

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์  
ในการควบคุมแบบทำนายแบบจำลองของอินเวอร์ทเพนดูลัม

PARAMETERS TUNING EFFECTS  
IN THE MODEL PREDICTIVE CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM



T139436

พงศ์ธร ชุนหษา

PONGTORN CHUNHACHA

9พ

พ 1250

2068

เลขหมู่.....~~139436~~

เลขทะเบียน.....

รับเดือนปี F 3 พ.ย. 2558

|         |
|---------|
| .b..... |
| .i..... |

12 7 22 479

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-080-044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARAMETERS TUNING EFFECTS  
IN THE MODEL PREDICTIVE CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMITL-2015-EN-M-080-044  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมแบบทำนายแบบจำลองของอินเวอร์ทเพนดูลัม |
| นักศึกษา                    | นายพงศธร ชูมหษา  |
| รหัสประจำตัว                | 53610917   |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต   |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมระบบควบคุม   |
| พ.ศ.                        | 2558   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.ถาวร เบญจนราสุทธิ  |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบทำนายแบบจำลองเชิงเส้นสำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรรางและวินิจฉัยผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าการชັกตัวอย่าง และขอบเขตการทำนายตอนบนที่มีต่อสมรรถนะและเสถียรภาพของระบบ นอกจากนี้ศึกษาเปรียบเทียบการควบคุมแบบทำนายแบบจำลองกับการควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยกำหนดค่าของเมทริกซ์น้ำหนักในการควบคุมทั้งสองแบบให้มีค่าสอดคล้องกัน เพื่อให้เห็นถึงข้อเด่นและข้อด้อยของการควบคุมแบบทำนายแบบจำลอง

จากผลการจำลองและผลการทดลองพบว่า การปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบนจะส่งผลต่อสมรรถนะและเสถียรภาพของระบบ โดยถ้ามีค่าน้อยหรือมากเกินไปจะส่งผลให้ระบบไม่เสถียร เมื่อพิจารณาภายในช่วงที่ระบบยังมีเสถียรภาพพบว่า ถ้าขอบเขตการทำนายตอนบนมีค่าน้อยเกินไปจะปรากฏการพุ่งเกินในผลตอบสนองของตำแหน่งรถ แต่การพุ่งเกินดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่าขอบเขตการทำนายตอนบนขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลงด้วย แต่จะทำให้ผลตอบสนองช้าลง ในการเปรียบเทียบผลการใช้อัตราการชັกตัวอย่างที่ช้า และอัตราการชັกตัวอย่างที่เร็ว พบว่าสมรรถนะของระบบวงปิดที่ใช้อัตราการชັกตัวอย่างที่เร็วจะดีกว่าการใช้อัตราการชັกตัวอย่างที่ช้า โดยใช้เวลาเข้าที่สั้นกว่า อย่างไรก็ตามในกรณีอัตราชັกตัวอย่างที่เร็วนั้นขอบเขตการทำนายตอนบนที่ต้องใช้มีค่ามากกว่ากรณีอัตราการชັกตัวอย่างที่ช้า ทำให้ต้องใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีหน่วยความจำและความเร็วในการประมวลผลมากขึ้น ในการเปรียบเทียบการควบคุมแบบทำนายแบบจำลองกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์พบว่าตัวควบคุมทั้งสองแบบมีสมรรถนะใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแบบทำนายแบบจำลองสามารถทำให้ระบบติดตามสัญญาณอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ดีกว่าตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

|                |   |
|----------------|---|
| Thesis title   | Parameters Tuning Effects in the Model Predictive Control of an Inverted Pendulum |
| Student        | Mr. Pongtorn Chunhacha  |
| Student ID.    | 53610917  |
| Degree         | Master of Engineering   |
| Program        | Control Engineering   |
| Year           | 2015  |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Taworn Benjanarasuth   |

## ABSTRACT

This thesis presents the applicability of linear model predictive control for an inverted pendulum on cart system and observes its parameters tuning effects. Sampling period and upper prediction horizon are varied for investigating their influences to the system's stability and performance. The comparison of the control systems using the model predictive control and servo LQR with the equivalent weighting matrices is additionally studied.

As can be observed from the simulations and experimental results, the adjustment of the upper prediction horizon influences the system's stability and performance. It must be in a proper range which is not too small and not too large to ensure the stability. Within the stable range, if the upper prediction horizon is small, the cart position response exhibits an oscillatory behavior. When the upper prediction horizon is increased, the cart position response becomes smooth and pendulum angle response exhibits less deviation from its upright position; however, the response is slower. The comparison result between using slow sample rate and fast sample rate is that the performance of the system using the fast sample rate achieves shorter settling time than the one using the slow sample rate. However, the upper prediction horizon range for the fast sample rate case is much higher than that for the slow sample rate case; therefore, it requires a better controller hardware. In comparison between the MPC controller and servo LQR controller, both controllers result in the systems with similar performance; however, the system using the MPC controller can track a time-varying reference signal better than the one using the servo LQR controller.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ถาวร เบญจนาสุภี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.จกมล งามวิวิทย์ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาแนวทางในการทำงานวิจัย รวมไปถึง คำแนะนำในการเขียนบทความและวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง ตลอดจนเอาใจใส่ดูแลสอบถาม ความก้าวหน้าของงานวิจัยอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง ที่ได้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้งานระบบ อินเทอร์เน็ตและโปรแกรมการใช้งานเบื้องต้น ซึ่งทำให้ผู้เขียนสามารถทำงานวิจัยได้สะดวกขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สังวาล บกสุวรรณ ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำ และแนะแนวทางการ แก้ไขปัญหาในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่คอยให้ กำลังใจ และคำปรึกษาไม่ว่าเรื่องการศึกษาหรือเรื่องชีวิตประจำวัน

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อประกิจ ชุณหชา และ คุณแม่วิไล ชุณหชา ที่เคารพรัก และมีพระคุณอย่างยิ่งกับผู้เขียน ได้อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และส่งเสริมผู้เขียนให้ได้เล่าเรียนจนถึง วันนี้ รวมไปถึงญาติพี่น้องทุกคนที่คอยห่วงใย และช่วยสนับสนุนจนทำให้ผู้เขียนศึกษาจนสำเร็จ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

พงศธร ชุณหชา

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....   | VIII |
| สารบัญรูป.....   | IX   |
| คำย่อและสัญลักษณ์.....   | XIV  |
| <br>   |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....  | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                    | 2    |
| 1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการวิจัย.....                                  | 2    |
| 1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....                                  | 3    |
| <br>   |      |
| บทที่ 2 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....                           | 4    |
| 2.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....                               | 4    |
| 2.1.1 อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....                                 | 4    |
| 2.1.2 ตัวควบคุม.....   | 5    |
| 2.1.3 ส่วนต่อประสานระหว่างตัวควบคุมกับอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง..... | 5    |
| 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....       | 6    |
| 2.3 การประมาณเชิงเส้น.....   | 9    |
| <br>   |      |
| บทที่ 3 ทฤษฎีการควบคุมแบบทำนายแบบจำลอง.....                        | 13   |
| 3.1 ปัญหาการควบคุมแบบทำนายแบบจำลอง.....                            | 13   |
| 3.1.1 ปัญหากรณีไม่มีข้อจำกัด.....                                  | 17   |
| 3.1.2 ปัญหากรณีมีข้อจำกัด.....                                     | 19   |
| 3.2 ตัวสังเกตสถานะ.....  | 21   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 การจำลอง.....   | 23   |
| 4.1 การใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด.....                           | 23   |
| 4.1.1 อัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว.....                                       | 24   |
| 4.1.1.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                   | 24   |
| 4.1.1.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                     | 26   |
| 4.1.1.3 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....                | 28   |
| 4.1.1.4 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....                  | 29   |
| 4.1.2 อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า.....  | 31   |
| 4.1.2.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                   | 31   |
| 4.1.2.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                     | 33   |
| 4.1.2.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....                  | 35   |
| 4.2 การใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด.....                              | 37   |
| 4.2.1 อัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว.....                                       | 37   |
| 4.2.1.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                   | 38   |
| 4.2.1.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                     | 40   |
| 4.2.1.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....                  | 42   |
| 4.2.2 อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า.....  | 44   |
| 4.2.2.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                   | 44   |
| 4.2.2.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                     | 46   |
| 4.2.2.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....                  | 48   |
| 4.3 การเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์..... | 50   |
| 4.3.1 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได.....                               | 50   |
| 4.3.1.1 อัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว.....                                     | 50   |
| 4.3.1.2 อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า.....                                      | 52   |
| 4.3.2 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายน.....                                    | 54   |
| 4.3.2.1 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....          | 54   |
| 4.3.2.2 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร.....          | 56   |
| 4.3.2.3 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....           | 56   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2563  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 4.3.3 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม.....                              | 60   |
| 4.3.3.1 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....          | 60   |
| 4.3.3.2 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร.....          | 60   |
| 4.3.3.3 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....           | 63   |
| 4.3.3.4 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร.....           | 63   |
| บทที่ 5 การทดลอง.....   | 66   |
| 5.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองซึ่งอาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี.....    | 66   |
| 5.2 การปรับขอบเขตการทำนายตอนบนของตัวควบคุมเอ็มพีซี.....                     | 68   |
| 5.2.1 อัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว.....                                       | 68   |
| 5.2.1.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                   | 68   |
| 5.2.1.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                     | 70   |
| 5.2.1.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....                  | 70   |
| 5.2.2 อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า.....  | 73   |
| 5.2.2.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                   | 73   |
| 5.2.2.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....                     | 73   |
| 5.2.2.3 กรณีกรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....              | 76   |
| 5.3 การเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์..... | 78   |
| 5.3.1 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได.....                               | 78   |
| 5.3.1.1 อัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว.....                                     | 78   |
| 5.3.1.2 อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า.....                                      | 80   |
| 5.3.2 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์.....                                   | 80   |
| 5.3.2.1 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....          | 82   |
| 5.3.2.2 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร.....          | 82   |
| 5.3.2.3 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....           | 85   |
| 5.3.2.4 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร.....           | 85   |
| 5.3.3 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม.....                              | 88   |
| 5.3.3.1 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....          | 88   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า       |
|---|------------|
| 5.3.3.3 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร..... | 91         |
| 5.3.3.4 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร..... | 91         |
| <b>บทที่ 6</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....                   | <b>94</b>  |
| 6.1 บทสรุป.....   | 94         |
| 6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัย.....                                     | 95         |
| 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....                              | 96         |
| <b>เอกสารอ้างอิง.....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>ภาคผนวก.....</b>   | <b>99</b>  |
| ภาคผนวก ก รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....                  | 100        |
| ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและการจำลอง.....       | 106        |
| ภาคผนวก ค โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง.....                            | 116        |
| ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....                      | 132        |
| <b>ประวัติผู้เขียน.....</b>                                       | <b>139</b> |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 พารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง.....  | 12   |
| 4.1 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว<br>กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....  | 24   |
| 4.2 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว<br>กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....    | 26   |
| 4.3 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว<br>กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้..... | 29   |
| 4.4 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า<br>กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....   | 31   |
| 4.5 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า<br>กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....     | 33   |
| 4.6 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า<br>กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....  | 35   |
| 4.7 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว<br>กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....     | 38   |
| 4.8 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว<br>กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....       | 40   |
| 4.9 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว<br>กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....    | 42   |
| 4.10 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า<br>กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....     | 44   |
| 4.11 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า<br>กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....       | 46   |
| 4.12 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า<br>กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....    | 48   |
| 4.13 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมในอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว.....   | 52   |
| 4.14 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมในอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า.....  | 54   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....  | 4    |
| 2.2 อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....  | 5    |
| 2.3 ส่วนต่อประสานระหว่างตัวควบคุมกับอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....  | 6    |
| 2.4 แบบจำลองของอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....   | 7    |
| 2.5 จุดสมดุลของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม.....   | 9    |
| 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด.....  | 18   |
| 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด.....   | 21   |
| 3.3 โครงสร้างของระบบควบคุมเอ็มพีซีกับตัวสังเกตสถานะ.....  | 22   |
| 4.1 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกรณีหนึ่งเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....  | 25   |
| 4.2 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกรณีสองเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....    | 27   |
| 4.3 การเปรียบเทียบตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้น และตัวแปรสถานะจริง<br>ในกรณีหนึ่งเอาต์พุต.....                     | 28   |
| 4.4 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกรณีสองเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้..... | 30   |
| 4.5 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้ากรณีหนึ่งเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....   | 32   |
| 4.6 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้ากรณีสองเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....     | 34   |
| 4.7 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้ากรณีสองเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....  | 36   |
| 4.8 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกรณีหนึ่งเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....     | 39   |
| 4.9 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกรณีสองเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....       | 41   |
| 4.10 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกรณีสองเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....   | 43   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.11 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เข้ากรณีหนึ่งเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....   | 45   |
| 4.12 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เข้ากรณีสองเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้.....   | 47   |
| 4.13 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เข้ากรณีสองเอาต์พุต<br>และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....  | 49   |
| 4.14 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชั้นบันไดของตัวควบคุม<br>เซอร์โวแอลคิวอาร์กับตัวควบคุมเอ็มพีซีในอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว.....                                  | 51   |
| 4.15 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชั้นบันไดของตัวควบคุม<br>เซอร์โวแอลคิวอาร์กับตัวควบคุมเอ็มพีซีในอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า.....                                   | 53   |
| 4.16 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายันของตัวควบคุมเอ็มพีซี<br>และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที<br>และขนาด 40 เซนติเมตร.....       | 55   |
| 4.17 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายันของตัวควบคุมเอ็มพีซี<br>และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที<br>และขนาด 60 เซนติเมตร.....       | 57   |
| 4.18 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายันของตัวควบคุมเอ็มพีซี<br>และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที<br>และขนาด 40 เซนติเมตร.....        | 58   |
| 4.19 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายันของตัวควบคุมเอ็มพีซี<br>และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที<br>และขนาด 60 เซนติเมตร.....        | 59   |
| 4.20 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุม<br>เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที<br>และขนาด 40 เซนติเมตร..... | 61   |
| 4.21 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุม<br>เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที<br>และขนาด 60 เซนติเมตร..... | 62   |

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.22 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุม<br>เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที<br>และขนาด 40 เซนติเมตร..... | 64   |
| 4.23 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุม<br>เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที<br>และขนาด 60 เซนติเมตร..... | 65   |
| 5.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบซึ่งอาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจากการจำลอง<br>และการทดลอง.....   | 67   |
| 5.2 ผลการทดลองในอัตราการชักร้อยอย่างที่เร็วกรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะ<br>สามารถวัดได้.....  | 69   |
| 5.3 ผลการทดลองในอัตราการชักร้อยอย่างที่เร็วกรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะ<br>สามารถวัดได้.....  | 71   |
| 5.4 ผลการทดลองในอัตราการชักร้อยอย่างที่เร็วกรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะ<br>ไม่สามารถวัดได้.....   | 72   |
| 5.5 ผลการทดลองในอัตราการชักร้อยอย่างช้ากรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะ<br>สามารถวัดได้.....  | 74   |
| 5.6 ผลการทดลองในอัตราการชักร้อยอย่างช้ากรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะ<br>สามารถวัดได้.....  | 75   |
| 5.7 ผลการทดลองในอัตราการชักร้อยอย่างช้ากรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะ<br>ไม่สามารถวัดได้.....   | 77   |
| 5.8 ผลการทดลองเปรียบเทียบกรณีอัตราการชักร้อยอย่างเร็วของระบบที่อาศัยตัวควบคุม<br>เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได.....                  | 79   |
| 5.9 ผลการทดลองเปรียบเทียบกรณีอัตราการชักร้อยอย่างช้าของระบบที่อาศัยตัวควบคุม<br>เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได.....                   | 81   |
| 5.10 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ของตัวควบคุมเอ็มพีซี<br>และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที<br>และขนาด 40 เซนติเมตร.....       | 83   |

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.11 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายน์ของตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร.....       | 84   |
| 5.12 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายน์ของตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....        | 86   |
| 5.13 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายน์ของตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร.....        | 87   |
| 5.14 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุม เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร..... | 89   |
| 5.15 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุม เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร..... | 90   |
| 5.16 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุม เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร.....  | 92   |
| 5.17 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุม เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร.....  | 93   |
| ก.1 ภาพถ่ายการ์ดเอนโคดเดอร์.....   | 101  |
| ก.2 ภาพถ่ายการติดตั้งการ์ดกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....  | 102  |
| ก.3 ภาพถ่ายการ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก.....   | 102  |
| ก.4 ภาพถ่ายชุดขับเคลื่อนมอเตอร์.....   | 103  |
| ก.5 ตัวอย่างสัญญาณเอาต์พุตของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์.....   | 103  |
| ก.6 การอ่านสัญญาณเอนโคดเดอร์แบบควอเตรเจอร์.....  | 104  |
| ก.7 การติดตั้งเอนโคดเดอร์แบบหมุนสำหรับวัดตำแหน่งรราง.....  | 104  |
| ก.8 การติดตั้งเอนโคดเดอร์แบบหมุนสำหรับวัดมุมเพนดูลัม.....  | 105  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ ภายใต้งานวิจัย การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| ข.1 แบบจำลองในโปรแกรมแมทแลปของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณี<br>หนึ่งเอาต์พุต สองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้..... | 110  |
| ข.2 แบบจำลองในโปรแกรมแมทแลปของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณี<br>สองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้.....            | 111  |
| ข.3 แบบจำลองในโปรแกรมแมทแลปของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง.....   | 112  |
| ข.4 แบบจำลองในโปรแกรมแมทแลปของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์.....  | 115  |



## คำย่อและสัญลักษณ์

|                     |         |  |
|---------------------|---------|--|
| $H_p$               | หมายถึง | ขอบเขตการทำนายตอนบน                                |
| $H_u$               | หมายถึง | ขอบเขตการควบคุม                                    |
| $T_s$               | หมายถึง | คาบการชักตัวอย่าง                                  |
| $\mathcal{L}$       | หมายถึง | ตัวดำเนินการลากรางจ์                               |
| $q, q_i$            | หมายถึง | พิกัดทั่วไปของระบบ                                 |
| $T$                 | หมายถึง | พลังงานจลน์รวมทั้งหมดของระบบ                       |
| $V$                 | หมายถึง | พลังงานศักย์รวมทั้งหมดของระบบ                      |
| $u_i$               | หมายถึง | แรงที่กระทำกับพิกัดทั่วไป                          |
| $M$                 | หมายถึง | มวลของรถราง  |
| $m$                 | หมายถึง | มวลของเพนดูลัม                                     |
| $f$                 | หมายถึง | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์                     |
| $l$                 | หมายถึง | ระยะจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลของเพนดูลัม        |
| $F$                 | หมายถึง | แรงที่ใช้ขับเคลื่อนรถราง                           |
| $x$                 | หมายถึง | ตำแหน่งรถราง                                       |
| $\theta$            | หมายถึง | มุมเพนดูลัม  |
| $g$                 | หมายถึง | ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก                       |
| $F$                 | หมายถึง | เมทริกซ์ระบบในเวลาต่อเนื่อง                        |
| $G$                 | หมายถึง | เมทริกซ์อินพุตในเวลาต่อเนื่อง                      |
| $x$                 | หมายถึง | เวกเตอร์ตัวแปรสถานะของระบบ                         |
| $y$                 | หมายถึง | เอาต์พุตของระบบ                                    |
| $u$                 | หมายถึง | อินพุตของระบบ                                      |
| $C$                 | หมายถึง | เมทริกซ์เอาต์พุต                                   |
| $A$                 | หมายถึง | เมทริกซ์ระบบในเวลาดีสครีต                          |
| $B$                 | หมายถึง | เมทริกซ์อินพุตในเวลาดีสครีต                        |
| $\Delta u(k)_{opt}$ | หมายถึง | อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด |
| $\mathcal{J}$       | หมายถึง | ดัชนีสมรรถนะ                                       |
| $H_w$               | หมายถึง | ขอบเขตการทำนายตอนล่าง                              |
| $\hat{r}$           | หมายถึง | เส้นทางอ้างอิง                                     |
| $\hat{y}$           | หมายถึง | เอาต์พุตที่มาจากการทำนาย                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยระบบราง  
 ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยระบบราง  
 ไม่สามารถแก้ไข หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

|                                    |         |   |
|------------------------------------|---------|---|
| $u(k)$                             | หมายถึง | สัญญาณควบคุม  |
| $\Delta u(k)$                      | หมายถึง | อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม                                |
| $\mathcal{Y}(k)$                   | หมายถึง | เมทริกซ์เอาต์พุตในอนาคต   |
| $\Delta \mathcal{U}(k)$            | หมายถึง | เมทริกซ์อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมในอนาคต                 |
| $\mathcal{T}(k)$                   | หมายถึง | เมทริกซ์เส้นทางอ้างอิงในอนาคต                                     |
| $\mathcal{Q}, \mathcal{R}$         | หมายถึง | เมทริกซ์น้ำหนัก   |
| $\Psi, \Upsilon, \Theta$           | หมายถึง | เมทริกซ์ประกอบการทำนายเมทริกซ์เอาต์พุตในอนาคต                     |
| $\mathcal{E}(k)$                   | หมายถึง | เมทริกซ์เสมือนเมทริกซ์ความผิดพลาด                                 |
| $\Delta \mathcal{U}(k)_{opt}$      | หมายถึง | เมทริกซ์อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมในอนาคตที่เหมาะสมที่สุด |
| $\mathcal{G}, \mathcal{H}$         | หมายถึง | เมทริกซ์องค์ประกอบของดัชนีสมรรถนะ                                 |
| $I$                                | หมายถึง | เมทริกซ์เอกลักษณ์   |
| $S_{\mathcal{Q}}, S_{\mathcal{R}}$ | หมายถึง | เมทริกซ์แยกองค์ประกอบของเมทริกซ์น้ำหนัก                           |
| $K_{mpc}$                          | หมายถึง | เมทริกซ์อัตราขยายของตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด            |
| $\mathbf{p}_{\Delta u}^u$          | หมายถึง | เวกเตอร์ขีดจำกัดบนของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม           |
| $\mathbf{p}_{\Delta u}^l$          | หมายถึง | เวกเตอร์ขีดจำกัดล่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม         |
| $\mathbf{p}_u^u$                   | หมายถึง | เวกเตอร์ขีดจำกัดบนของสัญญาณควบคุม                                 |
| $\mathbf{p}_u^l$                   | หมายถึง | เวกเตอร์ขีดจำกัดล่างของสัญญาณควบคุม                               |
| $\bar{y}$                          | หมายถึง | เอาต์พุตของตัวสังเกตสถานะ   |
| $\bar{x}$                          | หมายถึง | เวกเตอร์ตัวแปรสถานะของตัวสังเกตสถานะ                              |
| $t_r$                              | หมายถึง | เวลาขึ้น  |
| $t_s$                              | หมายถึง | เวลาเข้าที่   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การควบคุมแบบทำนายแบบจำลอง (Model predictive control: MPC) หรือเรียกโดยย่อว่าเอ็มพีซี เป็นเทคนิคในการควบคุมซึ่งถูกพัฒนาขึ้นและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมมานานกว่า 20 ปี [1-3] เนื่องจากเอ็มพีซีสามารถจัดการปัญหาการควบคุมหลายตัวแปรและปัญหาที่มีการอิมิตัวของตัวขับเคลื่อน (Actuator) ซึ่งจะช่วยให้ไม่มีปัญหาการเพิ่มขึ้นเกินระดับอิมิตัวของสัญญาณควบคุม โดยเอ็มพีซีเป็นวิธีการควบคุมแบบออนไลน์ที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยแบบจำลองระบบวงเปิดในการทำนายเอาต์พุตในอนาคตจากค่าเริ่มต้น ได้แก่ ค่าอินพุตและเอาต์พุตในอดีต และอินพุตในอนาคต [4-5] นอกจากนี้กรณีการควบคุมเชิงทำนายแบบทั่วไป (Generalized predictive control: GPC) หรือจีพีซี ซึ่งเป็นกรณีหนึ่งของเอ็มพีซีได้ถูกพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์แล้วว่าสามารถใช้ได้กับระบบที่อธิบายด้วยแบบจำลองเชิงเส้น [1-2] อย่างไรก็ตามกระบวนการส่วนใหญ่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เอ็มพีซีไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model predictive control) ในรูปแบบต่าง ๆ จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น [6-9] แต่จุดอ่อนที่สำคัญของวิธีการเหล่านี้คือการแก้ปัญหาแบบออนไลน์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทั่วไปเป็นปัญหาแบบไม่คอนเวกซ์ (Non-convex) ทำให้แก้ปัญหาได้ยากหรือยังไม่มีระเบียบวิธีการแก้ปัญหาบางกรณี

การควบคุมเอ็มพีซีต้องการทำให้ดัชนีสมรรถนะ (Performance index) มีค่าน้อยที่สุดภายใต้ขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  (Upper prediction horizon) และขอบเขตการควบคุม  $H_u$  (Control horizon) ที่พิจารณา โดยปกติขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  สามารถเลือกให้น้อยกว่า 100 สำหรับแบบจำลองที่มีเสถียรภาพ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีที่แบบจำลองไม่มีเสถียรภาพ ขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  จะต้องเลือกอย่างเหมาะสมเนื่องจากมีผลต่อเสถียรภาพ และสมรรถนะของระบบ [10] โดยการควบคุมเอ็มพีซีอาศัยการแก้ปัญหาแบบออนไลน์ภายใต้ขอบเขตการทำนายและขอบเขตการควบคุมที่กำหนดขึ้น

การควบคุมเอ็มพีซีอาศัยการคำนวณแบบออนไลน์จึงทำให้ตัวควบคุมต้องใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีหน่วยความจำและความเร็วในการประมวลผล ดังนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการควบคุมเอ็มพีซีนิยมใช้ในระบบอุตสาหกรรมที่มีผลตอบสนองช้า [11-14] เช่น การควบคุมกระบวนการทางเคมี กระบวนการกลั่นสารในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอื่น ๆ แต่อุตสาหกรรมประเภทเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งเป็นระบบที่มีผลตอบสนองเร็วถูกนำไปใช้น้อย โดยพบงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีร่วมกับตัวควบคุมอื่นเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบที่ขับเคลื่อนด้วยอุปกรณ์เพียโซ (Piezoactuated system) [15] อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถ [16] อินเวอร์ทเพนดูลัมคู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบขนาน [17] แต่มีได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเอ็มพีซีเพียงลำพังจากทดลองจริงโดยละเอียด

ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมซึ่งเป็นระบบที่ได้รับความนิยมสำหรับทดสอบเทคนิคการควบคุมต่าง ๆ เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มีเสถียรภาพ ณ จุดสมดุล โดยตัวควบคุมจำนวนมากถูกนำเสนอและนำไปใช้กับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม เช่น ตัวควบคุมแอลคิวอาร์ [18] ตัวควบคุมพีซี [19] และตัวควบคุมอื่น รวมถึงการประยุกต์ใช้การควบคุมเอ็มพีซีกับอินเวอร์ทเพนดูลัมโดยการจำลอง [10]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการนำเสนอการใช้การควบคุมเอ็มพีซีเชิงเส้น (Linear model predictive control) สำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรทัดและวินิจฉัยผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเอ็มพีซี โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงคาบการซิกตัวอย่าง  $T_s$  (Sampling period) และขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ที่มีผลต่อเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบ นอกจากนี้ผลการจำลองและผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซี ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลเมื่อใช้ตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์เพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อเด่นและข้อด้อยของการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซี

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับระบบที่มีผลตอบสนองที่เร็ว ไม่เป็นเชิงเส้น และวงเปิดไม่มีเสถียรภาพ โดยอาศัยระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรทัดในการศึกษา
2. ศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเอ็มพีซีกับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรทัด

## 1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการวิจัย

1. ปรับปรุงชุดทดลองของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรทัดสำหรับใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม
2. ศึกษาโครงสร้างและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรทัดโดยอาศัยสมการของลากรางจ์ (Lagrange's equation) เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
3. ออกแบบตัวควบคุมเอ็มพีซีและทดสอบผลการปรับค่าคาบการซิกตัวอย่าง  $T_s$  และขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  เพื่อศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมแมทแลป (Matlab) และการทดลองจริง
4. เปรียบเทียบข้อเด่นและข้อด้อยของตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บท และ 4 ภาคผนวก โดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังนี้  
 บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย ขอบเขต และขั้นตอนการวิจัย พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 กล่าวถึงรายละเอียดโครงสร้างและการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมเอ็มพีซี

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง โดยนำทฤษฎีจากบทที่ 3 มาใช้ออกแบบ และวินิจฉัยผลการปรับค่าอัตราการซึกตัวอย่าง  $T_s$  และ ขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี นอกจากนี้จะเปรียบเทียบผลการจำลอง การใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยการจำลองอาศัยโปรแกรมแมทแลป

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองซึ่งนำตัวควบคุมเอ็มพีซีในบทที่ 4 ไปทดลอง กับชุดทดลองจริง

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก อธิบายรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและการจำลอง

ภาคผนวก ค อธิบายโปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ง นำเสนอผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

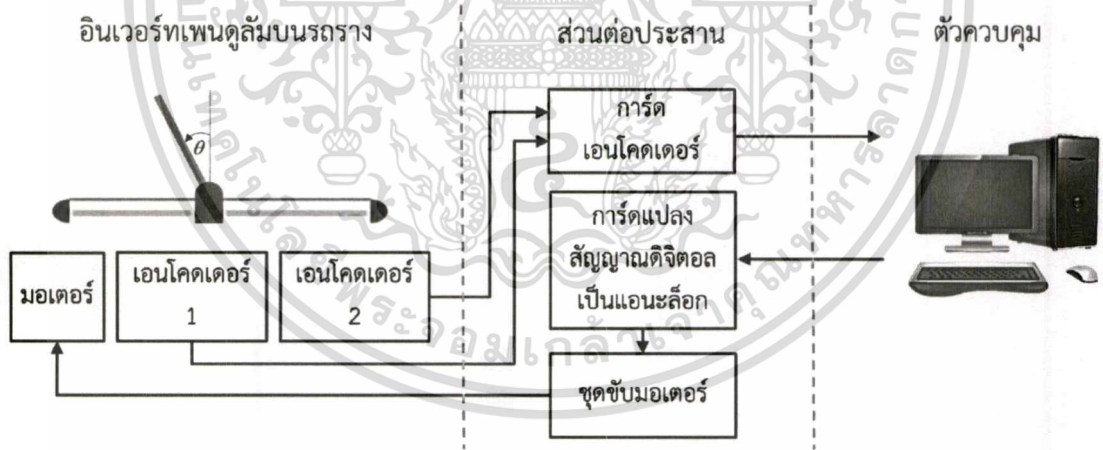
## บทที่ 2

# ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นเครื่องมือที่นิยมในการศึกษาค้นคว้าทางวิศวกรรมระบบควบคุม เนื่องจากระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ ณ จุดสมดุล โดยทั่วไประบบอินเวอร์ทเพนดูลัมแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ คือ อินเวอร์ทเพนดูลัมแบบฐานหมุนและอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางในการศึกษา และทดลองตัวควบคุมที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### 2.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางที่ใช้ในการศึกษาและทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่สามส่วน คือ อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง ตัวควบคุม และส่วนต่อประสาน (Interface) ระหว่างอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางกับตัวควบคุม โดยระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

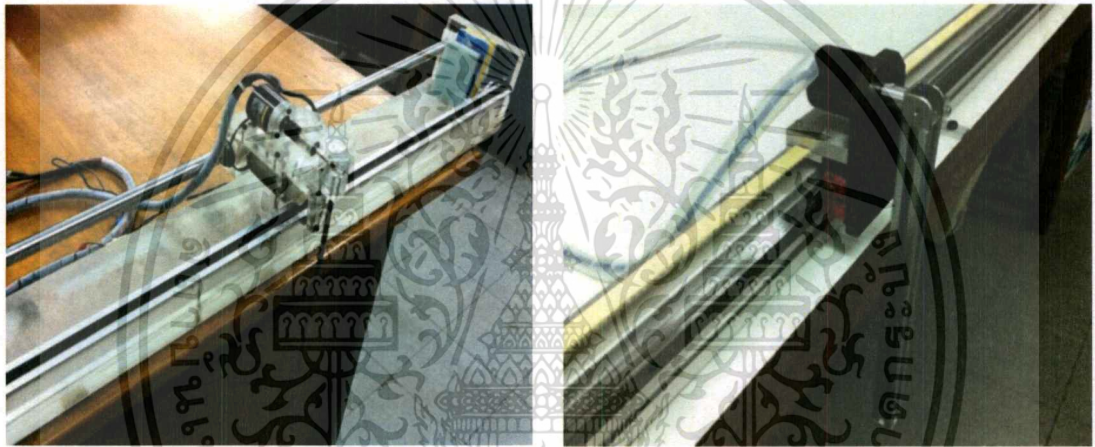


รูปที่ 2.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

#### 2.1.1 อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางที่ใช้ในการศึกษาและทดลองดังรูปที่ 2.1 มีส่วนประกอบหลักคือ ตัวรถราง เพนดูลัม มอเตอร์ใช้ขับเคลื่อน และเซนเซอร์วัดตำแหน่งรถและมุมเพนดูลัม เนื่องจากโครงสร้างอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางก่อนการปรับปรุงดังรูปที่ 2.2(ก) มีความยาวเพียง 1 เมตรและโครงสร้างหลักทำจากอะคริลิกจึงขาดความคงทน เมื่อมีข้อผิดพลาดในการทดลอง ตัวรถรางอาจวิ่งชนขอบด้านใดด้านหนึ่งจนเกิดความเสียหายได้ จึงได้ออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างของอินเวอร์ท

เพนดูลัมบนรรางดังรูปที่ 2.2(ข) ซึ่งมีขนาดรรางเพิ่มขึ้นเป็น 2 เมตร และมีโครงสร้างหลักทำจาก อะลูมิเนียมซึ่งมีความคงทน ตัวรรางขับเคลื่อนด้วยสายพานซึ่งต่อกับมอเตอร์กระแสตรงพิกัด 24 โวลต์ 4 แอมแปร์ รายละเอียดดังภาคผนวก ก ให้สามารถเคลื่อนที่ได้สองทิศทางตามแนวนอน เพนดูลัมทำจากอะลูมิเนียมหน้าตัดทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสถูกยึดติดกับตัวรรางผ่านจุดหมุน ณ บริเวณ ส่วนบนของตัวรราง โดยเพนดูลัมสามารถหมุนรอบจุดหมุนนี้ในระนาบของแนวแกนตั้งได้ โดยมุม เพนดูลัมซึ่งกระทำกับแนวแกนตั้งผ่านจุดหมุนนี้ถูกวัดโดยเอนโคดเดอร์แบบหมุน (Rotary encoder) รายละเอียดดังภาคผนวก ก และมีเอนโคดเดอร์แบบหมุนอีกตัวหนึ่งติดตั้งอยู่ที่ขอบของรรางเพื่อใช้เป็น ตัววัดตำแหน่งรราง นอกจากนี้ยังมีติดลิมิตสวิทช์บริเวณขอบของรรางทั้งสองฝั่ง เพื่อช่วยเพิ่มความ ปลอดภัยในทดลอง



(ก) ก่อนปรับปรุง

(ข) หลังปรับปรุง

รูปที่ 2.2 อินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง

### 2.1.2 ตัวควบคุม

โปรแกรมคอมพิวเตอร์บอร์ดแลนซีพลัสพลัส (Borland C++) ซึ่งพัฒนาขึ้นจากโปรแกรม ภาษาซี (C language) ถูกนำมาใช้เพื่อเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบอินเวอร์ท เพนดูลัมบนรราง ซึ่งจะทำงานตามเวลาจริง (Real-time control) โดยโปรแกรมหัดกล่าวจะทำงาน บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer) โดยรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งหมดที่พัฒนาเพื่อไปใช้เป็นตัวควบคุมแสดงในภาคผนวก ค

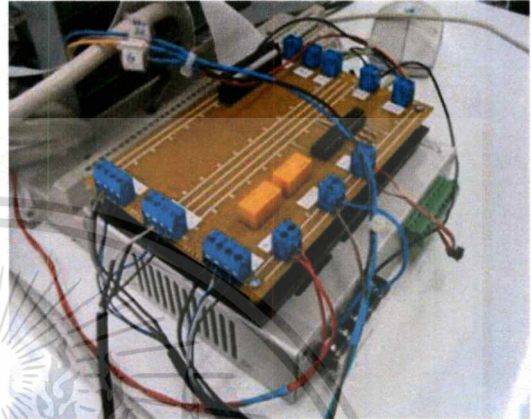
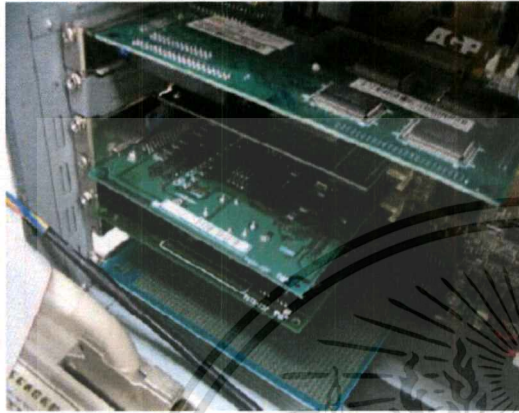
### 2.1.3 ส่วนต่อประสานระหว่างตัวควบคุมกับอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง

