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์สำหรับบล็อกสตรีมอินพุตในโหมดเซนเซอร์และตัวขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Parameters: Packet Output

Simulink Desktop Real-Time Packet Output (mask) (link)  
Write binary data or a CAN message to a communication channel.

Data acquisition board

Install new board    Delete current board

TCP Protocol [4242]    Board setup

Timing

Sample time:  
0.01

Maximum missed ticks:  
inf

Show "Missed Ticks" port  
 Yield CPU when waiting

Input/Output

Packet identifier:  
1

Output packet size:  
128

Output packet field data types:  
{128\*uint8}

Output packet field byte order: Little Endian

Show "Data Ready" port  
 Show "Data Error" port

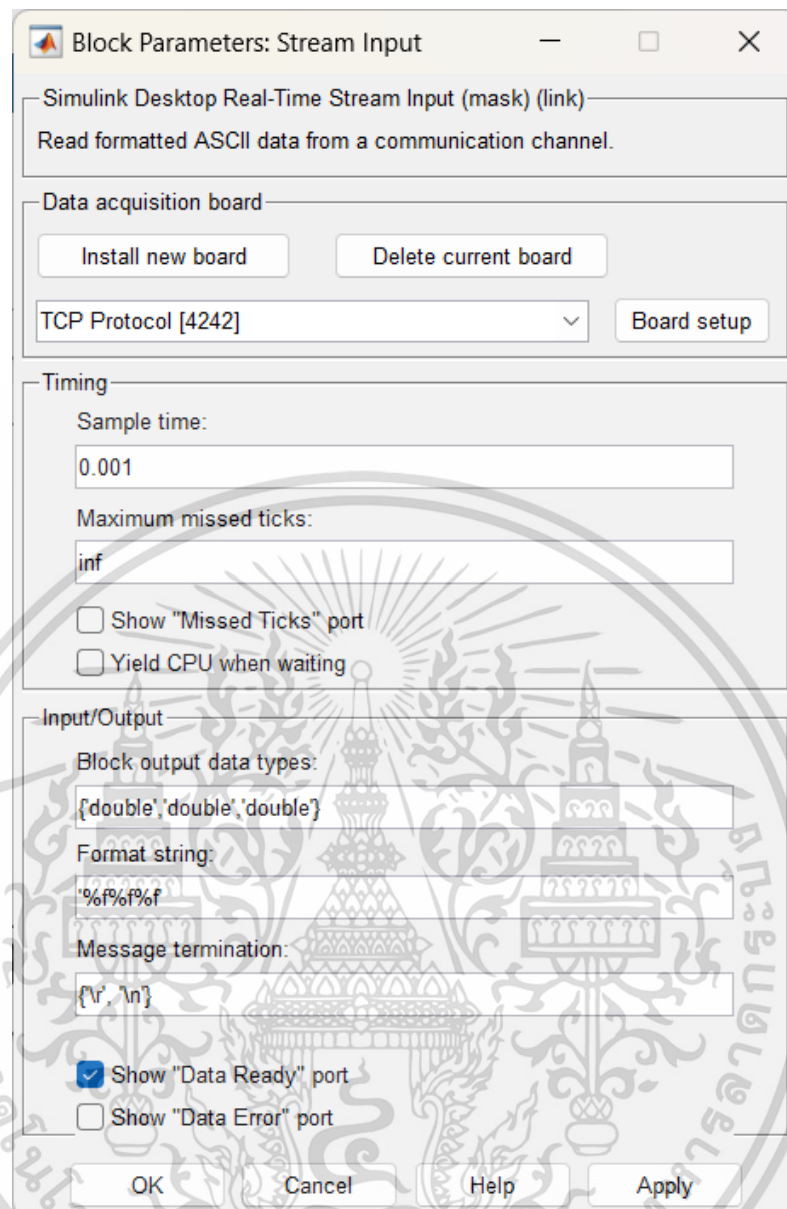
Initial value:

Final value:

OK    Cancel    Help    Apply

รูปที่ 4.20 พารามิเตอร์สำหรับบล็อกแพ็กเก็ตเอาต์พุตในโหมดเซนเซอร์

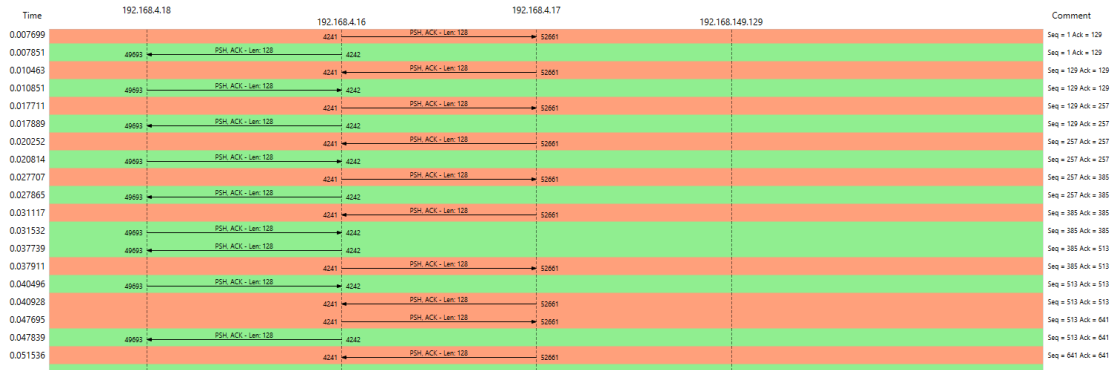
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



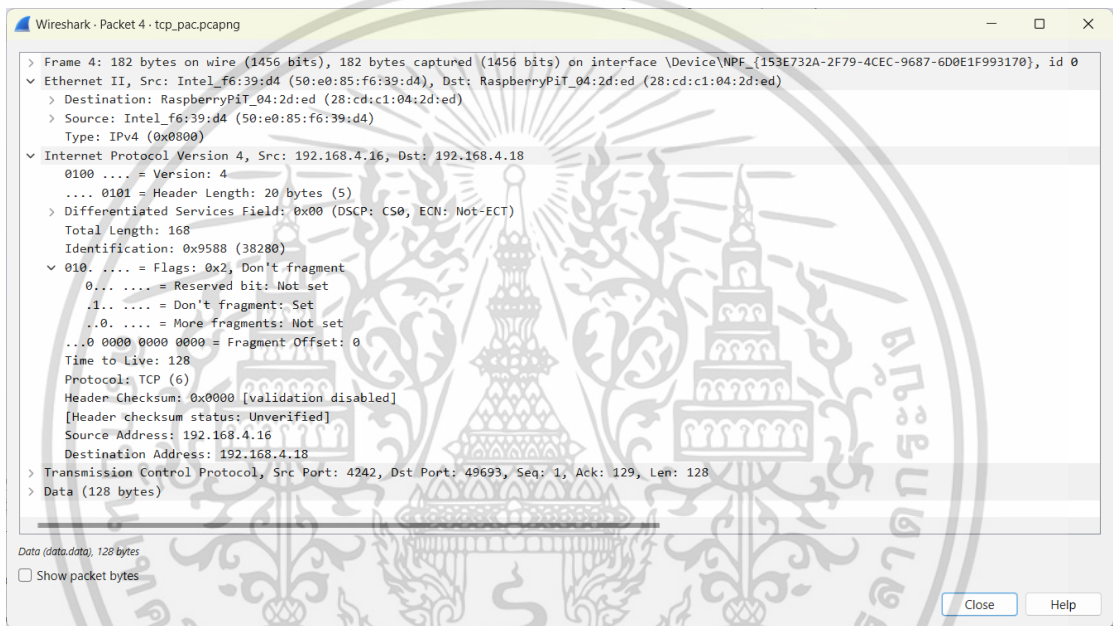
รูปที่ 4.21 พารามิเตอร์สำหรับบล็อกสตรีมอินพุตในโหมดเซินเซอร์และตัวขับ

การสื่อสารรับส่งแพ็กเก็ตบนโหนดตัวควบคุมสื่อสารกันผ่านทางโปรโตคอล TCP/IP เมื่อมีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบทรีเวย์แฮนด์เชค (Three way handshake) ทำการส่งข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.22 ตัวอย่างแพ็กเก็ตเพื่อการรับส่งข้อมูลจากโหนดตัวสุขุมไปสู่โหนดเซินเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

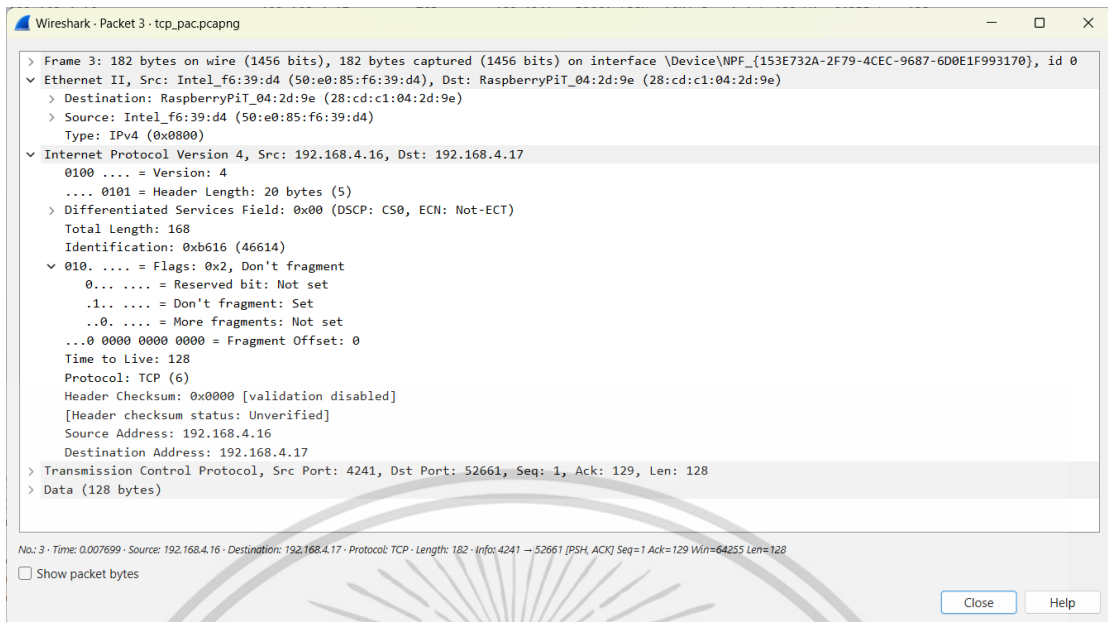


รูปที่ 4.22 แผนภาพวงจรวีธีการเชื่อมต่อในโหนดจุดเข้าใช้งาน



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างแพ็กเก็ตการสื่อสารระหว่างโหนดเซิร์ฟเวอร์และโหนดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างแพ็กเก็ตเกิดการสื่อสารระหว่างโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับและโหนดควบคุม

บทที่ 4 ซึ่งกล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมเชิงเส้นกำลังสองสำหรับระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนในเครือข่ายไร้สาย ซึ่งได้อภิปรายถึงแพ็กเก็ตการสื่อสารผ่านโปรโตคอล TCP/IP และองค์ประกอบต่างๆ ในโหนดเซ็นเซอร์ โหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ โหนดจุดเข้าใช้งานและโหนดตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

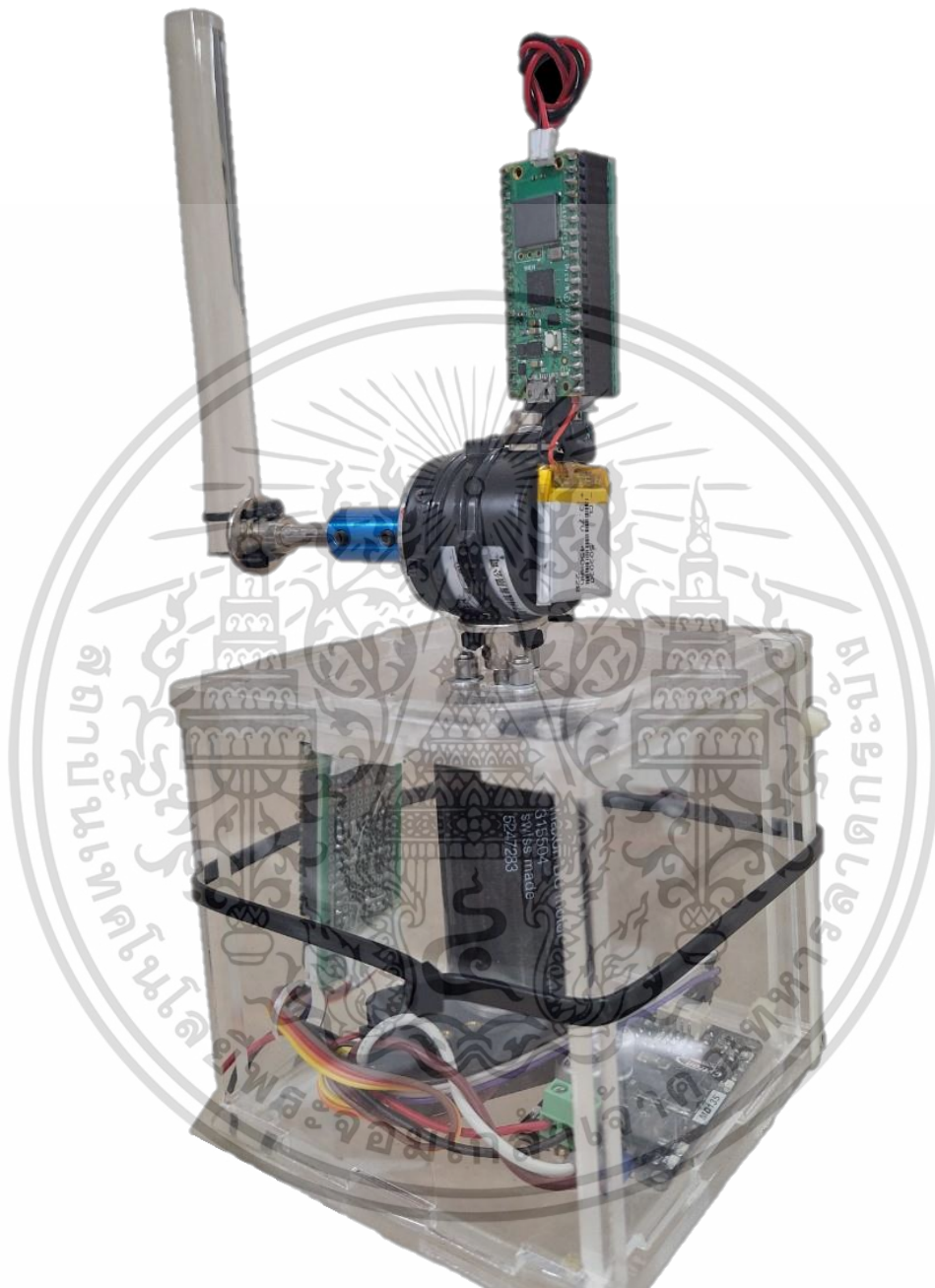
## บทที่ 5

### การทดลองระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย

การทดลองระบบควบคุมเครือข่ายไร้สายบทนี้ กล่าวถึงผลการทดลองและการเตรียมทรัพยากรที่ใช้ภายใต้เครือข่ายไร้สายกับระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน อธิบายถึงการเตรียม เครื่องมือวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ ระบบควบคุมเครือข่ายไร้สายแบบเรียลไทม์ และแสดงให้เห็นถึงสมรรถภาพจากตัวควบคุมที่ได้ทำการออกแบบ