ส่วนต่อประสานระหว่างตัวควบคุมกับอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรรางมีส่วนประกอบเป็นวงจร อิเล็กทรอนิกส์สำเร็จรูป ทำหน้าที่เป็นช่องทางเข้า (Input port) และช่องทางออก (Output port) ของข้อมูลระหว่างตัวควบคุมกับอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง โดยใช้การ์ดเอนโคดเดอร์สำเร็จรูป รหัส PCI-6201E ทำหน้าที่เป็นช่องทางเข้าของข้อมูลขนาด 24 บิต เพื่อรับข้อมูลมุมเพนดูลัม และข้อมูล ตำแหน่งรรางจากเอนโคดเดอร์แบบหมุนทั้งสองตัวและใช้การ์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการ ใดๆ ไม่อย่างใดก็อย่างหนึ่ง หากมีผู้ใดฝ่าฝืนลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้ จะดำเนินการฟ้องดำเนินคดีตามกฎหมายต่อไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำเร็จรูป รหัส PCI-3345A ทำหน้าที่เป็นช่องทางออกของข้อมูลสัญญาณควบคุม และแปลงสัญญาณควบคุมนี้จากสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกมีค่าระหว่าง -10 โวลต์ ถึง +10 โวลต์ดังรูปที่ 2.3(ก) แล้วส่งสัญญาณนี้ไปยังชุดขับเคลื่อนดังรูปที่ 2.3(ข) โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก ก



(ก) การ์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก และการ์ดเอนโคเดอร์  
รูปที่ 2.3 ส่วนต่อประสานระหว่างตัวควบคุมกับอินเวอร์ตเพนดูลัมบนรถราง

(ข) ชุดขับเคลื่อน

## 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอินเวอร์ตเพนดูลัมบนรถราง

การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการการเคลื่อนที่ของระบบอินเวอร์ตเพนดูลัมบนรถรางในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้วิธีของลากรางจ์ภายใต้สมมติฐานที่ว่าแท่งเพนดูลัมแข็งไม่สามารถงอได้ และความเสียดทานสถิต (Static friction) มีค่าน้อยมากจนไม่มีอิทธิพลต่อระบบ ซึ่งการคำนวณกลศาสตร์ของลากรางจ์ (Lagrangian mechanics) ต่างจากการคำนวณกลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian mechanics) โดยใช้พลังงานในการคำนวณเป็นหลัก ซึ่งประกอบไปด้วยทอมของพลังงานจลน์ (Kinetic energy) และพลังงานศักย์ (Potential energy) จึงทำให้กลศาสตร์ของลากรางจ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่ในแบบต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนได้ง่ายกว่ากลศาสตร์ของนิวตัน โดยนิยามตัวดำเนินการลากรางจ์  $\mathcal{L}$  (Lagrangian operator) ดังนี้

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q, \dot{q}) \quad (2.1)$$

โดย  $\mathcal{L}$  คือ ตัวดำเนินการลากรางจ์  
 $q$  คือ พิกัดทั่วไปของระบบ (Generalized coordinate)  
 $T$  คือ พลังงานจลน์รวมทั้งหมดของระบบ

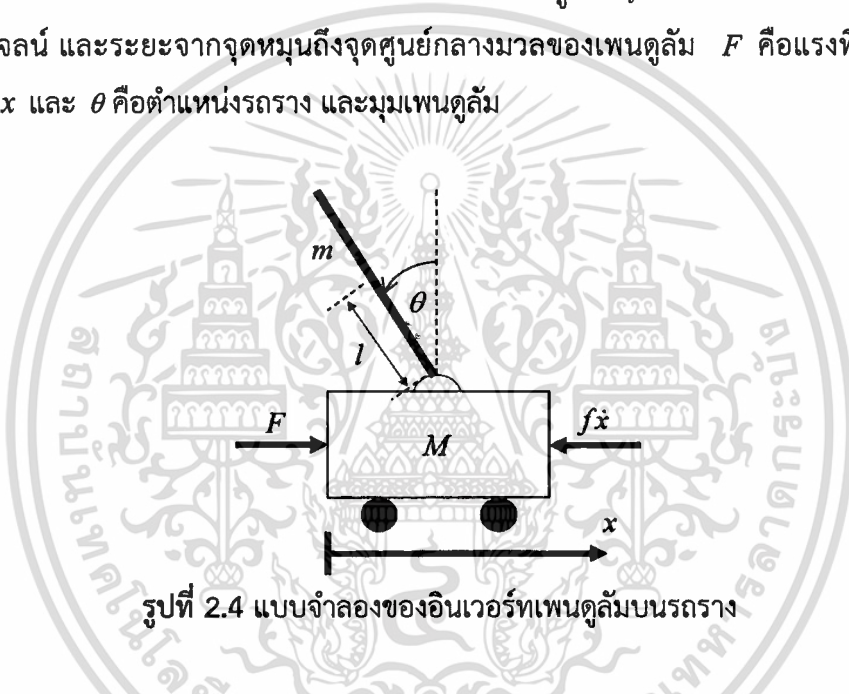
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คือ พลังงานศักย์รวมทั้งหมดของระบบ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของลากรางจ์และพลวัตในแต่ละทิศทางตามพิกัด  $q_i$  สามารถเขียนอธิบายได้โดย

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = u_i \quad (2.2)$$

โดย  $u_i$  คือแรงที่กระทำกับพิกัดทั่วไปที่  $i$  และ  $q_i$  คือพิกัดทั่วไปที่  $i$  สำหรับ  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  เมื่อ  $n$  คือ องศาอิสระ (Degree of freedom) ของระบบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางสามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.4 เมื่อ  $M$  และ  $m$  คือมวลของรถราง และมวลของเพนดูลัม  $f$  และ  $l$  คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ และระยะจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลของเพนดูลัม  $F$  คือแรงที่ใช้ขับเคลื่อนที่  $x$  และ  $\theta$  คือตำแหน่งรถราง และมุมเพนดูลัม



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

สำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางสามารถพิจารณาพิกัดทั่วไปได้สองพิกัดคือ พิกัดตำแหน่งรถราง  $x$  และพิกัดมุมเพนดูลัม  $\theta$  โดยสมมติว่ามีแรงกระทำกับพิกัดตำแหน่งรถราง  $x$  ส่วนพิกัดมุมเพนดูลัม  $\theta$  ไม่มีแรงใด ๆ มากระทำ ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) สามารถเขียนสมการของลากรางจ์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางตามพิกัดทั่วไปทั้งสองได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = F - f\dot{x} \quad (2.3)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = 0$$

โดยพลังงานจลน์รวมทั้งหมดของระบบ  $T$  และพลังงานศักย์รวมทั้งหมดของระบบ  $V$  สามารถอธิบายเอกสารได้ดังนี้ เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2 - ml\dot{\theta}\cos(\theta) + \frac{2}{3}ml^2\dot{\theta}^2 \quad (2.4)$$

$$V = mg(l + l\cos(\theta)) \quad (2.5)$$

เมื่อแทนค่าพลังงานจลน์รวมทั้งหมดของระบบ  $T$  และพลังงานศักย์รวมทั้งหมดของระบบ  $V$  ลงในสมการที่ (2.1) จะได้ตัวดำเนินการลากรางจ์  $\mathcal{L}$  ดังนี้

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(M + m)\dot{x}^2 - ml\dot{\theta}\cos(\theta) + \frac{2}{3}ml^2\dot{\theta}^2 - mg(l + l\cos(\theta)) \quad (2.6)$$

เมื่อนำค่าของตัวดำเนินการลากรางจ์  $\mathcal{L}$  ในสมการที่ (2.6) แทนลงในสมการที่ (2.3) และจัดรูปสมการจะได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรรางดังนี้

$$\ddot{x} = \frac{F - f\dot{x} + \frac{3}{4}mg\cos(\theta)\sin(\theta) - ml\dot{\theta}^2\sin(\theta)}{(M + m) - \frac{3}{4}m\cos^2(\theta)} \quad (2.7)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(mg\sin(\theta) + m(F - f\dot{x})\cos(\theta) - m^2l\dot{\theta}^2\cos(\theta)\sin(\theta))}{\frac{4}{3}ml - \frac{m^2l\cos^2(\theta)}{(M + m)}}$$

โดยสมการการเคลื่อนที่ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรรางในสมการที่ (2.7) สามารถเขียนในรูปแบบสมการสถานะ (State equation) ได้ดังนี้

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{(M + m)mg\sin(x_1) + m(u - fx_2)\cos(x_1) - m^2lx_2^2\cos(x_1)\sin(x_1)}{(M + m)\frac{4}{3}ml - m^2l\cos^2(x_1)} \quad (2.8)$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = \frac{u - fx_4 + \frac{3}{4}mg\cos(x_1)\sin(x_1) - mlx_4^2\sin(x_1)}{(M + m) - \frac{3}{4}m\cos^2(x_1)}$$

เมื่อกำหนดให้  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]^T$  และ  $u = F$   
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การประมาณเชิงเส้น

หลังจากได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรรางแล้ว จะเห็นว่าสมการที่ได้เป็นสมการสถานะแบบไม่เป็นเชิงเส้นในรูป  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u)$  แต่หลักการควบคุมของเอ็มพีซีที่นำเสนอ ต้องอาศัยแบบจำลองปริภูมิสถานะแบบเชิงเส้น ดังนั้นต้องทำการประมาณสมการที่ (2.8) เป็นสมการปริภูมิสถานะแบบเชิงเส้นในรูป

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}u \quad (2.9)$$

ซึ่งสามารถคำนวณเมทริกซ์  $\mathbf{F}$  และ  $\mathbf{G}$  จากการประมาณเชิงเส้นโดย

$$\mathbf{F} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, u)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0, u=u_0} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{G} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, u)}{\partial u} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0, u=u_0} \quad (2.11)$$

จุดสมดุลของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรรางมีด้วยกันสองจุดคือจุดสมดุลล่าง ( $\theta = \pi$ , ระบบมีเสถียรภาพ) กับจุดสมดุลบน ( $\theta = 0$ , ระบบไม่มีเสถียรภาพ) แสดงดังรูปที่ 2.5



(ก) จุดสมดุลล่าง

(ข) จุดสมดุลบน

รูปที่ 2.5 จุดสมดุลของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาการประมาณเชิงเส้นของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง ณ จุดสมดุลบนดังรูปที่ 2.5(ข) เพื่อนำแบบจำลองปริภูมิสถานะแบบเชิงเส้นไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้เพนดูลัมมีเสถียรภาพสามารถทรงตัวอยู่ได้ ณ จุดสมดุลบน ดังนั้นสามารถกำหนดให้จุดสมดุลของตัวแปรสถานะเป็น  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$  และของอินพุตเป็น  $u_0 = 0$  ทำให้สามารถประมาณเชิงเส้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการสถานะสมการที่ (2.8) เพื่อหาเมทริกซ์  $F$  และ  $G$  ในสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11) ของ ปริภูมิสถานะแบบเชิงเส้นในสมการที่ (2.9) ได้ดังนี้

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{3(M+m)mg}{4ml(M+m)-3m^2l} & 0 & 0 & \frac{-3mf}{4ml(M+m)-3m^2l} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{3mg}{4\left((M+m)-\frac{3}{4}m\right)} & 0 & 0 & \frac{-f}{(M+m)-\frac{3}{4}m} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

และ

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{3m}{4ml(M+m)-3m^2l} \\ 0 \\ \frac{1}{(M+m)-\frac{3}{4}m} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

หรือสามารถเขียนสมการปริภูมิสถานะเชิงเส้นของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรางในสมการที่ (2.9) ที่พิจารณา ณ จุดสมดุลได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{3(M+m)mg}{4ml(M+m)-3m^2l} & 0 & 0 & \frac{-3mf}{4ml(M+m)-3m^2l} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{3mg}{4\left((M+m)-\frac{3}{4}m\right)} & 0 & 0 & \frac{-f}{(M+m)-\frac{3}{4}m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{3m}{4ml(M+m)-3m^2l} \\ 0 \\ \frac{1}{(M+m)-\frac{3}{4}m} \end{bmatrix} u \quad (2.14)$$

และสมการเอาต์พุตสามารถเขียนได้เป็น

$$y = Cx \quad (2.15)$$

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งการพิจารณาเอาต์พุต  $y$  ออกเป็นสองกรณี กรณีแรกพิจารณาเฉพาะ ตำแหน่งรถ  $x$  เป็นเอาต์พุต จึงกำหนดเวกเตอร์  $C$  เป็นดังนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = [0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad (2.16)$$

ดังนั้น

$$y = [0 \ 0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

และในกรณีที่ 2 พิจารณาทั้งมุมเพนดูลัม  $\theta$  และตำแหน่งรถ  $x$  เป็นเอาต์พุต จึงกำหนดเวกเตอร์  $C$  เป็นดังนี้

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ดังนั้น

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

สมการปริภูมิสถานะและสมการเอาต์พุตในสมการที่ (2.14) และ (2.19) สามารถหาแบบจำลองในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ได้ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - F)^{-1}G \quad (2.20)$$

จากการพิจารณาตำแหน่งรถ  $X(s)$  และมุมเพนดูลัม  $\theta(s)$  เป็นเอาต์พุต  $Y(s)$  และแรงที่ใช้ขับรถรางเคลื่อนที่  $F(s)$  เป็นอินพุต  $U(s)$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{4ls^2 - 3g}{(4M + m)ls^4 + 4fls^3 - 3g(M + m)s^2 - 3fgs} \quad (2.21)$$

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{3s}{(4M + m)ls^3 + 4fls^2 - 3g(M + m)s - 3fg} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการชั่งน้ำหนักของรถรางและเพนดูลัม วัดระยะจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลเพนดูลัม และหาค่าแรงเสียดทานจากการทดลอง สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางได้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย                                 | ค่า   | หน่วย       |
|-----------|--|-------|-------------|
| $M$       | มวลของรถราง                              | 1.752 | $kg$        |
| $m$       | มวลของเพนดูลัม                           | 0.178 | $kg$        |
| $l$       | ระยะจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลเพนดูลัม | 0.206 | $m$         |
| $f$       | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์           | 3.795 | $N / m$     |
| $g$       | ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก             | 9.8   | $m / sec^2$ |

วิธีการออกแบบตัวควบคุมเอ็มพีซีซึ่งจะอธิบายในบทที่ 3 จะอาศัยแบบจำลองในรูปสมการปริภูมิสถานะเวลาติสคริต ดังนั้นแบบจำลองในรูปสมการปริภูมิสถานะเวลาต่อเนื่องดังสมการที่ (2.14) และ (2.17) หรือ (2.19) ต้องถูกแปลงเป็นสมการปริภูมิสถานะเวลาติสคริตในรูป

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) \quad (2.23)$$

$$y(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $\mathbf{A} = e^{\mathbf{F}T}$ , และ  $\mathbf{B} = \left( \int_0^T e^{\mathbf{F}\lambda} d\lambda \right) \mathbf{G}$  โดย  $T$ , คือคาบการซิกตัวอย่าง

## บทที่ 3

# ทฤษฎีการควบคุมแบบทำนายแบบจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบตัวควบคุมแบบทำนายแบบจำลอง หรือตัวควบคุมเอ็มพีซี โดยแบ่งการอธิบายออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกอธิบายถึงปัญหาการควบคุมแบบทำนายแบบจำลอง ขั้นตอนการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด  $\Delta u(k)_{opt}$  สำหรับควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนราง ส่วนที่สองอธิบายการใช้ตัวสังเกตสถานะ (State observer) ร่วมกับตัวควบคุมเอ็มพีซีในกรณีที่ตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

### 3.1 ปัญหาการควบคุมแบบทำนายแบบจำลอง

ในวิธีเอ็มพีซี ระบบควบคุมต้องทำให้ดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  มีค่าน้อยที่สุด โดยทั่วไปดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  คือผลรวมน้ำหนักของข้อผิดพลาดจากการควบคุมและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมยกกำลังสอง ดังนี้

$$\mathcal{J} = \sum_{i=H_w}^{H_p} \|\hat{y}(k+i|k) - \hat{r}(k+i)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\hat{y}$  คือเอาต์พุตที่มาจากการทำนาย  $\Delta \hat{u}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มาจากการทำนาย  $\hat{r}$  คือเส้นทางอ้างอิง (Reference trajectory)  $k$  คือเวลาปัจจุบัน  $H_p$  และ  $H_w$  คือขอบเขตการทำนายตอนบน และขอบเขตการทำนายตอนล่าง (Lower prediction horizon)  $H_u$  คือขอบเขตการควบคุมโดย  $Q(i)$  เมื่อ  $i = H_w, \dots, H_p$  และ  $R(i)$  เมื่อ  $i = 0, \dots, H_u - 1$  คือค่าถ่วงน้ำหนักของข้อผิดพลาดจากการควบคุมและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมยกกำลังสอง ณ เวลาทำนายที่  $k+i$  ตามลำดับ

ในกรณีทั่วไปค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ควรเลือกให้สอดคล้องกับเส้นทางอ้างอิง  $\hat{r}$  ซึ่งผลตอบสนอง ณ เวลาทำนายสุดท้าย หรือที่เวลา  $k + H_p$  สามารถเข้าสู่  $\hat{r}(k + H_p)$  ได้ในเวลาจริง ขอบเขตการทำนายตอนล่าง  $H_w$  สามารถปรับเพื่อไม่พิจารณาความผิดพลาดเริ่มต้นของขอบเขตการทำนายในดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  ส่วนค่าขอบเขตการควบคุม  $H_u$  เป็นตัวระบุขอบเขตการยอมให้สัญญาณควบคุมมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโดยปกติแล้วนิยามกำหนด  $H_u < H_p$  เพื่อให้เวลาภายหลังขอบเขตการควบคุม  $H_u$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมจากการทำนาย  $\hat{u}$  หรือ  $\Delta \hat{u}$  เป็นศูนย์

ปัญหาข้างต้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์และเวกเตอร์ โดยดัชนีสมรรถนะในสมการที่ (3.1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathcal{J} = \|\mathcal{Y}(k) - \mathcal{T}(k)\|_{\mathcal{Q}}^2 + \|\Delta \mathcal{U}(k)\|_{\mathcal{R}}^2 \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$\mathcal{Y}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}(k+H_w | k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+H_p | k) \end{bmatrix} \quad \mathcal{T}(k) = \begin{bmatrix} \hat{r}(k+H_w | k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k+H_p | k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathcal{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k | k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k+H_u-1 | k) \end{bmatrix}$$

และเมทริกซ์น้ำหนัก  $\mathcal{Q}$  และ  $\mathcal{R}$  มีรูปแบบดังนี้

$$\mathcal{Q} = \begin{bmatrix} Q(H_w) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q(H_w+1) & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q(H_p) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} R(0) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R(1) & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R(H_u-1) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

การหาเอาต์พุตจากการทำนาย  $\hat{y}(k)$  เพื่อใช้ในการคำนวณดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  ตามสมการที่ (3.2) สามารถอาศัยสมการปริภูมิสถานะเวลาดีสครีตที่คำนวณได้ในสมการที่ (2.23) และ (2.24) ทำซ้ำอย่างต่อเนื่องไปถึงขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  นั่นคือจนถึง  $\hat{y}(k+H_p)$  โดยสำหรับกรณี  $H_w = 1$  จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\hat{y}(k+1 | k) = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}[\Delta \hat{u}(k | k) + u(k-1)]) \quad (3.5)$$

$$\hat{y}(k+2 | k) = \mathbf{C} \cdot \left( \mathbf{A}^2 \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}\mathbf{B}[\Delta \hat{u}(k | k) + u(k-1)] + \mathbf{B} \underbrace{[\Delta \hat{u}(k+1 | k) + \Delta \hat{u}(k | k) + u(k-1)]}_{\hat{u}(k+1 | k)} \right) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{y}(k+H_p | k) = \mathbf{C} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{A}^{H_p} \mathbf{x}(k) + (\mathbf{A}^{H_p-1} + \dots + \mathbf{A} + \mathbf{I}) \mathbf{B} \Delta \hat{u}(k | k) \\ \dots + (\mathbf{A}^{H_p-H_u} + \dots + \mathbf{A} + \mathbf{I}) \mathbf{B} \Delta \hat{u}(k+H_u-1 | k) \\ + (\mathbf{A}^{H_p-1} + \dots + \mathbf{A} + \mathbf{I}) \mathbf{B} u(k-1) \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.5) ถึง (3.7) เวกเตอร์  $\mathcal{Y}(k)$  ของสัญญาณเอาต์พุตจากการทำนาย  $\hat{y}$  สามารถแสดงในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathcal{Y}(k) = \Psi \mathbf{x}(k) + \Upsilon u(k-1) + \Theta \Delta \mathcal{U}(k) \quad (3.8)$$

เมทริกซ์  $\Psi, \Upsilon$  และ  $\Theta$  ในกรณี  $H_w = 1$  มีรูปแบบดังนี้

$$\Psi = \begin{bmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{H_p} \end{bmatrix} \quad \Upsilon = \begin{bmatrix} \mathbf{CB} \\ \mathbf{C}(\mathbf{AB} + \mathbf{B}) \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} \mathbf{CA}^i \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad \Theta = \begin{bmatrix} \mathbf{CB} & \dots & 0 \\ \mathbf{C}(\mathbf{AB} + \mathbf{B}) & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} \mathbf{CA}^i \mathbf{B} & \dots & \sum_{i=0}^{H_p-H_u} \mathbf{CA}^i \mathbf{B} \end{bmatrix}$$

ในกรณี  $H_w > 1$  สามารถหาเมทริกซ์  $\Psi, \Upsilon$  และ  $\Theta$  ได้ในลักษณะเดียวกัน

นิยามเมทริกซ์  $\mathcal{E}(k)$  โดย

$$\mathcal{E}(k) = \mathcal{T}(k) - \Psi \mathbf{x}(k) - \Upsilon u(k-1) \quad (3.9)$$

เมทริกซ์  $\mathcal{E}(k)$  อาจสามารถพิจารณาเสมือนเมทริกซ์ความผิดพลาด โดยประกอบด้วยผลต่างของเวกเตอร์เส้นทางอ้างอิง  $\mathcal{T}(k)$  กับ ผลตอบสนองอิสระ (Free response) ของระบบ หากไม่มีอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม  $\Delta \mathcal{U}(k) = 0$

เมื่อนำสมการที่ (3.8) และ (3.9) แทนในดัชนีสมรรถนะในสมการที่ (3.2) สามารถเขียนดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  ใหม่ ได้เป็น

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= \|\Theta \Delta \mathcal{U}(k) - \mathcal{E}(k)\|_{\mathcal{Q}}^2 + \|\Delta \mathcal{U}(k)\|_{\mathcal{R}}^2 \\ &= [\Delta \mathcal{U}(k)^T \Theta^T - \mathcal{E}(k)^T] \mathcal{Q} [\Theta \Delta \mathcal{U}(k) - \mathcal{E}(k)] + \Delta \mathcal{U}(k)^T \mathcal{R} \Delta \mathcal{U}(k) \\ &= \mathcal{E}(k)^T \mathcal{Q} \mathcal{E}(k) - \Delta \mathcal{U}(k)^T 2\Theta^T \mathcal{Q} \mathcal{E}(k) + \Delta \mathcal{U}(k)^T [\Theta^T \mathcal{Q} \Theta + \mathcal{R}] \Delta \mathcal{U}(k) \end{aligned} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรืออยู่ในรูป

$$\mathcal{J} = \text{const} - \Delta \mathcal{U}(k)^T \mathcal{G} + \Delta \mathcal{U}(k)^T \mathcal{H} \Delta \mathcal{U}(k) \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$\mathcal{G} = 2\Theta^T \mathcal{Q} \mathcal{E}(k)$$

$$\mathcal{H} = \Theta^T \mathcal{Q} \Theta + \mathcal{R}$$

และ  $\text{const} = \mathcal{E}(k)^T \mathcal{Q} \mathcal{E}(k)$  ซึ่งมีค่าคงที่ ณ แต่ละการคำนวณ

คำตอบของการทำให้ดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  ในสมการที่ (3.10) มีค่าน้อยที่สุดจะให้เวกเตอร์  $\Delta \mathcal{U}(k)_{opt}$  โดยองค์ประกอบแรกของเวกเตอร์  $\Delta \mathcal{U}(k)_{opt}$  ถูกใช้เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด  $\Delta u(k)_{opt}$  ดังอธิบายโดยสมการที่ (3.12)

$$\Delta u(k)_{opt} = \begin{bmatrix} I_p & \underbrace{0_p \quad 0_p \quad 0_p}_{(H_n-1) \text{ times}} \end{bmatrix} \Delta \mathcal{U}(k)_{opt} \quad (3.12)$$

โดย  $I_p$  คือเมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) ขนาด  $p \times p$  และ  $0_p$  คือเมทริกซ์ศูนย์ (Zero matrix) ขนาด  $p \times p$  เมื่อ  $p$  คือขนาดของเวกเตอร์อินพุต และนำ  $\Delta u(k)_{opt}$  ที่ได้มาคำนวณสัญญาณควบคุม  $u(k)$  สำหรับกระบวนการจริงได้ดังนี้

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)_{opt} \quad (3.13)$$

การหาผลเฉลยซึ่งทำให้ดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  ในสมการที่ (3.10) มีค่าน้อยที่สุด และการคำนวณเมทริกซ์ที่จำเป็นจะถูกทำซ้ำทุกรอบการคำนวณ โดยขั้นตอนการหาผลเฉลยขึ้นอยู่กับว่ามีการพิจารณาว่าเป็นปัญหากรณีมีข้อจำกัด (Constrained problems) หรือปัญหากรณีไม่มีข้อจำกัด (Unconstrained problems) ดังจะได้อธิบายต่อไปในหัวข้อย่อย

### 3.1.1 ปัญหากรณีไม่มีข้อจำกัด

ในกรณีไม่มีข้อจำกัด ค่าต่ำสุดของดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  สามารถคำนวณเชิงวิเคราะห์ได้ โดยให้เกรเดียนต์ (Gradient) ของ  $\mathcal{J}$  ในสมการที่ (3.11) เป็นศูนย์ โดยเกรเดียนต์ของ  $\mathcal{J}$  หาได้ดังนี้

$$\nabla_{\Delta \mathbf{U}(k)} \mathcal{J} = -\mathbf{g} + 2\mathbf{H}\Delta \mathbf{U}(k) \quad (3.14)$$

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด  $\Delta \mathbf{U}(k)_{opt}$  จะได้

$$\Delta \mathbf{U}(k)_{opt} = \frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{g} \quad (3.15)$$

แต่ในการทดลองจริงพบว่าการแก้ปัญหา  $\Delta \mathbf{U}(k)_{opt}$  ที่เหมาะสมที่สุดในสมการที่ (3.15) ไม่ควรนำเมทริกซ์  $\mathbf{H}^{-1}$  มาใช้คำนวณ เนื่องจากเมทริกซ์  $\mathbf{H}$  โดยทั่วไปแล้วมีสถานะไม่เหมาะสม (Ill conditioned) ส่งผลให้เมทริกซ์  $\mathbf{H}^{-1}$  มีสถานะไม่เหมาะสมด้วย ซึ่งคำตอบที่ได้จะมีความผิดพลาดมากเมื่อทำการปิดเศษทิ้ง ดังนั้นการแก้ปัญหาจึงนิยมทำโดยการประมาณค่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least-squares)

เนื่องจากเมทริกซ์น้ำหนัก  $\mathbf{Q} \geq 0$  และ  $\mathbf{R} \geq 0$  ดังนั้นสามารถหาเมทริกซ์  $\mathbf{S}_{\mathbf{Q}}$  และ  $\mathbf{S}_{\mathbf{R}}$  ซึ่ง

$$\mathbf{S}_{\mathbf{Q}}^T \mathbf{S}_{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q} \quad \mathbf{S}_{\mathbf{R}}^T \mathbf{S}_{\mathbf{R}} = \mathbf{R} \quad (3.16)$$

ถ้า  $\mathbf{Q}$  และ  $\mathbf{R}$  เป็นเมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal matrix)  $\mathbf{S}_{\mathbf{Q}}$  และ  $\mathbf{S}_{\mathbf{R}}$  สามารถหาได้เพียงใส่รากที่สองแต่ละองค์ประกอบของเส้นทแยงมุมเท่านั้น แต่ถ้า  $\mathbf{Q}$  และ  $\mathbf{R}$  ไม่เป็นเมทริกซ์ทแยงมุม  $\mathbf{S}_{\mathbf{Q}}$  และ  $\mathbf{S}_{\mathbf{R}}$  สามารถหาได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีของ Cholesky (ฟังก์ชัน chol ในโปรแกรมแมทแลบ) สำหรับเมทริกซ์บวกแน่นอน (Positive definite matrices) หรือใช้ขั้นตอนวิธีอื่นเช่นเอสวีดี (Singular value decomposition: SVD) สำหรับเมทริกซ์กึ่งบวกแน่นอน (Semi positive definite matrices)

จากดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  ในสมการที่ (3.10) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= [\Delta \mathbf{U}(k)^T \mathbf{Q}^T - \mathbf{E}(k)^T] \mathbf{S}_{\mathbf{Q}}^T \mathbf{S}_{\mathbf{Q}} [\mathbf{Q} \Delta \mathbf{U}(k) - \mathbf{E}(k)] + \Delta \mathbf{U}(k)^T \mathbf{S}_{\mathbf{R}}^T \mathbf{S}_{\mathbf{R}} \Delta \mathbf{U}(k) \\ &= \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\mathbf{Q}} \{ \mathbf{Q} \Delta \mathbf{U}(k) - \mathbf{E}(k) \} \\ \mathbf{S}_{\mathbf{R}} \Delta \mathbf{U}(k) \end{bmatrix} \right\|^2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

ดังนั้นสมการที่ใช้แก้ปัญหของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหา  $\Delta \mathbf{U}(k)_{opt}$  คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} S_{\mathcal{E}} \{\ominus \Delta \mathcal{U}(k) - \mathcal{E}(k)\} \\ S_{\mathcal{R}} \Delta \mathcal{U}(k) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.18)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} S_{\mathcal{E}} \ominus \\ S_{\mathcal{R}} \end{bmatrix} \Delta \mathcal{U}(k) = \begin{bmatrix} S_{\mathcal{E}} \mathcal{E}(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

สมการที่ (3.19) อยู่ในรูปแบบ  $A\theta = b$  ซึ่งไม่มีผลเฉลยที่ถูกต้องแต่สามารถแก้ปัญหาที่ให้ความผิดพลาดน้อยที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดโดยใช้วิธีคิวอาร์ (QR) ซึ่งในโปรแกรมแมทแลปสามารถแก้ปัญหาเหล่านี้เพียงใช้คำสั่ง  $\theta_{opt} = A \setminus b$  โดยการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้จะมีค่าเหมือนกับการใช้  $\theta_{opt} = (A^T A)^{-1} A^T b$  ในสมการที่ (3.15) ดังนั้น  $\Delta \mathcal{U}(k)_{opt}$  สามารถหาได้ดังนี้

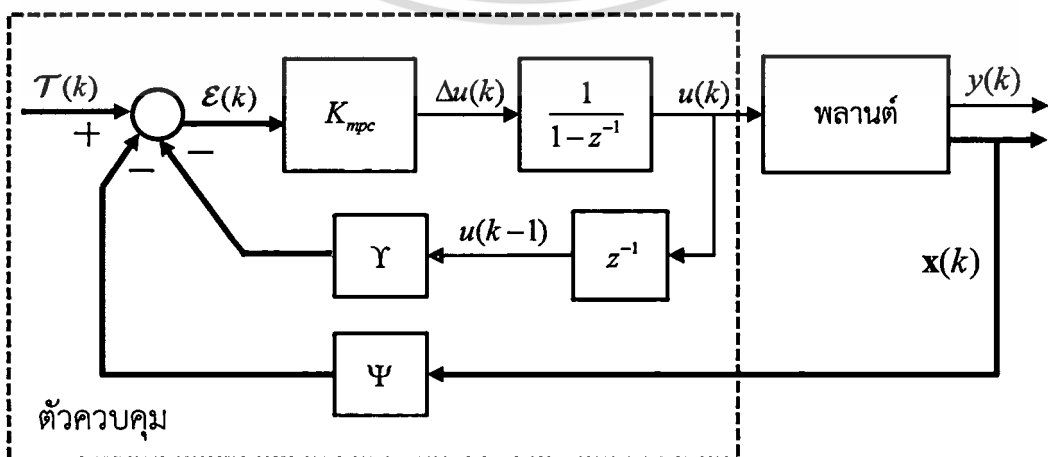
$$\Delta \mathcal{U}(k)_{opt} = \begin{bmatrix} S_{\mathcal{E}} \ominus \\ S_{\mathcal{R}} \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} S_{\mathcal{E}} \mathcal{E}(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

จากที่กล่าวมาปัญหาคณิตศาสตร์ไม่มีข้อจำกัดสามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปบล็อกไดแกรมได้ดังรูปที่ 3.1 เมื่อบล็อก  $K_{mpc}$  ระบุได้เป็น

$$K_{full} = \begin{bmatrix} S_{\mathcal{E}} \ominus \\ S_{\mathcal{R}} \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} S_{\mathcal{E}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$K_{mpc} = K_{full}(1:p,: ) \quad (3.22)$$

เมื่อ  $p$  คือขนาดของเวกเตอร์อินพุต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ปัญหากรณีมีข้อจำกัด

การหาค่าน้อยที่สุดของดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  สามารถรวมเอาข้อจำกัดต่าง ๆ ของสัญญาณควบคุม  $u(k)$  อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม  $\Delta u(k)$  และตัวแปรสถานะ  $x(k)$  มาใช้พิจารณาหา  $\Delta u(k)_{opt}$  ที่เหมาะสมที่สุดได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเพียงกรณีมีข้อจำกัดของ  $u$  และ  $\Delta u$  เท่านั้น แต่กรณีมีข้อจำกัดของตัวแปรสถานะสามารถนำมาพิจารณาในแนวทางเดียวกัน

กรณีมีข้อจำกัดของอินพุต อสมการแบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ ข้อจำกัดของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม  $\Delta u$  และข้อจำกัดสำหรับสัญญาณอินพุต  $u$  โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมจะต้องมีค่าไม่เกินค่าน้อยที่สุด  $\Delta u_{\min}$  และค่ามากที่สุด  $\Delta u_{\max}$  ในสมการที่ (3.23)

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+j) \leq \Delta u_{\max} \quad \forall j = 0, \dots, H_u \quad (3.23)$$

ขอบเขตของ  $\Delta u$  สามารถเขียนเป็นอสมการเชิงเส้น (Linear inequalities) ต่อไปนี้ เมื่อ  $N_{\Delta u}$  เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)

$$N_{\Delta u} \cdot \Delta u \leq p_{\Delta u}'' \quad (3.24)$$

$$-N_{\Delta u} \cdot \Delta u \leq p_{\Delta u}' \quad (3.25)$$

เวกเตอร์  $p_{\Delta u}''$  และ  $p_{\Delta u}'$  กำหนดได้ดังนี้

$$p_{\Delta u}'' = [\Delta u_{\max} \quad \dots \quad \Delta u_{\max}]^T \quad p_{\Delta u}' = [-\Delta u_{\min} \quad \dots \quad -\Delta u_{\min}]^T$$

ในทุกการคำนวณสัญญาณควบคุม  $u$  จะถูกจำกัดเนื่องจากความอึดตัวของตัวขับเคลื่อน ข้อจำกัดดังกล่าวแสดงได้ดังนี้

$$u_{\min} \leq u(k+j) \leq u_{\max} \quad \forall j = 0, \dots, H_u \quad (3.26)$$