#### 5.1 การเตรียมทรัพยากรวิจัยสำหรับการทดลองระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย

การเตรียมทรัพยากรวิจัยสำหรับการทดลองระบบควบคุมภายใต้การสื่อสารแบบเครือข่ายไร้สาย จากการได้มาซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพนดูลัมแบบฐานหมุนในบทที่ 3 โดยใช้สมองกลฝังตัว Raspberry Pi Pico W เป็นโหนดการรับส่งแพ็กเก็ตของข้อมูลการสื่อสาร และเป็นตัวแอคเซสพอยท์ (Access point) ซึ่งทดลองผ่านเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11n เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม เมื่อควบคุมกระบวนการจริงภายใต้เครือข่ายไร้สายว่าได้ประสิทธิภาพที่ต้องการหรือไม่ จากรูปที่ 5.1 แสดงถึงระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนโดยมีโหนดส่งแพ็กเก็ตข้อมูลหรือโหนดเซนเซอร์ และโหนดทั้งรับและส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสัญญาณควบคุมหรือโหนดตัวรับ รูปที่ 6.2 แสดงถึงโหนดตัวควบคุม คอมพิวเตอร์ซึ่งมีอัลกอริทึมตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองแบบตามเหตุการณ์ที่ได้ออกแบบไว้ ผ่าน Simulink desktop real-time โดยกำหนดระยะ การทดลองจากโหนดของระบบและโหนดของตัวควบคุม เป็นระยะทาง 10 เมตร

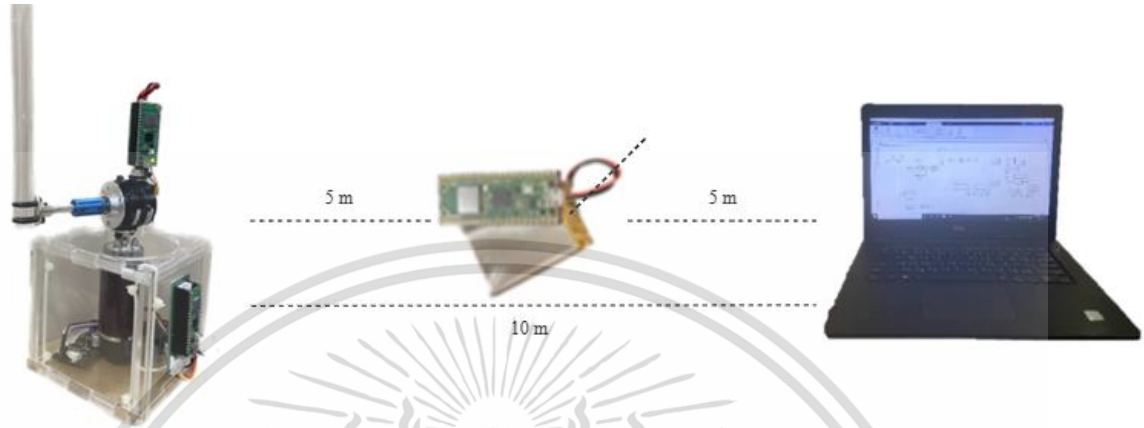


รูปที่ 5.1 ระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุน

จากระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนในเครือข่ายไร้สายโดยมีโหนดเซ็นเซอร์ ซึ่งโปรแกรมให้ส่ง แพ็กเก็ตของข้อมูลการวัดตำแหน่งขององศาที่เปลี่ยนแปลงไปยังโหนดตัวควบคุมที่มีระยะเวลาการส่งทุก ๆ 0.1 วินาที ครั้งละ 128 Bytes ตามที่ออกแบบการส่งข้อมูล ในบทที่ 4 และโหนดตัวรับจะรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพ็คเกจข้อมูลจากโหนดตัวควบคุมบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งถูกโปรแกรมให้รับแพ็คเกจข้อมูล และสร้างสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ให้มอเตอร์ดีซี (DC motor) เพื่อขับโหลดต่อไป



รูปที่ 5.2 แผนภาพตำแหน่งระยะทางของโหนดในเครือข่ายไร้สาย

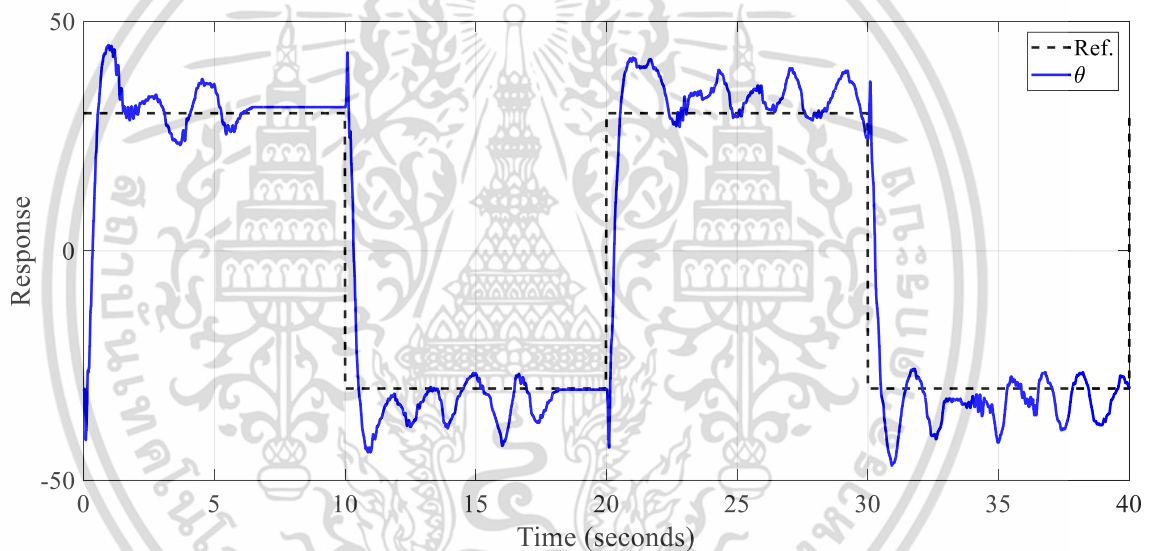
จากการอภิปรายระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนบนเครือข่ายไร้สายโดยมีโหนดเซนเซอร์ โหนดตัวขับและโหลดตัวควบคุม ในบทที่ 4 รวมถึงการส่งแพ็คเกจข้อมูลของโหนดเซนเซอร์ จำนวนการส่งแพ็คเกจข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปจะอธิบายถึง การออกแบบการสื่อสาร ของโหนดตัวควบคุม ซึ่งมีการใช้อัลกอริทึมตัวควบคุมสำหรับการทดลอง ถูกโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink บนคอมพิวเตอร์ โดยออกแบบให้ดำเนินการแบบเรียลไทม์ บน Simulink desktop realtime ซึ่งมีข้อดีที่สามารถดำเนินการด้วยเวลาจริงบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งรองรับอัตราการสุ่มตัวอย่างที่สูงสำหรับโหนดเคอร์เนล ขณะการทดลอง Simulink desktop realtime บนคอมพิวเตอร์รับแพ็คเกจข้อมูลจากโหนดตัวควบคุม โดยใช้บล็อก “Stream input” ซึ่งเป็นบล็อกไดโอแกรมของ Simulink desktop realtime ทำหน้าที่สำหรับการอ่านค่าจากโหนดเซนเซอร์ หรือค่าการวัดของกระบวนการ ซึ่งมีการกำหนดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 6.1 และบล็อก “Stream output” ซึ่งทำหน้าที่ส่งออกค่าควบคุมไปยังโหนดตัวขับไปจนกว่ากระบวนการนั้นจะสิ้นสุดลง

## 5.2 การทดลองตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ภายใต้เครือข่ายไร้สาย

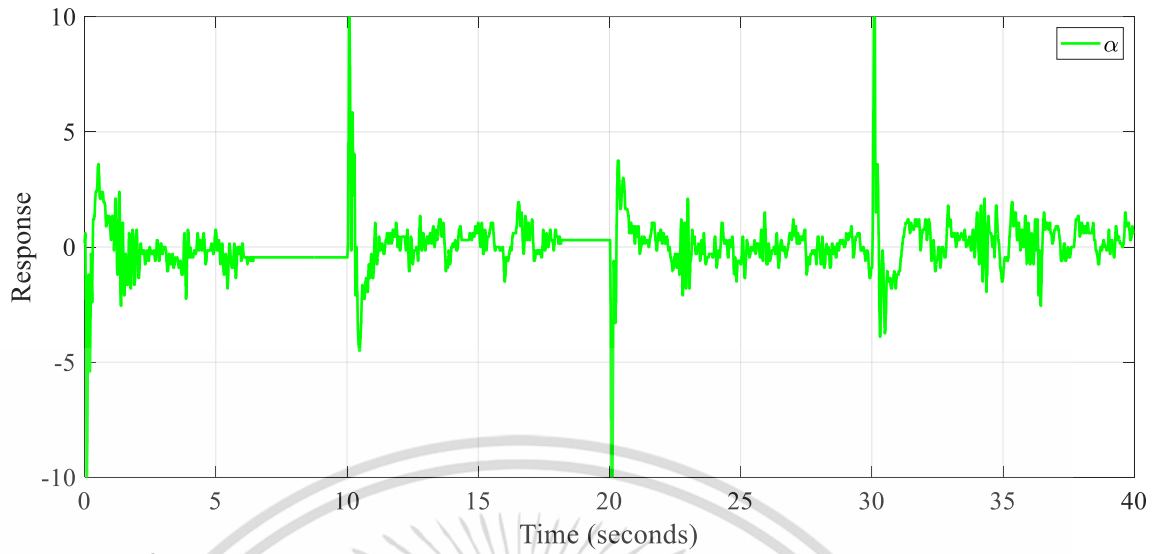
อัลกอริทึมตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR) ตามถูกเขียนบนซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink โหนด Realtime Kernel แสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อเริ่มการควบคุมรับค่าการวัดของกระบวนการ สื่อสารแบบผ่านบล็อก “Stream Input” เงื่อนไขการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์จากรูปที่ 5.2 กำหนดระยะเวลาของการส่งแพ็คเกจทุกๆ 0.01 มิลลิวินาทีเป็นเวลา 128

ไบต์ ระยะห่างระหว่างโหนดตัวควบคุม และโหนดจุดเข้าใช้งาน คือ 5 เมตรระยะห่างระหว่างโหนดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

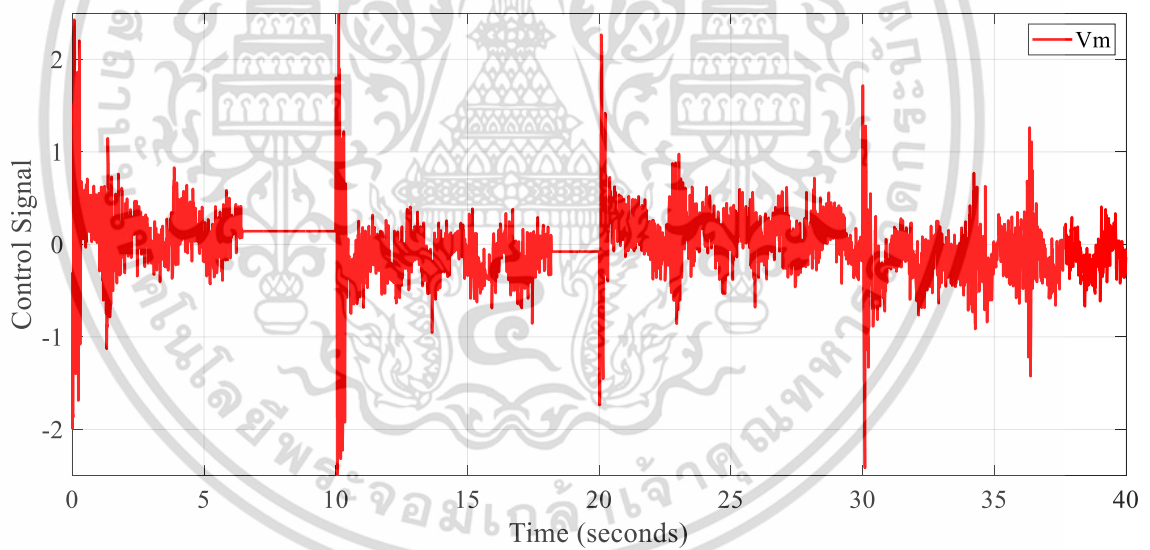
เซ็นเซอร์และตัวขับ และโหนดจุดเข้าใช้งานเท่ากับ 5 เมตรในแนวเส้นตรง หมายความว่า โหนดเซ็นเซอร์และตัวขับอยู่ห่างจากโหนดตัวควบคุม 10 เมตร และเมื่อทำการทดลองระดับอ้างอิงแบบหมุนเปลี่ยนจาก  $[-30, 30]$  องศา และจาก  $[30, -30]$  องศา ทุกๆ 10 วินาที ภายใต้การสื่อสารไร้สาย ทั้ง 4 โหนด ดังรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึงการแกว่งรอบค่าอ้างอิง แต่เพนดูลัมผกผันยังคงรักษาสมดุลไว้ได้ แม้ว่าแกนหลัก  $\alpha$  จะกลับด้านมากกว่า 10 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.4 สัญญาณควบคุมเมื่อเพนดูลัมและแกนหมุนจะคงที่ในช่วง  $[-0.5, 0.5]$  V จุดสูงสุดที่  $[-2.5, 2.5]$  V ดังรูปที่ 5.5 อย่างไรก็ตามรูปที่ 5.6 แสดงปัญหาของ WNCS ซึ่งแปรผันตามเวลา จากความล่าช้าในเครือข่ายไร้สายของโหนดเซ็นเซอร์และตัวขับ ส่งผลให้มีเวลาสุ่มตัวอย่างมากกว่า 20 มิลลิวินาทีตลอดทั้งการควบคุม รูปที่ 5.7 แสดงถึงเหตุการณ์แพ็คเก็ตที่มาถึงและทริกเกอร์ (trigger) การควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ภายในช่วง 1 วินาที



รูปที่ 5.3 ผลการตอบสนองการทดลองของระบบควบคุมภายใต้เครือข่ายไร้สาย ( $\theta$ )

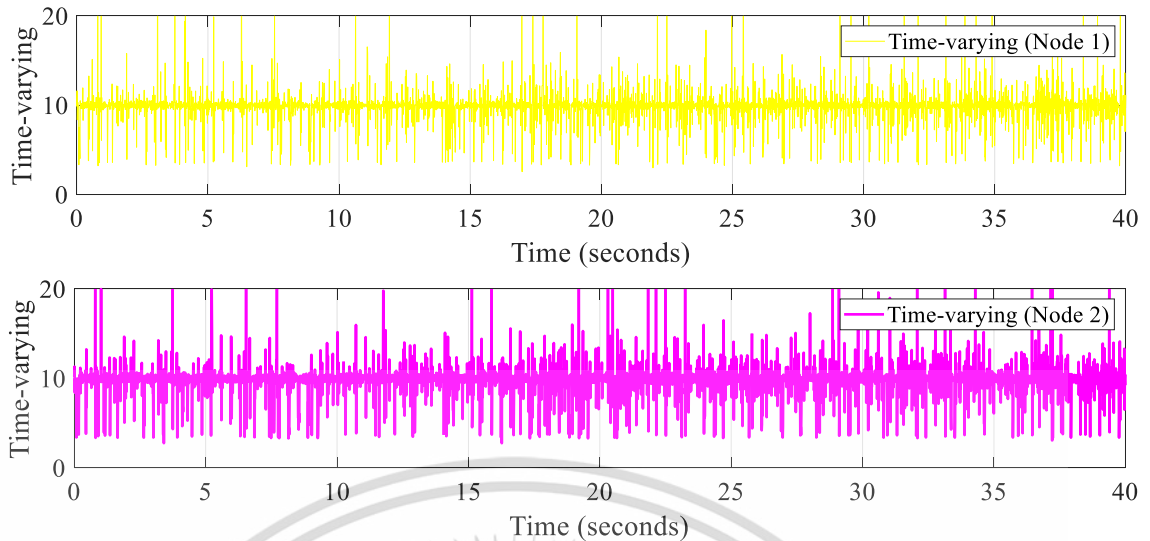


รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนองการทดลองของระบบควบคุมภายใต้เครือข่ายไร้สาย ( $\alpha$ )