เนื่องจากตัวแปรอิสระของดัชนีสมรรถนะในสมการที่ (3.11) คือ  $\Delta u$  ดังนั้นสมการที่ (3.26) จะต้องถูกแปลงเป็นอสมการเชิงเส้นของ  $\Delta u$  ซึ่งสัญญาณควบคุม  $u(k+j)$  สามารถแสดงได้เป็น

$$u(k+j) = u(k-1) + \sum_{i=0}^j \Delta u(k+i) \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การนำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบค่า  $u(k-1)$  ที่ขั้นตอนเวลา  $k$  อสมการเชิงเส้นของสมการที่ (3.26) สามารถเขียนใหม่เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด  $\Delta u$  ได้ดังนี้

$$\sum_{i=0}^j \Delta u(k+i) \leq u_{\max} - u(k-1) \quad (3.28)$$

$$-\sum_{i=0}^j \Delta u(k+i) \leq -u_{\min} + u(k-1) \quad (3.29)$$

สมการที่ (3.28) และ (3.29) ต้องเป็นจริงในขอบเขตการควบคุมจาก  $j = 0, \dots, H_u$  และสามารถจัดรูปให้เป็นระบบเชิงเส้นของอสมการ ดังนี้

$$\mathbf{N}_u \cdot \Delta u \leq \mathbf{p}_u'' \quad (3.30)$$

$$-\mathbf{N}_u \cdot \Delta u \leq \mathbf{p}_u' \quad (3.31)$$

เมื่อ

$$\mathbf{N}_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p}_u'' = [u_{\max} - u(k-1) \quad \dots \quad u_{\max} - u(k-1)]^T$$

$$\mathbf{p}_u' = [-u_{\min} + u(k-1) \quad \dots \quad -u_{\min} + u(k-1)]^T$$

อสมการที่ (3.24), (3.25), (3.30) และ (3.31) สามารถรวมเป็นปัญหาหนึ่งอสมการในรูป  $\mathcal{N} \cdot \Delta u \leq \mathcal{P}$  ซึ่งทำให้การแก้ปัญหาคณิตมีข้อจำกัดเป็นการแก้ปัญหาคณิตเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic programming) ต่อไปนี้

$$\min_{\Delta u} \mathcal{J} \quad \text{subject to} \quad \mathcal{N} \cdot \Delta u \leq \mathcal{P} \quad (3.32)$$

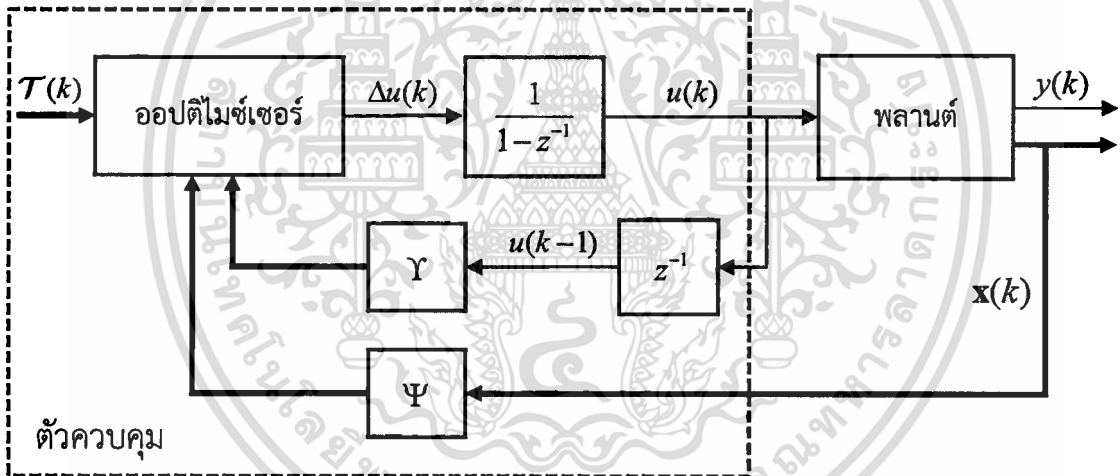
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$\mathcal{N} = \begin{bmatrix} N_{\Delta u} \\ -N_{\Delta u} \\ N_u \\ -N_u \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \mathcal{P} = \begin{bmatrix} P_{\Delta u}^u \\ P_{\Delta u}^l \\ P_u^u \\ P_u^l \end{bmatrix}$$

โปรแกรมเชิงเส้นกำลังสองในสมการที่ (3.32) ต้องถูกแก้หาคำตอบทุกขั้นตอนด้วยออปติไมซ์เซอร์ (Optimizer) ซึ่งอาศัยการคำนวณด้วยวิธีเชิงเลขที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นกำลังสอง ซึ่งในการแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสองเชิงเส้นแบบคอนเวกซ์ (Convex quadratic program) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาศัยโปรแกรมแมทแลบ ด้วยฟังก์ชัน quadprog [20]

โครงสร้างของการควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด

### 3.2 ตัวสังเกตสถานะ

ตัวสังเกตสถานะสามารถนำมาใช้ร่วมกับตัวควบคุมเอ็มพีซีในกรณีตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้ โดยวิธีเอ็มพีซียังคงเดิมแต่ตัวแปรสถานะ  $x(k)$  จะถูกแทนที่ด้วย  $\hat{x}(k|k)$  ซึ่งได้มาจากตัวสังเกตสถานะ ดังนั้นเวกเตอร์เอาต์พุตจากการทำนาย  $\mathcal{Y}(k)$  สมการที่ (3.8) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\mathcal{Y}(k) = \Psi \hat{x}(k|k) + \Upsilon u(k-1) + \Theta \Delta U(k) \quad (3.33)$$

และเมทริกซ์  $\mathcal{E}(k)$  สมการที่ (3.9) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\mathcal{E}(k) = \mathcal{T}(k) - \Psi \tilde{\mathbf{x}}(k|k) - \Upsilon u(k-1) \quad (3.34)$$

ตัวสังเกตสถานะแสดงในรูปสมการปริภูมิสถานะได้ดังนี้

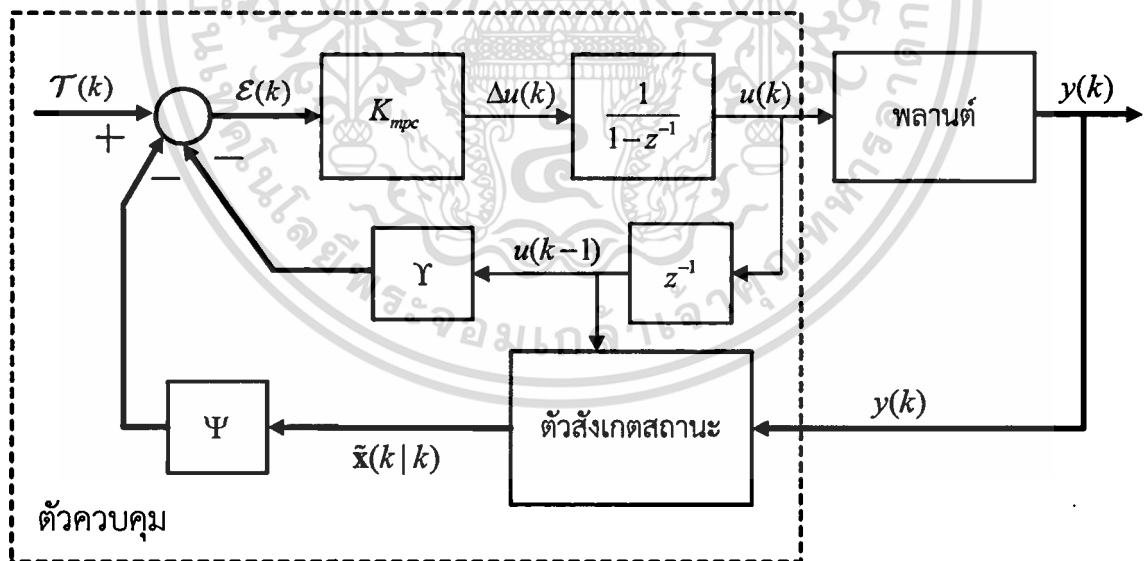
$$\tilde{\mathbf{x}}(k|k) = \tilde{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{L}'[y(k) - \tilde{y}(k|k-1)] \quad (3.35)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(k|k) + \mathbf{B}u(k) \quad (3.36)$$

$$\tilde{y}(k|k-1) = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(k|k-1) \quad (3.37)$$

โดยเวกเตอร์  $\mathbf{L}' = \mathbf{A}\mathbf{L}$  เมื่อ  $\mathbf{L}$  ออกแบบโดยเลือกวางโพลของตัวสังเกตสถานะให้ไว้กว่าพฤติกรรมของระบบวงปิด สำหรับโปรแกรมแมทแลปสามารถคำนวณเวกเตอร์  $\mathbf{L}$  โดยใช้คำสั่ง place หรือ acker

โครงสร้างของการควบคุมเอ็มพีซีที่เพิ่มตัวสังเกตสถานะ สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบควบคุมเอ็มพีซีกับตัวสังเกตสถานะ

## บทที่ 4

### การจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองตัวควบคุมเอ็มพีซีกับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรดาง โดยใช้โปรแกรมแมทแลป การออกแบบตัวควบคุมเอ็มพีซีในวิทยานิพนธ์เล่มนี้อาศัยแบบจำลองของอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรดางโดยประมาณเชิงเส้น ณ จุดสมดุลบน และจัดให้อยู่ในรูปของสมการปริภูมิสถานะเวลาดีสครีตในสมการที่ (2.23) และ (2.24) ตัวควบคุมที่ออกแบบไว้จะถูกนำไปใช้ควบคุมแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรดางในสมการที่ (2.8) และไม่มีระดับอิมิตัวของสัญญาณควบคุมในแบบจำลอง

การออกแบบตัวควบคุมเอ็มพีซีสำหรับแบบจำลองที่ไม่มีเสถียรภาพ จำเป็นต้องเลือกขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  อย่างเหมาะสม เพราะมีผลต่อเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกขอบเขตการทำนายจึงกำหนดขอบเขตการควบคุมให้คงที่  $H_u = 5$  และขอบเขตการทำนายตอนล่าง  $H_w = 1$  โดยจะศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  และคาบการซีกตัวอย่าง  $T_s$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี

การจำลองแบ่งออกเป็นสามหัวข้อใหญ่ โดยสองหัวข้อแรกคือการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด และการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด โดยการจำลองในแต่ละหัวข้อจะพิจารณากรณีตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้ โดยเอาต์พุตของระบบแบ่งเป็นกรณีหนึ่งเอาต์พุต คือตำแหน่งบรรดาง  $x$  เพียงลำพัง และกรณีสองเอาต์พุต คือมุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งบรรดาง  $x$  ที่ถูกพิจารณาในดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  ของการควบคุมเอ็มพีซี ตลอดจนการออกแบบและการใช้งานตัวสังเกตสถานะ โดยเลือกวงโพลของตัวสังเกตสถานะเวลาดีสครีตที่  $[0.2, 0.25, 0.3, 0.35]$  ในทุกการจำลอง และหัวข้อที่สามนำเสนอการเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได สัญญาณอ้างอิงรูปชายน และสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม

#### 4.1 การใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด

ในการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด  $\Delta U(k)_{opt}$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.20) โดยการจำลองจะปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  และคาบการซีกตัวอย่าง  $T_s$  ซึ่งสามารถแบ่งพิจารณาเป็นสองกรณี คือ กรณีอัตราการซีกตัวอย่างที่เร็วใช้คาบการซีกตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาทีกับกรณีอัตราการซีกตัวอย่างที่ช้าใช้คาบการซีกตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 100 มิลลิวินาที และกำหนดสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันไดให้บรรดางเคลื่อนที่ไปหนึ่งเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 อัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว

การจำลองในหัวข้อนี้กำหนดให้คาบการชักตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที โดยพิจารณาเอาต์พุตของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรราง และความสามารถในการวัดตัวแปรสถานะเป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.1.1.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

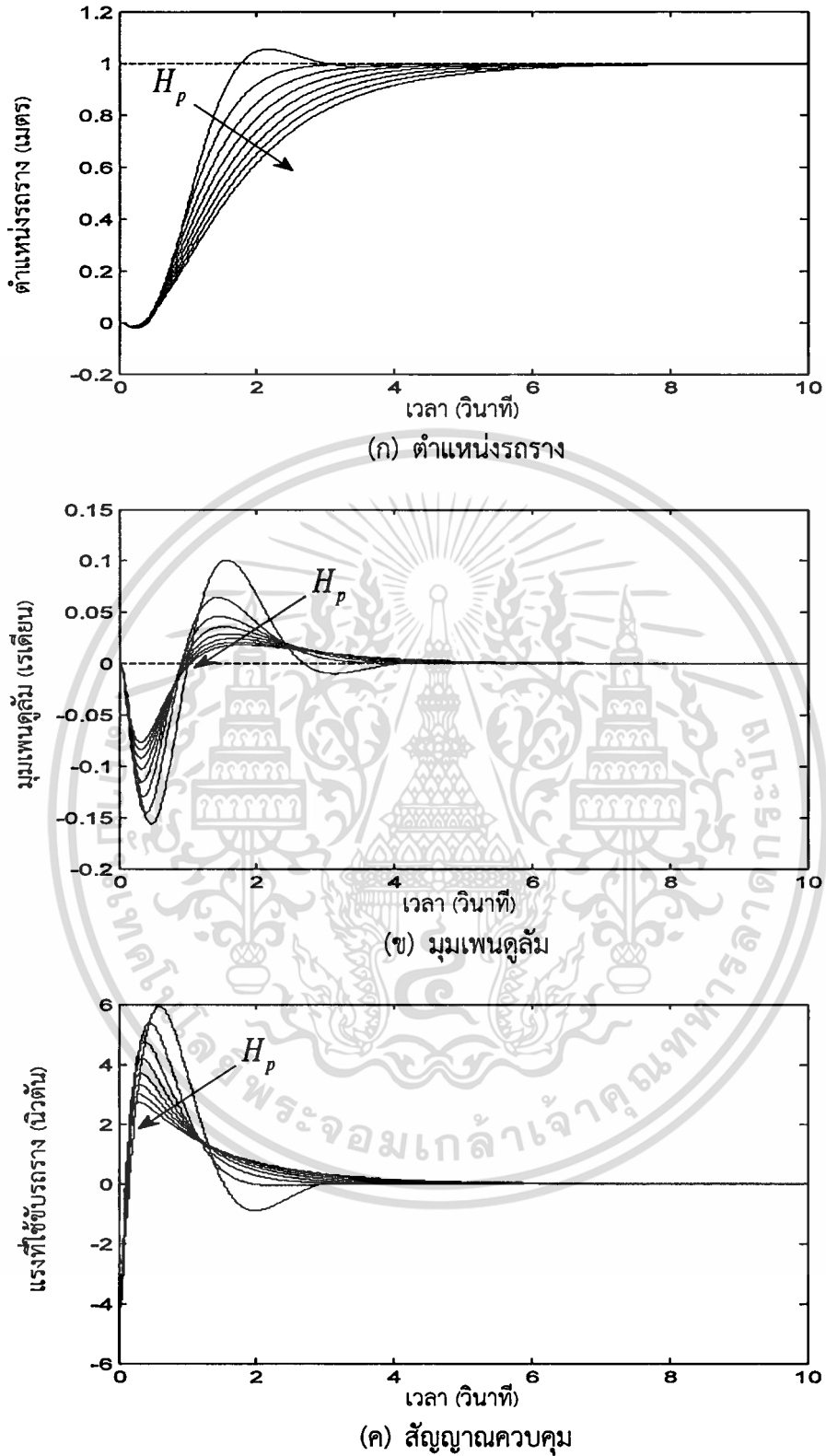
การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือตำแหน่งบรรราง  $x$  จากการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี พบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 150 ถึง 680 แต่เนื่องจากระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรรางเป็นระบบที่มีผลตอบสนองที่เร็ว ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาช่วง  $H_p$  เท่ากับ 170 ถึง 310 โดยผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.1 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนายตอนบน $H_p$ | เวลาเข้าที่ ( $\pm 2\%$ ) $t_s$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบนสูงสุด $ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด $ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|---------------------------|--|--|--|
| 170                       | 2.7300                                   | 0.1566   | 5.9264                                       |
| 190                       | 2.5204                                   | 0.1458   | 5.3813                                       |
| 210                       | 3.1903                                   | 0.1301   | 4.7579                                       |
| 230                       | 3.7493                                   | 0.1154   | 4.1924                                       |
| 250                       | 4.2779                                   | 0.1029   | 4.0882                                       |
| 270                       | 4.7933                                   | 0.0926   | 3.9676                                       |
| 290                       | 5.3008                                   | 0.0841   | 3.7856                                       |
| 310                       | 5.8020                                   | 0.0770   | 3.5811                                       |

จากการจำลองพบว่าบรรรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยเกินไปเช่น  $H_p = 170$  จะปรากฏการฟุ้งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งบรรราง แต่การฟุ้งเกินดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง และสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบบจะน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น (Rise time)  $t_r$  และเวลาเข้าที่ (Settling time)  $t_s$  นานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เฉพาะงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.1** ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกรณีหนึ่งเฮิร์ตพูด และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือมุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรอราง  $x$  จากการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  พบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรอรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 70 ถึง 580 โดยเลือกพิจารณาช่วง  $H_p$  ที่ 130 ถึง 290 ซึ่งผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.2 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการใช้ตัวแปรอย่างรวดเร็ว

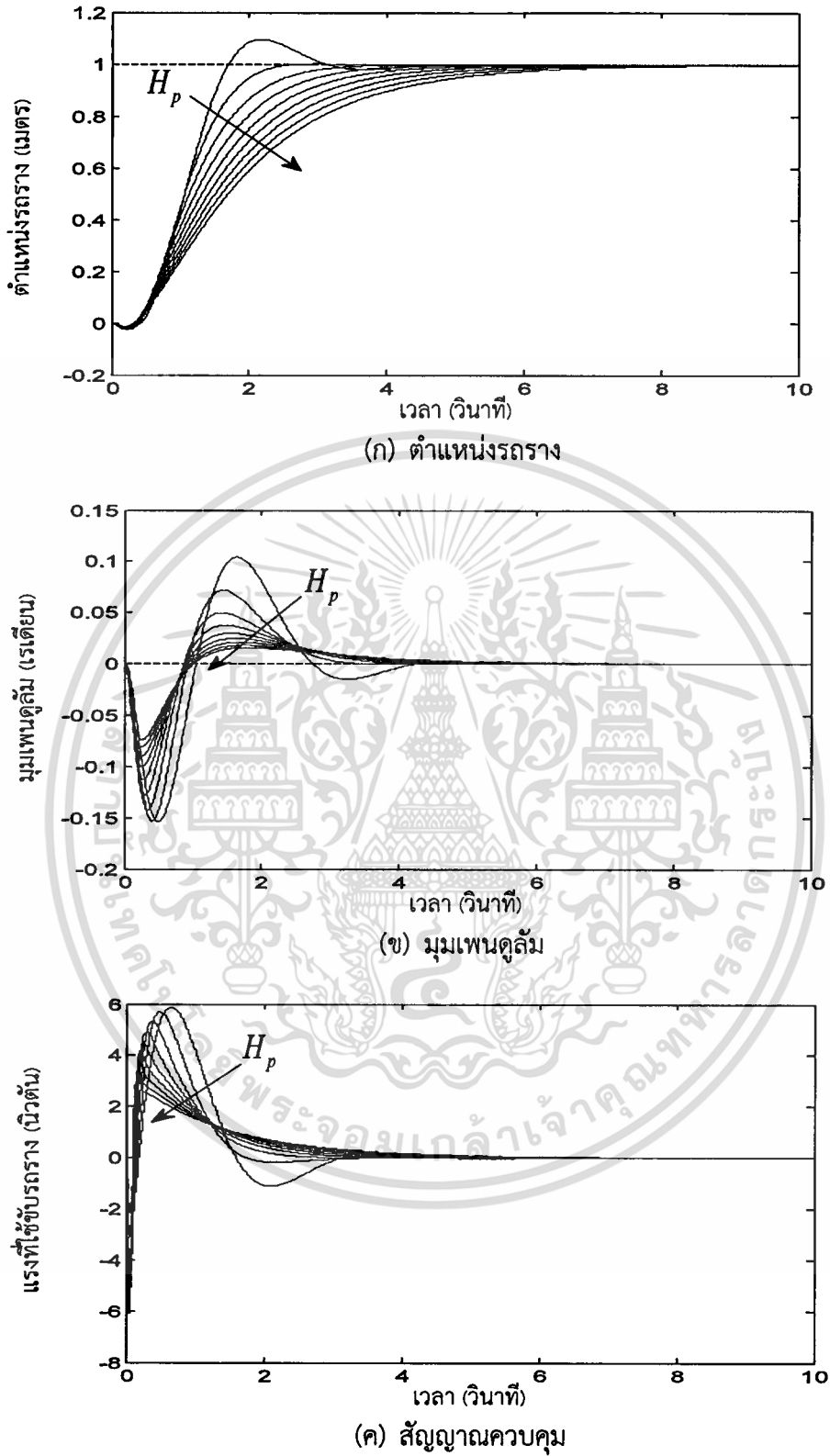
#### กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนาย<br>ตอนบน<br>$H_p$ | เวลาเข้าที่<br>( $\pm 2\%$ )<br>$t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบน<br>สูงสุด<br>$ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณ<br>ควบคุมสูงสุด<br>$ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|----------------------------------|--|---|---|
| 130                              | 2.9447   | 0.1538  | 5.8629  |
| 150                              | 2.2292   | 0.1533  | 5.6991  |
| 170                              | 2.9780   | 0.1423  | 5.3306  |
| 190                              | 3.5870   | 0.1276  | 4.7326  |
| 210                              | 4.1502   | 0.1130  | 5.3190  |
| 230                              | 4.6939   | 0.1002  | 5.6721  |
| 250                              | 5.2278   | 0.0896  | 5.9804  |
| 270                              | 5.7561   | 0.0810  | 6.0951  |
| 290                              | 6.2807   | 0.0740  | 6.0570  |

ในทำนองเดียวกันกับกรณีหนึ่งเอาต์พุต ทุก ๆ ผลการจำลองในกรณีสองเอาต์พุต รอรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยเกินไป เช่น  $H_p = 130$  จะปรากฏการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรอราง แต่การพุ่งเกินดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง แต่ข้อเสียเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  นานขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นหาก  $H_p$  มีค่ามากเกินไประบบจะจ่ายสัญญาณควบคุมสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้นการ

ทำงานโดยสังเกตได้ในรูปที่ 4.2(ค) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชັกตัวอย่างที่เร็วกรณีสองเฮิร์ตซุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

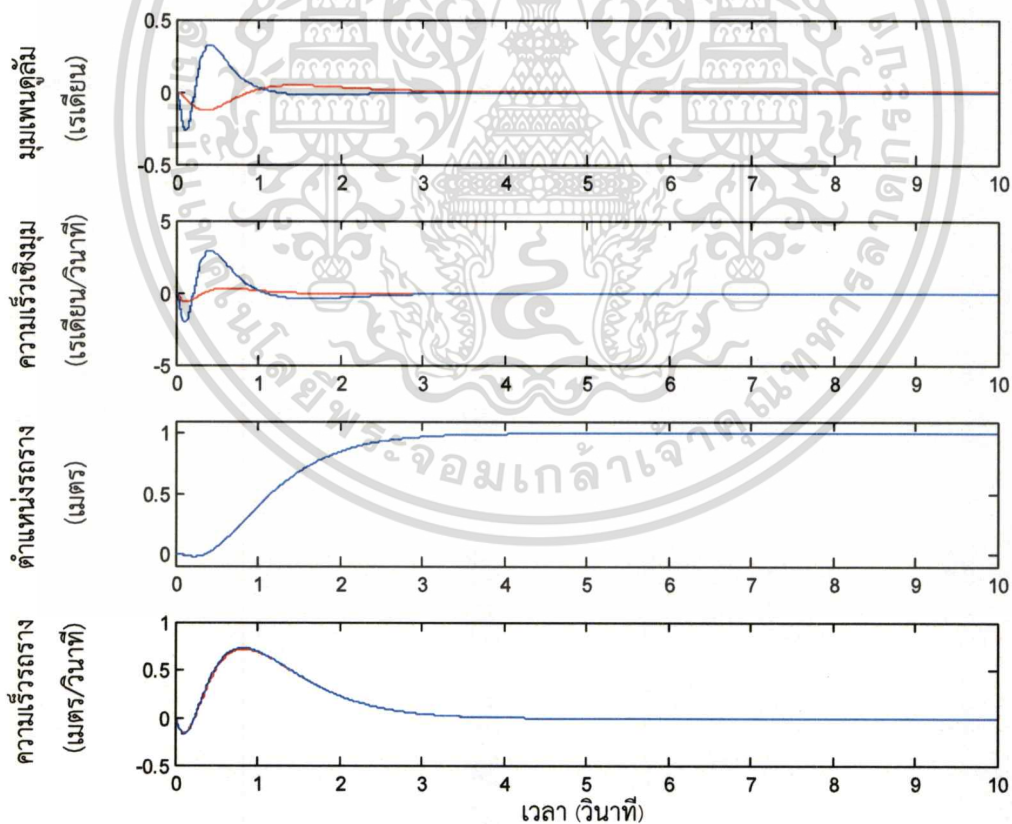
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1.3 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือตำแหน่งรอราง  $x$  เนื่องจากกรณีนี้ตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นจะใช้ตัวสังเกตสถานะในการสังเคราะห์ตัวแปรสถานะ โดยโครงสร้างตัวสังเกตสถานะ และการออกแบบอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2

จากการจำลองพบว่าระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรอรางไม่สามารถรักษาเสถียรภาพ ณ จุดสมดุลจนไว้ได้ ดังนั้นจึงตรวจสอบค่าของตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้นกับค่าจริง โดยเลือกใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีในกรณี 4.1.1.1 ที่  $H_p$  เท่ากับ 210 และใช้ค่าตัวแปรสถานะจริงป้อนให้ระบบ ไม่ใช่ค่าตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้นจากตัวสังเกตสถานะในการป้อนกลับ แต่ต่อตัวสังเกตสถานะกับระบบเพื่อเปรียบเทียบค่าตัวแปรสถานะจริงกับค่าตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้น โดยได้ผลการจำลองดังรูปที่ 4.3 เมื่อเส้นสีแดงคือตัวแปรสถานะจริง และเส้นสีน้ำเงินคือตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้น

จากผลการจำลองพบว่าตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้นของมุมและความเร็วเชิงมุมเพนดูลัมมีความแตกต่างจากตัวแปรสถานะจริงอยู่มาก โดยไม่สามารถติดตามค่าจริงได้เร็วพอในช่วงผลตอบสนองชั่วคราว เป็นเหตุให้เมื่อนำค่าจากตัวสังเกตสถานะมาใช้ ระบบควบคุมจึงไม่มีเสถียรภาพ



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้น และตัวแปรสถานะจริง  
ในกรณีหนึ่งเอาต์พุต

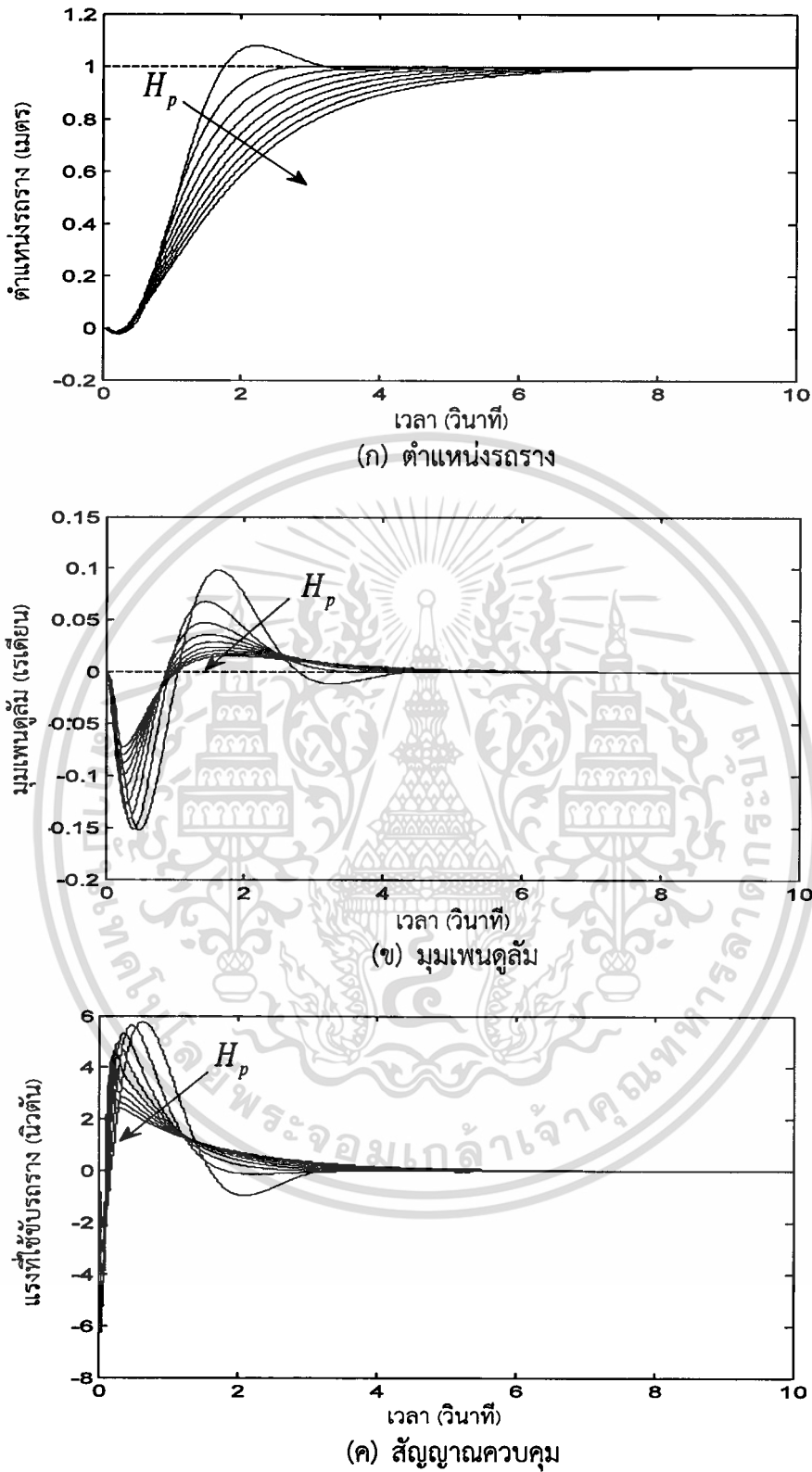
#### 4.1.1.4 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุตคือมุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรยางค์  $x$  เนื่องจากตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นจึงใช้ตัวสังเกตสถานะในการสังเคราะห์ตัวแปรสถานะ

จากการจำลองพบว่าสามารถใช้ตัวสังเกตสถานะร่วมกับตัวควบคุมเอ็มพีซีในกรณีที่พิจารณา ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรยางค์มีสองเอาต์พุต และหลังจากปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี พบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรยางค์สามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 70 ถึง 580 โดยเลือกพิจารณาช่วง  $H_p$  ที่ 130 ถึง 290 ซึ่งผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.4 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการซีกตัวอย่างที่เร็ว  
กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนาย<br>ตอนบน<br>$H_p$ | เวลาเข้าที่<br>( $\pm 2\%$ )<br>$t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบน<br>สูงสุด<br>$ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณ<br>ควบคุมสูงสุด<br>$ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|----------------------------------|--|---|---|
| 130                              | 2.9581   | 0.1521  | 5.7650  |
| 150                              | 2.3304   | 0.1519  | 5.6388  |
| 170                              | 3.0652   | 0.14113   | 5.3249  |
| 190                              | 3.6717   | 0.1265  | 4.9814  |
| 210                              | 4.2362   | 0.1119  | 5.4412  |
| 230                              | 4.7830   | 0.0990  | 5.7994  |
| 250                              | 5.3208   | 0.0884  | 6.1140  |
| 270                              | 5.8535   | 0.0797  | 6.2570  |
| 290                              | 6.3829   | 0.0727  | 6.2430  |



**รูปที่ 4.4** ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชັกด้อย่างที่เร็วกรณีสองเฮิร์ตพุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันกับการจำลองกรณีสองเอาต์พุตที่สามารถวัดตัวแปรสถานะได้ในหัวข้อ 4.1.1.2 พบว่ารถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยเกินไปจะปรากฏการฟุ้งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่การฟุ้งเกินดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง แต่ข้อเสียเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_s$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  นานขึ้น และถ้าเลือกค่า  $H_p$  น้อยเกินไประบบจะจ่ายสัญญาณควบคุมสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้นการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกรณีสองเอาต์พุตที่ใช้ตัวสังเกตสถานะกับกรณีสองเอาต์พุตที่ตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ พบว่า ณ ค่า  $H_p$  ที่เท่ากัน กรณีที่ใช้ตัวสังเกตสถานะจะมีเวลาเข้าที่ช้ากว่ากรณีที่สามารถวัดตัวแปรสถานะเล็กน้อย

#### 4.1.2 อัตราการชกตัวอย่างที่ช้า

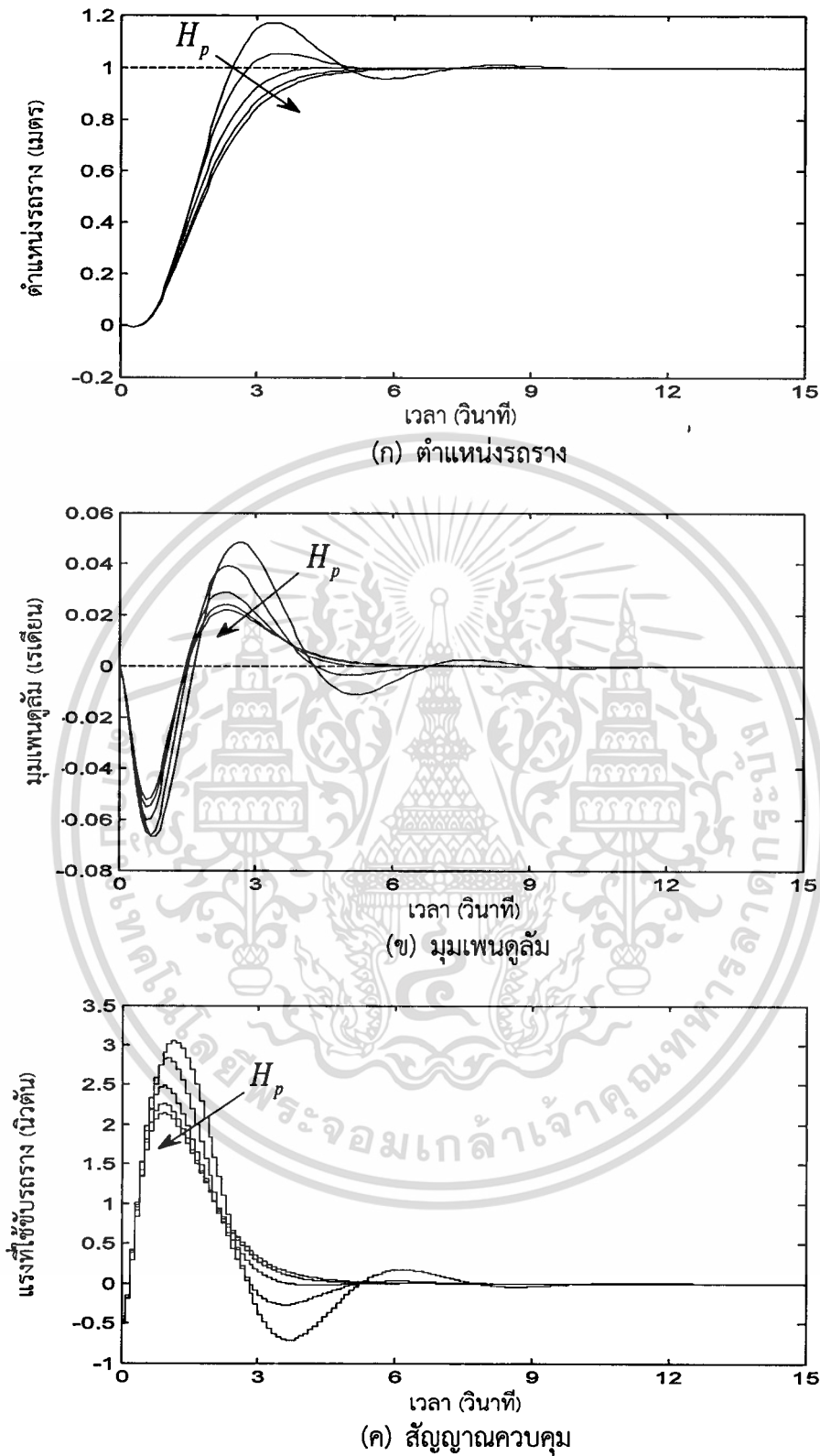
การจำลองในหัวข้อนี้กำหนดให้คาบการชกตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 100 มิลลิวินาที โดยพิจารณาเอาต์พุตของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง และความสามารถในการวัดตัวแปรสถานะเป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.1.2.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุตคือตำแหน่งรถราง  $x$  จากการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี พบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 18 ถึง 70 โดยเลือกพิจารณาช่วง 22 ถึง 40 ซึ่งผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.5 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า  
กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

| ขอบการทำนาย<br>ตอนบน<br>$H_p$ | เวลาเข้าที่<br>( $\pm 2\%$ )<br>$t_s$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบน<br>สูงสุด<br>$ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณ<br>ควบคุมสูงสุด<br>$ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|-------------------------------|--|---|---|
| 22                            | 6.7432   | 0.0668  | 3.0484  |
| 25                            | 4.5256   | 0.0664  | 2.8365  |
| 30                            | 3.6106   | 0.0600  | 2.4907  |
| 35                            | 4.4179   | 0.0551  | 2.2652  |
| 40                            | 4.8200   | 0.0522  | 2.1500  |



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้ากรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันกับกรณีหนึ่งเอาต์พุตในอัตราการชักรั่วอย่างเร็วในหัวข้อ 4.1.1.1 พบว่า ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยเกินไป เช่น  $H_p = 18$  ถึง 25 จะปรากฏการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรอราง แต่การพุ่งเกินดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลงและสัญญาณควบคุมที่ใช้ในระบบจะน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_s$  นานขึ้น

ความแตกต่างระหว่างอัตราการชักรั่วอย่างช้า และอัตราการชักรั่วอย่างเร็วในกรณีหนึ่งเอาต์พุต คือ สมรรถนะของระบบวงปิดที่ใช้อัตราการชักรั่วอย่างเร็วจะดีกว่าการใช้อัตราการชักรั่วอย่างช้าโดยใช้เวลาเข้าที่สั้นกว่า แต่ช่วงการทำงานสำหรับกรณีอัตราชักรั่วอย่างเร็วจะต้องใช้ขอบเขตการทำงานตอนบนที่มากกว่ากรณีอัตราชักรั่วอย่างช้า ทำให้ตัวควบคุมต้องใช้ฮาร์ดแวร์ (PIC, AVR, ฯลฯ) ที่มีหน่วยความจำและความเร็วในการประมวลผลมากขึ้น โดยทั่วไปจะมีราคาแพงขึ้น

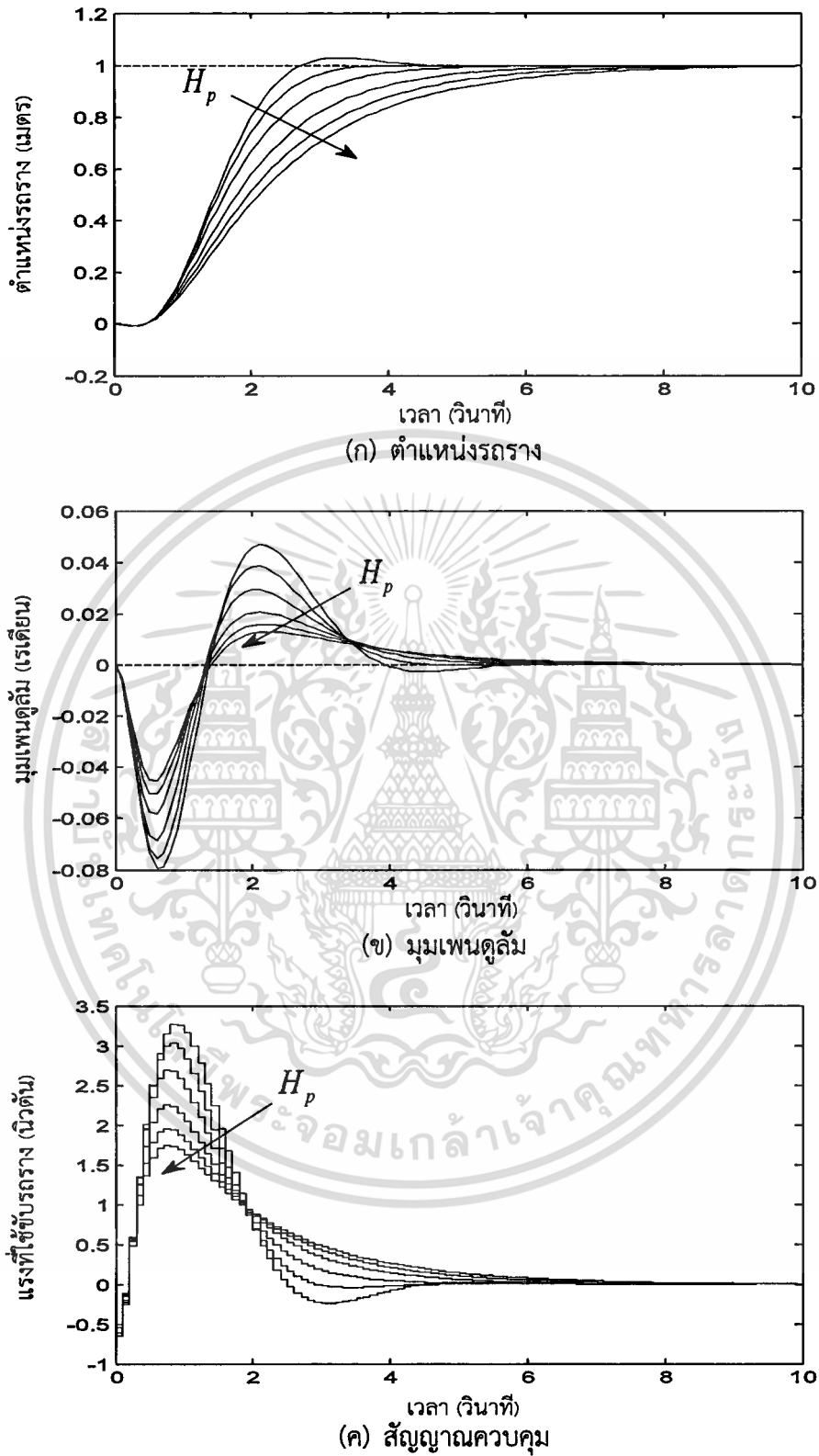
#### 4.1.2.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุตคือ มุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรอราง  $x$  ซึ่งการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำงานตอนบน  $H_p$  พบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรอรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 13 ถึง 63 โดยเลือกพิจารณา  $H_p$  ช่วง 20 ถึง 40 ซึ่งผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.6 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชักรั่วอย่างช้า  
กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำงานตอนบน<br>$H_p$ | เวลาเข้าที่<br>( $\pm 2\%$ )<br>$t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบน<br>สูงสุด<br>$ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณ<br>ควบคุมสูงสุด<br>$ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|------------------------------|--|---|---|
| 20                           | 3.7485   | 0.0793  | 3.2645  |
| 22                           | 3.1893   | 0.0757  | 3.0310  |
| 25                           | 4.2719   | 0.0686  | 2.6850  |
| 30                           | 5.5549   | 0.0580  | 2.2547  |
| 35                           | 6.5993   | 0.0504  | 1.9544  |
| 40                           | 7.4933   | 0.0451  | 1.7460  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ซ้ำกรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองเหมือนกับกรณีหนึ่งเอาต์พุต คือรถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยเกินไปจะปรากฏการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่การพุ่งเกินดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง และสัญญาณควบคุมที่ใช้ขับเคลื่อนจะน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_s$  นานขึ้น

ความแตกต่างระหว่างกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า และกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วในกรณีสองเอาต์พุต คือ สมรรถนะของระบบวงปิดที่ใช้อัตราการชกตัวอย่างที่เร็วจะดีกว่าการใช้อัตราการชกตัวอย่างที่ช้าโดยใช้เวลาเข้าที่สั้นกว่า แต่ช่วงการทำนายสำหรับกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วจะต้องใช้ขอบเขตการทำนายตอนบนที่มากกว่ากรณีอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า

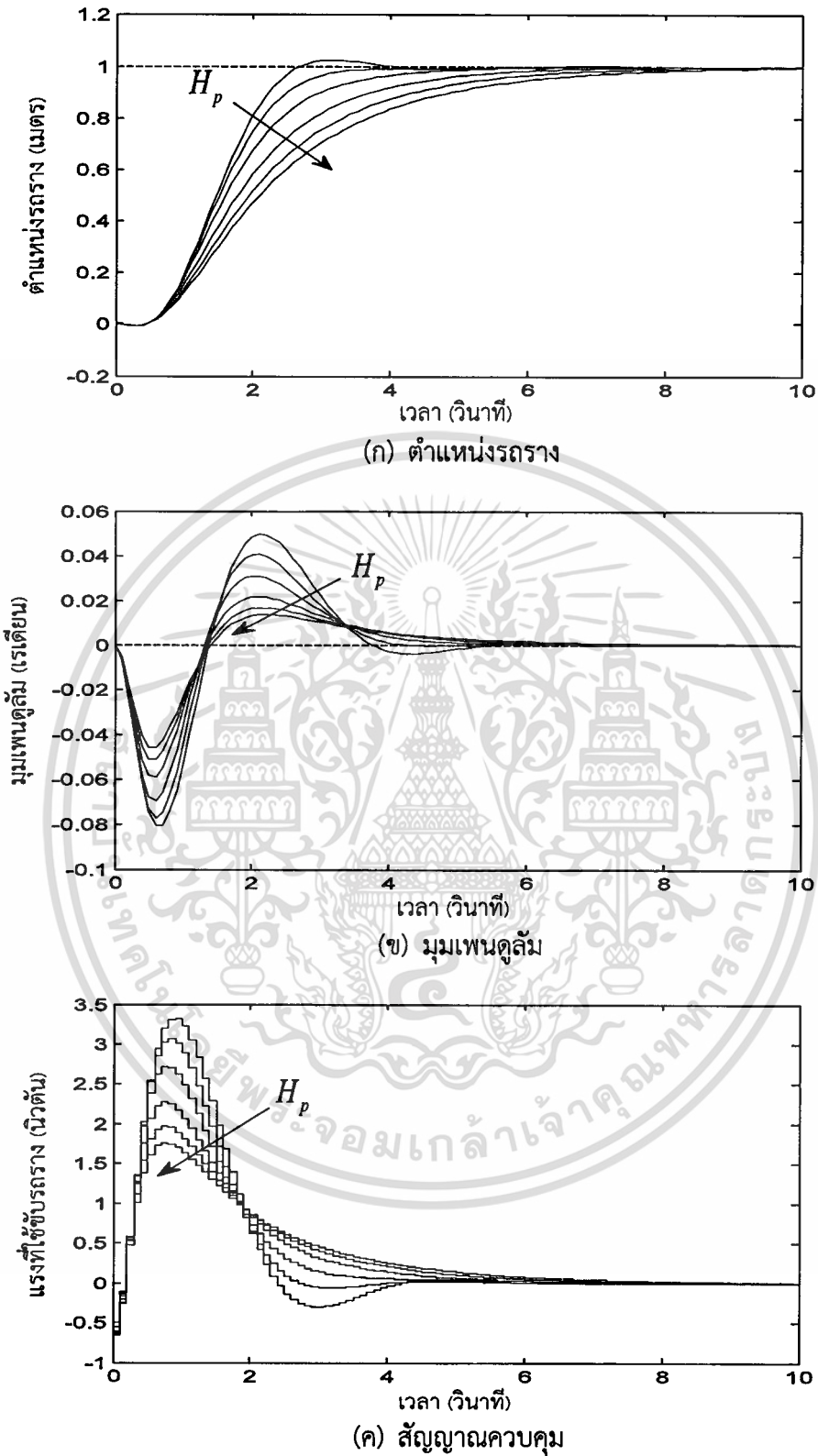
#### 4.1.2.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือ มุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรถราง  $x$  และอาศัยตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้นจากตัวสังเกตสังเกตสถานะ

จากการจำลองพบว่าระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางสามารถรักษาเสถียรภาพได้ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 13 ถึง 63 โดยเลือกพิจารณาช่วง  $H_p$  เท่ากับ 20 ถึง 40 ซึ่งผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.7 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมรรถนะจากการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนายตอนบน $H_p$ | เวลาเข้าที่ ( $\pm 2\%$ ) $t_s$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบนสูงสุด $ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด $ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|---------------------------|--|--|--|
| 20                        | 3.5249                                   | 0.0804   | 3.3146                                       |
| 22                        | 3.2609                                   | 0.0768   | 3.0724                                       |
| 25                        | 4.5502                                   | 0.0696   | 2.7172                                       |
| 30                        | 5.7541                                   | 0.0588   | 2.2790                                       |
| 35                        | 6.7751                                   | 0.0510   | 1.9739                                       |
| 40                        | 7.6599                                   | 0.0456   | 1.7628                                       |



**รูปที่ 4.7** ผลการจำลองกรณีไม่มีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เข้ากรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองพบว่ารถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีควมผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยเกินไปจะปรากฏการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่การพุ่งเกินดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลงและสัญญาณควบคุมที่ใช้ในระบบจะน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_s$  นานขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกรณีสองเอาต์พุตที่ใช้ตัวสังเกตสถานะกับกรณีสองเอาต์พุตที่ตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ในหัวข้อ 4.1.2.2 พบว่าถ้า  $H_p$  เท่ากัน กรณีที่ใช้ตัวสังเกตสถานะจะมีเวลาเข้าที่ช้ากว่ากรณีที่สามารถวัดตัวแปรสถานะเล็กน้อย

## 4.2 การใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด

ปัญหาข้อจำกัดต่าง ๆ ของสัญญาณควบคุม  $u(k)$  อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม  $\Delta u(k)$  และตัวแปรสถานะ  $x(k)$  สามารถนำมาพิจารณาในการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด  $\Delta u(k)_{opt}$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี ดังอธิบายในหัวข้อ 3.1.2

จากการจำลองการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัดในหัวข้อ 4.1 เห็นได้ว่าการขับรถรางให้เคลื่อนที่ไปยังจุดอ้างอิงที่ระยะ 1 เมตร ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุดในหลายการจำลองมีค่าเกิน 3 นิวตัน โดยเฉพาะเห็นได้ชัดเจนในกรณี  $T_r$  น้อย ซึ่งหากนำไปใช้งานจริง ย่อมไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากตัวขับเคลื่อนในท้องปฏิบัติการมีระดับการอิ่มตัวที่  $\pm 3$  นิวตัน ดังนั้นการจำลองในหัวข้อนี้ได้เลือกพิจารณาเฉพาะข้อจำกัดของสัญญาณควบคุม  $u(k)$  โดยกำหนดให้สัญญาณควบคุม  $u(k)$  มีข้อจำกัดที่  $\pm 3$  นิวตัน เพื่อให้สอดคล้องกับระบบในท้องปฏิบัติการ ซึ่งข้อจำกัดดังกล่าวต้องจัดให้อยู่ในระบบเชิงเส้นของสมการที่ (3.30) และ (3.31) เพื่อใช้โปรแกรมกำลังสองเชิงเส้นมาช่วยแก้ปัญหา สำหรับการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแลปสามารถใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูปของโปรแกรมกำลังสองเชิงเส้น คือ quadprog ซึ่งอยู่ใน Optimization toolbox โดยการจำลองการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัดจะเหมือนกับกรณีไม่มีข้อจำกัดที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โดยปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  และคาบการชกตัวอย่าง  $T_r$  เพื่อสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งแบ่งเป็นกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วโดยใช้คาบการชกตัวอย่าง  $T_r$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที และกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่ช้าใช้คาบการชกตัวอย่าง  $T_r$  เท่ากับ 100 มิลลิวินาที

### 4.2.1 อัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว

การจำลองในหัวข้อนี้กำหนดให้คาบการชกตัวอย่าง  $T_r$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที โดยพิจารณาเอาต์พุตของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง และความสามารถในการวัดตัวแปรสถานะเป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

#### 4.2.1.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุตคือตำแหน่งรอราง  $x$  จากการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี พบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรอรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 270 ถึง 400 โดยเลือกพิจารณา  $H_p$  ช่วง 290 ถึง 350 ผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.8 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.7

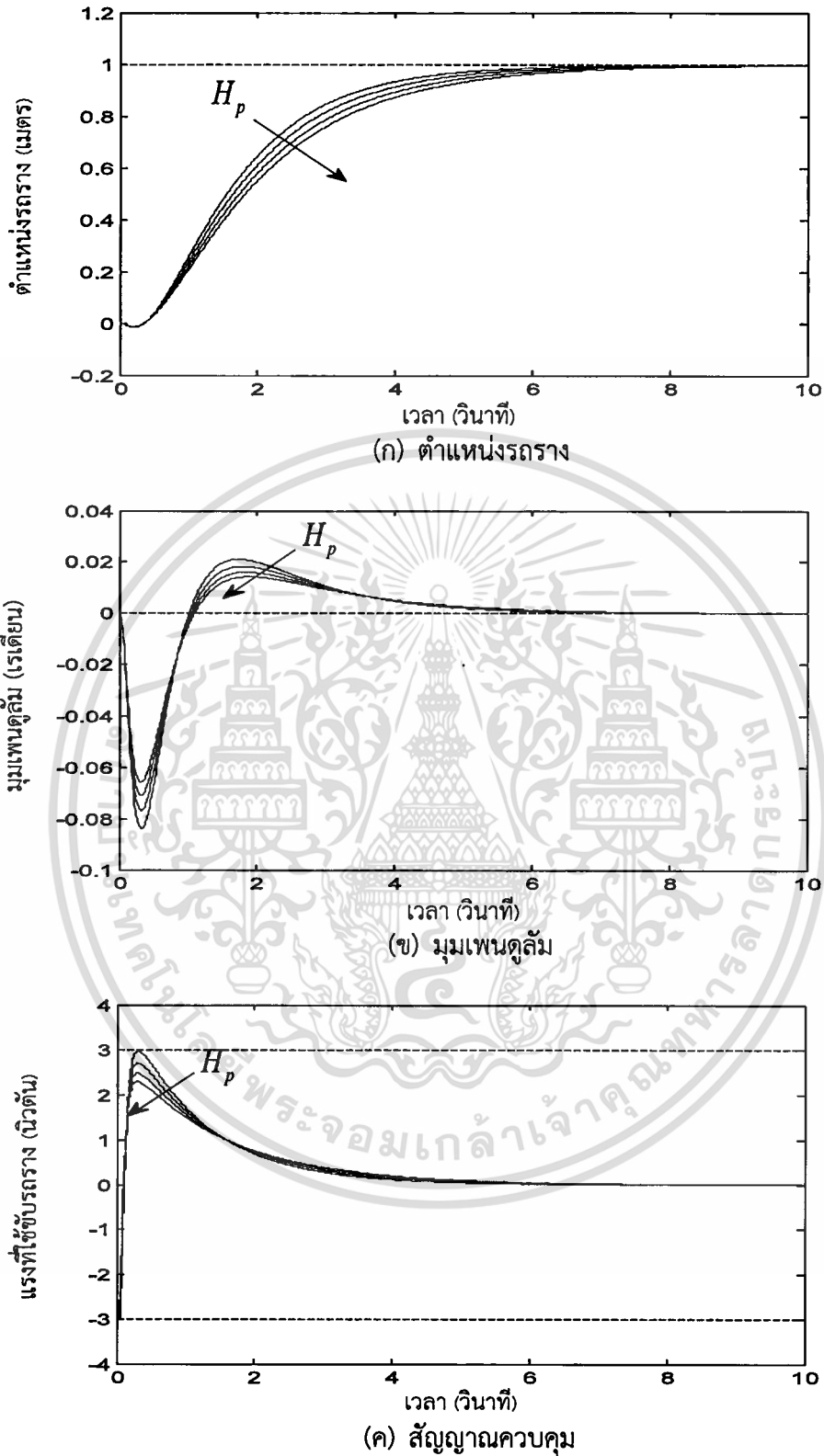
ตารางที่ 4.7 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว

กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนายตอนบน $H_p$ | เวลาเข้าที่ ( $\pm 2\%$ ) $t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบนสูงสุด $ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด $ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|---------------------------|--|--|--|
| 290                       | 5.3075                                   | 0.0839   | 3.0000                                       |
| 310                       | 5.8066                                   | 0.0768   | 3.0000                                       |
| 330                       | 6.3003                                   | 0.0709   | 3.0000                                       |
| 350                       | 6.7889                                   | 0.0658   | 3.0000                                       |

จากการจำลองพบว่ารอรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีคามผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ไม่มีการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรอรางและมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  นานขึ้น แต่มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง

เมื่อพิจารณาสัญญาณควบคุมในรูปที่ 4.8(ค) พบว่าสัญญาณควบคุมสามารถจำกัดให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดในทุกการจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีข้อจำกัดที่สอดคล้องในหัวข้อ 4.1.1.1 และเมื่อพิจารณา ค่า  $H_p$  เท่ากัน คือ  $H_p = 290$  หรือ  $310$  พบว่ากรณีมีข้อจำกัดมีมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่าเล็กน้อย แต่เวลาเข้าที่ช้ากว่ากรณีไม่มีข้อจำกัด และช่วง  $H_p$  ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยกว่ากรณีไม่มีข้อจำกัด



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุตคือ มุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรอราง  $x$  จากการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซีพบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรอรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 250 ถึง 330 โดยเลือกพิจารณา  $H_p$  ช่วง 270 ถึง 300 ผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.9 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.8

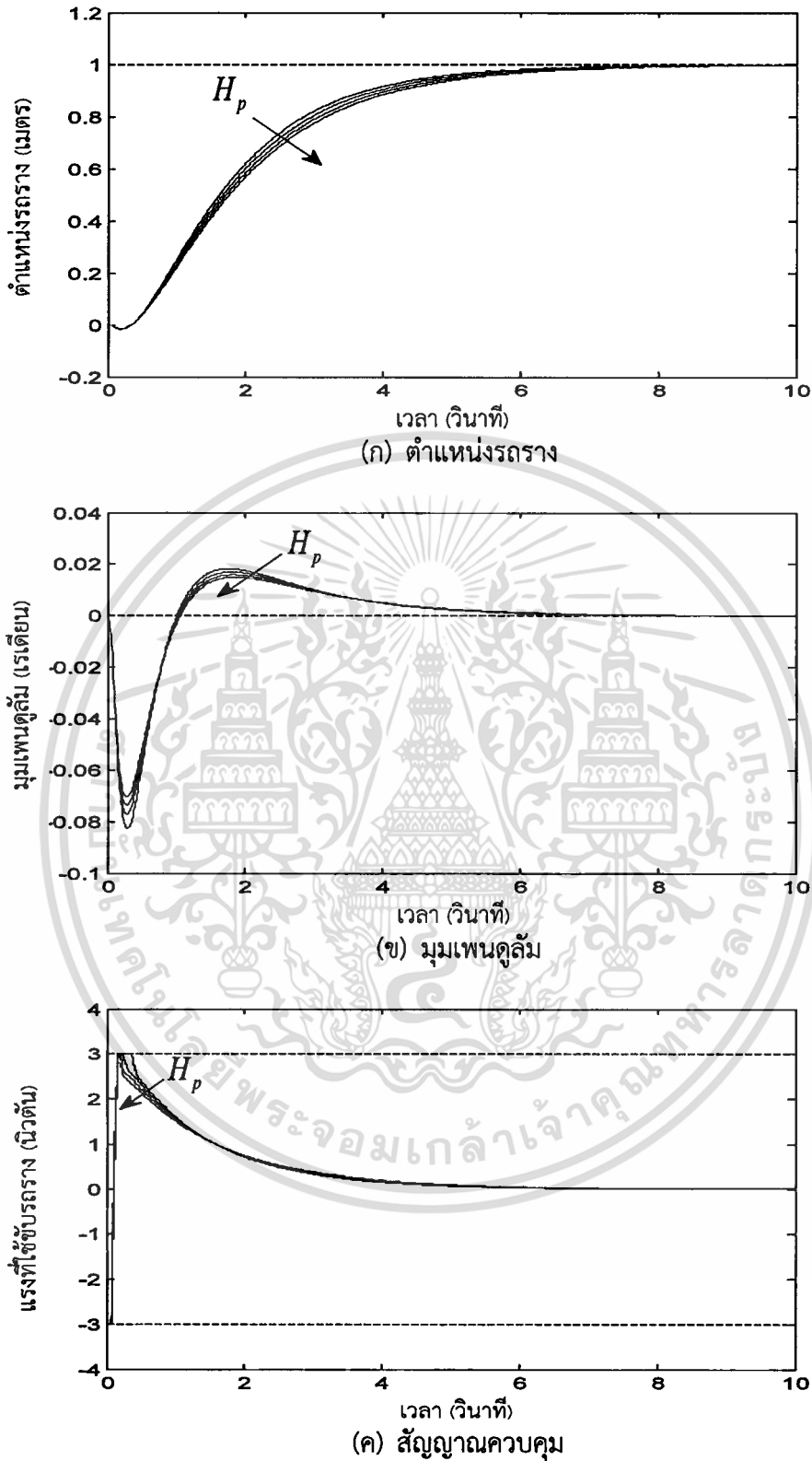
ตารางที่ 4.8 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว

กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนายตอนบน $H_p$ | เวลาเข้าที่ ( $\pm 2\%$ ) $t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบนสูงสุด $ \theta_{max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด $ u_{max} $ (นิวตัน) |
|---------------------------|--|---|---|
| 270                       | 5.7719                                   | 0.0827  | 3.0000                                      |
| 280                       | 6.0406                                   | 0.0771  | 3.0000                                      |
| 290                       | 6.3024                                   | 0.0735  | 3.0000                                      |
| 300                       | 6.5633                                   | 0.0705  | 3.0000                                      |

จากการจำลองพบว่ารอรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ไม่มีการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรอราง และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าเมื่อ  $H_p$  มีค่ามากขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  นานขึ้น แต่มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง

เมื่อพิจารณาสัญญาณควบคุมในรูปที่ 4.9(ค) พบว่าสัญญาณควบคุมสามารถจำกัดให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดในทุกการจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีข้อจำกัดที่สอดคล้องในหัวข้อ 4.1.1.2 และเมื่อพิจารณา ณ ค่า  $H_p$  เท่ากัน คือ  $H_p = 270$  หรือ 290 พบว่ากรณีมีข้อจำกัดมีเวลาเข้าที่ช้ากว่ากรณีไม่มีข้อจำกัด และกรณีมีข้อจำกัดมีช่วง  $H_p$  ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยกว่ากรณีไม่มีข้อจำกัด



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชักตัวอย่างทีเร็วกรณีสองเฮาต์พุด และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.1.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

การจำลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือมุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรถราง  $x$  และอาศัยตัวแปรสถานะที่สังเคราะห์ขึ้นจากตัวสังเกตสังเกตสถานะ จากการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี พบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 250 ถึง 330 โดยเลือกพิจารณา  $H_p$  เท่ากับ 250 ถึง 290 ผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.10 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว

กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

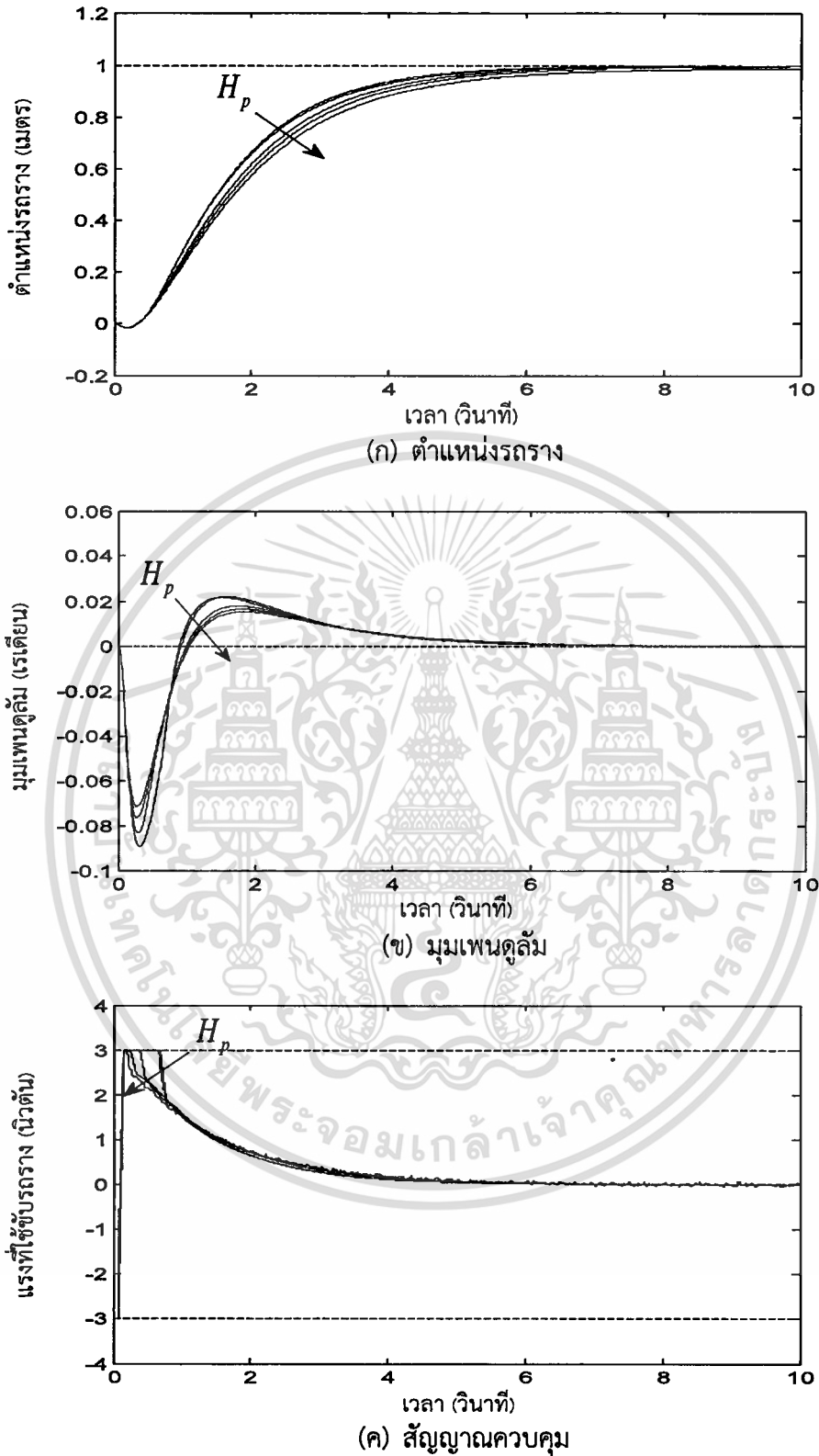
| ขอบเขตการทำนาย<br>ตอนบน<br>$H_p$ | เวลาเข้าที่<br>( $\pm 2\%$ )<br>$t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบน<br>สูงสุด<br>$ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณ<br>ควบคุมสูงสุด<br>$ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|----------------------------------|--|---|---|
| 250                              | 5.2888   | 0.0891  | 3.0000  |
| 260                              | 5.5129   | 0.0891  | 3.0000  |
| 270                              | 5.8634   | 0.0831  | 3.0000  |
| 280                              | 6.1395   | 0.0770  | 3.0000  |
| 290                              | 6.4054   | 0.0726  | 3.0000  |

จากการจำลองพบว่ารถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีควมผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ไม่มีการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าเมื่อ  $H_p$  มีค่ามากขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  นานขึ้น แต่มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง

เมื่อพิจารณาสัญญาณควบคุมในรูปที่ 4.10(ค) พบว่าสัญญาณควบคุมสามารถจำกัดให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดในทุกการจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีข้อจำกัดที่สอดคล้องในหัวข้อ 4.1.1.4 พบว่ากรณีมีข้อจำกัดมีขนาดมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนสูงสุดน้อยกว่า แต่ให้เวลาเข้าที่ใกล้เคียงกัน โดย ณ ค่า  $H_p$  เท่ากับ 250 และ 270 มีเวลาเข้าที่เร็วกว่ากรณีไม่มีข้อจำกัดเล็กน้อย แต่ค่า  $H_p = 290$  มีเวลาเข้าที่ช้ากว่ากรณีไม่มีข้อจำกัดเล็กน้อย นอกจากนั้นช่วง  $H_p$  ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยกว่ากรณีไม่มีข้อจำกัด และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีมีข้อจำกัดของสองเอาต์พุตในหัวข้อ 4.2.1.2 พบว่ากรณีที่ใช้ตัวสังเกตสถานะมีเวลาเข้าที่ช้ากว่ากรณีตัวแปรสถานะวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.10** ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการใช้พลังงานที่เร็วกรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า

ในอัตราการชักตัวอย่างที่ช้า กำหนดให้อัตราการชักตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 100 มิลลิวินาที โดยพิจารณาเอาต์พุตของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรราง และความสามารถในการวัดตัวแปรสถานะ เป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.2.2.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

กำหนดให้อเอาต์พุตคือตำแหน่งบรรราง  $x$  เมื่อทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี พบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนบรรรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 22 ถึง 42 โดยเลือกพิจารณาช่วง  $H_p$  เท่ากับ 22 ถึง 40 ผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.11 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.10

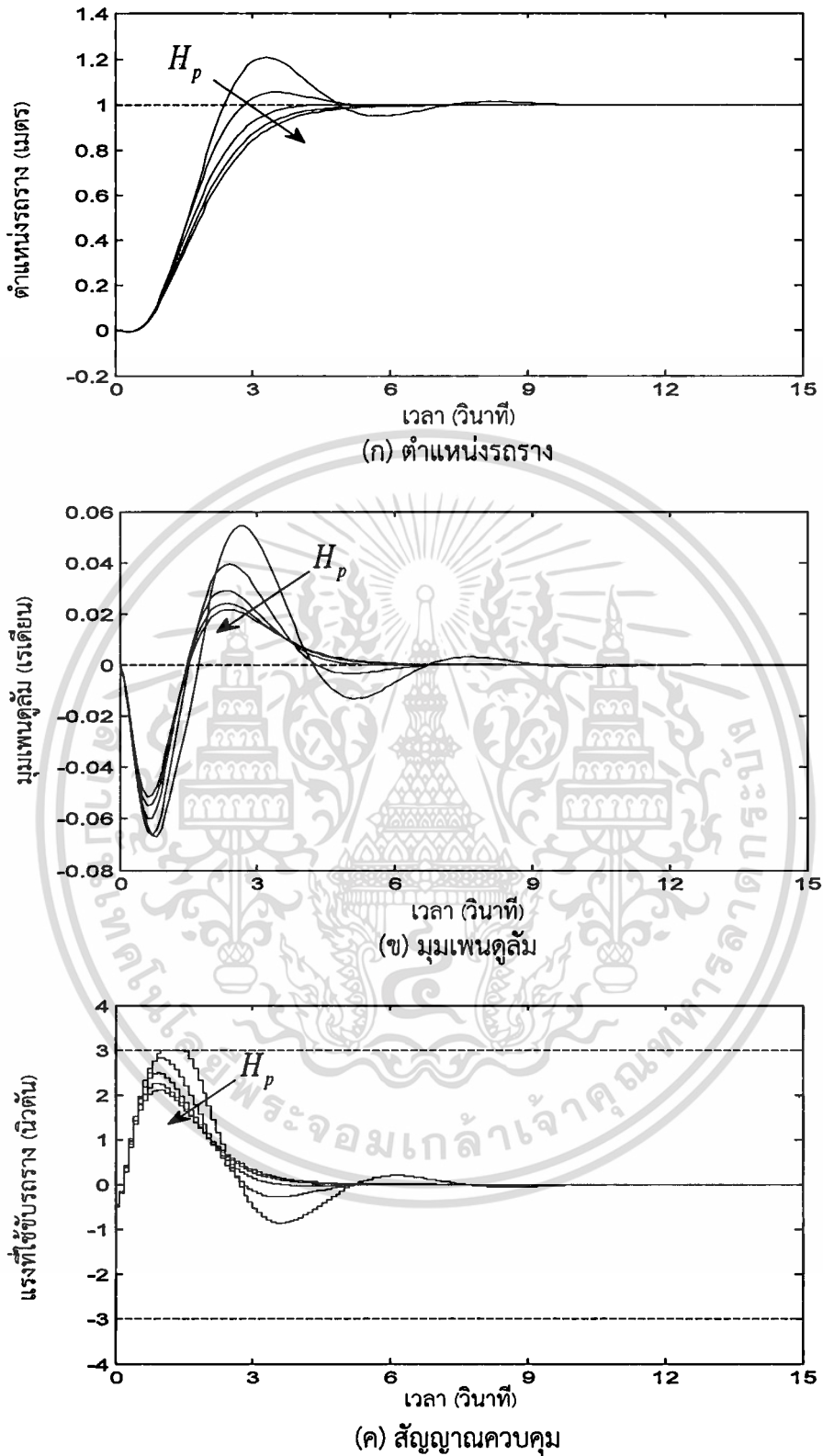
ตารางที่ 4.10 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชักตัวอย่างที่ช้า

กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนายตอนบน $H_p$ | เวลาเข้าที่ ( $\pm 2\%$ ) $t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบนสูงสุด $ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด $ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|---------------------------|--|--|--|
| 22                        | 6.7943                                   | 0.0668   | 3.0000                                       |
| 25                        | 4.5256                                   | 0.0664   | 2.8365                                       |
| 30                        | 3.6106                                   | 0.0600   | 2.4907                                       |
| 35                        | 4.4179                                   | 0.0551   | 2.2652                                       |
| 40                        | 4.8340                                   | 0.0515   | 2.1220                                       |