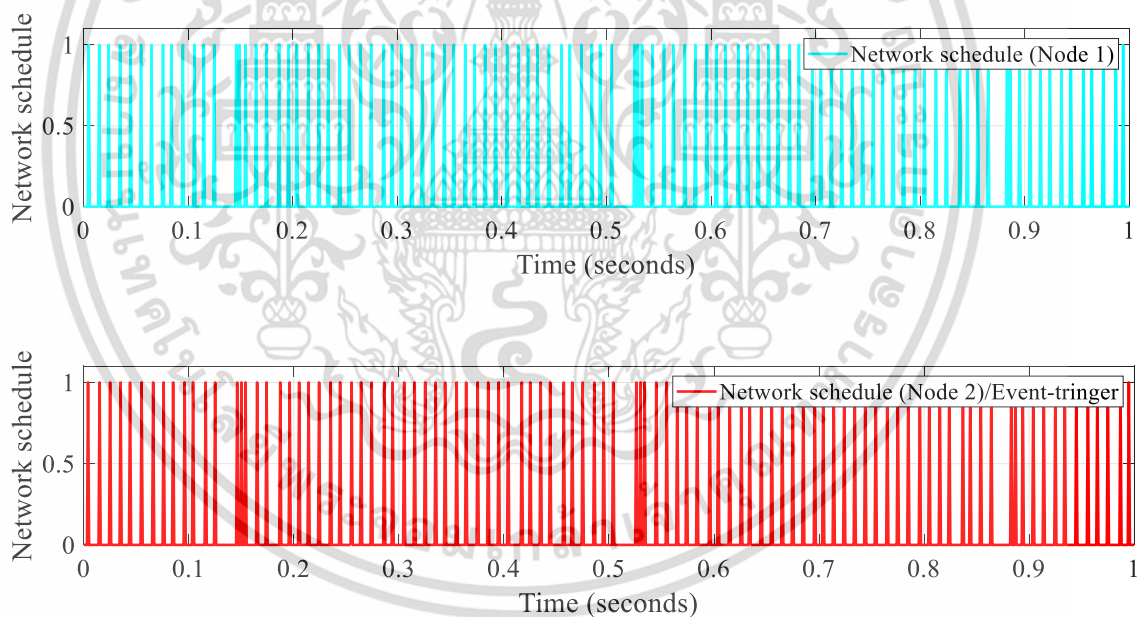


รูปที่ 5.5 สัญญาณควบคุมการทดลองในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ผลการทดลองแปรผันตามเวลาในระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย



รูปที่ 5.7 Network schedule ของเซ็นเซอร์/ตัวขับ (โหนด 1) และเซ็นเซอร์ (โหนด 2)

กล่าวสรุปในบทที่ 5 ได้กล่าวถึงการเตรียมการทดลองสำหรับการควบคุมเชิงเส้นกำลังสองตามเหตุการณ์ในเครือข่ายไร้สาย และอภิปรายถึงผลที่ได้ ซึ่งพบว่าตัวควบคุมนี้สามารถรักษาสมรรถภาพการควบคุมได้ดังที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุป

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

แนวทางการควบคุมด้วยตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสอง (LQR) ตามเหตุการณ์สำหรับระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนได้ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งควบคุมอยู่บนระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย (WNCS) มาตรฐาน IEEE 802.11n (WiFi) ที่ทำงานอยู่บนชิปไร้สาย CYW43439 ของบอร์ดพัฒนา Raspberry Pi Pico W นำเสนอการแก้ปัญหาระบบควบคุมเครือข่ายไร้สาย ด้วยการรวมกลไกการอ้างอิงตามเหตุการณ์เข้ากับลู่วควบคุม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแนวทางที่นำเสนอสามารถทนต่อการรบกวนที่เกิดจากเครือข่ายไร้สาย ขณะเดียวกันก็รักษาประสิทธิภาพการควบคุมที่น่าพอใจ สามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังทนทานต่อการรบกวนที่เกิดจากเครือข่ายความล่าช้าและการสูญหายของแพ็กเก็ต แม้ว่าความล่าช้าของเครือข่ายจะเกิน 10 มิลลิวินาที แต่ยังสามารถรักษาสมดุลของระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนไว้ได้

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การควบคุมระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนด้วยตัวควบคุมเชิงเส้นกำลังสองแบบตามเหตุการณ์ ให้ผลตอบสนองได้ดีภายใต้การสื่อสารแบบเครือข่ายไร้สาย ที่มีค่าที่อยู่ในช่วงเวลาตอบสนอง ไม่เกิน 20 มิลลิวินาที ตามที่ได้ทดลองไว้ ซึ่งการสูญเสียแพ็กเก็ตหรือเวลาที่มากกว่าที่นำเสนอ อาจทำให้ตัวควบคุม ไม่สามารถคงประสิทธิภาพการควบคุมไว้ได้ อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ของตัวควบคุมผ่านสมองกลฝังตัวและผลการทดลองที่เป็นที่ต้องการ

#### 6.3 ปัญหาและอุปสรรค

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่การสร้างกระบวนการระบบเพนดูลัมผกผันแบบฐานหมุนขึ้นเพื่อทดสอบความสามารถของการควบคุมแบบเครือข่ายไร้สาย พารามิเตอร์ของกระบวนการมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากหาได้จากค่าที่วัดได้และข้อมูลบางส่วนได้จากข้อมูลของบริษัทซึ่งหามาได้ยาก แต่สามารถควบคุมได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ แต่ถ้าสามารถหาด้วยวิธีอื่นเพื่อยืนยันว่าตรงกับกระบวนการจริงจะทำให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

#### 6.4 งานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยมุ่งเน้นที่จะพัฒนาตัวผู้คุมผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย ในวิธีอื่น ๆ เพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบสมรรถนะ ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่ศึกษา การตรวจสอบการบังคับใช้แนวทางการควบคุมตามเหตุการณ์กับโหมดการแกว่งเพนดูลัม ขณะเดียวกันสำรวจกลไกการตามเหตุการณ์ขั้นสูงเพื่อลดการสื่อสารเครือข่ายและข้อกำหนดด้านการคำนวณเพิ่มเติมอีกทั้งอาจนำตัวควบคุมที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้กับระบบต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Berceanu, Cristian, and Monica Pătrașcu. 2022. "Engineering Emergence: A Survey on Control in the World of Complex Networks" *Automation* 3, no. 1: 176-196.
- [2] P. Park, S. Coleri Ergen, C. Fischione, C. Lu and K. H. Johansson, "Wireless Network Design for Control Systems: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 978-1013, Secondquarter 2018,
- [3] M. S. Mahmoud, "Wireless networked control system design: An overview," 2014 *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Istanbul, Turkey, 2014, pp. 2335-2340
- [4] K. Furuta, M. Yamakita and S. Kobayashi, "Swing up control of inverted pendulum," *Proceedings IECON '91: 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Kobe, Japan, 1991, pp. 2193-2198
- [5] K.J. Åström, K. Furuta, "Swinging up a pendulum by energy control", *Automatica*, Volume 36, Issue 2, 2000, Pages 287-295,
- [6] Katarína Žáková "Experiments with Inverted Pendulum: from Simulations to Remote Control" *International Journal of Education and Information Technologies* 1 Date: 2007, Issue 3, Volume 1
- [7] Xuebo Yang and Xiaolong Zheng "Swing-Up and Stabilization Control Design for an Underactuated Rotary Inverted Pendulum System" *Theory and Experiments Journal IEEE Transactions on Industrial Electronics* Volume and Issue: Vol. 65, No. 9 Publication Date: September 2018 Page Numbers: 7229-723
- [8] Wang, Quan, Yuanyuan Zou, and Yugang Niu. "Event-triggered Model Predictive Control for Wireless Networked Control System." 23 In *Proceedings of the 2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC)*, July 3-5, 2014, Jinzhou, China. IEEE. p 332-336
- [9] Blevins, Terry, Mark Nixon, and Willy Wojsznis. "Event Based Control Applied to Wireless Throttling Valves." Presented at *Emerson Process Management*, Round Rock, TX, USA. Accessed April 7, 2024.
- [10] J. C. Maxwell, "On governors," *Philos. Mag.*, vol. 35, pp. 385–398, 1868.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] T. D. Crouch, *First Flight: The Wright Brothers and the Invention of the Airplane*. Washington, DC: Division Pub., Harpers Ferry Center Nat. Park Service, U.S. Dept. Interior, 2002.
- [12] N. N. P. Mahalik and K. K. Kim, "A prototype for hardware-in-the-loop simulation of a distributed control architecture," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 38, no. 2, pp. 189–200, Mar. 2008.
- [13] M.-Y. Chow and Y. Tipsuwan, "Time sensitive network-based control systems and applications," *IEEE IES Netw. Based Control Newslett.*, vol. 5, no. 2, pp. 13–18, Jun. 2005.
- [14] K. C. Lee, S. Lee, and M. H. Lee, "QoS-based remote control of networked control systems via PROFIBUS token passing protocol," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 1, no. 3, pp. 183–191, Aug. 2005.
- [15] M. Farsi, K. Ratcliff, and M. Barbosa, "An overview of controller area network," *Comput. Control Eng. J.*, vol. 10, no. 3, pp. 113–120, Aug. 1999.
- [16] R. M. Daoud, H. M. Elsayed, and H. H. Amer, "Gigabit Ethernet for redundant networked control systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, Dec. 2004, vol. 2, pp. 869–873.
- [17] K. C. Lee, S. Lee, and M. H. Lee, "Worst case communication delay of real-time industrial switched Ethernet with multiple levels," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1669–1676, Oct. 2006.
- [18] M. A. M. Vieira, C. N. Coelho, Jr., D. C. da Silva, Jr., and J. M. da Mata, "Survey on wireless sensor network devices," in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technol. Factory Autom.*, Dec. 2004, vol. 1, pp. 537–544.
- [19] J. Colandairaj, G. W. Irwin, and W. G. Scanlon, "A co-design solution for wireless feedback control," in *Proc. IEEE Int. Conf. Netw., Sens. Control*, 2007, pp. 404–409.
- [20] P. Matkurbanov, S. Lee, and D.-S. Kim, "A survey and analysis of wireless fieldbus for industrial environments," in *Proc. Int. Joint Conf. SICEICASE*, Oct. 2006, pp. 5555–5561.
- [21] S. Soucek and T. Sauter, "Quality of service concerns in IP-based control systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 6, pp. 1249–1258, Dec. 2004.

- [22] L. A. Montestruque and P. Antsaklis, "Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1562–1572, Sep. 2004.
- [23] J. Nilsson, B. Bernhardsson, and B. Wittenmark, "Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays," *Automatica*, vol. 34, no. 1, pp. 57–64, Jan. 1998.
- [24] R. Luck and A. Ray, "Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems," *Int. J. Control*, vol. 59, no. 6, pp. 1357–1372, 1994.
- [25] H. Chan and Ü. Özgüner, "Closed-loop control of systems over a communication network with queues," *Int. J. Control*, vol. 62, no. 3, pp. 493–510, Sep. 1995.
- [26] G. C. Walsh, Y. Hong, and L. G. Bushnell, "Stability analysis of networked control systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 438–446, May 2002.
- [27] C. Benedetti, M. Franchini, and P. Fiorini, "Stable tracking in variable time-delay teleoperation," in *Proc. IEEE/RSJ IROS*, Maui, HI, 2001, pp. 2252–2257.
- [28] R. P. Patankar, "A model for fault-tolerant networked control system using TTP/C communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, no. 5, pp. 1461–1467, Sep. 2004.
- [29] Z. Huo, H. Fang, and G. Yan, "Co-design for NCS robust fault-tolerant control," in *Proc. ICIT*, 2005, pp. 119–124.
- [30] Y. Wang, H. Ye, and G. Wang, "A new method for fault detection of networked control systems," in *Proc. IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, May 24–26, 2006, pp. 1–4.
- [31] Z.-Q. Zhu and X.-Z. Zhou, "Fault detection based on the states observer for networked control systems with uncertain long time-delay," in *Proc. IEEE Int. Conf. Autom. Logistics*, Aug. 2007, pp. 2320–2324.
- [32] S. Klinkhieo, C. Kambhampati, and R. J. Patton, "Fault tolerant control in NCS medium access constraints," in *Proc. IEEE Int. Conf. Netw. Sens. Control*, 2007, pp. 416–423.

- [33] K.-E. Årzen and A. Cervin, "Control and embedded computing: Survey of research directions," IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), vol. 16, Jul. 2005.
- [34] A. Cervin, "Integrated control and real-time scheduling," January 2003.
- [35] A. Cervin, D. Henriksson, B. Lincoln, J. Eker, and K.-E. Arzen, "How does control timing affect performance? analysis and simulation of timing using jitterbug and truetype," IEEE Control Systems Magazine, vol. 23, no. 3, pp. 16–30, 2003.
- [36] P. Zometa, M. Kögel, T. Faulwasser, and R. Findeisen, "Implementation aspects of model predictive control for embedded systems," in 2012 American Control Conference (ACC), 2012, pp. 1205–1210.
- [37] L. C. Cordeiro, C. Mar, E. B. Valentin, F. Cruz, D. Patrick, R. da Silva Barreto, and V. F. de Lucena, "An agile development methodology applied to embedded control software under stringent hardware constraints," ACM SIGSOFT Softw. Eng. Notes, vol. 33, 2008.
- [38] R. W. Krauss and J. R. Croxell, "A low-cost microcontroller-in-the-loop platform for controls education," 2012 American Control Conference (ACC), pp. 4478–4483, 2012.
- [39] Ogata, Katsuhiko. Discrete-Time Control Systems. Australia, Sydney: Prentice Hall, 1987., pp 824
- [40] B. Cazzolato and Z. Prime, "On the dynamics of the furuta pendulum," Hindawi Publishing Corporation Journal of Control Science and Engineering, vol. 8, January 2011.
- [41] Chawla, Ishan, and Ashish Singla. 20173. "Real-Time Control of a Rotary Inverted Pendulum using Robust LQR-based ANFIS Controller." International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation. doi:10.1515/ijnsns-2017-0139
- [42] Ma, Longhua, Feng Xia, and Zhe Peng. 2008. "Integrated Design and Implementation of Embedded Control Systems with Scilab" *Sensors* 8, no. 9: 5501-5515. <https://doi.org/10.3390/s8095501>
- [43] Benítez-Pérez, Héctor, Alma Alicia Benítez Pérez, and Jorge L. Ortega-Arjona1. "Networked Control Systems Design Considering Scheduling Restrictions and Local Faults."2 International Journal of Innovative

Computing, Information and Control 8, no. 12 (December 2012): 8515-85263.

- [44] Mahmoud, Magdi & Karaki, Bilal. (2019). Event-based networked control scheme for two-wheeled systems. The Journal of Scientific and Engineering Research. 5. 151-158. 10.20474/jater-5.4.1.