จากการจำลองพบว่าบรรรางสามารถเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มี ความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าสัญญาณควบคุมในรูปที่ 4.11(ค) สามารถจำกัดให้อยู่ ภายในขอบเขตที่กำหนดในทุกการจำลอง ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อย เช่น  $H_p = 22$  จะปรากฏการแกว่งใน ผลตอบสนองตำแหน่งบรรราง แต่การแกว่งดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุม เพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง และสัญญาณควบคุมที่ใช้ในระบบจะน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  นานขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีข้อจำกัดหนึ่งเอาต์พุตในหัวข้อ 4.1.2.1 พบว่ากรณีมีข้อจำกัดมี ช่วง  $H_p$  ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยกว่า นอกจากนั้นสังเกตเห็นว่าหากสัญญาณควบคุมไม่เกิน ขอบเขตที่กำหนดไว้ที่  $\pm 3$  นิวตัน สมรรถนะของระบบที่ได้จะคล้ายคลึงกับกรณีไม่มีข้อจำกัด



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่เข้ากรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

กำหนดให้เอาต์พุตคือ มุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรอราง  $x$  จากการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซีพบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรอรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 22 ถึง 35 ผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.12 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.11

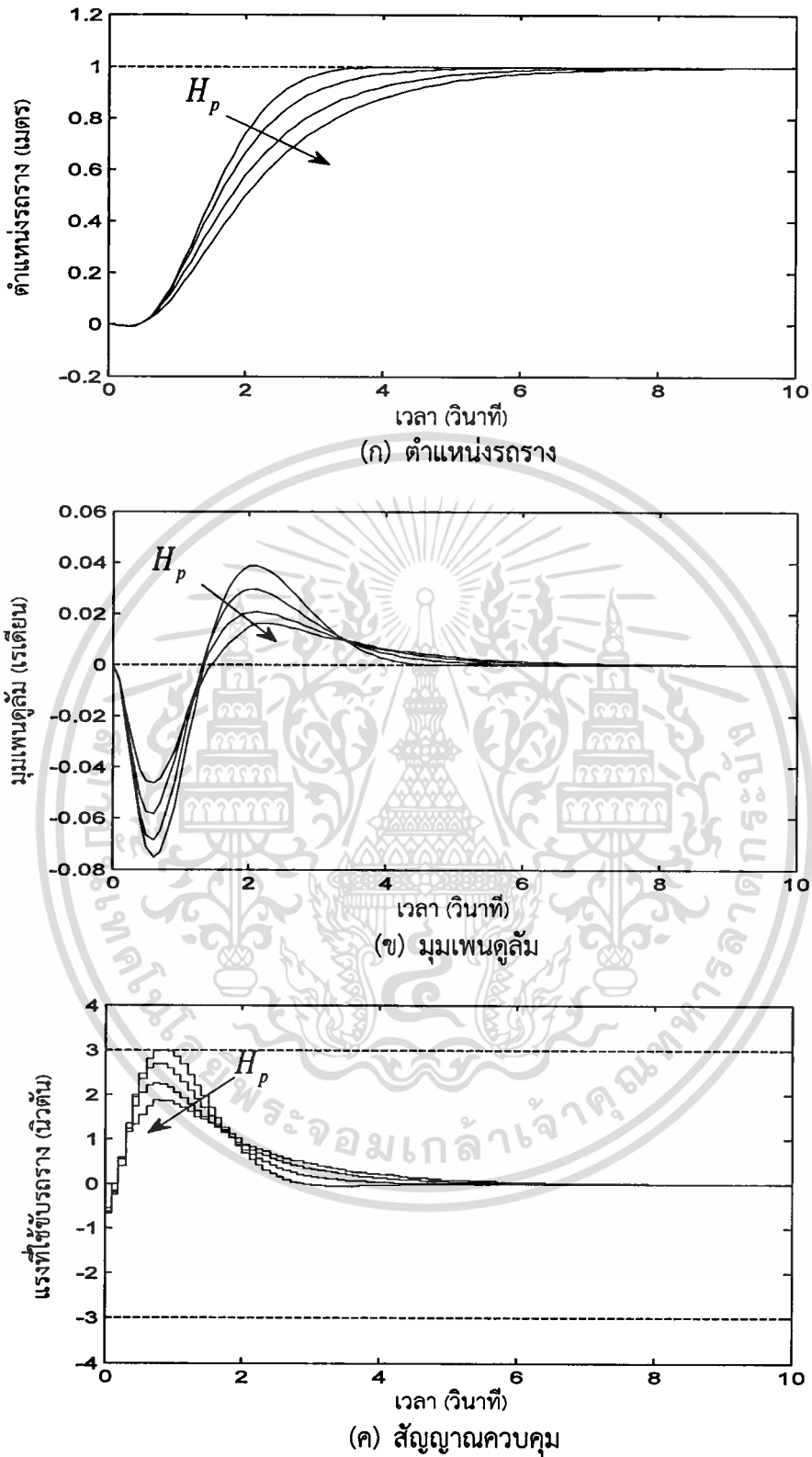
ตารางที่ 4.11 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการซึกตัวอย่างที่ช้า

กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนายตอนบน $H_p$ | เวลาเข้าที่ ( $\pm 2\%$ ) $t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบนสูงสุด $ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด $ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|---------------------------|--|--|--|
| 22                        | 3.1839                                   | 0.0752   | 3.0000                                       |
| 25                        | 4.2718                                   | 0.0686   | 2.6850                                       |
| 30                        | 5.5552                                   | 0.0580   | 2.2541                                       |
| 35                        | 6.4639                                   | 0.0461   | 1.8652                                       |

จากการจำลองพบว่ารอรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีควมผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ไม่มีการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรอราง และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าสัญญาณควบคุมในรูปที่ 4.12(ค) สามารถจำกัดให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดในทุกการจำลอง โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าเมื่อ  $H_p$  มีค่ามากขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  นานขึ้น แต่มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีข้อจำกัดในหัวข้อ 4.1.2.2 พบว่ากรณีมีข้อจำกัดมีช่วง  $H_p$  ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยกว่า แต่สัญญาณควบคุมสามารถจำกัดไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ที่  $\pm 3$  นิวตัน โดยผลการเปรียบเทียบของสมรรถนะเมื่อ  $H_p$  เท่ากัน พบว่า  $H_p = 22$  กรณีมีข้อจำกัดสามารถจำกัดให้สัญญาณควบคุมอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และมีเวลาเข้าที่เร็วกว่าเล็กน้อย นอกเหนือจากนั้นมีสมรรถนะของระบบที่คล้ายคลึงกับกรณีไม่มีข้อจำกัด



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการใช้พลังงานที่เข้ากรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.2.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

กำหนดให้เอาต์พุตคือมุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรราง  $x$  และอาศัยตัวแปรสถานะจากตัวสังเกตสังเกตสถานะ จากการทดลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซีพบว่าช่วงที่ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรรางสามารถรักษาเสถียรภาพ คือช่วง  $H_p$  เท่ากับ 22 ถึง 35 ผลการจำลองจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 4.13 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.12

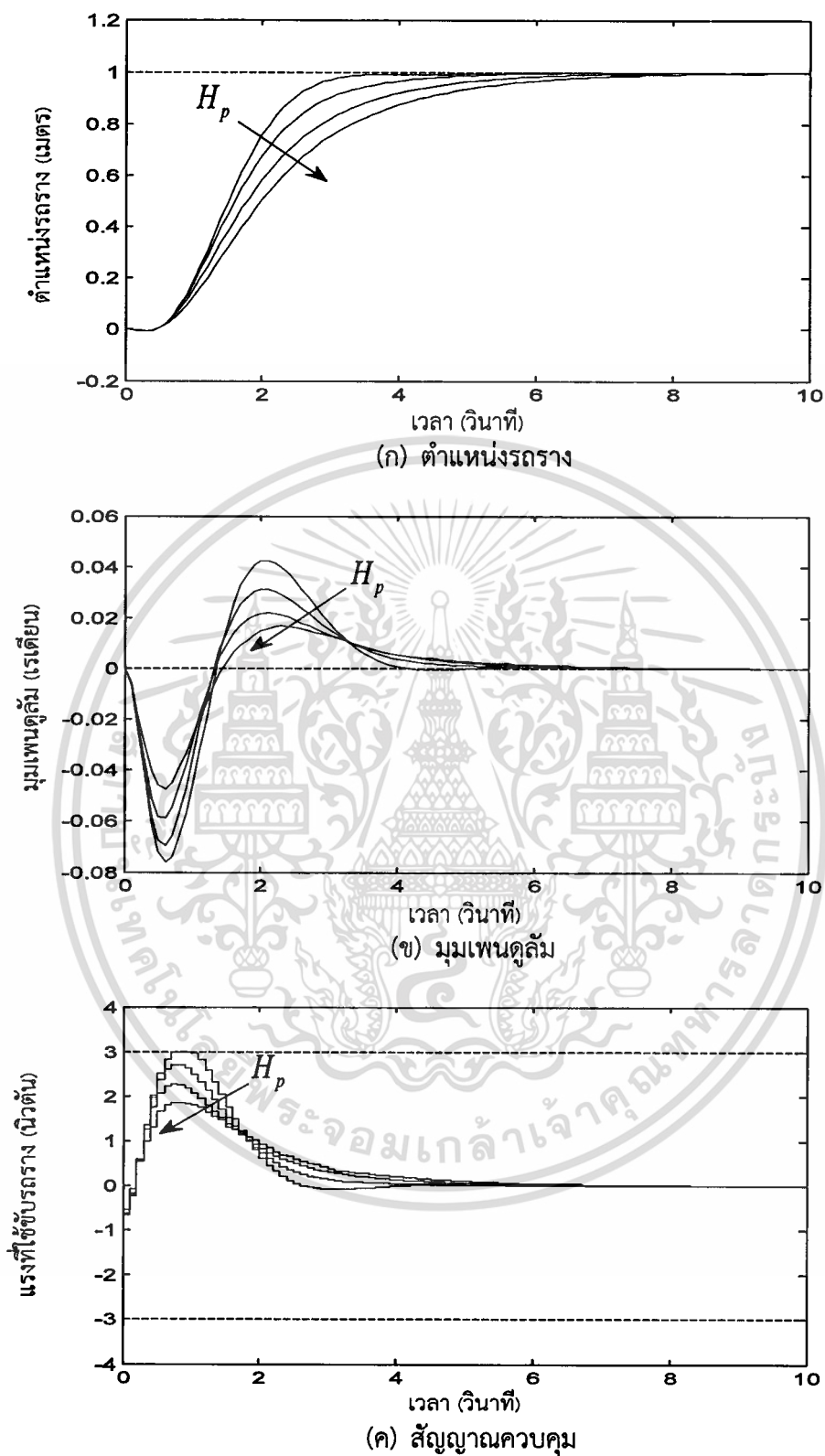
ตารางที่ 4.12 สมรรถนะจากการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า

กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

| ขอบเขตการทำนายตอนบน $H_p$ | เวลาเข้าที่ ( $\pm 2\%$ ) $t_r$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบนสูงสุด $ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุด $ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|---------------------------|--|--|--|
| 22                        | 3.1635                                   | 0.0762   | 3.0000                                       |
| 25                        | 4.5502                                   | 0.0696   | 2.7172                                       |
| 30                        | 5.7541                                   | 0.0588   | 2.2789                                       |
| 35                        | 6.7501                                   | 0.0473   | 1.8500                                       |

เช่นเดียวกับกรณีสองเอาต์พุตและตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ในหัวข้อ 4.2.2.2 พบว่ารรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าสัญญาณควบคุมในรูปที่ 4.13(ค) สามารถจำกัดให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดในทุกการจำลอง ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อย มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากและสัญญาณควบคุมที่ใช้ขับระบบมาก แต่ทำให้ผลตอบสนองเร็วขึ้นส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  เร็วขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้นซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลงและสัญญาณควบคุมที่ใช้ขับระบบน้อยลงด้วย แต่ทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_r$  นานขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีข้อจำกัดในหัวข้อ 4.1.2.3 พบว่าช่วง  $H_p = 22$  กรณีมีข้อจำกัดสามารถจำกัดให้สัญญาณควบคุมอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และมีเวลาเข้าที่เร็วกว่าเล็กน้อย นอกเหนือจากนั้นมีสมรรถนะของระบบที่คล้ายคลึงกับกรณีไม่มีข้อจำกัด



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองกรณีมีข้อจำกัดด้วยอัตราการใช้พลังงานที่เข้ากรณีสองเฮดต์พุด และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

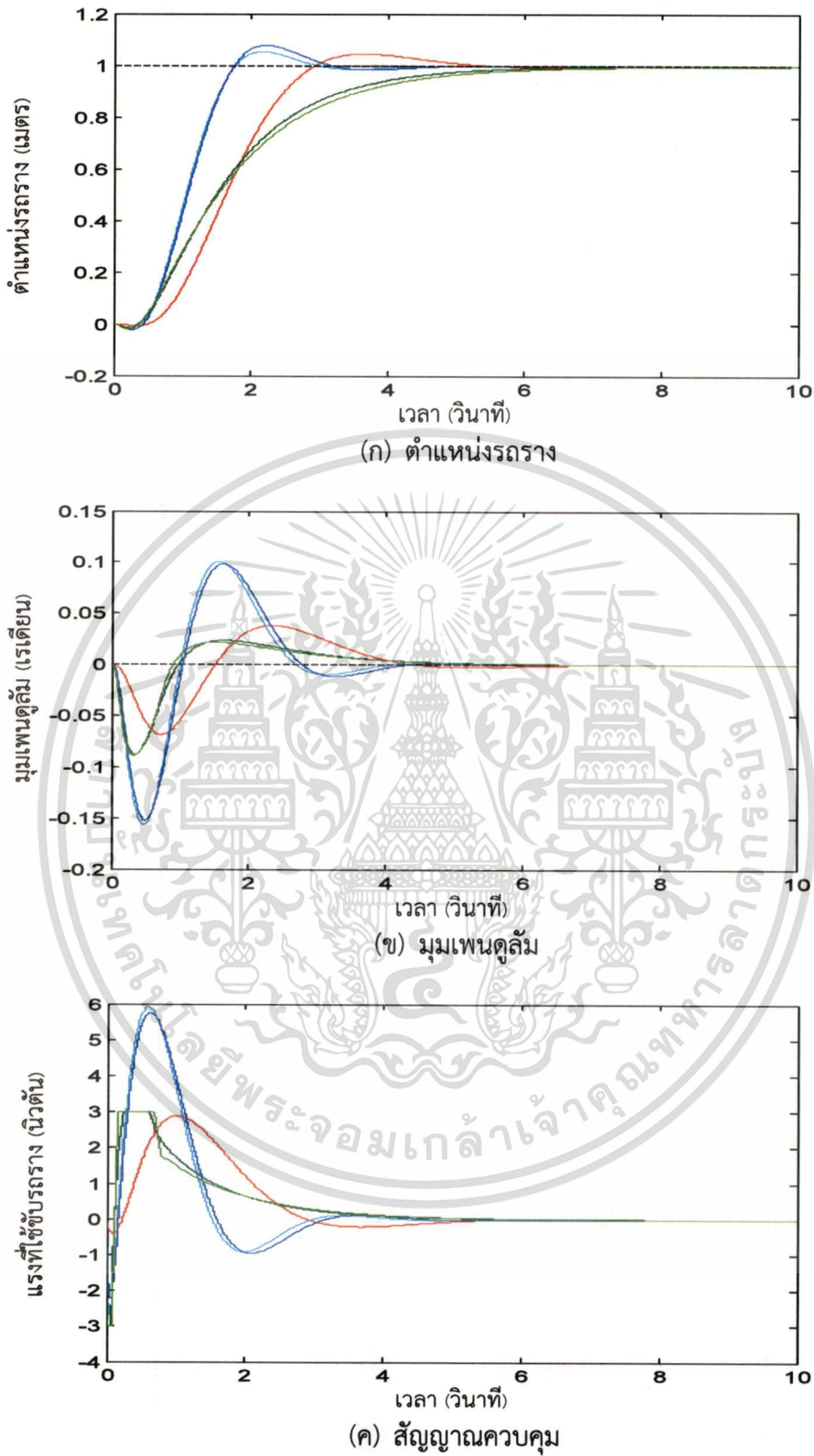
เพื่อแสดงสมรรถนะของการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซี ในการจำลองนี้ได้เลือกตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มาใช้ในการเปรียบเทียบ เนื่องจากตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์อาศัยดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  เพื่อคำนวณหาผลเฉลยที่ทำให้สัญญาณควบคุมมีค่าเหมาะสมที่สุดเหมือนกัน แต่ดัชนีสมรรถนะ  $\mathcal{J}$  ของตัวควบคุมแอลคิวอาร์โดยทั่วไปจะให้เมทริกซ์น้ำหนัก  $R$  ขึ้นกับสัญญาณควบคุม  $u$  ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ จึงกำหนดให้เมทริกซ์น้ำหนัก  $R$  ของตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีค่าแปรผกผันกับคาบการชกตัวอย่าง  $T_s$  และพิจารณากรณีที่มีหนึ่งเอาต์พุตเหมือนกัน โดยกำหนดให้ตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีรูปแบบของเมทริกซ์น้ำหนักคือ  $Q = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 1)$  และ  $R = 1/T_s$  ส่วนตัวควบคุมเอ็มพีซีมีรูปแบบของเมทริกซ์น้ำหนักคือ  $Q(i) = 1$  โดย  $\forall i = H_w, \dots, H_p$  และ  $R(i) = 1$  โดย  $\forall i = 0, \dots, H_u - 1$  โดยเปรียบเทียบผลจากสมรรถนะในการติดตามสัญญาณอ้างอิงในตำแหน่งรกราง ซึ่งแบ่งสัญญาณอ้างอิงออกเป็นสามประเภทได้แก่ สัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได สัญญาณอ้างอิงรูปซายน์ และสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม

#### 4.3.1 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได

การจำลองนี้จะนำตัวควบคุมเอ็มพีซีที่ออกแบบไว้ในกรณีต่าง ๆ ก่อนหน้านี้มามาใช้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะในการติดตามสัญญาณอ้างอิงในตำแหน่งรกรางรูปขั้นบันไดหนึ่งหน่วย โดยแบ่งพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว และกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า

##### 4.3.1.1 อัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว

ในอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกำหนดให้คาบชกตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที และ เลือกใช้ค่าน้อยที่สุดของ  $H_p$  ที่ระบบยังมีเสถียรภาพ เนื่องจากใช้ขั้นตอนการคำนวณตามวิธีเอ็มพีซีที่น้อย ทำให้ประมวลผลได้เร็วที่สุด โดยกรณีไม่มีข้อจำกัดหนึ่งเอาต์พุตเลือก  $H_p$  เท่ากับ 170 และกรณีมีข้อจำกัดหนึ่งเอาต์พุตเลือก  $H_p$  เท่ากับ 280 ส่วนกรณีไม่มีข้อจำกัดสองเอาต์พุตเลือก  $H_p$  เท่ากับ 130 และกรณีมีข้อจำกัดสองเอาต์พุตเลือก  $H_p$  เท่ากับ 260 ซึ่งผลการจำลองเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีทั้งสี่กรณีดังกล่าวและการใช้ตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์แสดงดังรูปที่ 4.14 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.13 โดยเส้นสีฟ้าและเส้นสีน้ำเงิน คือผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัดหนึ่งเอาต์พุต และตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัดสองเอาต์พุต เส้นสีเขียวเข้มและเส้นสีเขียวอ่อน คือผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัดหนึ่งเอาต์พุต และตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัดสองเอาต์พุต และเส้นสีแดงคือผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันไดของตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์กับตัวควบคุมเอ็มพีซีในอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมในอัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว

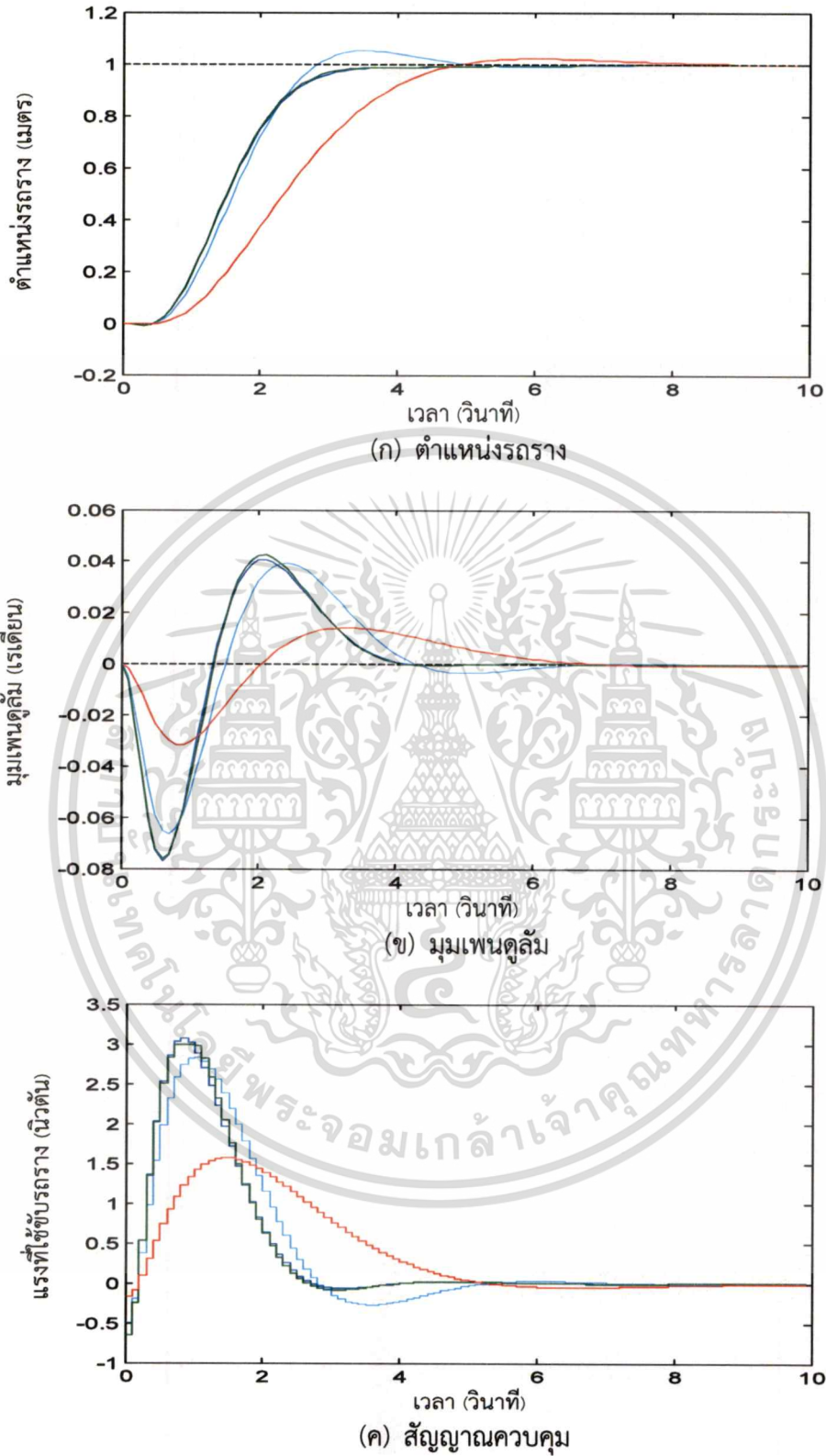
| ชนิดตัวควบคุม                              | เวลาเข้าที่<br>( $\pm 2\%$ )<br>$t_s$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบน<br>สูงสุด<br>$ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณ<br>ควบคุมสูงสุด<br>$ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|--|--|---|---|
| เอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด<br>หนึ่งเอาต์พุต | 2.7300   | 0.1566  | 5.9264  |
| เอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด<br>สองเอาต์พุต   | 2.9447   | 0.1538  | 5.8629  |
| เอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด<br>หนึ่งเอาต์พุต    | 5.0305   | 0.0880  | 3.0000  |
| เอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด<br>สองเอาต์พุต      | 5.3397   | 0.0900  | 3.0000  |
| เซอร์โวแอลคิวอาร์                          | 4.7149   | 0.0686  | 2.8897  |

ในอัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว ผลการจำลองพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัดมีเวลาเข้าที่เร็วกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ แต่เกิดการฟุ้งเกินมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ และสัญญาณควบคุมที่ใช้เกินกว่าระดับอิ่มตัวของตัวขับเร็วที่  $\pm 3$  นิวตัน ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัดพบว่าสัญญาณควบคุมที่ใช้ไม่เกิน  $\pm 3$  นิวตัน และไม่เกิดการฟุ้งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่มีเวลาเข้าช้ากว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

#### 4.3.1.2 อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า

ในอัตราการชักตัวอย่างที่ช้ากำหนดให้คาบการชักตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 100 มิลลิวินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัดหนึ่งอินพุตเลือก  $H_p$  เท่ากับ 25 ส่วนกรณีไม่มีข้อจำกัดและมีข้อจำกัดสองเอาต์พุตเลือก  $H_p$  เท่ากับ 22 ซึ่งผลการจำลองเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีทั้งสี่กรณีดังกล่าวและการใช้ตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์แสดงดังรูปที่ 4.15 และสมรรถนะที่สอดคล้องแสดงในตารางที่ 4.14 โดยเส้นสีฟ้าและเส้นสีน้ำเงิน คือผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัดหนึ่งเอาต์พุต และตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัดสองเอาต์พุต เส้นสีเขียวคือผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัดสองเอาต์พุต และเส้นสีแดงคือผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.15** ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันไดของตัวควบคุม เซอร์โวแอลคิวอาร์กับตัวควบคุมเอ็มพีซีในอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมในอัตราการชกตัวอย่างที่ซ้ำ

| ชนิดตัวควบคุม                              | เวลาเข้าที่<br>( $\pm 2\%$ )<br>$t_s$ (วินาที) | ขนาดมุมเบี่ยงเบน<br>สูงสุด<br>$ \theta_{\max} $ (เรเดียน) | ขนาดสัญญาณ<br>ควบคุมสูงสุด<br>$ u_{\max} $ (นิวตัน) |
|--|--|---|---|
| เอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด<br>หนึ่งเอาต์พุต | 4.5256   | 0.0664  | 2.8365  |
| เอ็มพีซีกรณีไม่มีข้อจำกัด<br>สองเอาต์พุต   | 3.1893   | 0.0757  | 3.0310  |
| เอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด<br>สองเอาต์พุต      | 3.1841   | 0.0752  | 3.0000  |
| เซอร์โวแอลคิวอาร์                          | 6.8649   | 0.0314  | 1.5743  |

จากการจำลองพบว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีในทุกกรณีมีผลตอบสนองตำแหน่งรถรางเร็วกว่า แต่ใช้สัญญาณควบคุมสูงสุดมากกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมทางธรรมชาติของระบบ

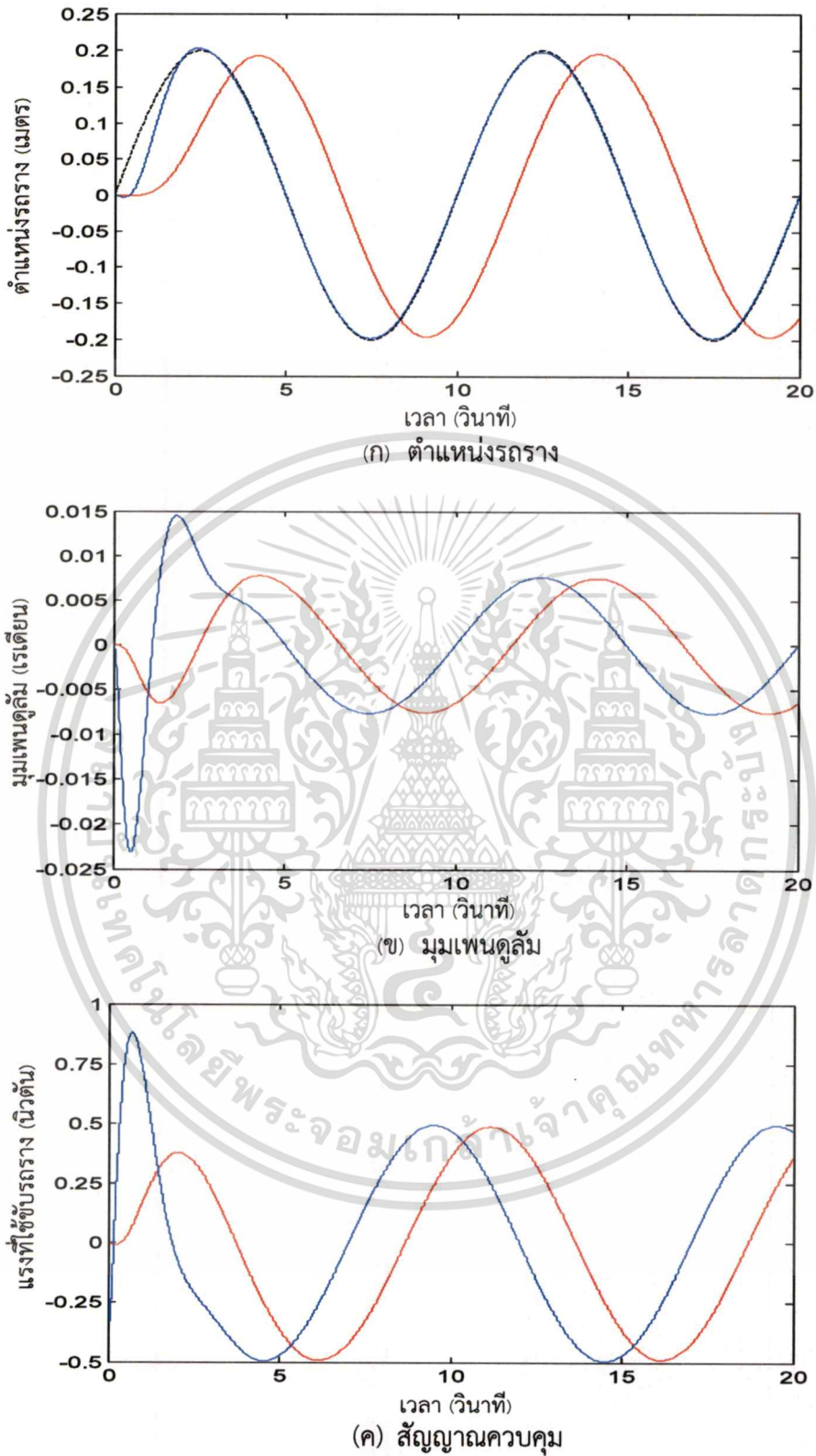
#### 4.3.2 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายน

การจำลองนี้จะเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมในการติดตามสัญญาณอ้างอิงตำแหน่งรถรางรูปชายน โดยแบ่งการจำลองออกเป็นสี่กรณี กรณีแรกและกรณีสองกำหนดให้คาบของสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 10 วินาที และมีขนาดของคลื่นเท่ากับ 40 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนกรณีสามและกรณีสี่กำหนดให้คาบของสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 5 วินาที และมีขนาดของคลื่นเท่ากับ 40 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ โดยทุกการจำลองคาบการชกอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที เส้นสีน้ำเงินคือผลตอบสนองของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี และเส้นสีแดงคือผลตอบสนองของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

##### 4.3.2.1 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายนได้ดีกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยผลตอบสนองตำแหน่งรถรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดผิดพลาดประมาณ 0.38 เซนติเมตร คิดเป็น 0.95% และของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดผิดพลาดประมาณ 1.14 เซนติเมตร คิดเป็น 2.85% นอกจากนั้นผลตอบสนองตำแหน่งรถรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 59.4 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.65 วินาที แต่ช่วงเริ่มต้นการทำงานพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่า และใช้สัญญาณควบคุมสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขายนของตัวควบคุม

เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10

วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.2 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

เช่นเดียวกับกรณี 4.3.2.1 โดยผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขายนี้นในตำแหน่งรณรางได้ดีกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยผลตอบสนองตำแหน่งรณรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดผิดพลาดประมาณ 0.56 เซนติเมตร คิดเป็น 0.93% และของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดผิดพลาดประมาณ 1.26 เซนติเมตร คิดเป็น 2.10% นอกจากนั้นผลตอบสนองตำแหน่งรณรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 59.4 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.65 วินาที ซึ่งไม่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ทัน แต่ช่วงเริ่มต้นการทำงานพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่า และใช้สัญญาณควบคุมสูงกว่า

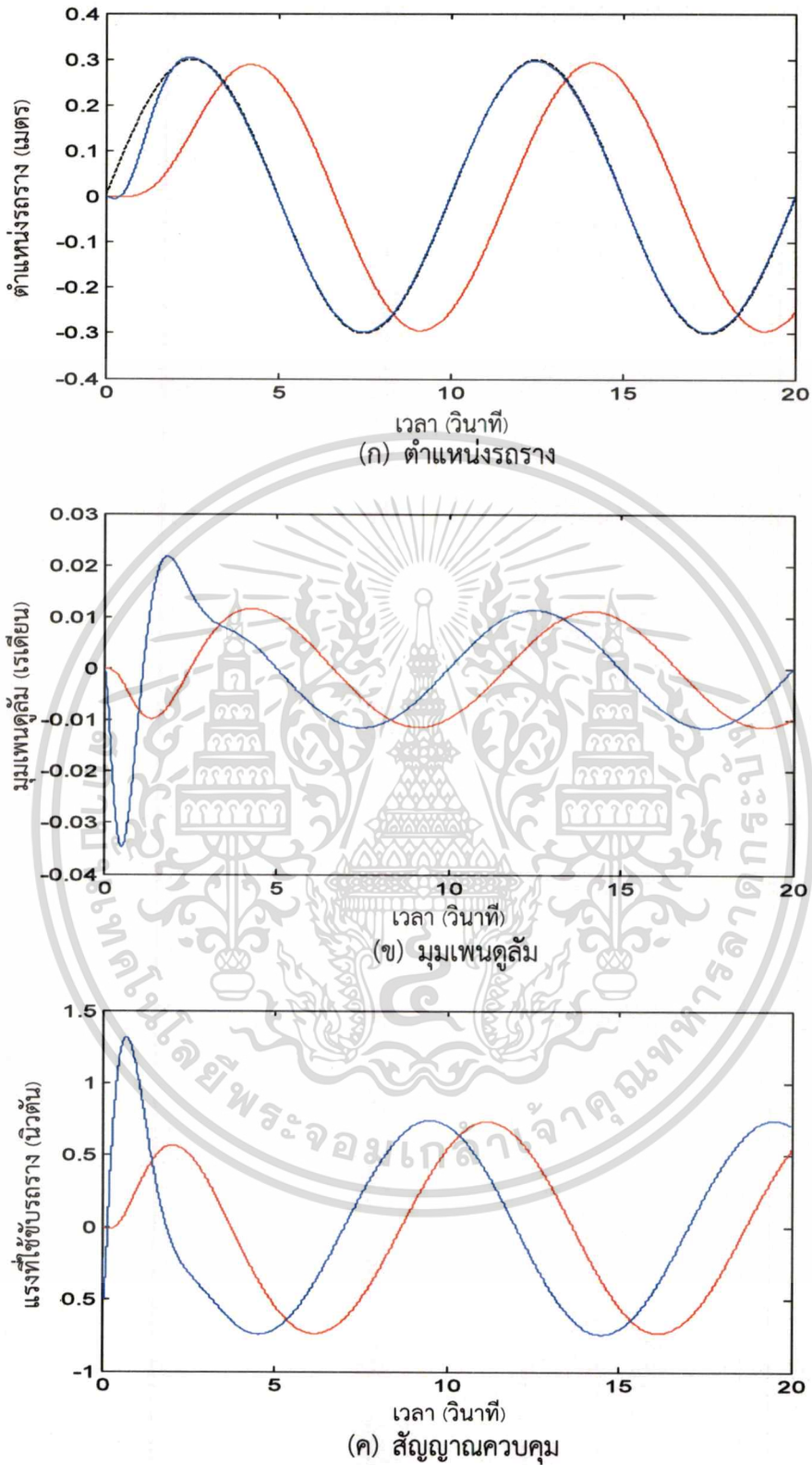
#### 4.3.2.3 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

การจำลองนี้กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงรูปขายนี้นมีคาบสั้นลง โดยผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าตัวควบคุมเอ็มพีซียังสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขายนี้นในตำแหน่งรณรางได้ดีกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยผลตอบสนองตำแหน่งรณรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดผิดพลาดประมาณ 1.66 เซนติเมตร คิดเป็น 4.15% และของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดผิดพลาดประมาณ 8.55 เซนติเมตร คิดเป็น 21.38% นอกจากนั้นผลตอบสนองตำแหน่งรณรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 123.91 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.72 วินาที ซึ่งไม่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ทัน แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจะใช้สัญญาณควบคุมสูงกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่า เนื่องจากระยะทางการเคลื่อนที่ในตำแหน่งรณรางที่มากกว่านั่นเอง

#### 4.3.2.4 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

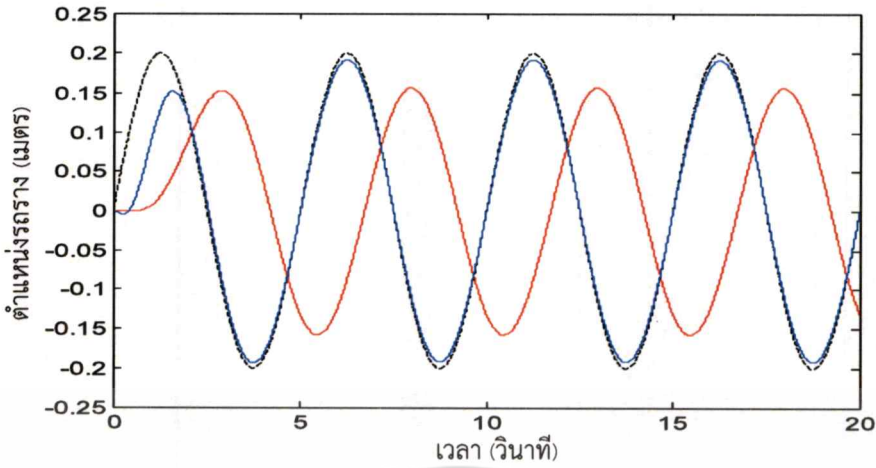
เช่นเดียวกันกรณี 4.3.2.3 โดยผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซียังสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขายนี้นในตำแหน่งรณรางได้ดีกว่าตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยผลตอบสนองตำแหน่งรณรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดผิดพลาดประมาณ 2.51 เซนติเมตร คิดเป็น 4.18% และของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดผิดพลาดประมาณ 12.83 เซนติเมตร คิดเป็น 21.38% นอกจากนั้นผลตอบสนองตำแหน่งรณรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 123.91 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.72 วินาที ซึ่งไม่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ทัน แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจะใช้สัญญาณควบคุมสูงกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่า ดังเหตุผลเช่นเดียวกับกรณี 4.3.2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

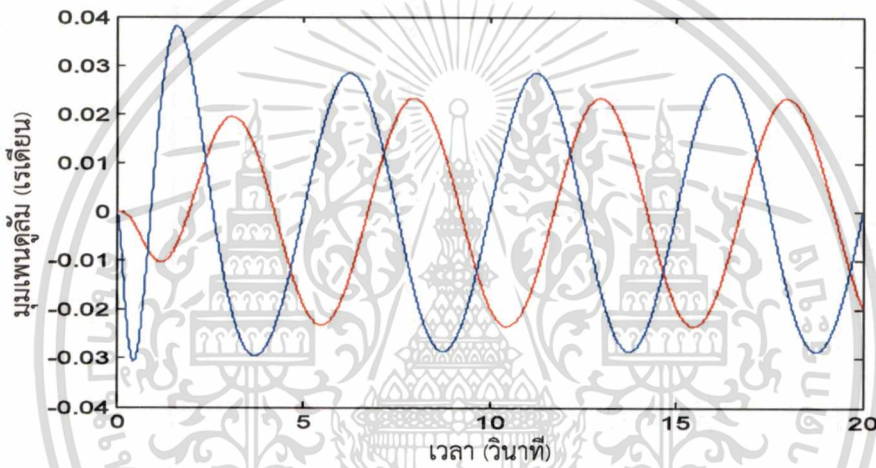


รูปที่ 4.17 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปชายนของตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด

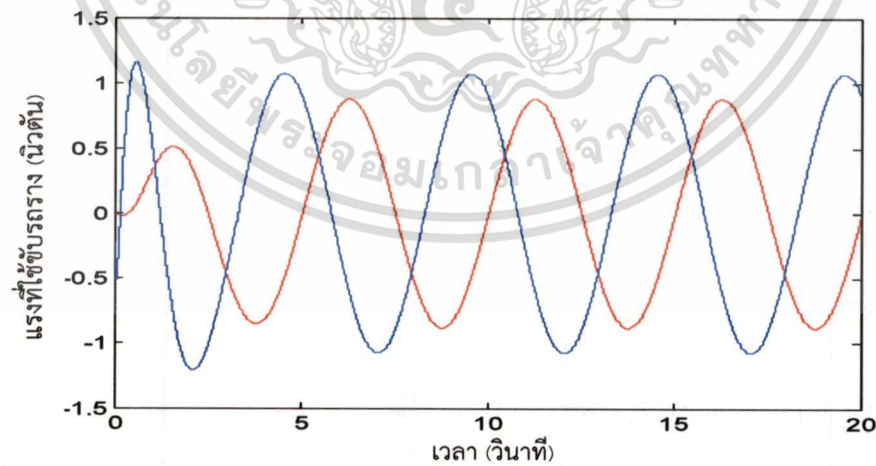
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตำแหน่งรูดราง



(ข) มุมเพนดูลัม



(ค) สัญญาณควบคุม

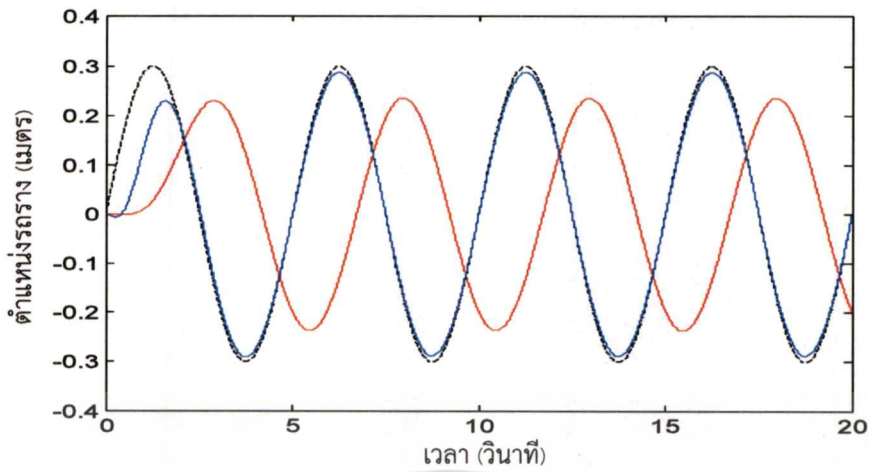
**รูปที่ 4.18** ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ของตัวควบคุม

เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที

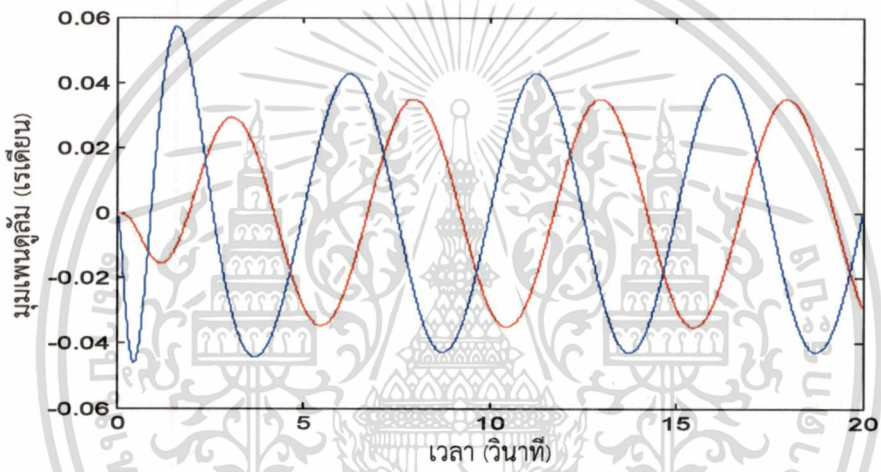
และขนาด 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

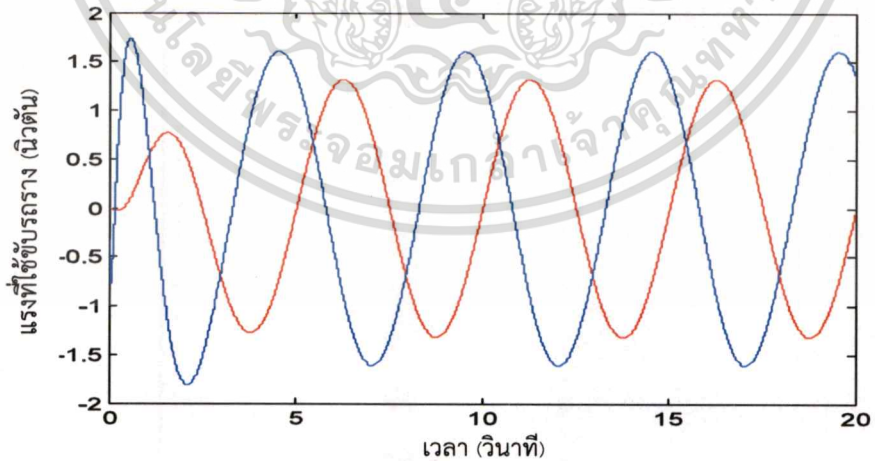
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตำแหน่งรถราง



(ข) มุมเพนดูลัม



(ค) สัญญาณควบคุม

**รูปที่ 4.19** ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขายนของตัวควบคุม

เอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที

และขนาด 60 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม

เช่นเดียวกับการจำลองก่อนหน้านี้ การจำลองนี้จะเปรียบเทียบตัวควบคุมเพื่อตรวจสอบสมรรถนะในการติดตามสัญญาณอ้างอิงในตำแหน่งรกรางรูปสามเหลี่ยม โดยอาศัยอนุกรมฟูเรียร์ 7 ฮาร์โมนิกแรกในการสร้างสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม โดยแบ่งการจำลองออกเป็นสี่กรณี กรณีแรกและกรณีสองกำหนดให้คาบของสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 10 วินาที และมีขนาดของคลื่นเท่ากับ 40 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ ส่วนกรณีสามและกรณีสี่กำหนดให้คาบของสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 5 วินาที และมีขนาดของคลื่นเท่ากับ 40 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ โดยทุกการจำลองคาบการซักอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที เส้นสีน้ำเงินคือผลตอบสนองของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี และเส้นแดงคือผลตอบสนองของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

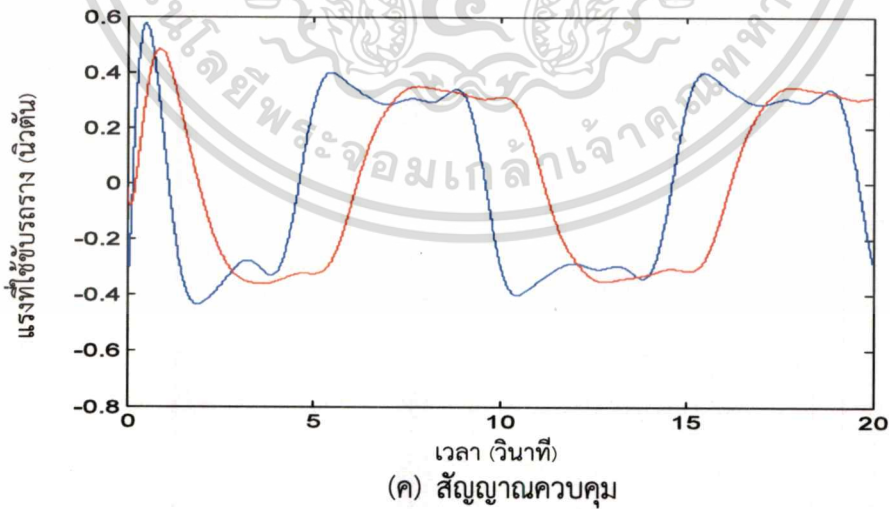
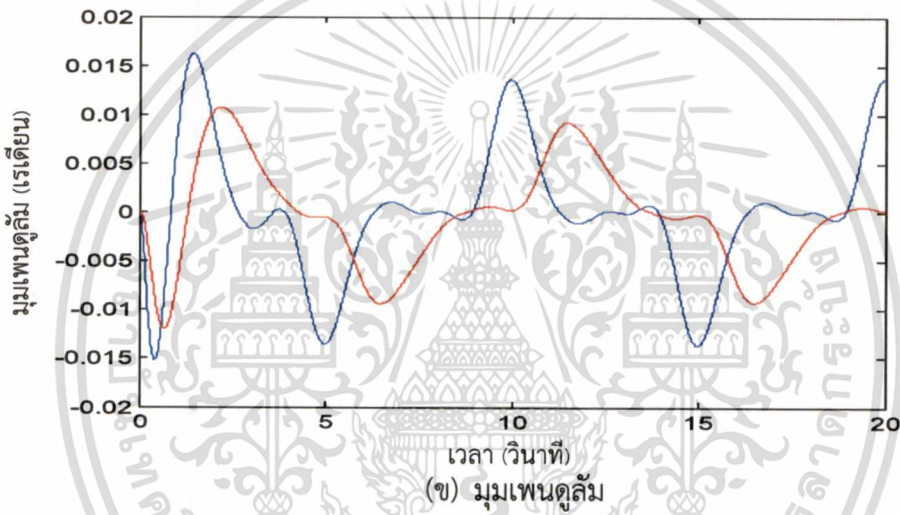
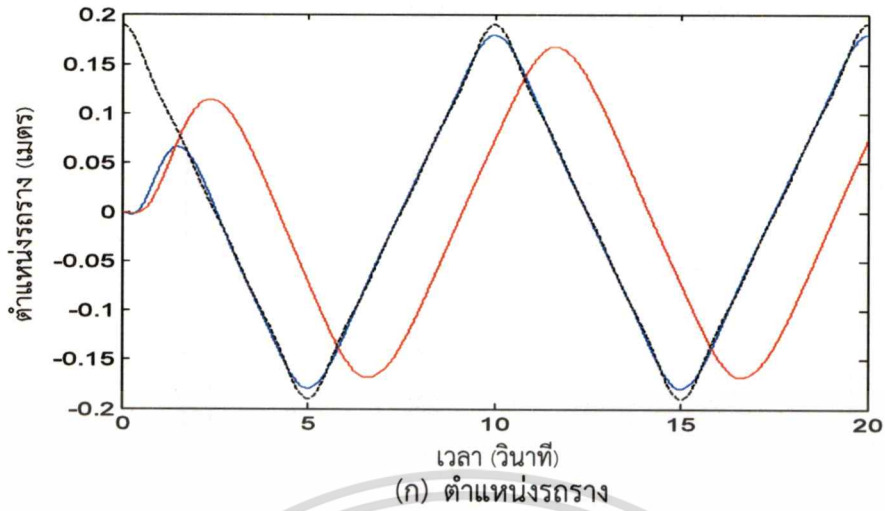
#### 4.3.3.1 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมได้คล้ายรูปสามเหลี่ยมมากกว่าและดีกว่าตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ ซึ่งเห็นได้จากผลตอบสนองตำแหน่งรกรางสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมได้ตลอดการเคลื่อนที่ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดผิดพลาดประมาณ 2.14 เซนติเมตร คิดเป็น 5.63% และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดผิดพลาดประมาณ 4.46 เซนติเมตร คิดเป็น 11.74% นอกจากนี้ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 59.04 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.64 วินาที แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจะใช้สัญญาณควบคุมสูงกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่า เนื่องจากกระยะการเคลื่อนที่ในตำแหน่งรกรางที่มากกว่านั่นเอง

#### 4.3.3.2 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

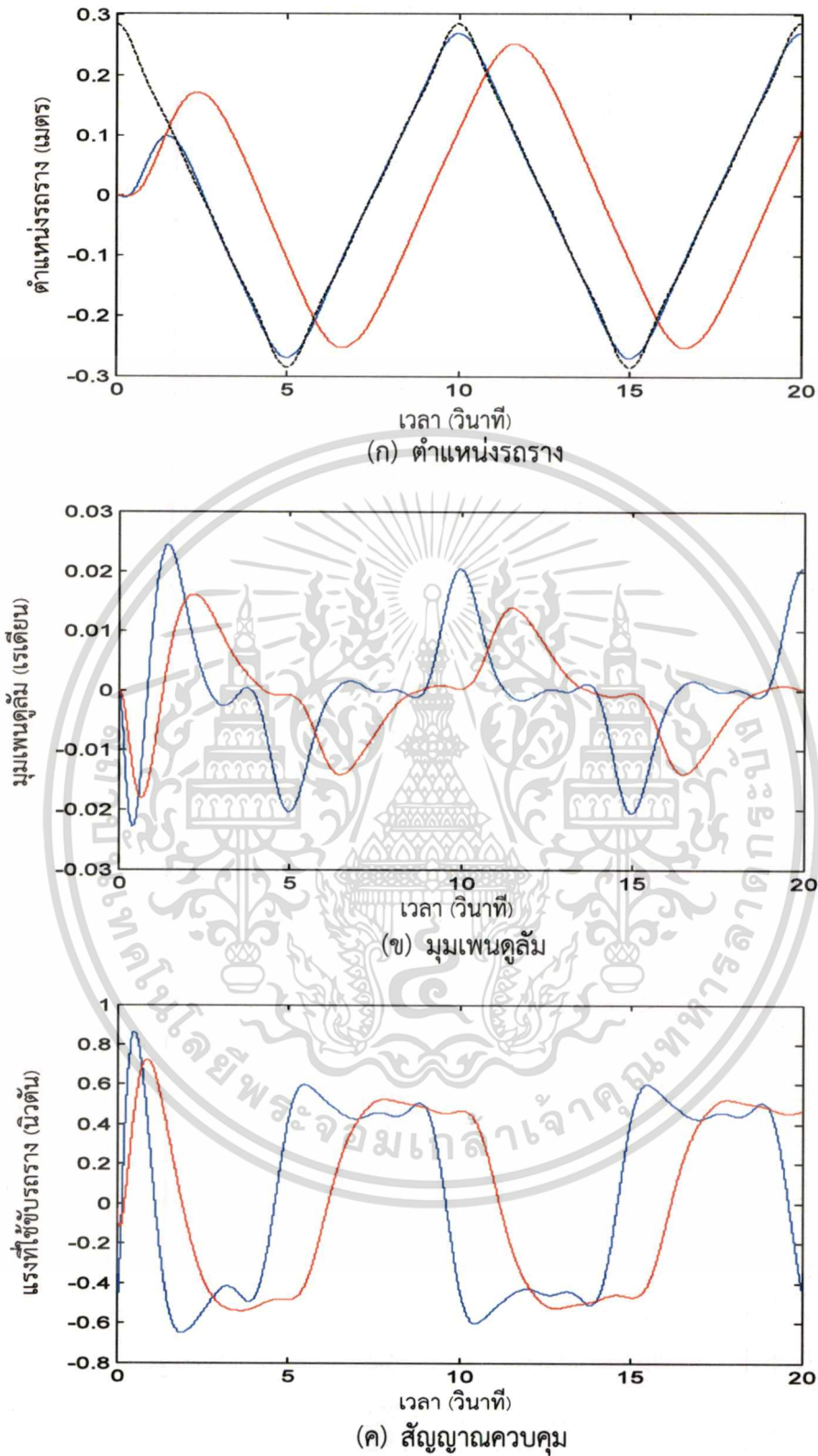
เช่นเดียวกับกรณี 4.3.3.1 โดยผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมในตำแหน่งรกรางได้คล้ายรูปสามเหลี่ยมมากกว่าและดีกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ ซึ่งเห็นได้จากผลตอบสนองตำแหน่งรกรางสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมได้ตลอดการเคลื่อนที่ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดผิดพลาดประมาณ 3.22 เซนติเมตร คิดเป็น 5.65% และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดผิดพลาดประมาณ 6.72 เซนติเมตร คิดเป็น 11.79% นอกจากนี้ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 66.96 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.86 วินาที ซึ่งไม่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ทัน แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจะใช้สัญญาณควบคุมสูงกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.20** ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของ  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิง  
มีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.21** ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของ  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิง

มีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

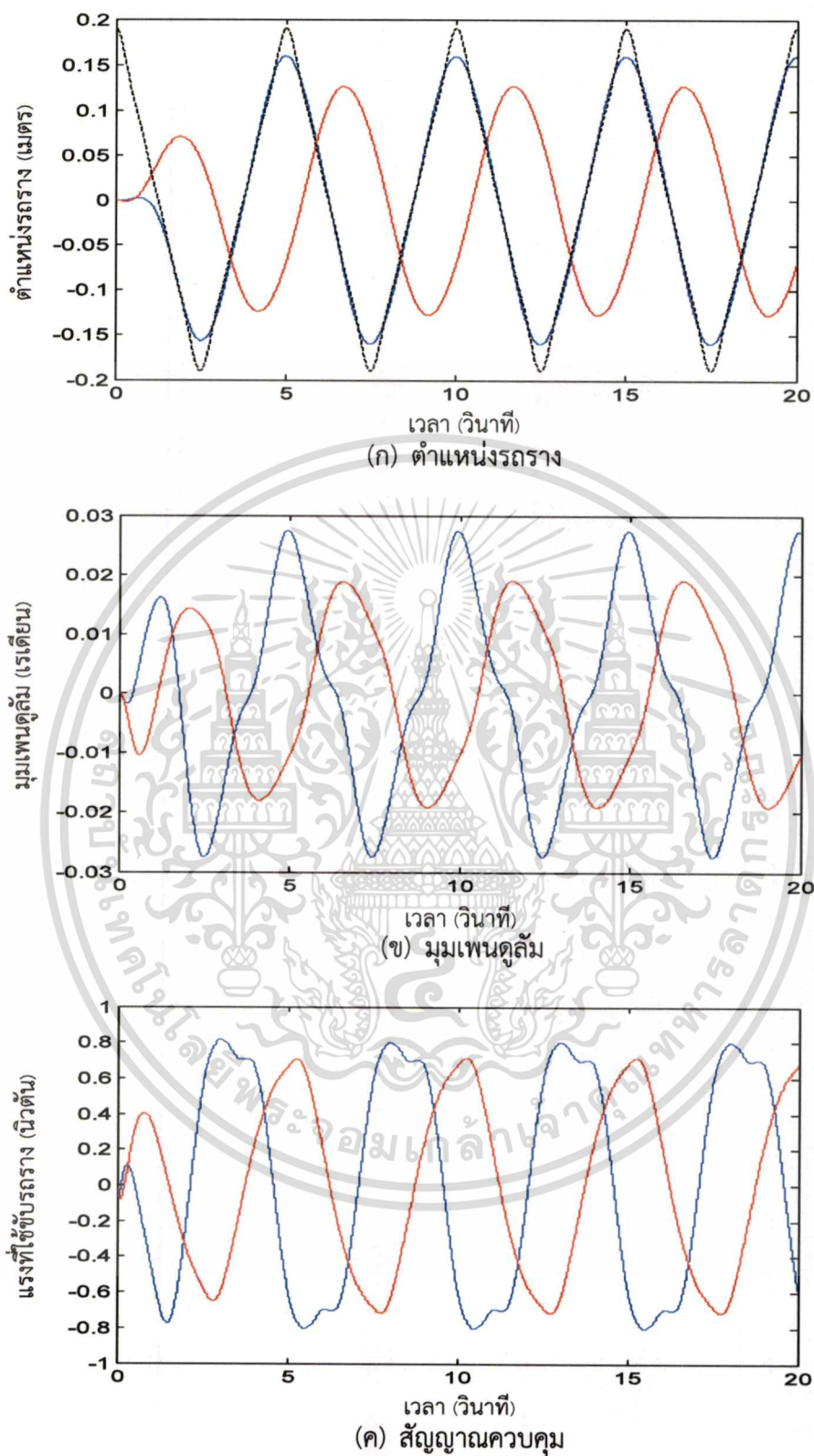
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.3 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

การจำลองนี้กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมมีคาบสั้นลง โดยผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าตัวควบคุมเอ็มพีซียังสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมในตำแหน่งรถรางได้คล้ายรูปสามเหลี่ยมมากกว่าและดีกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยผลตอบสนองตำแหน่งรถรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดผิดพลาดประมาณ 6.02 เซนติเมตร คิดเป็น 15.85% ในขณะที่ผลตอบสนองตำแหน่งรถรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดผิดพลาดประมาณ 12.58 เซนติเมตร คิดเป็น 33.12% นอกจากนั้นผลตอบสนองตำแหน่งรถรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 122.4 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.70 วินาที ซึ่งไม่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ทัน แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจะใช้สัญญาณควบคุมสูงกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่า

#### 4.3.3.4 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

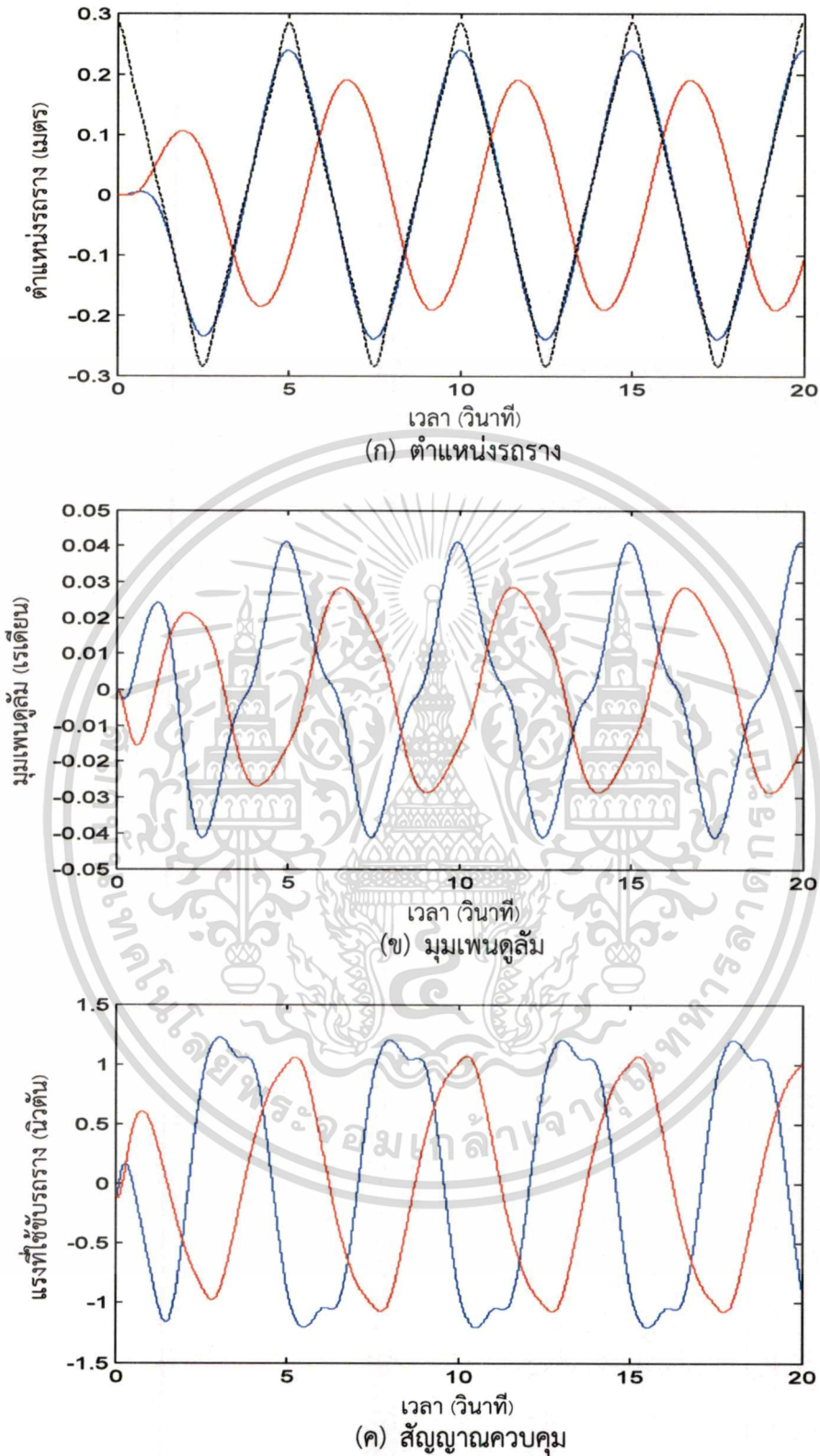
เช่นเดียวกันกรณี 4.3.3.3 โดยผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซียังสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมในตำแหน่งรถรางได้คล้ายรูปสามเหลี่ยมมากกว่าและดีกว่าตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยผลตอบสนองตำแหน่งรถรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดผิดพลาดประมาณ 9.04 เซนติเมตร คิดเป็น 15.87% และของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดผิดพลาดประมาณ 18.88 เซนติเมตร คิดเป็น 33.13% นอกจากนั้นผลตอบสนองตำแหน่งรถรางของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 121.46 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.69 วินาที ซึ่งไม่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ทัน แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจะใช้สัญญาณควบคุมสูงกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนมากกว่า



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของ  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิง

มีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.23** ผลการจำลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของ  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิง

มีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีในการควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางโดยอาศัยทฤษฎีการออกแบบในบทที่ 3 และเปรียบเทียบการจำลองในบทที่ 4 ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็นสามส่วนดังนี้ ส่วนแรกเป็นการนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลอง เพื่อตรวจสอบผลการควบคุมและความถูกต้องของแบบจำลองอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง ส่วนที่สองเป็นการทดลองปรับขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  กับคาบการชกตัวอย่าง  $T_s$  และวินิจัยผลการปรับค่าทั้งสองในกรณีหนึ่งเอาต์พุต กรณีสองเอาต์พุต และกรณีตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้ ส่วนที่สามเป็นการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได สัญญาณอ้างอิงรูปซายน์ และสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม

ทุกการทดลองซึ่งอาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาเฉพาะกรณีไม่มีข้อจำกัด เนื่องจากกรณีมีข้อจำกัดจำเป็นต้องใช้โปรแกรมกำลังสองเชิงเส้นในการแก้ปัญหา แต่คอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการเป็นรุ่นเก่าจึงไม่สามารถคำนวณขั้นตอนวิธีเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัดได้ทันภายในหนึ่งคาบการชกตัวอย่างที่เร็ว ด้วยเหตุนี้จึงไม่ใช้กรณีมีข้อจำกัดในการทดลองเพื่อควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง ซึ่งเป็นระบบที่มีผลตอบสนองเร็ว นอกจากนี้จากผลการจำลองในบทที่ 4 พบว่าหากใช้สัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันไดเพื่อกำหนดให้ตำแหน่งรถรางเคลื่อนที่ไป 1 เมตร สัญญาณควบคุมที่ต้องการใช้อาจเกินระดับการอิ่มตัว ซึ่งพบว่าอาจสูงถึงเกือบสองเท่าของความสามารถของตัวขับเร็ว ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบ ในการทดลองจึงพิจารณาให้รถรางเคลื่อนที่ไปเพียงครึ่งหนึ่งของการจำลองคือ 50 เซนติเมตร

#### 5.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองซึ่งอาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี

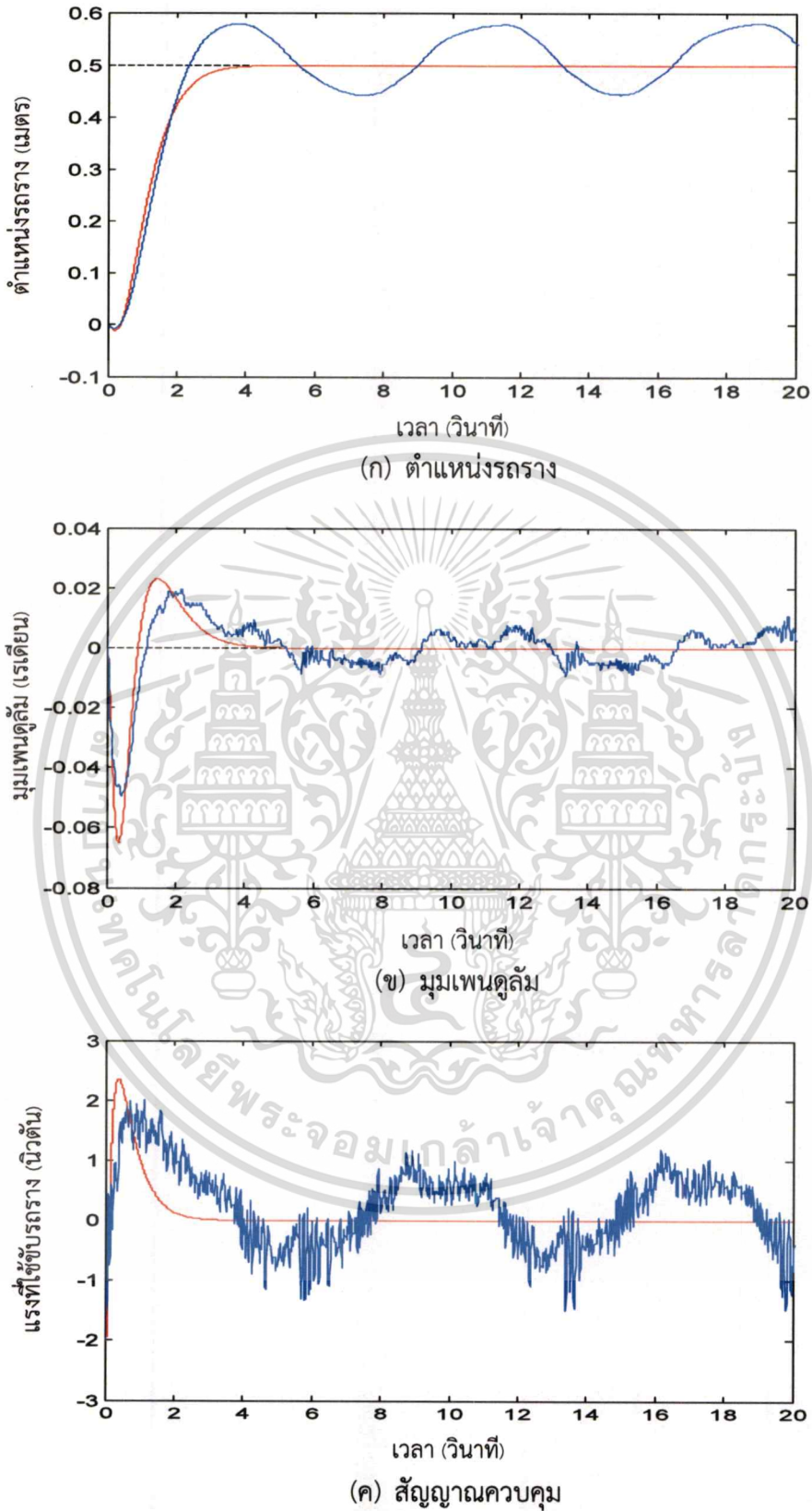
ในการทดลองนี้เลือกพิจารณาผลการทดลองซึ่งอาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีหนึ่งเอาต์พุตและตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ เมื่อ  $H_p = 210$  และ  $T_s = 10$  มิลลิวินาที โดยนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองในหัวข้อ 4.1.1.1 ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.1 เมื่อเส้นสีน้ำเงินและเส้นสีแดง คือผลการทดลองและผลการจำลอง ตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบพบว่าสมรรถนะของระบบซึ่งอาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจากการทดลองมีลักษณะใกล้เคียงกับการจำลอง โดยเฉพาะในช่วงสภาวะชั่วคราว ซึ่งสังเกตได้จากผลตอบสนองตำแหน่งรถรางมีเวลาขึ้นที่ใกล้เคียงกัน การเบี่ยงเบนของมุมเพนดูลัมและสัญญาณควบคุมใกล้เคียงกัน แต่ผลการทดลองมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่า และใช้สัญญาณควบคุมสูงสุดน้อยกว่าผลการจำลอง สำหรับใน

สภาวะคงตัวผลการทดลองพบว่าการแกว่งในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง ซึ่งคาดว่าเป็นผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบซึ่งอาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจากการทดลอง

และการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นเพื่อรักษาสมดุลของเพนดูลัมไว้ในทางปฏิบัติจริง และอาจเกิดจากการแบ่งนับ (Quantization) หรือปัญหาอื่น ๆ จากผลการเปรียบเทียบนี้ จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองเชิงเส้นของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรางที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 สามารถนำไปใช้ในตัวควบคุมเอ็มพีซีซึ่งอาศัยแบบจำลองในการทำนายและการควบคุม ซึ่งให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้

## 5.2 การปรับขอบเขตการทำนายตอนบนของตัวควบคุมเอ็มพีซี

การทดลองนี้ศึกษาและวินิจฉัยผลกระทบจากการปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซีและคาบการซีกตัวอย่าง  $T_s$  โดยการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ อัตราการซีกตัวอย่างที่เร็ว และอัตราการซีกตัวอย่างที่ช้า และในแต่ละส่วนจะพิจารณากรณีตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ และกรณีตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้ โดยเอาต์พุตแบ่งเป็นกรณีหนึ่งเอาต์พุต คือ ตำแหน่งรราง  $x$  เพียงลำพัง และกรณีสองเอาต์พุต คือ มุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรราง  $x$  ดังต่อไปนี้

### 5.2.1 อัตราการซีกตัวอย่างที่เร็ว

ในอัตราการซีกตัวอย่างที่เร็วกำหนดให้คาบซีกตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที โดยพิจารณาจำนวนเอาต์พุตและความสามารถในการวัดตัวแปรสถานะได้เป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