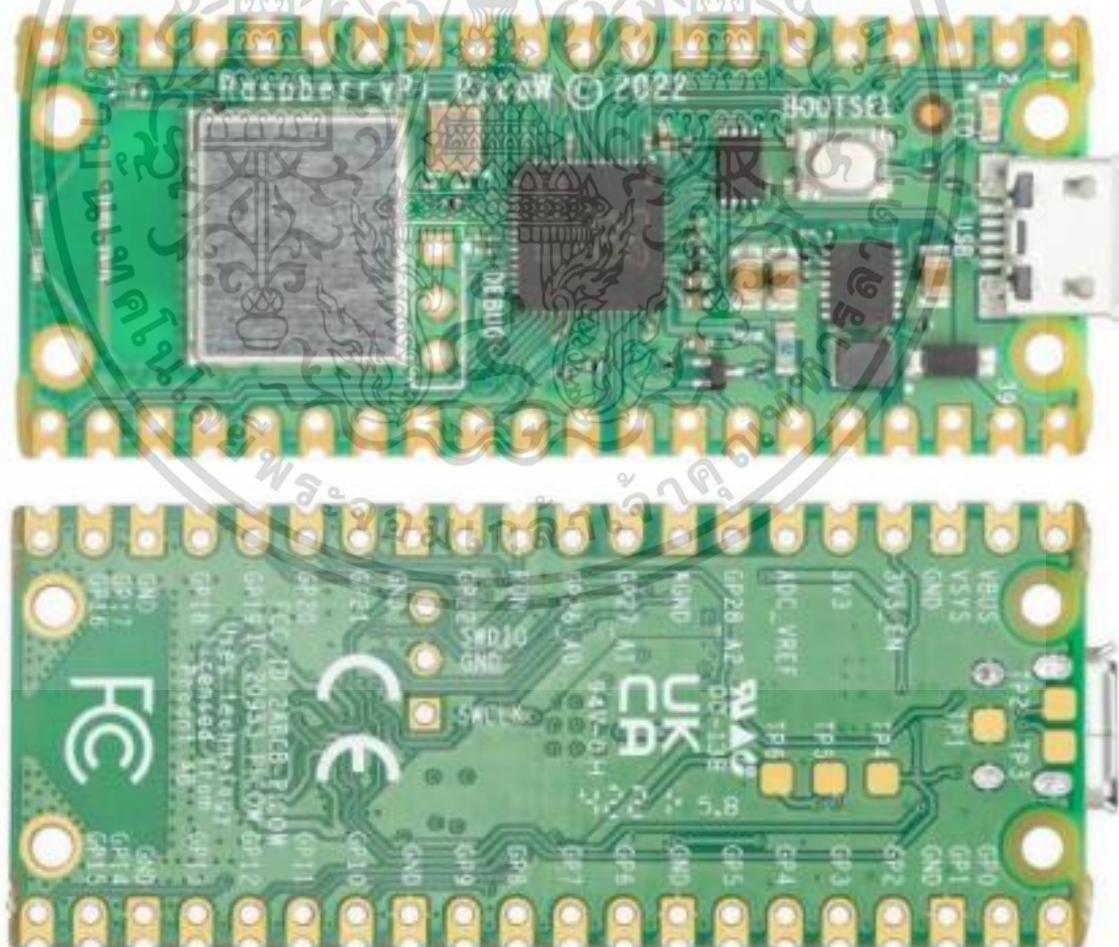
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์

#### 1.1ก Raspberry Pi Pico W

Raspberry Pi Pico W เป็นบอร์ดสมองกลฝังตัว ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของ RP2040 และชิป CYW43439 Wifi+BLE Raspberry Pi Pico W เป็นคอนโทรลเลอร์แบบ Arm โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้เขียนโปรแกรมด้วยภาษา C Raspberry Pi Pico W เพิ่มอินเทอร์เฟซไร้สาย (wireless interface) 2.4GHz. 802.11n โดยใช้ชิปจาก Inlineon CYW43439 และสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายเพื่อควบคุมระบบ Raspberry Pi Pico W เป็นเวอร์ชันที่สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายได้ บอร์ด Microcontroller ใช้นักพัฒนาบอร์ดแรก จาก Raspberry Pi Foundation Silicon (IC)



รูปที่ 1.1ก บอร์ด Raspberry pi Pico W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มาของรูป <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>

คุณสมบัติและข้อมูลจำเพาะของ Raspberry Pi Pico

ความเร็วสัญญาณนาฬิกาพื้นฐานที่ 48MHz และความเร็วสูงสุดที่ 133MHz(ต้องมีการตั้งค่าเพิ่มเติม) สามารถใช้งาน USB Micro B ในการจ่ายไฟและโอนถ่ายโปรแกรมได้ รองรับ USB 1.1 Host และ Device เมื่อเชื่อมต่อกับ PC ผ่าน USB Port จะปรากฏเป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูล USB Mass Storage โดยไม่ต้องใช้ Driver รองรับภาษา MicroPython, C และ C++ ในการเขียนโค้ดเพื่อโปรแกรมตัวบอร์ด โหลดโปรแกรมลงตัวบอร์ดได้อย่างง่ายดายด้วยการ Drag and Drop ลงในตัวบอร์ดเหมือนคัตลอกข้อมูลลงแฟลชไดร์ 40-pin 21x51 'DIP' ความหนา PCB 1 มม. และรองรับการติดตั้ง male header pin ระยะห่างระหว่าง pin 0.1 จึงทำให้สามารถใช้งานร่วมกับ breadboard ได้ มาพร้อมกับขอบ PCB บริเวณ Pin แบบ edge castellations PCB จึงทำให้สามารถติดตั้งได้บนแผ่น PCB อื่นแบบโดยวิธี SMD โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่นเพิ่มเติม ตัวบอร์ดไม่ได้ทำการบัดกรี male header pin มาด้วย

ความสามารถอื่น ๆ เพิ่มเติม :

- 1) 26 x multifunction 3.3V General Purpose I/O (GPIO)
- 2) 23 x digital GPIO เท่านั้น
- 3) 3 x 12-bit ADC ที่ความถี่แซมเปิลที่ 500Ksps, Analog to Digital Converter
- 4) 2 x UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)
- 5) 2 x SPI (Serial Peripheral Interface)
- 6) 2 x I2C (Inter IC)
- 7) 16 x PWM (Pulse Width Modulation)
- 8) 1 x Timer พร้อมกับ 4 alarms
- 9) 1 x Real Time Counter

10) 2 x Programmable IO (PIO) ที่สามารถจำลองการทำงานเป็นอุปกรณ์ high-speed interfaces ต่างๆ อาทิ SD card หรือ VGA • Built-in 12-bit ADC temperature sensor - 3-pin ARM Serial Wire Debug (SWD) port - Onboard Programmable LED, GP25

11) รองรับการจ่ายไฟผ่าน USB Port, external power supply หรือแบตเตอรี่ SDK ที่ครอบคลุมการพัฒนาในด้านต่างๆ, ตัวอย่างซอฟต์แวร์ และเอกสารประกอบอื่นๆ

12) ผลิตภัณฑ์อย่างเป็นทางการจาก Raspberry Pi Foundation

13) รองรับการทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่มีพอร์ต USB และใช้ OS ที่เป็น Windows, macOS, Linux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14) ทำงานกับ Raspberry Pi 4 Model B หรือ Raspberry Pi 400 และ Raspberry Pi OS ได้อย่างราบรื่นไร้รอยต่อ

15) ขนาด: 51 มม. x 21 มม. X 1 มม.

16) คุณสมบัติและข้อมูลจำเพาะของ Raspberry Pi Pico W

17) P2040 microcontroller with 2 MB of flash memory

18) On-board single-band 2.4 GHz wireless interfaces (802.11n)

19) Micro USB B port for power and data (and for reprogramming the flash)

20) 40 pin 21 x 51 mm 'DIP' style 1 mm thick PCB with 0.1' through-hole pins

also with edge castellations

22) Exposes 26 multi-function 3.3 V general purpose I/O (GPIO)

23) 23 GPIO are digital-only, with three also being ADC capable

24) Can be surface mounted as a module

25) 3-pin ARM serial wire debug (SWD) port

26) Simple yet highly flexible power supply architecture

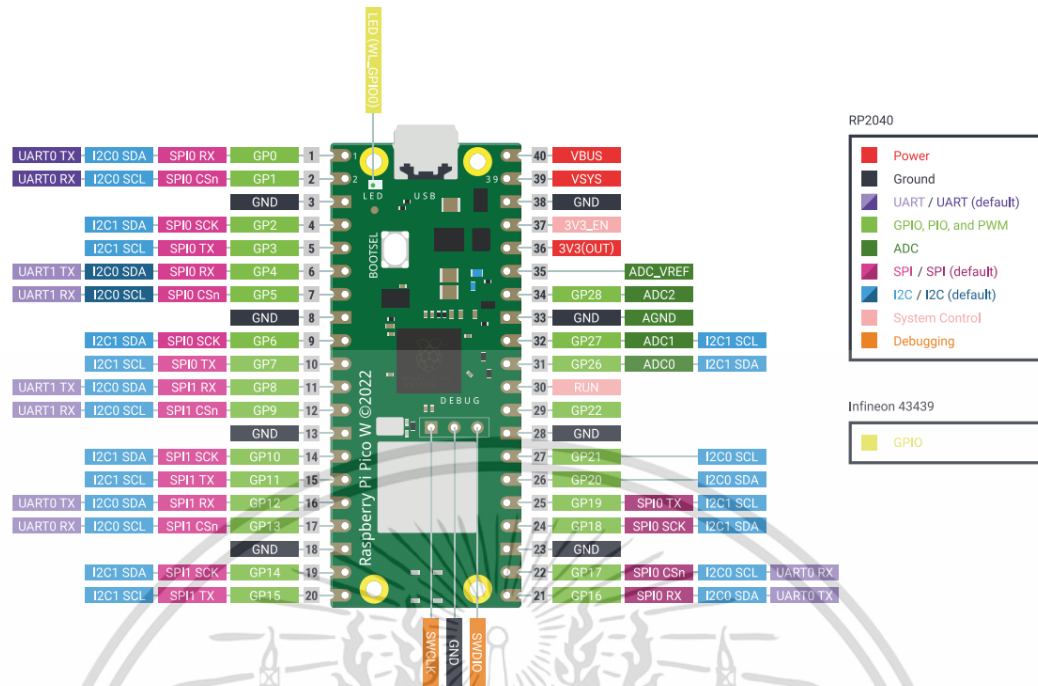
27) Various options for easily powering the unit from micro-USB, external supplies or batteries

28) High quality, low cost, high availability

29) Comprehensive SDK, software examples and documentation

Raspberry Pi Pico W มีวงจรภายนอกที่เรียบง่ายแต่ยืดหยุ่นเพื่อรองรับชิป RP2040: หน่วยความจำแฟลช (Winbond W25Q16JV), คริสตัล (Abracon ABM8-272-T3), แหล่งจ่ายไฟ และการแยกส่วน และเชื่อมต่อ USB พินไมโครคอนโทรลเลอร์ RP2040 ส่วนใหญ่จะถูกส่งไปยังพิน I/O ของผู้ใช้ที่ขอบด้านซ้ายและขวาของบอร์ด RP2040 I/O สี่ตัวใช้สำหรับฟังก์ชันภายใน: การขับเคลื่อน LED, การควบคุมพลังงานของแหล่งจ่ายไฟโหมดสวิตช์ (SMPS) บนบอร์ด และการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของระบบ Pico W มีอินเทอร์เฟซไร้สาย 2.4GHz ในตัวโดยใช้ Infineon CYW43439 เสาอากาศเป็นเสาอากาศออนบอร์ดที่ได้รับอนุญาตจาก ABRACON (เดิมชื่อ ProAnt) อินเทอร์เฟซไร้สายเชื่อมต่อผ่าน SPI กับ RP2040 Pico W ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้ส่วนหัวของพินบัดกรีขนาด 0.1 นิ้ว (ซึ่งมีระยะพิทช์ 0.1 นิ้วที่กว้างกว่าแพ็คเกจ DIP 40 พินมาตรฐาน) หรือจะวางตำแหน่งเป็น 'โมดูล' ที่ติดตั้งบนพื้นผิวได้ในฐานะผู้ใช้ I/O พินก็มีลักษณะเป็นคาสเทลเช่นกัน มีแผ่น SMT อยู่ใต้เชื่อมต่อ USB และปุ่ม BOOTSEL ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าถึงสัญญาณเหล่านี้ได้หากใช้พินโมดูล SMT ที่บัดกรีแบบรีโฟลว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



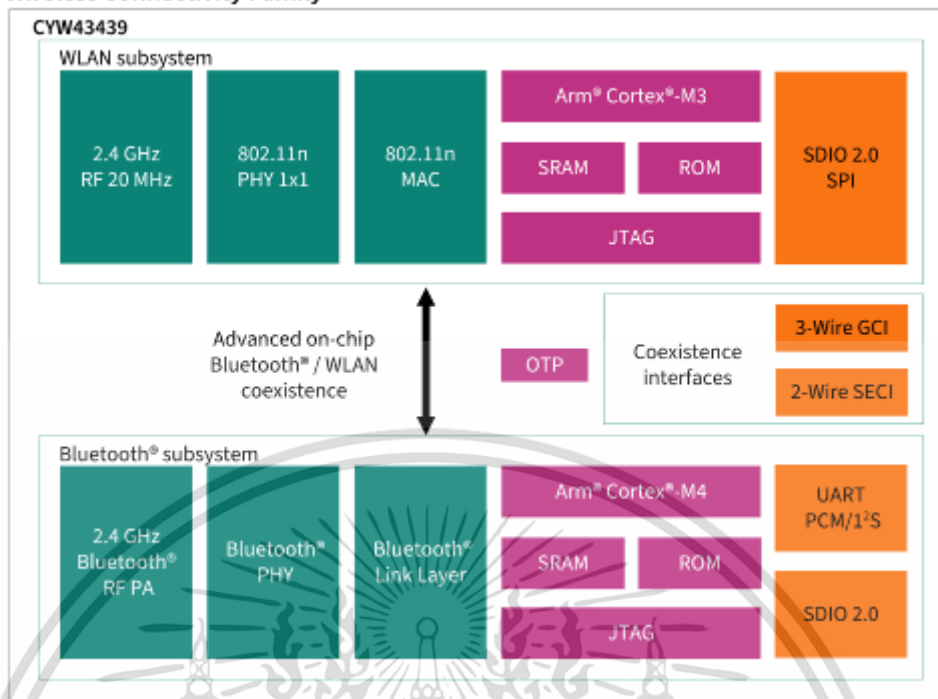
รูปที่ 1.2ก พินบอร์ด Raspberry pi Pico W

ที่มาของรูป <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>

Raspberry Pi Pico W ใช้ SMPS แบบเพิ่มบั๊กอนบอร์ดซึ่งสามารถสร้าง 3.3V ที่ต้องการ (เพื่อจ่ายไฟ RP2040 และวงจรรายนอก) จากแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่หลากหลาย (1.8 ถึง 5.5V) ซึ่งให้ความยืดหยุ่นอย่างมากในการจ่ายไฟให้กับยูนิตจากแหล่งต่างๆ เช่น เซลล์ลิเธียมไอออนเซลล์เดียวหรือเซลล์ AA สามเซลล์ต่ออนุกรม เครื่องชาร์จแบตเตอรี่สามารถใช้งานร่วมกับ Pico W powerchain ได้อย่างง่ายดาย การตั้งโปรแกรมแฟลช Pico W ใหม่สามารถทำได้โดยใช้ USB (เพียงลากและวางไฟล์ลงบน Pico W ซึ่งปรากฏเป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล) หรือพอร์ต serial wire debug (SWD) มาตรฐานสามารถรีเซ็ตระบบและโหลดและรันโค้ดได้ โดยไม่ต้องกดปุ่มใดๆ พอร์ต SWD ยังสามารถใช้เพื่อดีบั๊กโค้ดแบบโต้ตอบที่ทำงานบน RP2040 ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Wireless Connectivity Family



รูปที่ 1.3ก ไดอะแกรมการทำงานในชิพ CYW43439

ที่มาของรูป <https://www.infineon.com/cms/en/product/wireless-connectivity/airoc-wi-fi-plus-bluetooth-combos/wi-fi-4-802.11n/cyw43439/>

ตารางที่ 1.1ก พารามิเตอร์คุณสมบัติของชิพ CYW43439

|                         |                                  |
|-------------------------|----------------------------------|
| Parametrics             | CYW43439                         |
| Antenna Configuration   | 1x1                              |
| Bluetooth Interface     | UART/PCM/SDIO                    |
| Bluetooth Specification | Bluetooth 5.4                    |
| CPU                     | N/A                              |
| Core                    | Cortex M3                        |
| Dimensions              | 4.87 x 2.87 mm                   |
| Family                  | AIROC™ Wi-Fi + Bluetooth® Combos |
| GPIOs                   | 5                                |
| Launch Date             | N/A                              |
| Longevity - 15 years    | No                               |
| Longevity - 20 years    | No                               |
| Longevity – Extended    | No                               |
| Memory                  | N/A                              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเชิงพาณิชย์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 1.1ก (ต่อ) พารามิเตอร์คุณสมบัติของชิป CYW43439**

|  |                   |
|--|-------------------|
| Parametrics                            | CYW43439          |
| Operating Temperature min max          | -30 °C 70 °C      |
| Operating Voltage min max              | 1.71 V 1.98 V     |
| Operating system support               | Linux, RTOS       |
| Package                                | WLBGA-63          |
| Partner Module                         | Y                 |
| Pitch                                  | 0.4 mm            |
| Planned to be available until at least | N/A               |
| Product Description                    | Wi-Fi 4 combo     |
| ROM                                    | 576 KB            |
| SRAM                                   | 160 kByte         |
| Software Support                       | ModusToolbox™     |
| WI-FI Interface                        | SDIO/SPI          |
| Wi-Fi Band                             | 2.4GHz            |
| Wi-Fi PHY Data Rate ((MBit/s))         | upto 96Mbps       |
| Wi-Fi Specification                    | Wi-Fi 4 (802.11n) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2ก MD13S 13Amp DC Motor Driver



รูปที่ 1.4ก บอร์ดไดร์ฟมอเตอร์ MD13S

ที่มาของรูป <https://www.thaieasylec.com/product/496/cytron-13amp-6v-30v-dc-motordriver-grove-compatible>

MD13S ได้รับการออกแบบมาเพื่อขับมอเตอร์ DC แบบ brushed ที่มีกระแสสูงถึง 13A อย่างต่อเนื่อง มีการปรับปรุงหลายประการ เช่น รองรับสัญญาณ PWM ทั้งแบบ locked antiphase. และ สัญญาณ-ขนาด สัญญาณ PWM เนื่องจากใช้ส่วนประกอบโซลิตสเตดเต็มรูปแบบ ซึ่งสามารถให้เวลาตอบสนองที่เร็วขึ้นและจัดการรอกของรีเลย์เชิงกล

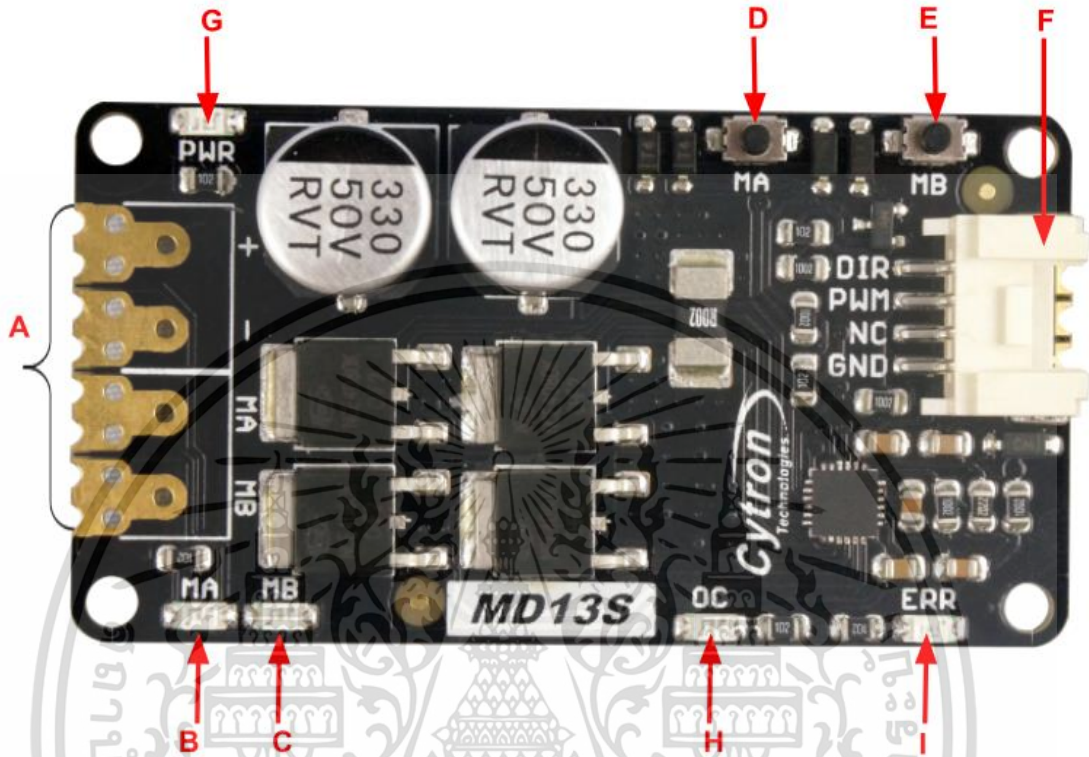
ความสามารถและคุณสมบัติ

- 1) การควบคุมแบบสองทิศทางสำหรับมอเตอร์ DC แบบแปร่งถ่านหนึ่งตัว
- 2) แรงดันมอเตอร์ตั้งแต่ 6V ถึง 30V
- 3) กระแสสูงสุดถึง 13A ต่อเนื่อง (ไม่มีฮีทซิงค์ที่ 25°C) และสูงสุด 30A (10 วินาที)
- 4) จำกัดกระแสที่ 30A.
- 5) อินพุตระดับลอจิก 3.3V และ 5V
- 6) คอนเนคเตอร์ที่เข้ากันได้กับ GROVE
- 7) ส่วนประกอบโซลิตสเตดให้เวลาตอบสนองที่เร็วขึ้นและจัดการรอกของรีเลย์เชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) NMOS H-Bridge เติมรูปแบบเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นระบายความร้อน

9) ควบคุมความเร็วความถี่ PWM สูงสุด 20KHz (ความถี่เอาต์พุตจริงเหมือนกับความถี่อินพุต)



รูปที่ 1.5ก ไดอะแกรมบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ MD13S

ที่มาของรูป <https://www.thaieasyelec.com/product/496/cytron-13amp-6v-30v-dc-motordriver-grove-compatible>

ตารางที่ 1.2ก ฟังก์ชันการทำงานของไดรฟ์มอเตอร์ MD13S

| ป้ายกำกับ | ฟังก์ชัน            |
|-----------|---------------------|
| A         | Terminal Block      |
| B         | MA LED Indicator    |
| C         | MB LED Indicator    |
| D         | MA Test Switch      |
| E         | MB Test Switch      |
| F         | Input pin           |
| G         | Power LED Indicator |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเชิงเทคนิคเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ที่นอกเหนือจากนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 1.2ก (ต่อ) ฟังก์ชันการทำงานของไดรฟ์มอเตอร์ MD13S

| ป้ายกำกับ | ฟังก์ชัน          |
|-----------|-------------------|
| H         | OC LED Indicator  |
| I         | ERR LED Indicator |
| J         | SMD Compatible    |

### ตารางที่ 1.3ก ปุ่มการทำงานของไดรฟ์มอเตอร์ MD13S

| Pin No. | Pin Name       | Description                 |
|---------|----------------|-----------------------------|
| 1       | POWER +        | Positive Supply (6V to 30V) |
| 2       | POWER -        | Negative Supply             |
| 3       | Motor Output A | Connect to motor terminal A |
| 4       | Motor Output B | Connect to motor terminal B |

#### ฟังก์ชันการทำงานของปุ่มและไฟสถานะ

- 1) MA LED Indicator – Turns on when the output A is high and output B is low. Indicates the current flows from output A to B.
- 2) MB LED Indicator – Turns on when the output A is low and output B is high. Indicates the current flows from output B to A.
- 3) MA Test Switch – When this button is pressed, current flows from output A to B and motor will turn CW (or CCW depending on the connection).
- 4) MB Test Switch – When this button is pressed, current flows from output B to A and motor will turn CCW (or CW depending on the connection).
- 5) Power LED Indicator – Power LED. Should be on when the board is powered on.
- 6) OC (Over Current) LED Indicator, Output current is over 30A limit.
- 7) ERR LED Indicator - Error LED Indicator, it will illuminate when fault detected in the MOSFET driver (Usually this indicates an undervoltage).

### ตารางที่ 1.4ก พินและการทำงานของไดรฟ์มอเตอร์ MD13S

| Pin No. | Pin Name | Description                 |
|---------|----------|-----------------------------|
| 1       | GND      | Logic ground.               |
| 2       | PWM      | PWM input for speed control |
| 3       | DIR      | Direction control.          |

### 1.3ก DC motor by MAXON MOTOR และ E5 Optical Kit Encoder

คุณสมบัติของ DC motor by MAXON MOTOR

#### ตารางที่ 1.5ก พารามิเตอร์คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง MAXON

| คุณสมบัติ             | Value             |
|-----------------------|-------------------|
| Supply Voltage        | 24 V dc           |
| DC Motor Type         | Brushed           |
| Power Rating          | 150 W             |
| Output Speed          | 7580 rpm          |
| Shaft Diameter        | 6mm               |
| Maximum Output Torque | 170 mNm           |
| Dimensions            | 40 (Dia.) x 71 mm |
| Current Rating        | 5.77 A            |
| Length                | 71mm              |
| Core Construction     | Ironless          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6ก มอเตอร์กระแสตรง MAXON DC motor

ที่มาของรูป <https://th.rs-online.com/web/p/dc-motors/4684804>

คุณสมบัติของ E5 Optical Kit Encoder

- 1) Quick, simple assembly, and disassembly
- 2) Rugged screw-together housing
- 3) Positive latching connector
- 4) Accepts .010 in. axial shaft play
- 5) 32 to 5,000 cycles per revolution (CPR)
- 6) 128 to 20,000 pulses per revolution (PPR)
- 7) 2 channel quadrature with optional index
- 8) Multiple Output Drive Options
- 9) Mounting compatibility with HEDS-5500

10) 60000 RPM is the maximum rpm due to mechanical considerations. The maximum rpm due to the module's maximum frequency response is dependent upon the module's resolution (CPR). Add 0.125" to the required shaft length when using R-option.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.7ก ตัวเข้ารหัส E5 Optical Kit Encoder

ที่มาของรูป <https://www.usdigital.com/products/encoders/incremental/kit/e5/>

#### 1.4ก Magnetolectric Incremental Rotary Encoder

คุณสมบัติของ Magnetolectric Incremental Rotary Encoder

- 1) This product has 600 p/r (Single-phase 600 pulses /R, two phase 4 frequency doubling to 2400 pulses). A great choice for you
- 2) Power source is DC5-24V. Stable working performance and good working condition. You can use it with confidence
- 3) AB 2phase output rectangular orthogonal pulse circuit, the output for the NPN open collector output type. Its quality is guaranteed
- 4) The encoder can be used to measure the rotational rate, Angle and acceleration of the object and the length measurement
- 5) Suitable for intelligent control of various displacement measurement, automatic fixed-length leather automatic guillotine machines, steel cut length control, height and weight scale, students racing robots. Meet your needs
- 6) 1pc Incremental Rotation Encoder 600 p/r 6mm Shaft 5-24v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) Pulses: 600 p/r (Single-phase 600 pulses /R, two phase 4 frequency doubling to 2400 pulses)

8) Power source: DC5-24V

9) Shaft: 6\*13mm/0.23\*0.51"

10) Size: 38\*35.5mm/1.49\*1.39"

11) Output: AB 2phase output rectangular orthogonal pulse circuit, the output for the NPN open collector output type

12) Maximum mechanical rate: 5000 R / min

13) Response frequency: 0-20KHz

14) Cable length: 1.5 meter

#### ตารางที่ 1.6 คุณสมบัติของ Magnetolectric Incremental Rotary Encoder

|                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| Manufacturer                    | Yosoo                    |
| Part Number                     | MC-ECODER-MX             |
| Item Weight                     | 5.5 ounces               |
| Package Dimensions              | 3.94 x 3.39 x 2.4 inches |
| Is Discontinued by Manufacturer | No                       |
| Material                        | Metal plastic            |
| Voltage                         | 24 Volts                 |
| Batteries Included?             | No                       |
| Batteries Required?             | No                       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.8ก ตัวเข้ารหัส Magnetolectric Incremental Rotary  
ที่มาของรูป <https://www.amazon.com/Photoelectric-Incremental-Encoder-DC5V-24V-Voltage/dp/B01HRBRZK2>

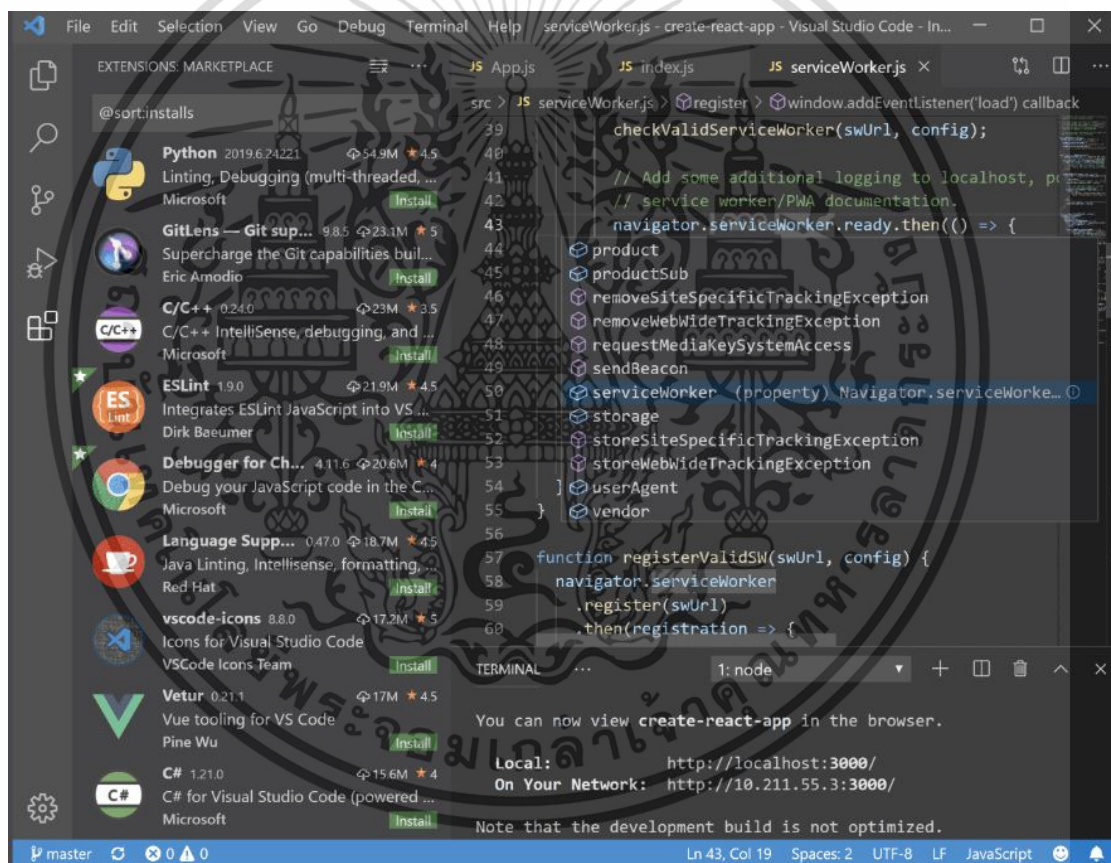
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์

#### 1.1x Virtual studio code

Visual Studio Code เป็นตัวแก้ไขซอร์สโค้ดน้ำหนักเบาแต่ทรงพลัง ซึ่งทำงานบนเดสก์ท็อปของและพร้อมใช้งานสำหรับ Windows, macOS และ Linux รองรับ JavaScript, TypeScript และ Node.js ในตัว มีระบบส่วนขยายที่หลากหลายสำหรับภาษาและรันไทม์อื่นๆ (เช่น C++, C#, Java, Python, PHP, Go, .NET)



รูปที่ 1.1x Visual studio interface

ที่มาของรูป <https://code.visualstudio.com/>

Visual Studio Code ผสมผสานความเรียบง่ายของโปรแกรมแก้ไขซอร์สโค้ดเข้ากับเครื่องมือสำหรับนักพัฒนาที่มีประสิทธิภาพ เช่น การเติมโค้ด IntelliSense และการดีบั๊ก

คุณลักษณะที่สำคัญของ Visual Studio code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ใช้งานได้กับ macOS, Linux และ Windows Visual Studio Code รองรับ macOS, Linux และ Windows – ดังนั้นจึงสามารถเริ่มต้นใช้งานได้ไม่ว่าจะเป็นแพลตฟอร์มใดก็ตาม แก้ไข สร้าง และดีบั๊กได้อย่างง่ายดาย หัวใจหลักของ Visual Studio Code มีโปรแกรมแก้ไขซอร์สโค้ดที่รวดเร็ว เหมาะสำหรับการใช้งานในแต่ละวัน ด้วยการรองรับหลายร้อยภาษา VS Code ช่วยให้ทำงานได้ทันทีด้วยการเน้นไวยากรณ์ การจับคู่วงเล็บเหลี่ยม การเยื้องอัตโนมัติ การเลือกกล่องตัวอย่างข้อมูล และอื่นๆ อีกมากมาย แป้นพิมพ์ลัดที่ใช้งานง่าย การปรับแต่งที่ง่ายดาย ช่วยให้สามารถนำทางโค้ดได้อย่างง่ายดาย

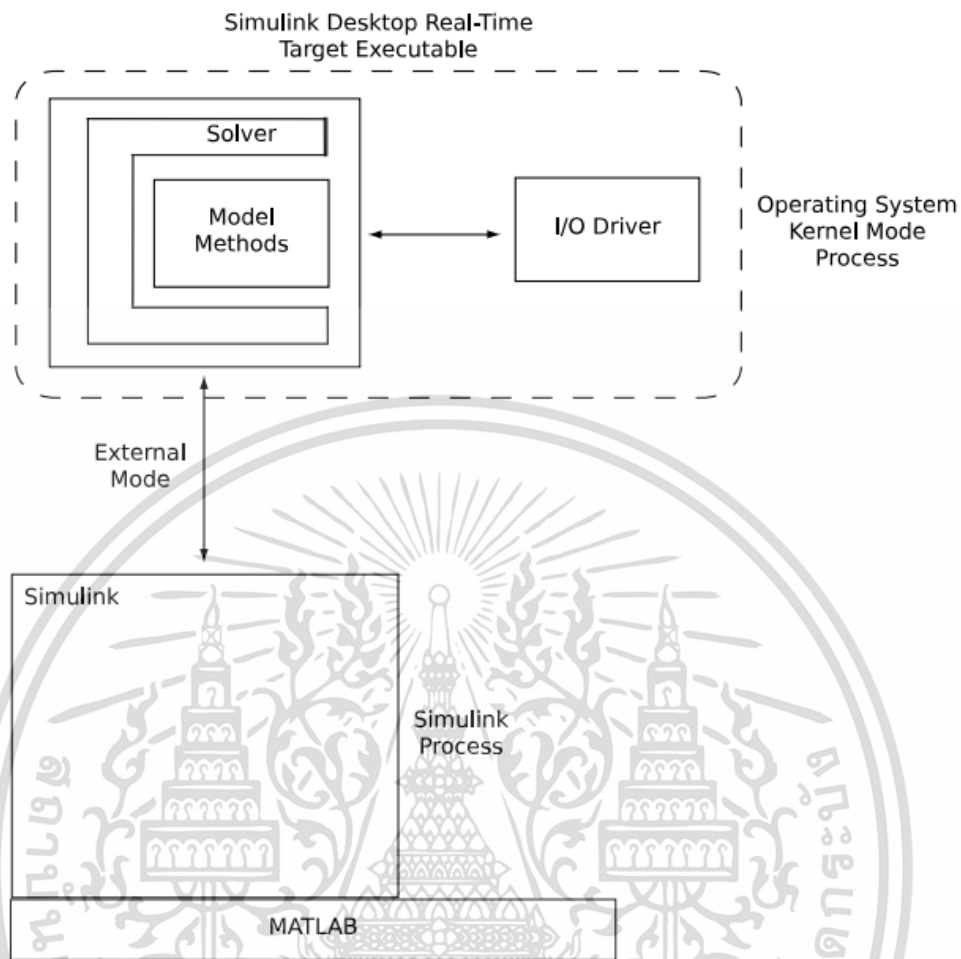
2) ปรับแต่งทิวทัศน์ตามที่ต้องการและติดตั้งส่วนขยายของบุคคลที่สามจำนวนเท่าใดก็ได้ ในขณะที่สถานการณ์ส่วนใหญ่ทำงาน "นอกกรอบ" โดยไม่มีการกำหนดค่า VS Code เป็นโครงการโอเพ่นซอร์ส ดังนั้นจึงสามารถมีส่วนร่วมในชุมชนที่กำลังเติบโตบน GitHub ได้

3) VS Code มีการสนับสนุนในตัวที่ครบครันสำหรับการพัฒนา Node.js ด้วย JavaScript และ TypeScript ซึ่งขับเคลื่อนโดยเทคโนโลยีพื้นฐานเดียวกันกับที่ขับเคลื่อน Visual Studio VS Code ยังมีเครื่องมือสำหรับเทคโนโลยีเว็บ เช่น JSX/React, HTML, CSS, SCSS, Less และ JSON

4) Visual Studio Code มีโมเดลความสามารถในการขยายที่ช่วยให้นักพัฒนาสามารถสร้างและใช้ส่วนขยาย และปรับแต่งประสบการณ์การแก้ไข-สร้าง-ดีบั๊กได้อย่างเต็มที่

## 1.2x MATLAB Simulink Desktop Real-Time

Simulink Desktop Real-Time ให้ความสามารถคอร์เนลแบบเรียลไทม์สำหรับ Windows®, Linux® และ macOS® ประกอบด้วยบล็อกไดรเวอร์ Simulink I/O แบบลากและวางที่ช่วยให้สามารถควบคุมระบบฟิสิกส์แบบวงปิดจากคอมพิวเตอร์เดสก์ท็อป กล่องเครื่องมือช่วยให้เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ แอคชูเอเตอร์ และอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อสร้างต้นแบบและทดสอบระบบควบคุมโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ทดสอบแบบเรียลไทม์โดยเฉพาะ Simulink Desktop Real-Time รองรับอุปกรณ์ I/O เช่น บอร์ด DAQ, อุปกรณ์ CAN และเว็บแคม USB



รูปที่ 1.2x Real-Time Execution in Run in Kernel Mode

ที่มาของรูป [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/sldrt/sldrt Ug.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/sldrt/sldrt Ug.pdf)

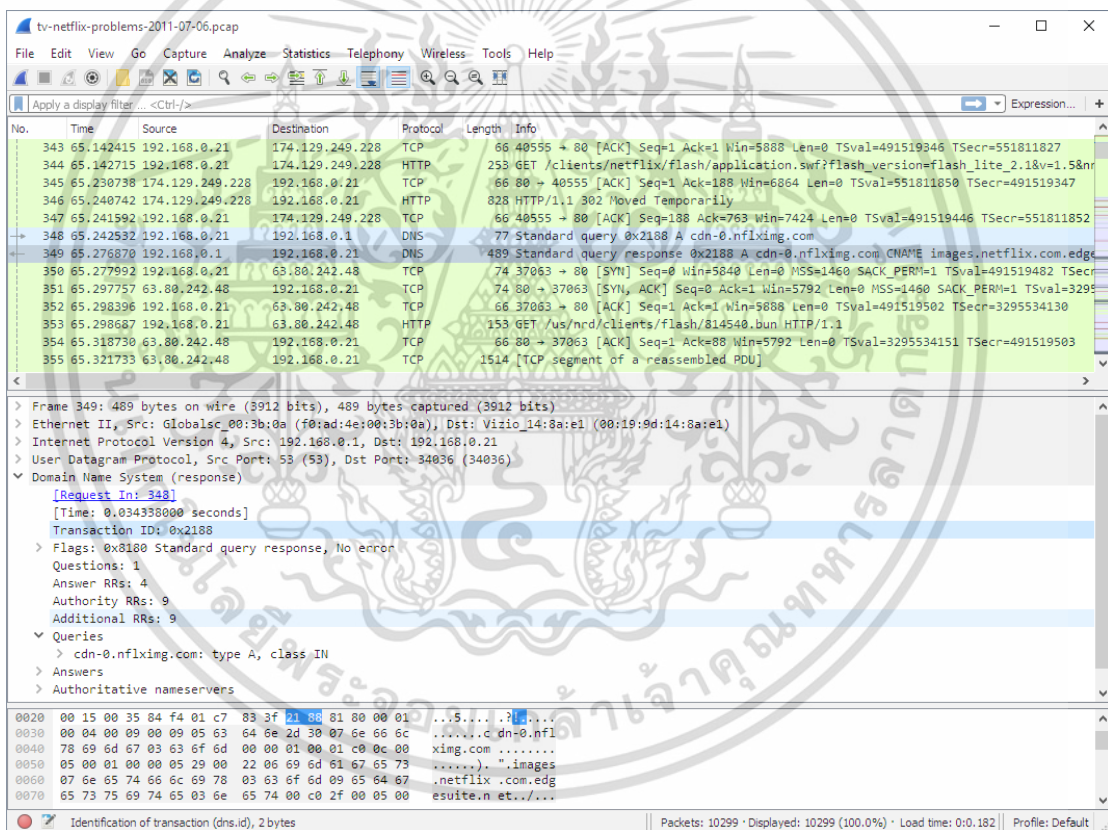
ในโหมดรันในโหมดเคอร์เนล แอปพลิเคชันแบบเรียลไทม์และไดรเวอร์ I/O จะทำงานในกระบวนการโหมดเคอร์เนล การใช้ไดรเวอร์ I/O เพื่อสื่อสารกับฮาร์ดแวร์ แอปพลิเคชันจะจัดเก็บข้อมูลการตอบสนองที่ต่อเนื่องกันในหน่วยความจำที่ Simulink สามารถเข้าถึงได้จนกระทั่งมีข้อมูลบัฟเฟอร์เต็มแล้ว เมื่อบัฟเฟอร์เต็ม แอปพลิเคชันแบบเรียลไทม์จะยังคงทำงานต่อไปในขณะที่ Simulink ถ่ายโอนข้อมูลไปยังสภาพแวดล้อม MATLAB® ผ่านโหมดภายนอก Simulink การถ่ายโอนข้อมูลมีความสำคัญน้อยกว่าการรักษาการอัปเดตตามเวลาจริงที่กำหนดตามช่วงเวลาตัวอย่างที่ต้องการ หลังจากการคำนวณโมเดลเสร็จสิ้น การถ่ายโอนข้อมูลจะทำงานด้วยลำดับความสำคัญที่ต่ำกว่าในขณะที่กระบวนการรอการขัดจังหวะอีกครั้งเพื่อทริกเกอร์การอัปเดตโมเดลครั้งถัดไป ข้อมูลที่บันทึกภายในบัฟเฟอร์เดียวจะต่อเนื่องกัน เมื่อบัฟเฟอร์ของข้อมูลถูกถ่ายโอน ข้อมูลจะถูกพล็อตในบล็อกขอบเขต Simulink พื้นที่สามารถบันทึกข้อมูลลงในไฟล์ได้โดยตรงโดยใช้การเก็บข้อมูลในโหมด

ภายนอก Simulink ด้วยการเก็บข้อมูล สามารถบันทึกบัฟเฟอร์ข้อมูลแต่ละบัฟเฟอร์เป็นไฟล์ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเองได้ สามารถเพิ่มชื่อไฟล์ได้โดยอัตโนมัติ ทำให้สามารถบันทึกและจัดเก็บข้อมูลจำนวนมากได้ แม้ว่าจุดภายในบัพเฟอร์จะต่อเนื่องกัน แต่เวลาที่ต้องใช้ในการถ่ายโอนข้อมูลกลับไปยัง Simulink จะหยุดการรวบรวมข้อมูลชั่วคราวจนกว่าบัพเฟอร์ทั้งหมดจะถูกถ่ายโอน การหยุดชั่วคราวนี้อาจส่งผลให้จุดตัวอย่างหายไประหว่างบัพเฟอร์ข้อมูล

### 1.3x Wireshark

Wireshark เป็นตัววิเคราะห์แพ็กเก็ตเครือข่าย เครื่องวิเคราะห์แพ็กเก็ตเครือข่าย นำเสนอข้อมูลแพ็กเก็ตที่บันทึกไว้ในรายละเอียดมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เครื่องวิเคราะห์แพ็กเก็ตเครือข่ายเป็นอุปกรณ์วัดสำหรับตรวจสอบสิ่งที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิลเครือข่าย



รูปที่ 1.3x Wireshark captures packets interface

ที่มาของรูป [https://www.wireshark.org/docs/wsug\\_html/#Preface](https://www.wireshark.org/docs/wsug_html/#Preface)

ในอดีตเครื่องมือดังกล่าวมีราคาแพงมากมีกรรมสิทธิ์ อย่างไรก็ตาม ด้วยการถือกำเนิดของ Wireshark สิ่งนั้นก็เปลี่ยนไป Wireshark ให้บริการฟรี เป็นโอเพ่นซอร์ส และเป็นหนึ่งในเครื่องมือวิเคราะห์แพ็กเก็ตที่ดีที่สุดในปัจจุบัน นี่คือเหตุผลบางประการที่ผู้คนใช้ Wireshark: ผู้ดูแลระบบเครือข่ายใช้เพื่อแก้ไขปัญหาเครือข่าย วิศวกรความปลอดภัยเครือข่ายใช้เพื่อตรวจสอบปัญหาด้านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความปลอดภัย วิศวกร QA ใช้เพื่อตรวจสอบแอปพลิเคชันเครือข่าย นักพัฒนาใช้เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องในการใช้งานโปรโตคอล ผู้คนใช้มันเพื่อเรียนรู้ภายในโปรโตคอลเครือข่าย Wireshark ยังมีประโยชน์ในสถานการณ์อื่นๆ อีกมากมาย

คุณสมบัติของ Wireshark

- 1) ใช้ได้กับ UNIX และ Windows
- 2) บันทึกข้อมูลแพ็กเก็ตเกิดสดจากอินเทอร์เน็ตหรือเครือข่าย
- 3) เปิดไฟล์ที่มีข้อมูลแพ็กเก็ตที่บันทึกด้วย tcpdump/WinDump, Wireshark และโปรแกรม

ดักจับแพ็กเก็ตอื่นๆ อีกมากมาย

- 4) นำเข้าแพ็กเก็ตจากไฟล์ข้อความที่มีการดัมพ์ข้อมูลแพ็กเก็ตฐานสิบหก
- 5) แสดงแพ็กเก็ตพร้อมข้อมูลโปรโตคอลที่ละเอียดสูง
- 6) บันทึกข้อมูลแพ็กเก็ตที่บันทึกไว้
- 7) ส่งออกแพ็กเก็ตบางส่วนหรือทั้งหมดในรูปแบบไฟล์จับภาพหลายรูปแบบ
- 8) กรองแพ็กเก็ตตามเกณฑ์ต่างๆ
- 9) ค้นหาแพ็กเก็ตในหลายเกณฑ์
- 10) ปรับสีการแสดงผลแพ็กเก็ตตามตัวกรอง สร้างสถิติต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค  
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ICCAS 2023

2023 23<sup>rd</sup> International Conference on Control, Automation and Systems

▶ PROCEEDINGS

October 17(Tue)-20(Fri), 2023

Yeosu Venezia Hotel & Utop Marina Hotel

Yeosu, Jeollanam-do Korea

IEEE Catalog Number: CFP2310D-USB

ISBN: 978-89-93215-26-7

ISSN: 2093-7121

<https://2023.iccas.org>

Welcome Message

Conference Organization

Table of Contents

Author Index

E-proceeding Search

Sponsors

Exit

## Event-based LQR Control for Rotary Inverted Pendulum Using

### Wireless Networked Control System

Baitong Thongsakul<sup>1</sup> Arjin Numsomran<sup>1\*</sup>  
Vittaya Tipsuwanporn<sup>1</sup> and Jutarut Chaoraingern<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Instrumentation and Control Engineering, School of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand,

<sup>2</sup>Department of Robotics and AI Engineering, School of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand,  
(arjin.nu@kmitl.ac.th) \* Corresponding author

**Abstract:** Wireless communication introduces delays, packet losses, and data uncertainties, which can degrade the control's performance. To address these challenges, this paper presents an event-based Linear Quadratic Regulator (LQR) control approach for a rotary inverted pendulum system utilizing a Wireless Networked Control System (WNCS). To facilitate the control process, a WNCS is employed to transmit data between the rotary inverted pendulum and the controller via WiFi, a wireless network executing in the CYW43439 wireless chip of the Raspberry Pi Pico W development board. The wireless node consists of a sensor node, actuator node, access point node, and controller node, which transmit and receive data via the TCP/IP communication protocol. The event-triggering mechanism is integrated into the control loop. It allows the control algorithm to adaptively adjust the control update rate based on the system's dynamics and network conditions, ensuring efficient utilization of network resources while maintaining satisfactory control performance. The experimental results of hardware in the loop (HIL) in the MATLAB/Simulink real-time kernel show that the proposed event-based LQR control strategy can achieve balancing and improve resilience to network-induced disturbances, making it suitable for real-world applications where wireless network constraints are prevalent.

**Keywords:** Event-based LQR control, IEEE 802.11n, Raspberry Pi Pico W, Rotary inverted pendulum, WNCS

## 1. INTRODUCTION

The control of rotary inverted pendulum systems has been a subject of interest in the field of control engineering due to their inherent nonlinear and unstable nature [1-2]. Various control strategies have been proposed to achieve stable and accurate control systems. In recent years, the integration of wireless networked control systems (WNCS) has gained attention as a means to overcome the limitations of wired communication in control applications [3-4]. However, wireless communication introduces challenges such as delays, packet losses, and data uncertainties, which can degrade the control performance [5].

In the context of rotary inverted pendulum systems, several studies have investigated such as the performance tests of various control techniques for balance and upswing, such as PID, LQR, LQG, fuzzy, sliding mode control [6-10]. Reinforcement [11-13] makes the results well under control. The application of event-based control in [14] presents an optimal control design based on an efficient and reliable network of two-wheeled inverted pendulum systems to achieve system stability over a wide range. (LQR), and to ultimately reduce sub-errors, event-driven control is used in conjunction with LQR control to reduce network communication degradation. And to solve the problem of instability in non-periodic measurement updates, thus improving the stability and robustness of the disturbed control system or delayed network.

This paper presents an event-based Linear Quadratic Regulator (LQR) control approach for a rotary inverted pendulum system utilizing a Wireless Networked Control System (WNCS). To facilitate the control process, a WNCS is employed to transmit data between the rotary inverted pendulum and the controller with an IEEE 802.11n (WiFi) wireless network executing in the CYW43439 wireless chip of the Raspberry Pi Pico W development board. The wireless node consists of a sensor node, actuator node, access point node, and controller node, which transmit and receive data via the TCP/IP communication protocol.

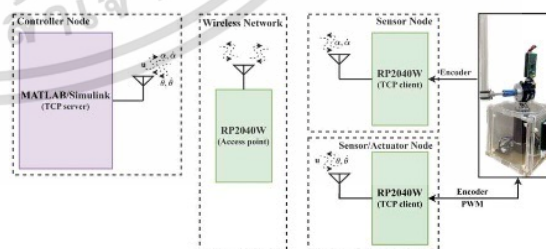


Fig. 1. Structure of wireless networked control system

The event-triggering mechanism is integrated into the control loop. It allows the control algorithm to adaptively adjust the control update rate based on the system's dynamics and network conditions, ensuring efficient utilization of network resources while maintaining satisfactory control performance.

The paper's structure is as follows: The second section describes the design of the LQR and event-based controls. The mathematical modeling of the rotary inverted pendulum is expressed in the third section. The fourth section demonstrates the details of the performance evaluation and experimental results. The conclusion is stated in the final section.

## 2. EVENT-BASED LQR CONTROL

This section discusses the linear quadratic regulator (LQR) [10]. An event-based LQR control is also presented.

### 2.1 LQR

The linear quadratic regulator uses the quadratic cost function to calculate the optimal feedback state gain matrix  $K$ ,

$$u(t) = Kx(t) \quad (1)$$

when quadratic cost function,

$$J_k = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2)$$

An optimal state feedback gain, which minimizes the cost function:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (3)$$

The optimal feedback gain matrix  $K$  is solved by the Riccati equation:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4)$$

### 2.2 Event-based control

Consider Eq. (1), the state gain matrix  $K$  with event trigger strategy [11] is

$$u(k) = K\hat{x}(k) \quad (5)$$

where  $\hat{x}(k)$  is the last value of the measure update, or the final value of the error between the reference value and the measurement update value.

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (6)$$

where  $\hat{x}(k)$  is the last transmitted signal. Let the error between the last transmitted signal and the actual one is  $e(k)$ .

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (7)$$

Therefore, the control signal of an event-based LQR is

$$u(k) = Kx(k) - Ke(k) \quad (8)$$

## 3. MATHEMATICAL MODELING OF ROTARY INVERTED PENDULUM

The rotational inverted pendulum or Furuta pendulum was invented in 1992 at the Tokyo Institute of Technology by Katsuhisa Furuta [1]. It is a very complex and non-linear system of interest in control system theory as shown in Fig. 2. A system has been created for designing a controller under a wireless network environment.

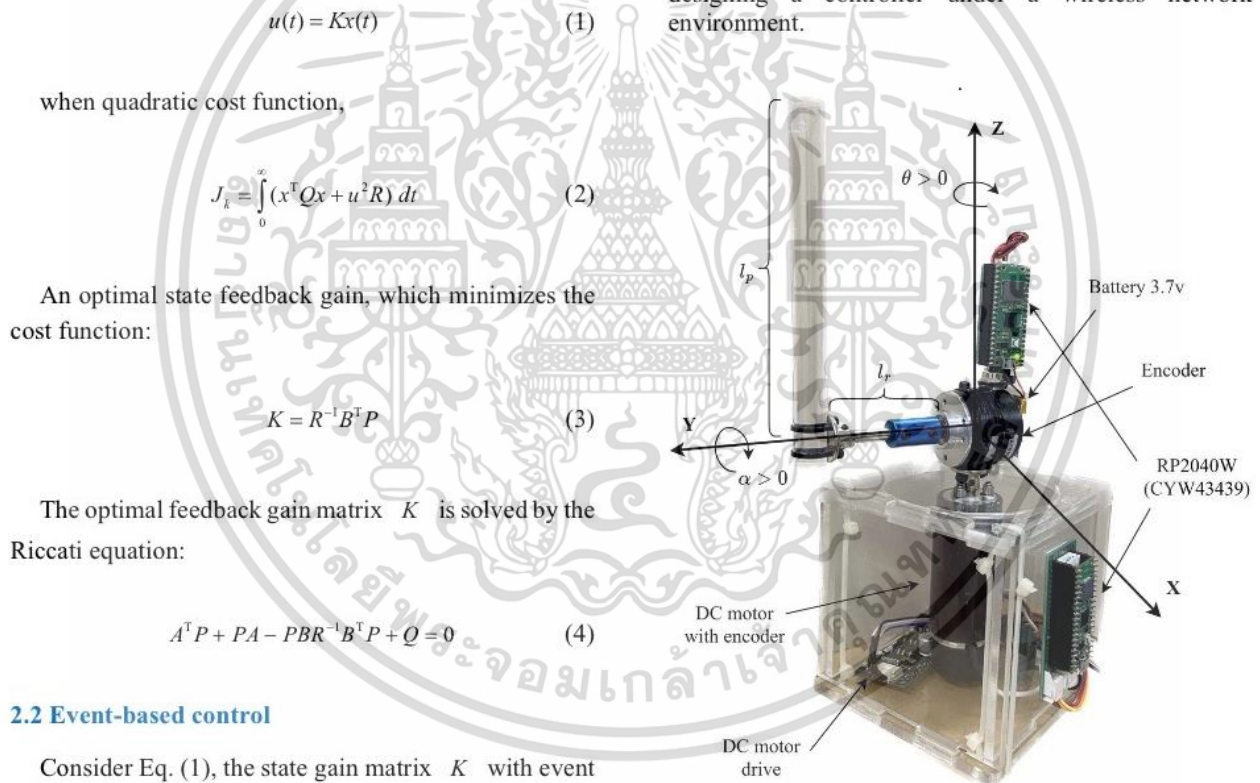


Fig. 2. Structure of rotary IP

This rotary IP experimental unit has designed and installed a Z-axis wireless communication node to solve the problem of cable constraints that cause the rotary to rotate 360 degrees independently instead of the traditional slip ring motor. The rotary IP consists of the following main components: DC motor with encoder by MAXON MOTOR, nominal voltage 30 V, nominal current 2.72 A, and encoder (E5 Optical Kit Encoder) by US Digital E5-500-157 single-ended. The optical shaft

encoders rotate along the Z axis, measure the angle  $\theta$  of the DC motor, set the positive angle of the clockwise pin, give 2000 counts per revolution in quadrature mode (500 lines per revolution).

Part 2 DC motor drive by Cytron technologies co. ltd can support motor voltage from 6V to 30VDC, maximum current up to 13A continuous and 30A peak (10 seconds), speed control PWM frequency up to 20KHz (Actual output frequency is same as input frequency). Both are connected to the 1st RP2040W wireless node to read the rotary angle variation and output a controller (PWM) signal to drive the DC motor. Finally, the encoder with the pendulum rotated along the Y axis measures the angle  $\alpha$  of the pendulum, set to positive rotation clockwise, giving 2400 counts per revolution in quadrature mode (600 lines per revolution) connected to a second RP2040W wireless node. In order to read the changing pendulum angle meanwhile, the important parameters are shown in Table 1.

Table 1. Parameters of rotary IP

|                        | Description                                   | Values            |
|------------------------|---|-------------------|
| DC motor               |   |                   |
| $R_m$                  | Terminal resistance                           | 1.2 Ohm           |
| $K_t$                  | Toque constant                                | 0.0389 Nm/A       |
| $K_m$                  | Back-emf constant                             | 0.0389 V/(rad/s)  |
| Rotary arm             |   |                   |
| $m_r$                  | Mass of rotary arm                            | 0.1032 kg         |
| $\ell_r$               | Rotary arm length                             | 0.06 m            |
| $D_r$                  | Damping coefficient                           | 0 Nms/rad         |
| $J_r$                  | Moment of inertia                             | 5.7E-5 $kgm^2$    |
| Rotary pendulum module |   |                   |
| $m_p$                  | Pendulum link mass                            | 0.0308 kg         |
| $\ell_p$               | Rotary arm length (pivot to end of metal rod) | 0.14 m            |
| $D_p$                  | Damping Coefficient                           | 0 Nms/rad         |
| $J_p$                  | Moment of inertia                             | 2.3843E-6 $kgm^2$ |

To find the mathematical modeling of rotary IP, consider the Euler-Lagrange equation shown in Eq (9).

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = f_i \quad (9)$$

Where  $\mathcal{L} = T - V$  is the Lagrange operator,  $T$ , is the kinetic energy,  $V$  is the potential energy,  $q$  is the

generalized coordinates,  $f$  is the acting force. Total kinetic energy of pendulum and rotary arm:

$$T = \frac{1}{2} (m_p \ell_r^2 + J_r + m_p \frac{\ell_p^2}{4} \sin^2 \alpha) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} (m_p \frac{\ell_p^2}{4} + J_p) \dot{\alpha}^2 - \frac{1}{2} m_p \ell_r \ell_p \dot{\theta} \dot{\alpha} \cos \alpha \quad (10)$$

And total kinetic energy of pendulum and rotary arm:

$$V = 0 + (-m_p g \left( \frac{\ell_p}{2} - \frac{\ell_p}{2} \cos \alpha \right)) \quad (11)$$

Lagrangian:

$$\mathcal{L} = T - V \quad (12)$$

The Rayleigh's:

$$R = \frac{1}{2} D_r \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} D_p \dot{\alpha}^2 \quad (13)$$

The Lagrange's equations:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\theta}} = \tau \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\alpha}} = 0 \quad (15)$$

At operating point ( $\alpha = 0$ ), the ODE equation of Rotary IP is obtained as in Eqs. (16)~ (17),

$$(m_p \ell_r^2 + J_r) \ddot{\theta} - \frac{1}{2} m_p \ell_p \ell_r \ddot{\alpha} + B_r \dot{\theta} = \tau \quad (16)$$

$$-\frac{1}{2} m_p \ell_p \ell_r \ddot{\theta} + (J_p + \frac{1}{4} m_p \ell_p^2) \ddot{\alpha} - \frac{m_p \ell_p g \alpha}{2} + B_p \dot{\alpha} = 0 \quad (17)$$

where,

$$J_t = J_p m_p \ell_r^2 + J_r J_p + \frac{1}{4} J_r m_p \ell_p^2 \quad (18)$$

$$\tau = K_t \left( \frac{V_m - K_m \dot{\theta}}{R_m} \right) \quad (19)$$

It is presented in the form of a state-space equation as Eq (20).

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{31} \\ b_{41} \end{bmatrix} [V_m] \quad (20)$$

where,

$$a_{32} = \frac{m_p^2 \ell_p^2 \ell_r g}{4 J_t} \quad (21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_{33} = \frac{-D_r}{J_t} \left( J_p + \frac{m_p \ell_p^2}{4} \right) - \frac{K_t^2}{R_m} \left( \frac{K_t}{J_t R_m} \left( J_p + \frac{1}{4} m_p \ell_p^2 \right) \right) \quad (22)$$

$$a_{34} = \frac{-m_p \ell_r D_p \ell_p}{2J_t} \quad (23)$$

$$a_{42} = \frac{m_p g \ell_p}{2J_t} (J_r + m_p \ell_r^2) \quad (24)$$

$$a_{43} = -\frac{m_p \ell_p \ell_r D_r}{2J_t} - \frac{K_t^2}{R_m} \left( \frac{K_t}{2J_t R_m} m_p \ell_p \ell_r \right) \quad (25)$$

$$a_{44} = \frac{-D_p}{J_t} (J_r + m_p \ell_r^2) \quad (26)$$

$$b_{31} = \frac{K_t}{J_t R_m} \left( J_p + \frac{1}{4} m_p \ell_p^2 \right) \quad (27)$$

$$b_{41} = \frac{K_t}{J_r R_m} \left( \frac{1}{2} m_p \ell_r \ell \right) \quad (28)$$

And when substituting all parameters as in Table 1, we get this state-space model for rotary IP as

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 56.26 & -0.41 & 0 \\ 0 & 730.15 & -1.37 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \theta \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 259.54 \\ 862.31 \end{bmatrix} [V_m] \quad (29)$$

Parameter tuning of the LQR regulator according to Eq. (3) optimal feedback gain matrix  $K$  by chosen weight were:

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.2 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad R = [4] \quad (30)$$

The weights in Eq. (30) results in the state feedback gain given by

$$K = [-1.5811 \quad 13.5568 \quad -0.5680 \quad 0.9367] \quad (31)$$

#### 4. EXPERIMENT RESULT

WNCS experiment configuration in Fig. 3 included a sensor/actuator node (1), a sensor node (2), a controller node (3), and an access point node (4) that executed event-based LQR control of a rotary inverted pendulum using Simulink Desktop Real-Time, as depicted in Fig. 4. In Fig. 5, the Raspberry Pi Pico Wireless (RP2040W)

microcontroller with a wireless processor CYW43439 is programmed with C/C++ and CmakeLists to develop as a sensor and actuator node (Node 1) for precisely reading the encoder pulses from a DC motor. The sensor and actuator node computed the angle and angular velocity  $(\theta, \dot{\theta})$  of the rotary base for transmission to the controller node, while receiving the manipulated control signal  $(u)$  from the controller node over IEEE 802.11n WiFi via the access point node (4).

The sensor node (Node 2) in Figure 6 is used to receive encoder pulses from the DC motor for calculating the pendulum rod's angle and angular velocity  $(\alpha, \dot{\alpha})$  and transmitting them to the controller node over IEEE 802.11n WiFi via the access point node (4). The controller node created by the Simulink Desktop Real-Time MATLAB/Simulink program operating on a laptop is connected over IEEE 802.11n WiFi to sensor/actuator node1 and sensor node2 via access point node (4). It employs the "stream input block" to receive data packets from sensor/actuator nodes 1 and 2, and the "packet output block" to send the control signal to sensor/actuator node 1.

The controller node created by the Simulink Desktop Real-Time MATLAB/Simulink program operating on a laptop is connected over IEEE 802.11n WiFi to sensor/actuator node1 and sensor node2 via access point node (4). It employs the "stream input block" to receive data packets from sensor/actuator nodes 1 and 2, and the "packet output block" to send the control signal to sensor/actuator node 1.

Fig. 7 illustrates the reference tracking results of the rotary base's angle control which could reach the setpoint and the beginning while still having some effect from the noise in WiFi network. Fig. 8 shows the balancing performance of a pendulum rod, which could swing a little around equilibrium even when the angle of the rotary base was changed more than 10 degrees.

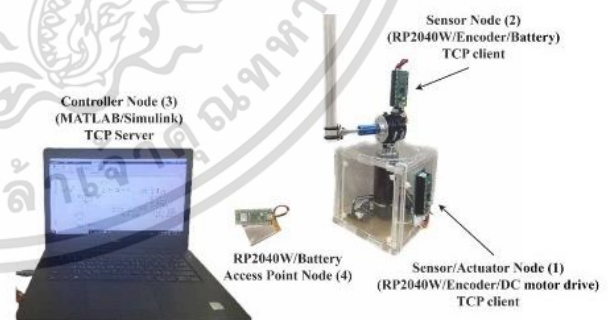


Fig. 3. Experiment setup for WNCS

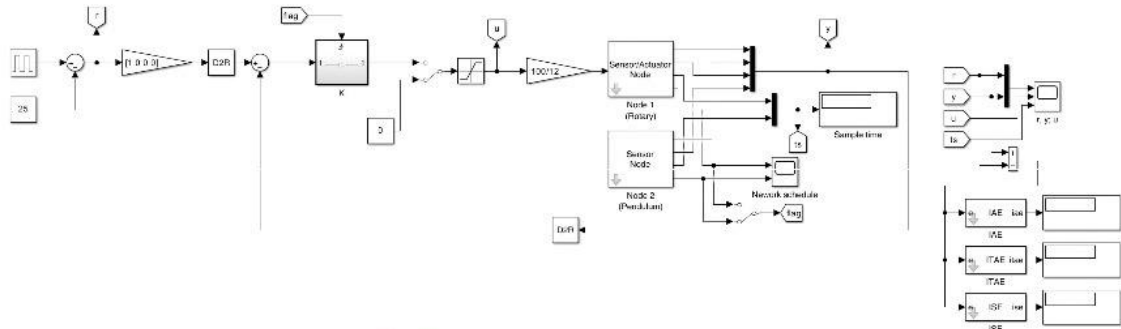


Fig. 4. Simulink Desktop Real-Time

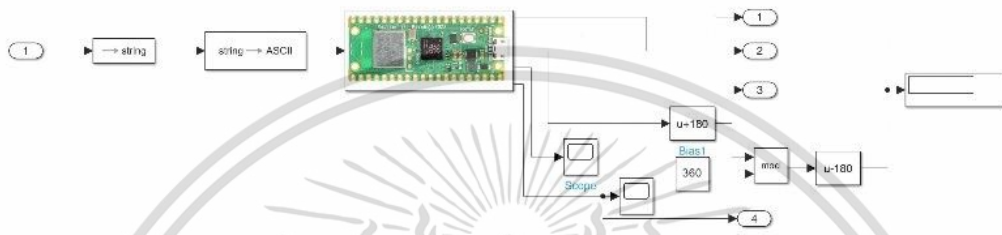


Fig. 5. Sensor and actuator node (Node 1)

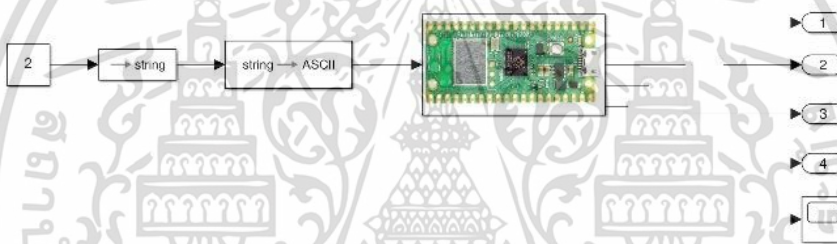


Fig. 6. Sensor node (Node 2)

The control signals in Fig. 9 showed the boundary range between -2.5 and 2.5 volts. It demonstrated the effects of noise and low bandwidth in wireless communications. Fig. 10 showed loop time varying in wireless control network that deviated from 10 msec to 20 msec, which referred to the obstacle to control performance. Fig. 11 expresses a packet transit event that arrives and triggers within 1 second of the event-based LQR control.

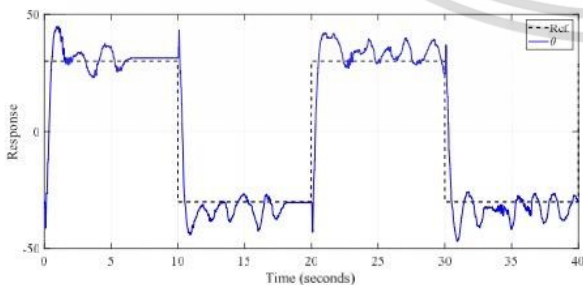


Fig. 7. The experiment response results of WNCS ( $\theta$ )

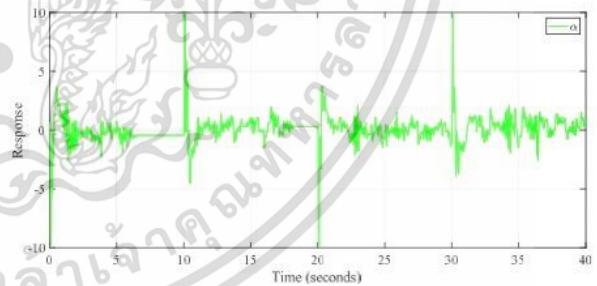


Fig. 8. The experiment response results of WNCS ( $\alpha$ )

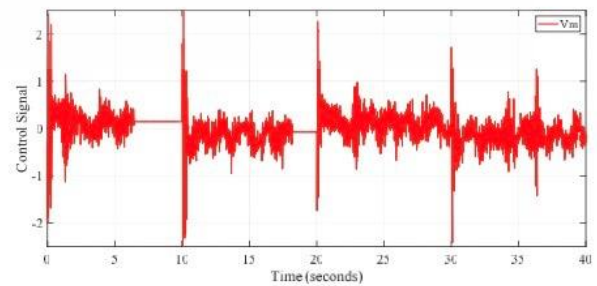


Fig. 9. The experiment control signal results of WNCS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 577 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

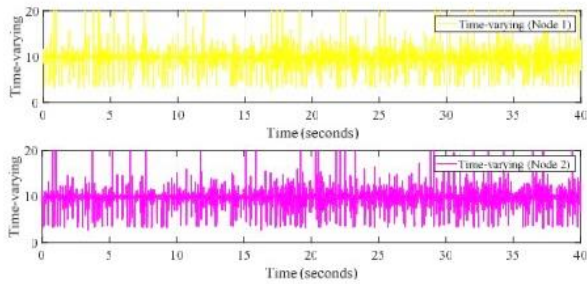


Fig. 10. The experiment time-varying results of WNCs

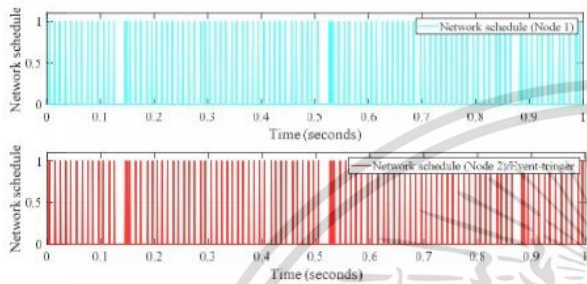


Fig. 11. Network schedule of sensor/actuator (node 1) and sensor (node 2)

## 5. CONCLUSION

In this paper, an event-based Linear Quadratic Regulator (LQR) control approach for a rotary inverted pendulum system using a Wireless Networked Control System (WNCs) is presented. By integrating an event-triggering mechanism into the control loop, the proposed approach efficiently utilizes network resources while maintaining satisfactory control performance. Through the implementation of WNCs on the rotary inverted pendulum and the controller with an IEEE 802.11n (WiFi) wireless network executing in the CYW43439 wireless chip of the Raspberry Pi Pico W development board, the results demonstrated that the event-based LQR control strategy achieves control performance. Additionally, it is more resistant to network-induced disturbances, such as delays and packet loss. Although the network delay exceeds 10 milliseconds, the pendulum balance can be maintained. Future research directions may include investigating the applicability of the event-based control approach to pendulum swing-up mode while exploring advanced event-triggering mechanisms for further reducing network communication and computational requirements.

## REFERENCES

- [1] K. Furuta, M. Yamakita and S. Kobayashi, "Swing up control of inverted pendulum," Proceedings IECON '91: 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Kobe, Japan, 1991, pp. 2193-2198 vol.3
- [2] K.J. Åström, K. Furuta, "Swinging up a pendulum by energy control," *Automatica*, Volume 36, Issue 2, 2000, Pages 287-295,
- [3] W. Du and F. Du, "Wireless Networked Control Systems with Neuron Adaptive Control and Novel Smith Predictor," 2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (case 2009), Zhangjiajie, China, 2009, pp. 644-647, doi: 10.1109/CASE.2009.164.
- [4] M. S. Mahmoud, "Wireless Networked Control System Design: An Overview," in *Proc. International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 2335-2340, 2014.
- [5] D. S. A. A. Alwahab, "Enhancement of WNCs response using packet priority," 2016 Al-Sadeq International Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA), Baghdad, Iraq, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/AIC-MITCSA.2016.7759911.
- [6] Kumar, M. & Butti, Dasu & Ganta, Ramesh. (2016). Design of LQR based stabilizer for rotary inverted pendulum system. 9. 21-29.
- [7] Bilgiç, Hasan & Şen, Muhammed Arif & Kalyoncu, Mete. (2016). Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm. *Journal of Vibroengineering*. 18. 3684-3694. 10.21595/jve.2016.16787.
- [8] L. Zhang and R. Dixon, "Robust Nonminimal State Feedback Control for a Furuta Pendulum With Parametric Modeling Errors," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 8, pp. 7341-7349, Aug. 2021.
- [9] A. Gutarra, S. Palomino, E. J. Alegria and J. Cisneros, "Fuzzy Controller Design for Rotary Inverted Pendulum System Using Genetic Algorithms," 2022 IEEE ANDESCON, Barranquilla, Colombia, 2022, pp. 1-6.
- [10] Y. J. Kim, Y. G. Lee, S. H. Lee and O. M. Kwon, "T-S fuzzy controller design for Rotary Inverted Pendulum with input delay using Wirtinger-based integral inequality," 2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, Korea, Republic of, 2022, pp. 890-895.
- [11] A. Nagarajan and A. A. Victoire, "Optimization Reinforced PID-Sliding Mode Controller for Rotary Inverted Pendulum," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 24420-24430, 2023.
- [12] J. -B. Kim, H. -K. Lim, C. -M. Kim, M. -S. Kim, Y. -G. Hong and Y. -H. Han, "Imitation Reinforcement Learning-Based Remote Rotary Inverted Pendulum Control in OpenFlow Network," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 36682-36690, 2019.
- [13] H. -K. Lim, J. -B. Kim, I. Ullah, J. -S. Heo and Y. -H. Han, "Federated Reinforcement Learning Acceleration Method for Precise Control of Multiple Devices," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 76296-76306, 2021.
- [14] Mahmoud, Magdi & Karaki, Bilal. (2019). Event-based networked control scheme for two-wheeled systems. *The Journal of Scientific and Engineering Research*. 5. 151-158. 10.20474/jater-5.4.1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวใบตอง ทองสกุล  
วัน เดือน ปีเกิด 9 มกราคม 2544 จังหวัดลพบุรี  
ที่อยู่ 405 หมู่ 12 ตำบลท่าระหัด อำเภอเมืองสุพรรณบุรี จังหวัดสุพรรณบุรี  
รหัสไปรษณีย์ 72000

### ประวัติการศึกษา:

พ.ศ. 2563-2566 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566-2567 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม (เกียรตินิยมอันดับ2) คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:

พ.ศ. 2567 B. Thongsakul, A. Numsomran, V. Tipsuwanporn and J. Chaoraingern, "Event-Based LQR Control for Rotary Inverted Pendulum Using Wireless Networked Control System," 2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Yeosu, Korea, Republic of, 2023, pp. 573-578,