#### 5.2.1.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

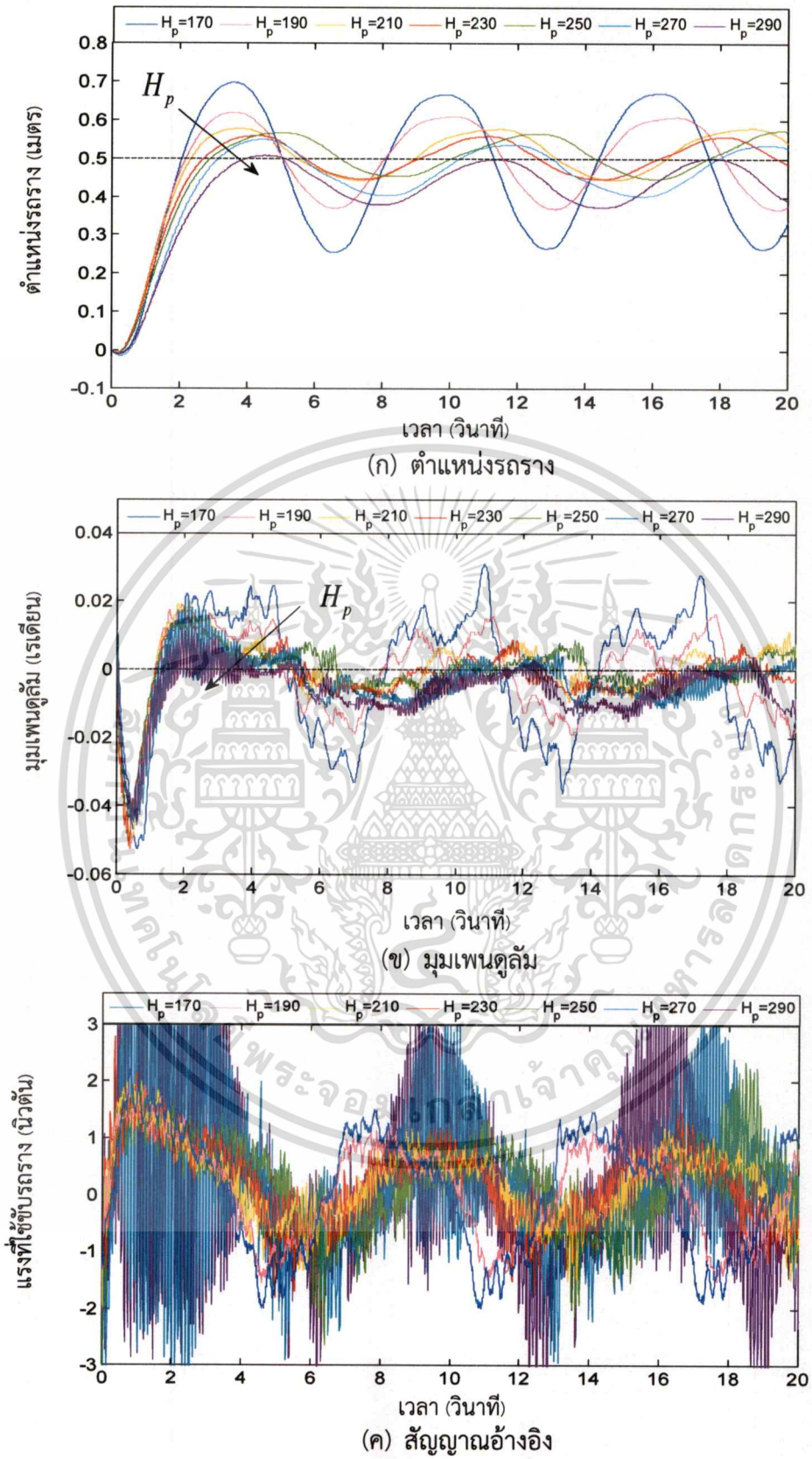
การทดลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือ ตำแหน่งรราง  $x$  และเลือกพิจารณาช่วงขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  เหมือนกับการจำลองที่ 4.1.1.1 โดยช่วง  $H_p$  เท่ากับ 170 ถึง 290 ซึ่งผลตอบสนองของระบบจากการปรับค่า  $H_p$  แสดงดังรูปที่ 5.2

ผลการทดลองพบว่ารรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตรได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลการปรับค่า  $H_p$  พบว่า ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อย เช่น  $H_p = 170$  จะปรากฏการพุ่งเกิน และการแกว่งรอบ ๆ จุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรรางในระยะที่กว้าง แต่การพุ่งเกินและการแกว่งดังกล่าวจะสามารถลดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง และสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบุน้อยลงด้วย แต่ทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  นานขึ้น อย่างไรก็ตามหาก  $H_p$  มีค่าน้อยหรือมากเกินไป พบว่าผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวจะมีความผิดพลาด สังเกตจากการแกว่งของตำแหน่งรรางซึ่งไม่ได้แกว่งรอบระยะ 50 เซนติเมตร โดยที่  $H_p = 170$  แกว่งรอบ 46.69 เซนติเมตร ในช่วง 26.58 ถึง 66.80 เซนติเมตร และที่  $H_p = 290$  แกว่งรอบ 43.56 เซนติเมตร ในช่วง 37.24 ถึง 49.88 เซนติเมตร ยิ่งไปกว่านั้นหาก  $H_p$  มีค่ามากเกินไป ดังกรณี  $H_p = 290$  พบว่าเกิดการสั่นมากในผลตอบสนองมุมเพนดูลัม และเกิดการสั่นมากในสัญญาณควบคุม ซึ่งส่งผลให้เกิดการอิมพัลส์ บ้างขณะด้วย

จากผลการทดลองสังเกตเห็นว่าผลตอบสนองตำแหน่งรรางที่สภาวะคงตัวมีการแกว่งค่อนข้างคงที่ลักษณะคล้ายสัญญาณรูปซายน์ที่มีความถี่ต่างกันขึ้นกับค่า  $H_p$  โดยอาจเกิดจากพลวัตความถี่สูงในระบบซึ่งมิได้รวมไว้ในแบบจำลอง (High-frequency unmodeled dynamics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการคัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ผลการทดลองในอัตรการชักตัวอย่างที่เร็ว กรณีหนึ่งเอาต์พุตและตัวแปรสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

การทดลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือ มุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรถราง  $x$  โดยเลือกพิจารณา ช่วงขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  เหมือนกับการจำลองที่ 4.1.1.2 แต่เนื่องจากคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการเป็นรุ่นเก่า จึงคำนวณขั้นตอนวิธีเอ็มพีซีได้ทันเวลาในช่วง  $H_p$  เท่ากับ 130 ถึง 150 เท่านั้น ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.3

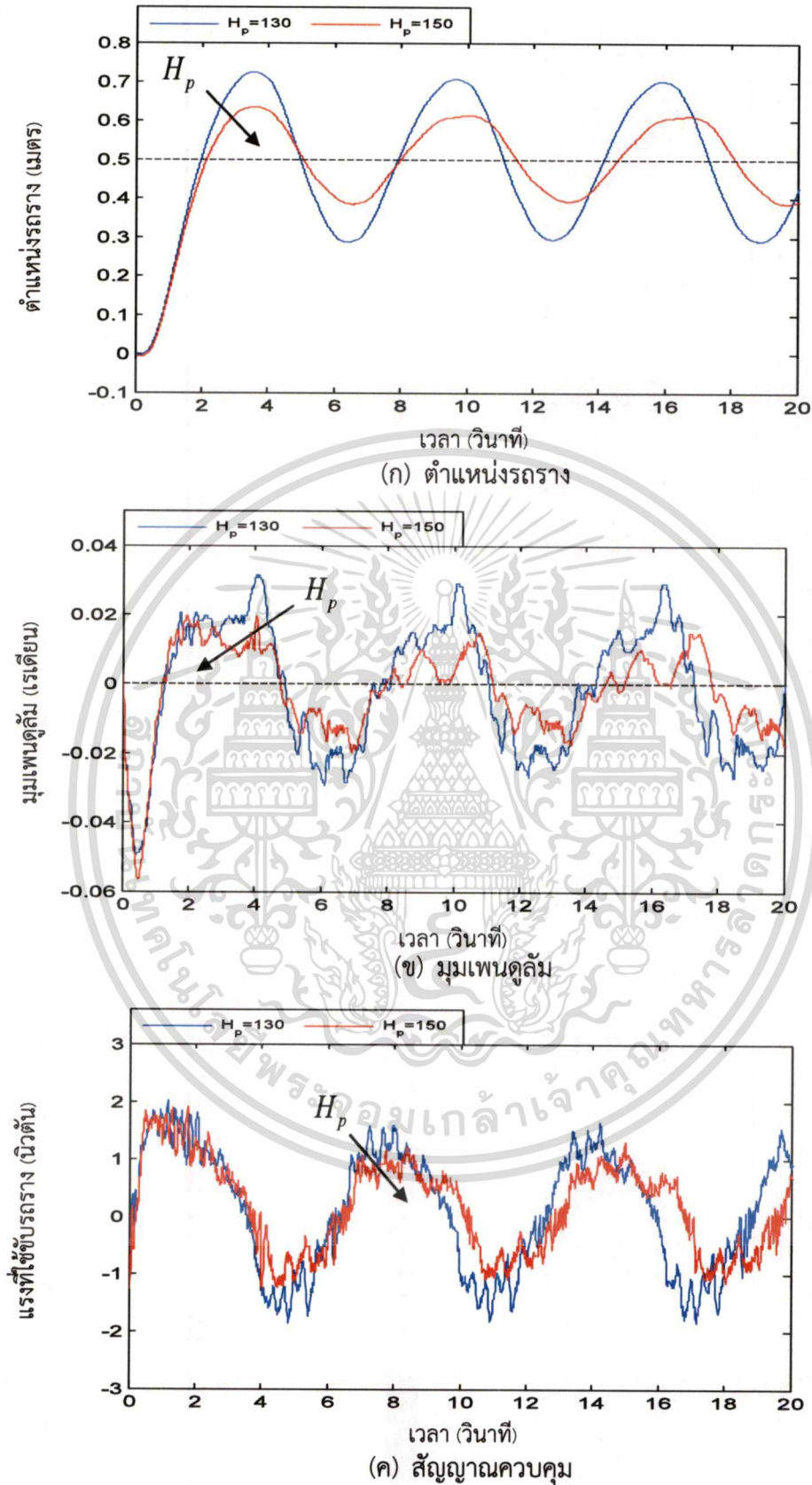
ในการทำงานเดียวกันกับกรณีหนึ่งเอาต์พุต พบว่ารถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตรได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าที่  $H_p=130$  ปรากฏการพุ่งเกิน และเกิดการแกว่งรอบ ๆ จุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่การพุ่งเกินและการแกว่งดังกล่าวสามารถลดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลงและสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบบน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตามทำให้ผลตอบสนองช้าลงซึ่งส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  นานขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองกรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ในหัวข้อ 5.2.1.1 พบว่าสามารถใช้ค่า  $H_p$  ที่น้อยกว่าเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพ และรถรางแกว่งรอบตำแหน่ง 50 เซนติเมตรได้ ถึงแม้  $H_p$  จะมีค่าน้อย ซึ่งดีกว่ากรณีหนึ่งเอาต์พุต

### 5.2.1.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

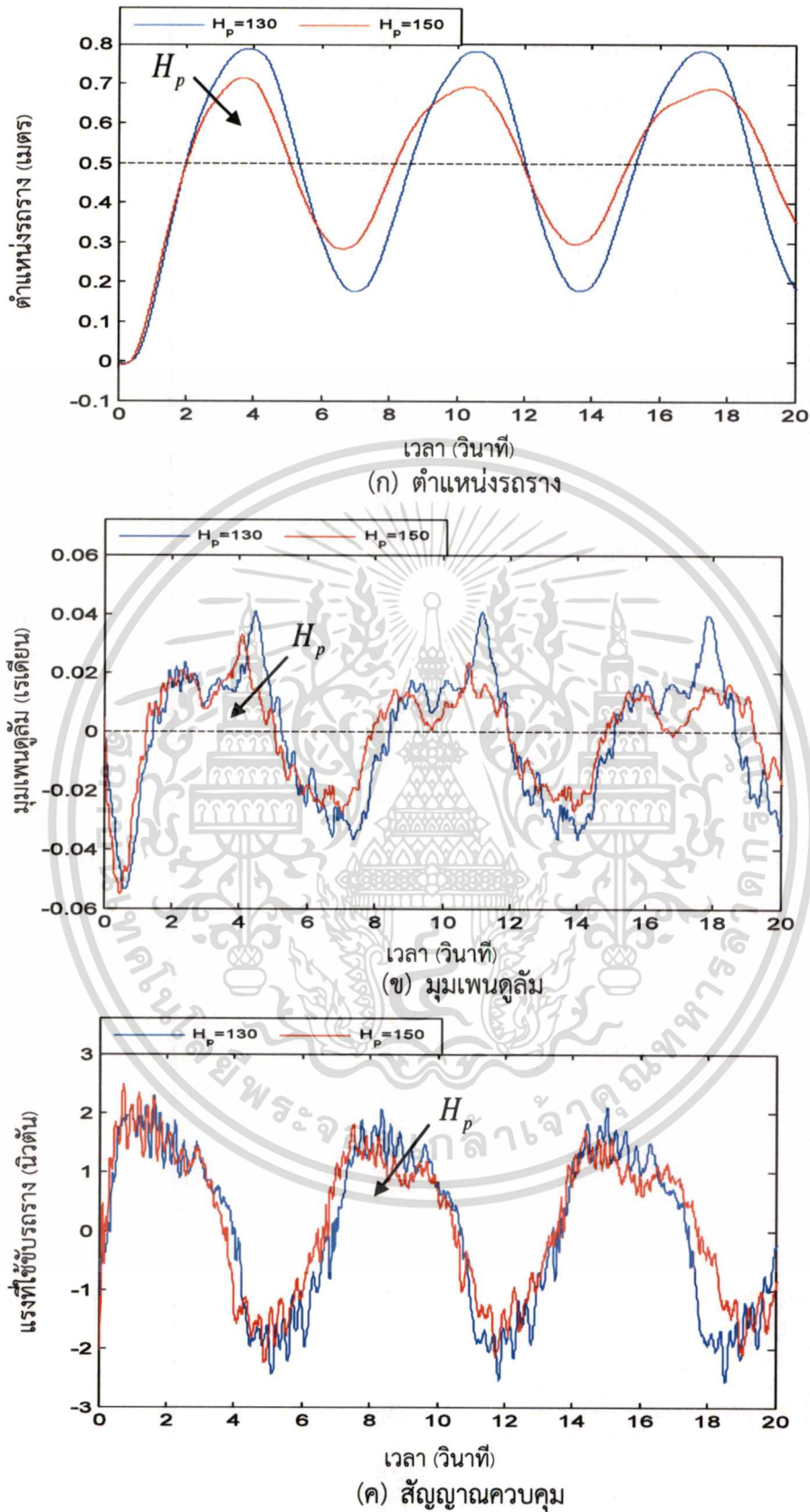
การทดลองนี้กำหนดให้เอาต์พุตคือมุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรถราง  $x$  และอาศัยตัวสังเกตสถานะเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ตัวแปรสถานะขึ้นมา โดยเลือกช่วงขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  เหมือนกับการจำลองที่ 4.1.1.3 แต่ช่วงที่สามารถประมวลผลขั้นตอนคำนวณของควบคุมเอ็มพีซีได้ทันเวลา คือ ช่วง  $H_p$  เท่ากับ 130 ถึง 150 เท่านั้น ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.4

จากการทดลองพบว่าการใช้ตัวสังเกตสถานะมีผลลัพธ์ในลักษณะเดียวกันกับกรณีสองเอาต์พุตและตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ โดยรถรางสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตรได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ และผลจากการปรับค่า  $H_p$  ให้ผลในลักษณะเดียวกับกรณีตัวแปรสถานะวัดได้ในหัวข้อ 5.2.1.2 โดยพบว่าที่  $H_p=130$  ปรากฏการพุ่งเกินและการแกว่งรอบจุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่การพุ่งเกินและการแกว่งดังกล่าวจะลดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลงและสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบบน้อยลงด้วย แต่ทำให้ผลตอบสนองช้าลงซึ่งส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  นานขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองในกรณีสองเอาต์พุตที่ใช้ตัวสังเกตสถานะกับกรณีสองเอาต์พุตที่ตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ พบว่าที่  $H_p$  เท่ากันกรณีที่สามสามารถวัดแปรสถานะได้จะมีผลลัพธ์ดีกว่า เช่น การแกว่งรอบจุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถรางน้อยกว่า มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่า และสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบบน้อยกว่าด้วย



รูปที่ 5.3 ผลการทดลองในอัตราการชั้ตัวอย่างที่เร็ว กรณีสองเอาต์พุตและตัวแปรสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงสามารถวัดได้ ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ผลการทดลองในอัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว กรณีสองเอาต์พุตและตัวแปรสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง **ไม่สามารถวัดได้** ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.2 อัตราการชกตัวอย่างที่ช้า

ในอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า กำหนดให้คาบชกตัวอย่าง  $T_s = 30$  มิลลิวินาที เนื่องจากพบว่าไม่สามารถทดลองที่คาบชกตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับการจำลองที่ 100 มิลลิวินาทีได้ เพราะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ โดยพิจารณาเอาต์พุตของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง และความสามารถในการวัดตัวแปรสถานะได้เป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

### 5.2.2.1 กรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

การทดลองนี้กำหนดให้เอาต์พุตคือตำแหน่งรถราง  $x$  และเลือกพิจารณาช่วงขอบเขตการทำงานตอนบน  $H_p$  เท่ากับ 60 ถึง 100 โดยผลตอบสนองของระบบแสดงดังรูปที่ 5.5

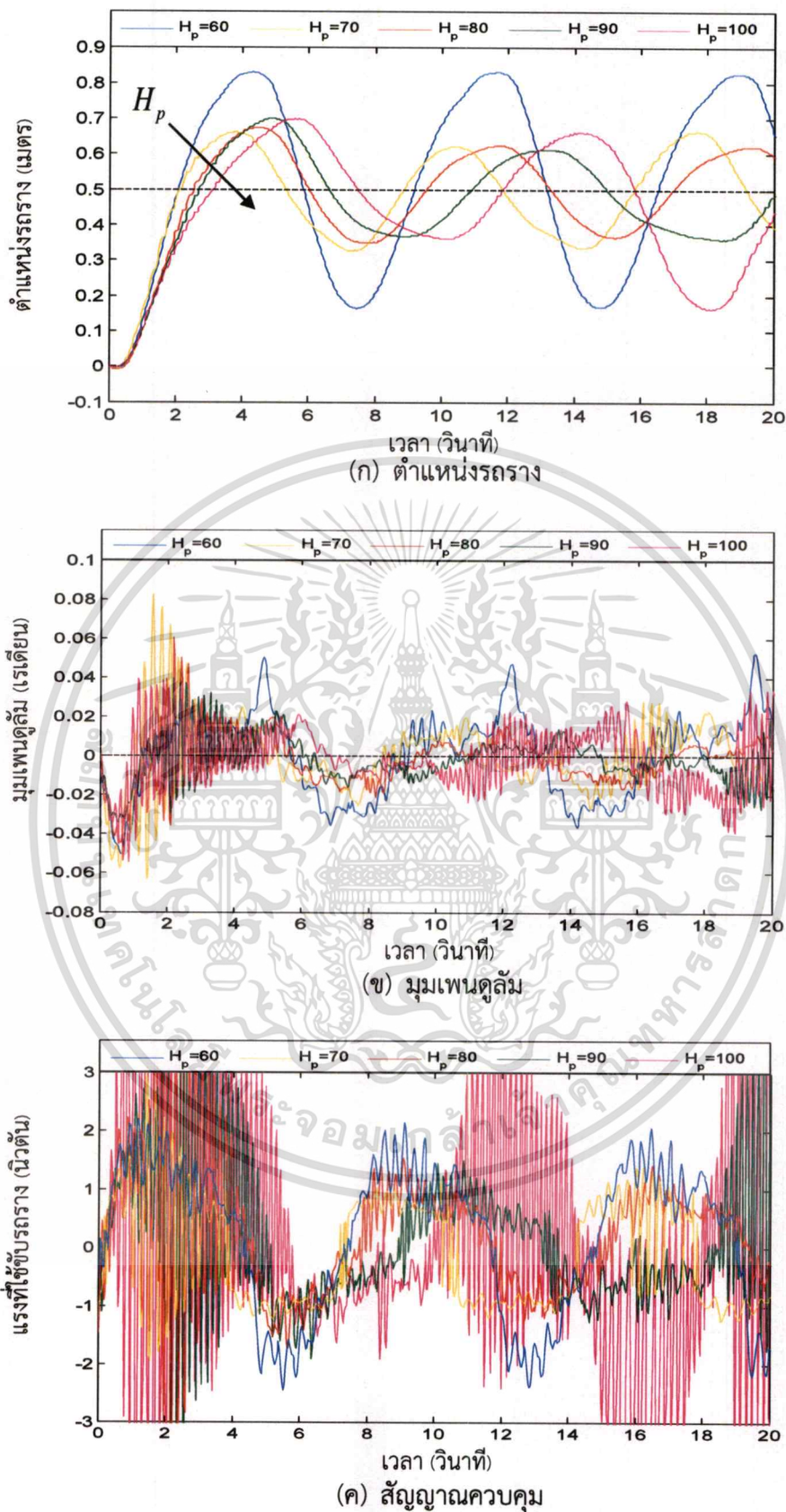
ผลการทดลองมีลักษณะเดียวกับกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วของหนึ่งเอาต์พุต ในหัวข้อ 5.2.1.1 โดยพบว่ารถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตรได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ จากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าถ้า  $H_p$  มีค่าน้อย เช่น  $H_p = 60$  จะปรากฏการพุ่งเกิน และการแกว่งรอบ ๆ จุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่สามารถลดการพุ่งเกินและการแกว่งดังกล่าวได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลงและสัญญาณควบคุมที่ใช้ในระบบน้อยลงด้วย แต่ทำให้ผลตอบสนองช้าลงซึ่งส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  นานขึ้น อย่างไรก็ตามหาก  $H_p$  มีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปพบว่าเกิดการสั่นมากในผลตอบสนองมุมเพนดูลัม และเกิดการอึดตัวในสัญญาณควบคุม

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วในหัวข้อ 5.2.1.1 พบว่าสมรรถนะของระบบที่ใช้อัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกว่าการใช้อัตราการชกตัวอย่างที่ช้า เช่นการแกว่งรอบจุดอ้างอิงน้อยกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่า เป็นต้น แต่ช่วงการทำงานสำหรับกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วต้องใช้ค่า  $H_p$  ที่มากกว่า ส่งผลให้ตัวประมวลผลต้องทำงานมากกว่า

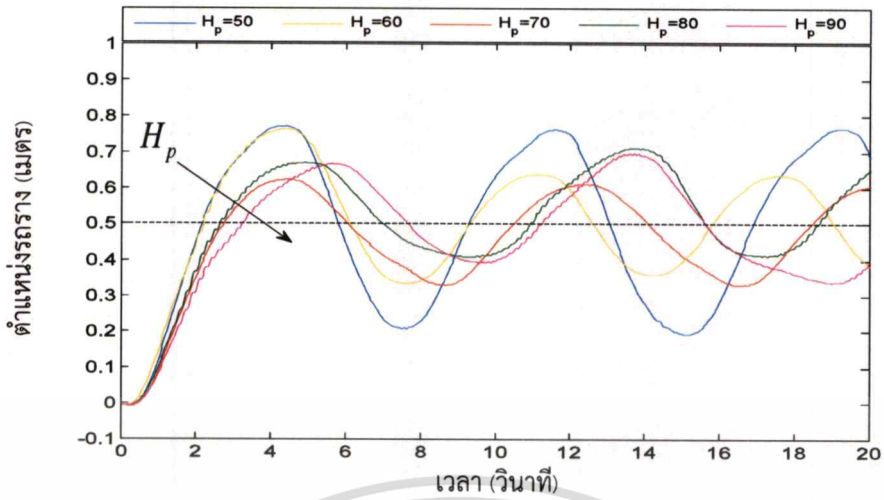
### 5.2.2.2 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้

การทดลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือมุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรถราง  $x$  โดยเลือกพิจารณาช่วงขอบเขตการทำงานตอนบน  $H_p$  เท่ากับ 50 ถึง 90 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.6

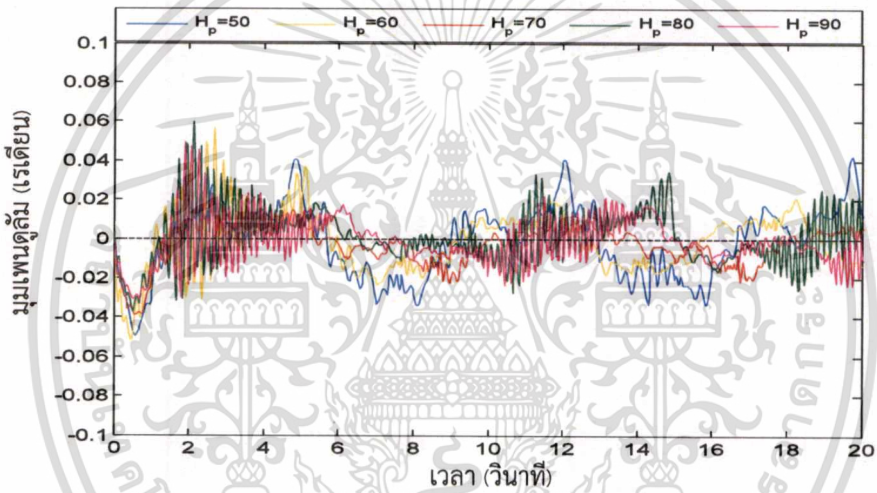
ผลการทดลองพบว่ารถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตรได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลจากการปรับค่า  $H_p$  พบว่าถ้า  $H_p$  มีค่าน้อย เช่น  $H_p = 50$  จะปรากฏการพุ่งเกิน และแกว่งรอบ ๆ จุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่การพุ่งเกินและการแกว่งดังกล่าวสามารถลดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง และสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบบน้อยลงด้วย แต่ทำให้ผลตอบสนองช้าลงซึ่งส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  นานขึ้น



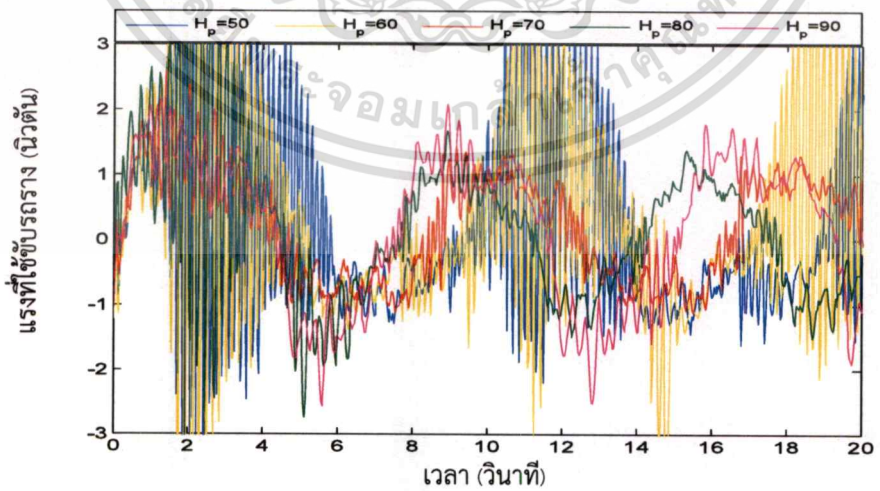
**รูปที่ 5.5** ผลการทดลองในอัตรการชักตัวอย่างที่ช้า กรณีหนึ่งเอาต์พุตและตัวแปรสถานะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตำแหน่งรถราง



(ข) มุมเพนดูลัม



(ค) สัญญาณควบคุม

**รูปที่ 5.6** ผลการทดลองในอัตรการชักตัวอย่างที่ช้า กรณีสองเอาต์พุตและตัวแปรสถานะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีสองเอาต์พุตในอัตราการชักตัวอย่างที่เร็วในหัวข้อ 5.2.1.2 พบว่าสมรรถนะของระบบที่ใช้อัตราการชักตัวอย่างที่เร็วกว่าการใช้อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า เช่น รถรางเคลื่อนที่ใกล้จุดอ้างอิงมากกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่า เป็นต้น แต่ช่วงการทำนายสำหรับกรณีอัตราชักตัวอย่างที่เร็วจะต้องใช้  $H_p$  ที่มากกว่า ส่งผลให้ตัวประมวลผลที่มีประสิทธิภาพต้องทำงานมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหนึ่งเอาต์พุตที่อัตราการชักตัวอย่างเท่ากัน ในหัวข้อ 5.2.2.1 พบว่าถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยคือช่วง 50 ถึง 70 สมรรถนะของระบบกรณีสองเอาต์พุตดีกว่า เช่น รถรางเคลื่อนที่ใกล้จุดอ้างอิงมากกว่า มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่า และสัญญาณควบคุมที่ใช้้น้อยกว่า แต่ทำให้ผลตอบสนองช้าลงซึ่งส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  นานขึ้น หาก  $H_p$  มีค่ามากตั้งแต่ 80 ขึ้นไป พบว่ากรณีสองเอาต์พุตเกิดการสั่นมากในผลตอบสนองมุมเพนดูลัม และสัญญาณควบคุมที่ใช้มากกว่ากรณีหนึ่งเอาต์พุต

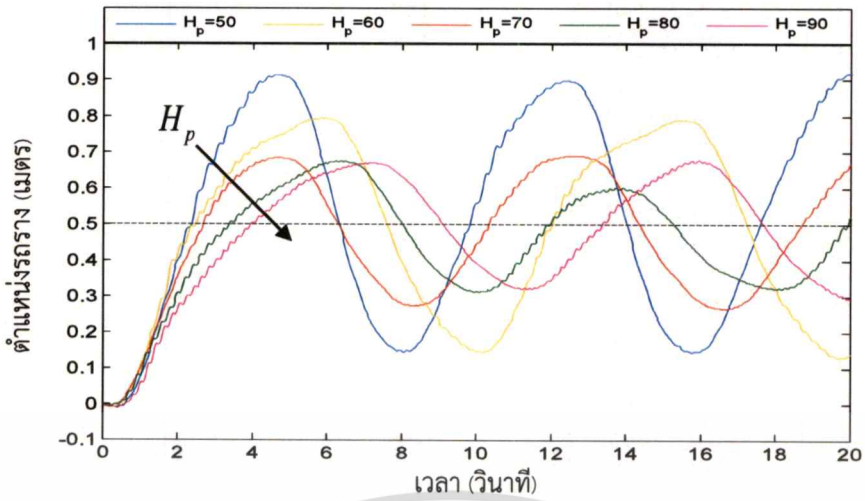
### 5.2.2.3 กรณีสองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

การทดลองนี้กำหนดให้เอาต์พุต คือมุมเพนดูลัม  $\theta$  กับตำแหน่งรถราง  $x$  โดยพิจารณาช่วงขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  เท่ากับ 50 ถึง 90 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.7

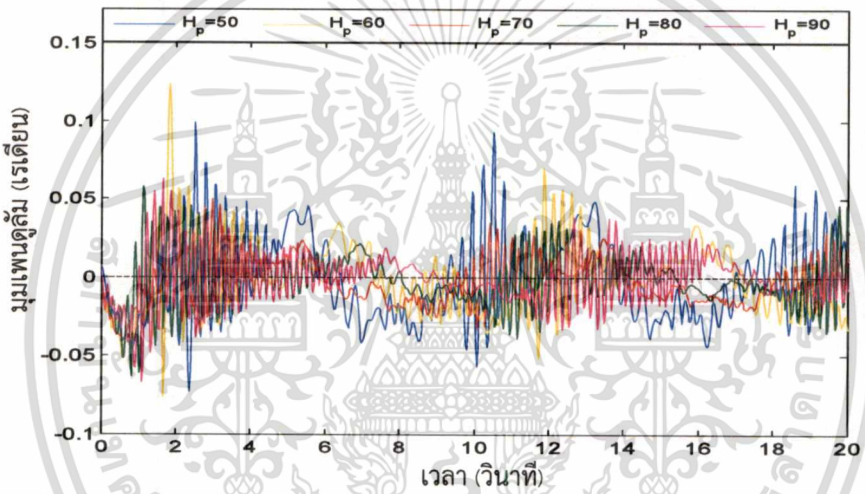
เช่นเดียวกับกับกรณีสองเอาต์พุตและตัวแปรสถานะสามารถวัดได้พบว่ารถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตรได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลการปรับค่า  $H_p$  พบว่าถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยจะปรากฏการพุ่งเกิน และแกว่งรอบ ๆ จุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่การพุ่งเกินและการแกว่งดังกล่าวสามารถลดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลงและสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบบน้อยลงด้วย แต่ข้อเสียเมื่อ  $H_p$  เพิ่มขึ้นคือทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  นานขึ้น อย่างไรก็ตามหาก  $H_p$  มีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไป พบว่าเกิดการสั่นมากในผลตอบสนองมุมเพนดูลัม และเกิดการอิมพัลส์ในสัญญาณควบคุม

ในการเปรียบเทียบกรณีสองเอาต์พุตที่ใช้ตัวสังเกตสถานะกับกรณีสองเอาต์พุตที่ตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ พบว่ากรณีที่  $H_p$  มีค่าเท่ากับกรณีที่สามารวัดแปรสถานะได้มีผลลัพธ์ดีกว่า เช่น การแกว่งรอบจุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถรางจะน้อยกว่า มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่า และสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบบน้อยกว่าด้วย

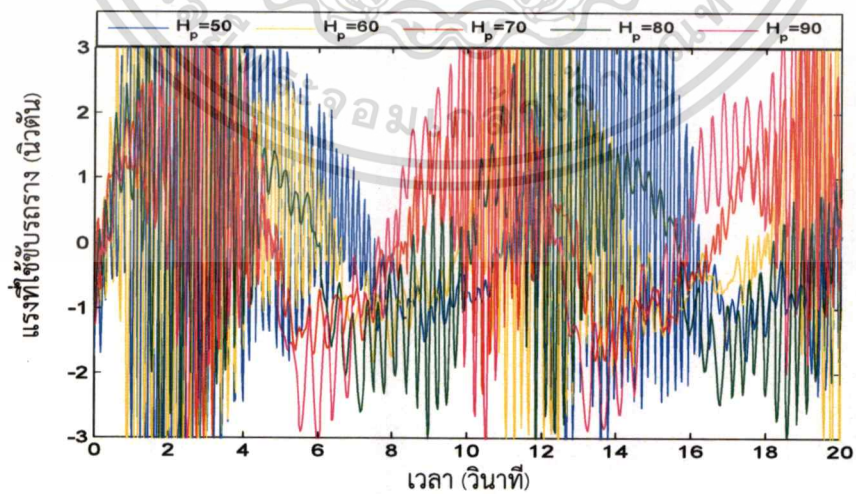
ความแตกต่างระหว่างกรณีอัตราการชักตัวอย่างที่ช้า และกรณีอัตราการชักตัวอย่างที่เร็วในกรณีสองเอาต์พุต คือสมรรถนะของระบบที่ใช้อัตราการชักตัวอย่างที่เร็วกว่าการใช้อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า เช่น การแกว่งรอบจุดอ้างอิงน้อยกว่า และมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่า เป็นต้น แต่ช่วงการทำนายสำหรับกรณีอัตราชักตัวอย่างที่เร็วต้องใช้ขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ที่มากกว่า ส่งผลให้ตัวประมวลผลทำงานมากกว่า



(ก) ตำแหน่งรอร่าง



(ข) มุมเพนดูลัม



(ค) สัญญาณควบคุม

**รูปที่ 5.7** ผลการทดลองในอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า กรณีสองเฮดต์พุดและตัวแปรสถานะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

ในการทดลองนี้จะเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ เหมือนกับการจำลองในหัวข้อ 4.3 โดยพิจารณากรณีหนึ่งเอาต์พุต และตัวแปรสถานะวัดได้เหมือนกัน กำหนดให้เมทริกซ์นำหน้าของตัวควบคุมเอ็มพีซีและตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีค่าสอดคล้องกัน โดยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีรูปแบบของเมทริกซ์นำหน้าคือ  $Q = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 1)$  และ  $R = 1/T_s$  ส่วนตัวควบคุมเอ็มพีซีมีรูปแบบของเมทริกซ์นำหน้าคือ  $Q(i) = 1$  โดย  $\forall i = H_w, \dots, H_p$  และ  $R(i) = 1$  โดย  $\forall i = 0, \dots, H_u - 1$  โดยเปรียบเทียบผลจากสมรรถนะในการติดตามสัญญาณอ้างอิง ตำแหน่งรถรางโดยแบ่งพิจารณาเป็นสามหัวข้อเช่นเดียวกับการจำลองดังนี้ หัวข้อแรกจะพิจารณาการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันไดขนาด 50 เซนติเมตร หัวข้อที่สองจะพิจารณาการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขายน และหัวข้อที่สามจะพิจารณาการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม

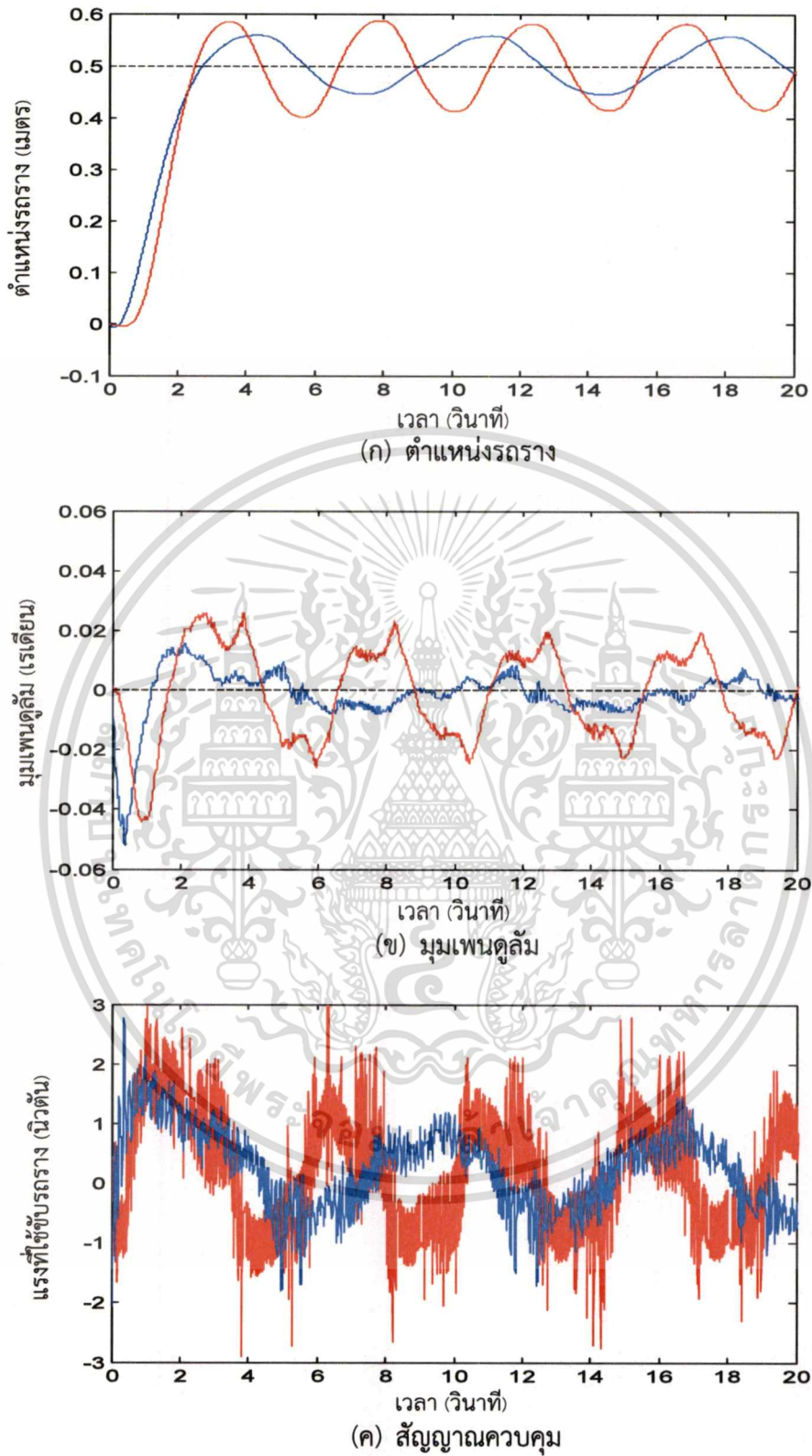
#### 5.3.1 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได

การทดลองนี้จะนำผลการทดลองของตัวควบคุมเอ็มพีซีที่ได้ทดลองในหัวข้อ 5.2 เปรียบเทียบกับผลการทดลองของตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์โดยแบ่งพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือ กรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว และกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่ช้า โดยเส้นสีน้ำเงินและเส้นสีแดง คือ ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ ตามลำดับ

##### 5.3.1.1 อัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว

กรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วกำหนดให้คาบการชกตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที และขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  เท่ากับ 210 โดยผลการทดลองเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.8

ผลการทดลองพบว่าการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์สามารถทำให้รถรางเคลื่อนที่ไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตร และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ได้ โดยช่วงสภาวะชั่วคราวระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดมุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนสูงสุดสูงกว่า และใช้สัญญาณควบคุมตอนเริ่มการทำงานมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์จะมีเวลาขึ้น  $t_r$  ที่เร็วกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามช่วงสภาวะคงตัวระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจะมีสมรรถนะของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ เช่น รถรางเคลื่อนที่รอบจุดอ้างอิงได้ใกล้เคียงกว่า มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่าและสัญญาณควบคุมที่ใช้้น้อยกว่า สังเกตเห็นว่าผลตอบสนองตำแหน่งรถรางที่สภาวะคงตัวจะมีการแกว่งค่อนข้างคงที่ลักษณะคล้ายสัญญาณรูปขายนที่ความถี่ต่างกัน ซึ่งพบว่าความถี่ของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีค่าเท่ากับ 0.144 เฮิร์ตซ์ หรือคาบเท่ากับ 6.94 วินาที และความถี่ของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์เท่ากับ 0.23 เฮิร์ตซ์ หรือคาบเท่ากับ 4.40 วินาที



รูปที่ 5.8 ผลการทดลองเปรียบเทียบกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่เร็วของระบบที่อาศัย  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในการติดตามสัญญาณ

อ้างอิงรูปข้างบนได เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

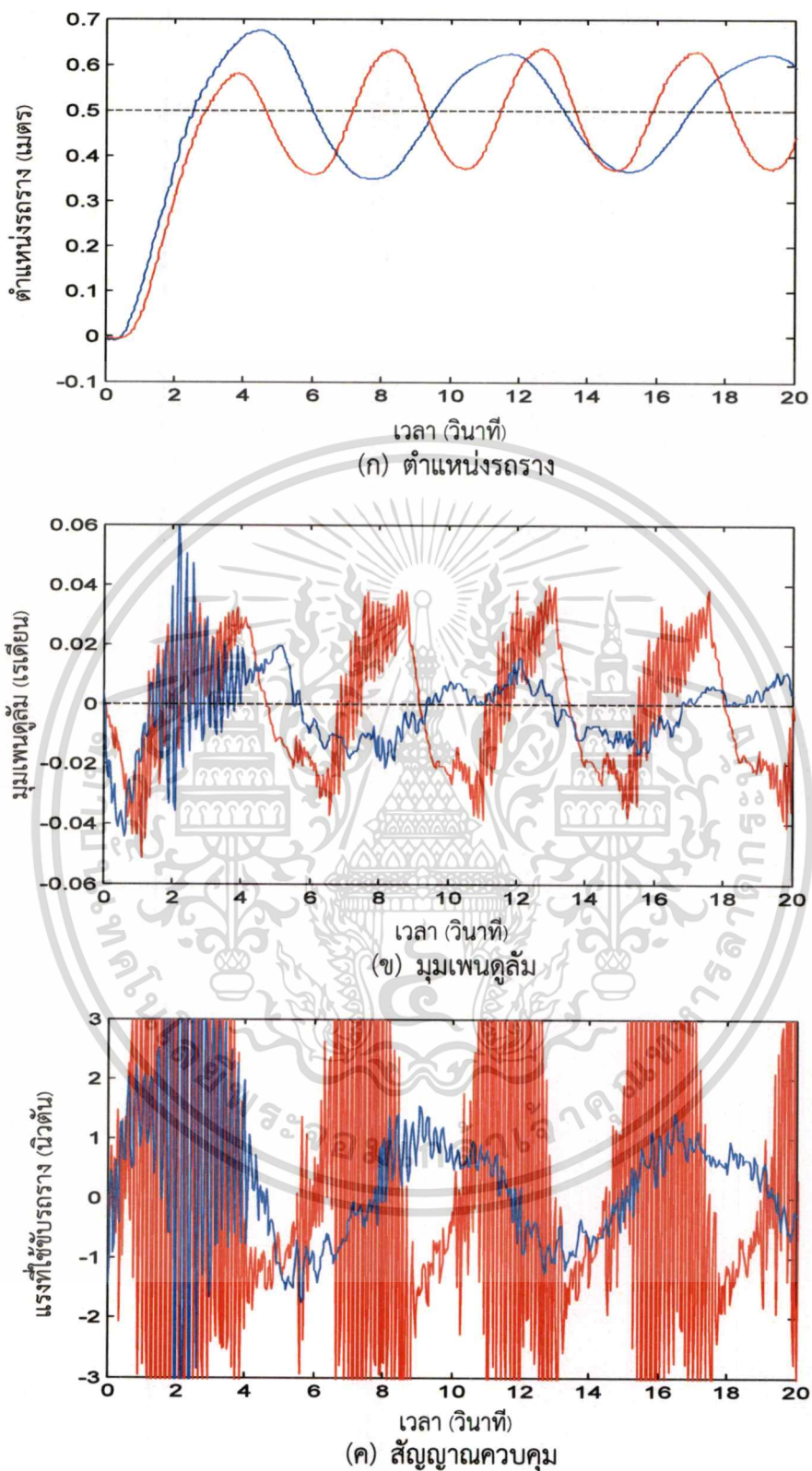
### 5.3.1.2 อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า

กรณีอัตราการชักตัวอย่างที่ช้ากำหนดให้คาบการชักตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 30 มิลลิวินาที และขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  เท่ากับ 80 โดยผลการทดลองเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.9

เช่นเดียวกันกับผลการทดลองกรณีอัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว คือระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์สามารถทำให้รางเคลื่อนที่ไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตร และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ได้ โดยช่วงสภาวะชั่วคราวระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งรรางมากกว่ามุมเพนดูลัมเพียงเบนมากกว่า และสัญญาณควบคุมตอนเริ่มการทำงานมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ แต่มีเวลาขึ้น  $t_r$  ที่เร็วกว่า นอกจากนั้นช่วงสภาวะคงตัวระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีจะมีสมรรถนะของระบบที่ดีกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ เช่น มุมเพนดูลัมเพียงเบนน้อยกว่า และสัญญาณควบคุมที่ใช้้น้อยกว่า นอกจากนั้นสัญญาณควบคุมของระบบที่อาศัยตัวควบคุมแอลคิวอาร์เกิดการอิมพัลส์ขึ้น เมื่อสังเกตผลตอบสนองตำแหน่งรรางที่สภาวะคงตัวพบว่ามีการแกว่งค่อนข้างคงที่ลักษณะคล้ายสัญญาณรูปซายน์ที่มีความถี่ต่างกัน โดยอาจเกิดจากพลวัตความถี่สูงในระบบซึ่งมิได้รวมไว้ในแบบจำลอง ซึ่งพบว่าความถี่ของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีค่าเท่ากับ 0.132 เฮิรตซ์ หรือคาบเท่ากับ 7.60 วินาที และความถี่ของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีค่าเท่าเดิมเหมือนกับกรณีอัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว ซึ่งเท่ากับ 0.23 เฮิรตซ์ หรือคาบเท่ากับ 4.40 วินาที

### 5.3.2 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์

การทดลองนี้จะเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์ของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสี่กรณี กรณีแรกและกรณีที่สองกำหนดให้คาบของสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 10 วินาที และมีขนาดเท่ากับ 40 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ และกรณีที่สามกับกรณีที่สี่กำหนดให้คาบของสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 5 วินาที และมีขนาดเท่ากับ 40 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ โดยทุกการทดลองคาบการชักตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที และขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซีเท่ากับ 210 โดยเส้นสีน้ำเงิน และเส้นสีแดงคือผลตอบสนองของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี และผลตอบสนองของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ ตามลำดับ



**รูปที่ 5.9** ผลการทดลองเปรียบเทียบกรณีอัตราการชกตัวอย่างที่ช้าของระบบที่อาศัย  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในการติดตามสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง **อ้างอิงรูปขึ้นบันได**งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

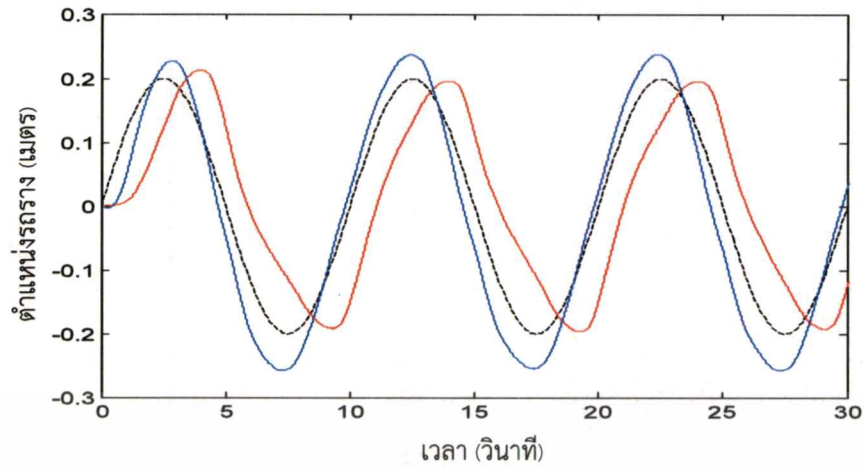
### 5.3.2.1 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.10 โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์ได้โดยมีเฟสใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสนำสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 6.84 องศา หรือเร็วกว่าประมาณ 0.19 วินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 38.2 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.06 วินาที นอกจากนั้นระบบที่ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีมีการเบี่ยงเบนของมุมเพนดูลัมช่วงสภาวะคงตัวน้อยมาก และสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุมน้อยกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรอรางในช่วงเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ โดยมีความผิดพลาดประมาณ 9.57 เซนติเมตร คิดเป็น 23.93% ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้โดยมีขนาดของสัญญาณรูปซายน์ที่เกือบเท่ากัน โดยความผิดพลาดประมาณ 0.8 เซนติเมตร คิดเป็น 2%

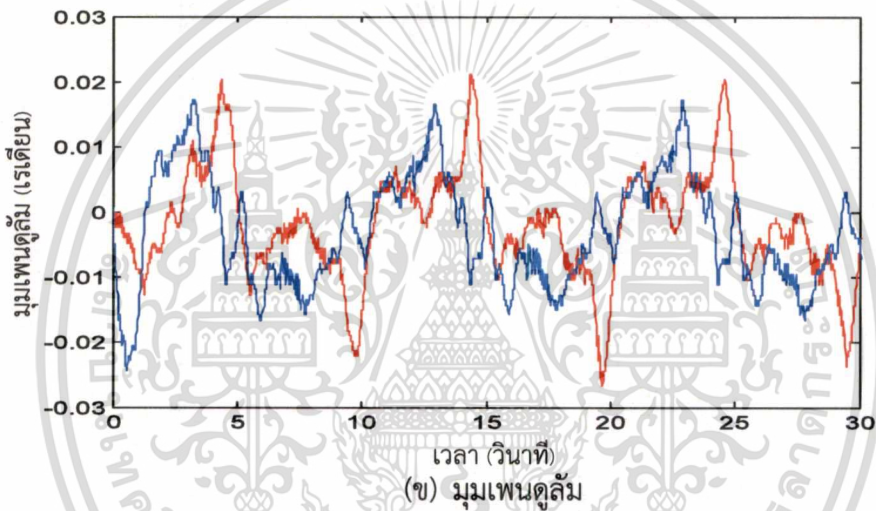
เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.3.2.1 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีในผลการทดลองมีความผิดพลาดในการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์มากกว่าผลการจำลองโดยมีขนาดสูงขึ้นค่อนข้างมาก ซึ่งอาจเกิดจากพลวัตความถี่สูงในระบบซึ่งมิได้รวมไว้ในแบบจำลอง เพราะจากที่สังเกตในหัวข้อ 5.3.1.1 ซึ่งพบว่ามีความถี่เรโซแนนซ์ในระบบที่ 0.144 เฮิรตซ์ ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณรูปซายน์ที่ 0.1 เฮิรตซ์

### 5.3.2.2 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

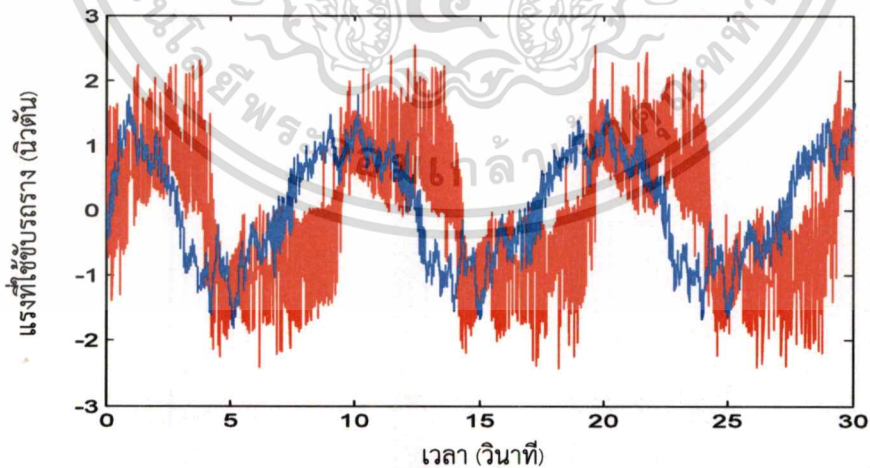
เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.3.2.1 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.11 โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์ได้โดยมีเฟสใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสนำสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 13.14 องศา หรือเร็วกว่าประมาณ 0.365 วินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 43.56 องศาหรือล่าช้าประมาณ 1.21 วินาที นอกจากนั้นระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีการเบี่ยงเบนของมุมเพนดูลัมช่วงสภาวะคงตัวน้อยมาก และสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุมน้อยกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรอรางในช่วงเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ โดยมีความผิดพลาดประมาณ 13.76 เซนติเมตร คิดเป็น 22.93% ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้โดยมีขนาดของสัญญาณรูปซายน์ที่เกือบเท่ากัน มีความผิดพลาดประมาณ 0.588 เซนติเมตร คิดเป็น 2% โดยความแตกต่างจากการจำลองอธิบายได้ด้วยเหตุดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3.2.1



(ก) ตำแหน่งรกราง



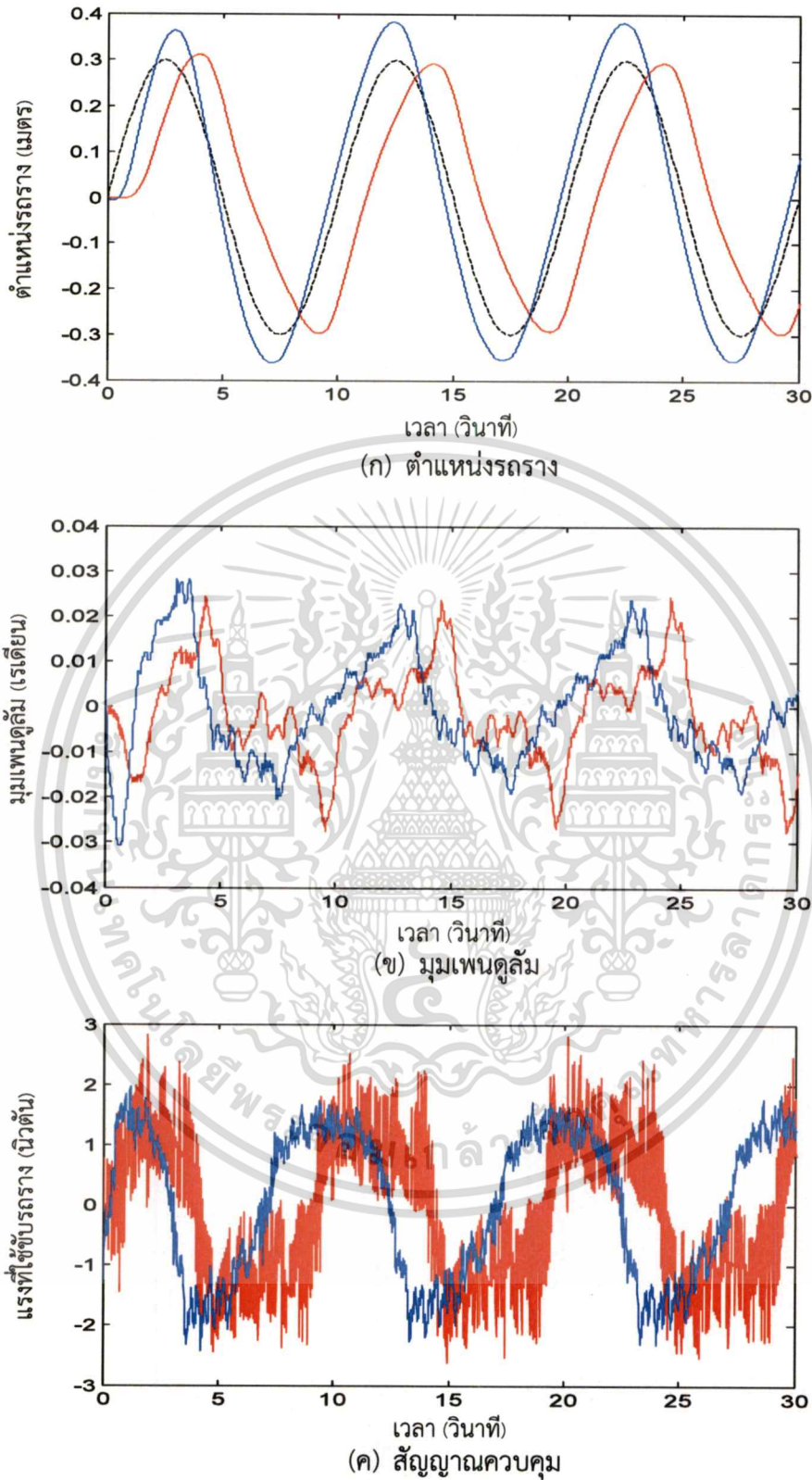
(ข) มุมเพนดูลัม



(ค) สัญญาณควบคุม

**รูปที่ 5.10** ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามอ้างอิงรูปขายนของตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.11** ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามอ้างอิงรูปขายนของตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคัวร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนและขนาด 60 เซนติเมตร การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

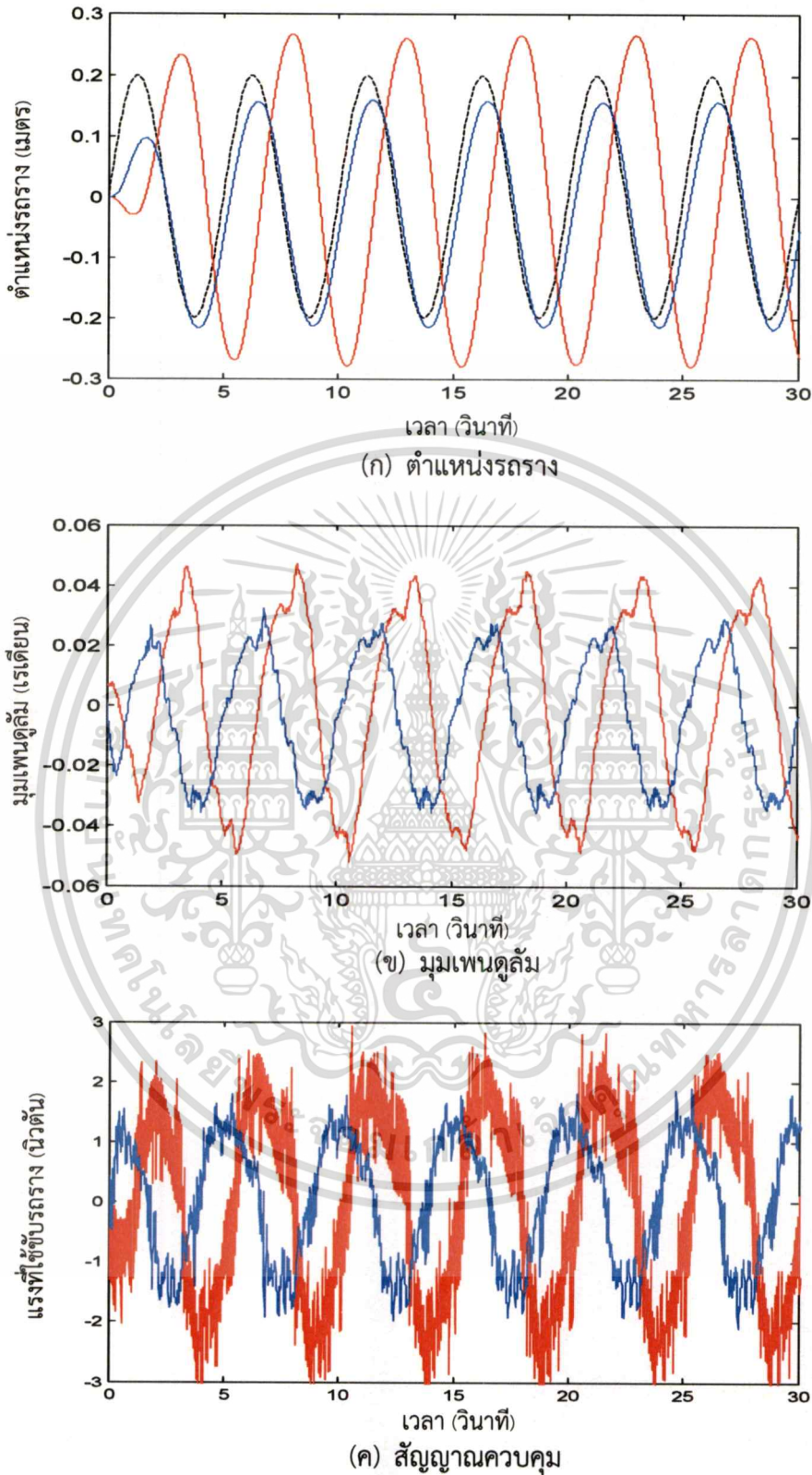
### 5.3.2.3 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.12 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์ได้โดยมีเฟสและขนาดใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 20.16 องศาหรือล่าช้าประมาณ 0.28 วินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 118.58 องศาหรือล่าช้าประมาณ 1.65 วินาที นอกจากนี้ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีการเบี่ยงเบนของมุมเพนดูลัมช่วงสภาวะคงตัวน้อยมาก และสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุมน้อยกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรูดรางประมาณ 2.69 เซนติเมตร คิดเป็น 6.725% ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรูดรางประมาณ 14.08 เซนติเมตร คิดเป็น 35.2%

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.3.2.3 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในผลการทดลองมีความผิดพลาดในการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์มากกว่าผลการจำลองอย่างมากโดยผลการทดลองมีขนาดใหญ่กว่าการจำลอง ซึ่งอาจเกิดจากพลวัตความถี่สูงในระบบซึ่งมิได้รวมไว้ในแบบจำลอง เพราะจากที่สังเกตในหัวข้อ 5.3.1.1 พบว่ามีความถี่เรโซแนนซ์ในระบบที่ 0.23 เฮิรตซ์ ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณรูปซายน์ที่ 0.2 เฮิรตซ์

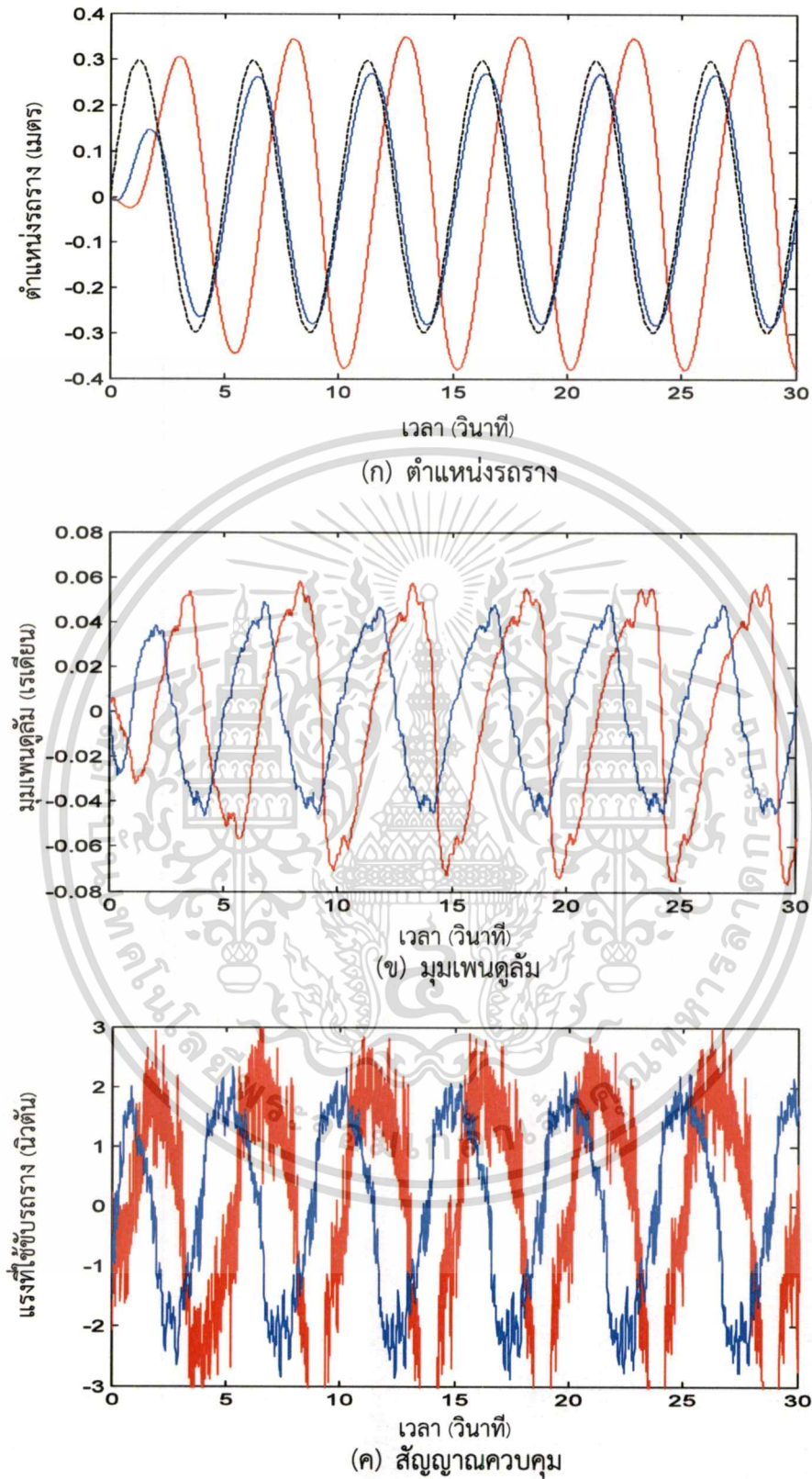
### 5.3.2.4 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.3.2.3 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์ได้โดยมีเฟสใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 7.92 องศา หรือล่าช้าประมาณ 0.11 วินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 112.32 องศาหรือล่าช้าประมาณ 1.56 วินาที นอกจากนี้ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีการเบี่ยงเบนของมุมเพนดูลัมช่วงสภาวะคงตัวน้อยมาก และสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุมน้อยกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรูดรางประมาณ 5.57 เซนติเมตร คิดเป็น 9.283% ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรูดรางประมาณ 12.0 เซนติเมตร คิดเป็น 20% โดยความแตกต่างจากการจำลองอธิบายได้ด้วยเหตุดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3.2.3



**รูปที่ 5.12** ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามอ้างอิงรูปขายนของตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และขนาด 40 เซนติเมตร การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.13** ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามอ้างอิงรูปขายน้ของตัวควบคุมเอ็มพีซี

และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ซึ่งมอบให้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

และขนาด 60 เซนติเมตร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.3 การติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม

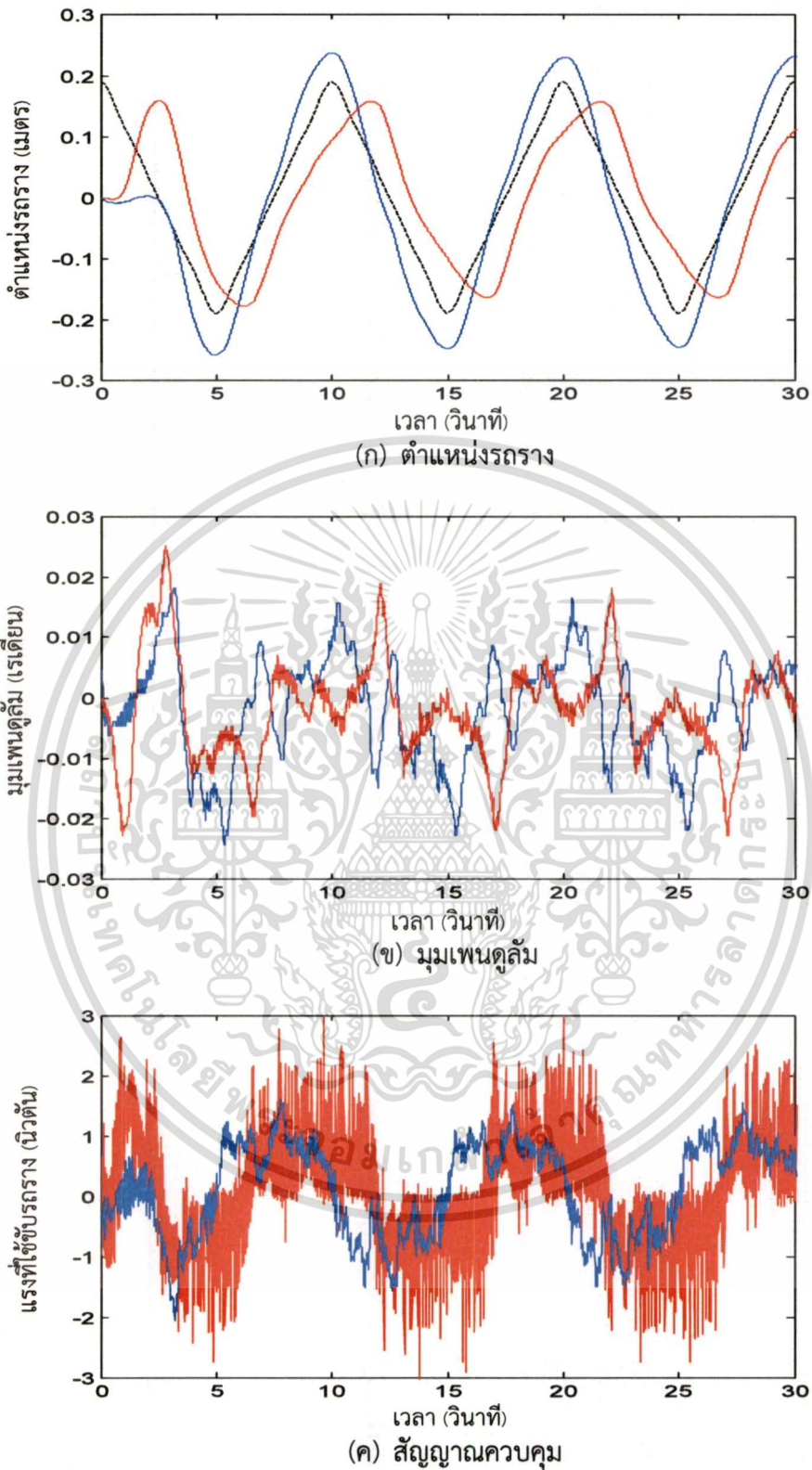
การทดลองนี้จะเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีและตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสี่กรณี กรณีแรกและกรณีที่สองกำหนดให้คาบของสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 10 วินาที และมีขนาดเท่ากับ 40 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ ส่วนกรณีที่สามและกรณีที่สี่กำหนดให้คาบของสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 5 วินาที และมีขนาดเท่ากับ 40 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ โดยทุกการทดลองคาบการชักตัวอย่าง  $T_s$  เท่ากับ 10 มิลลิวินาที และขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซีเท่ากับ 210 โดยเส้นสีน้ำเงิน และเส้นสีแดงคือผลตอบสนองของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี และผลตอบสนองของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ ตามลำดับ

#### 5.3.3.1 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.14 โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมได้โดยมีเฟสใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสนำสัญญาณอ้างอิงอยู่เล็กน้อย ประมาณ 2.52 องศา หรือเร็วกว่าประมาณ 0.07 วินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 32.76 องศา หรือล่าช้าประมาณ 0.91 วินาที นอกจากนี้ระบบที่ใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีมีการเบี่ยงเบนของมุมเพนดูลัมช่วงสภาวะคงตัวน้อยมาก และสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุมน้อยกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรูดรางสูงกว่า โดยมีความผิดพลาดประมาณ 9.34 เซนติเมตร คิดเป็น 24.59% ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้โดยมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรูดรางประมาณ 6.5 เซนติเมตร คิดเป็น 17.11%

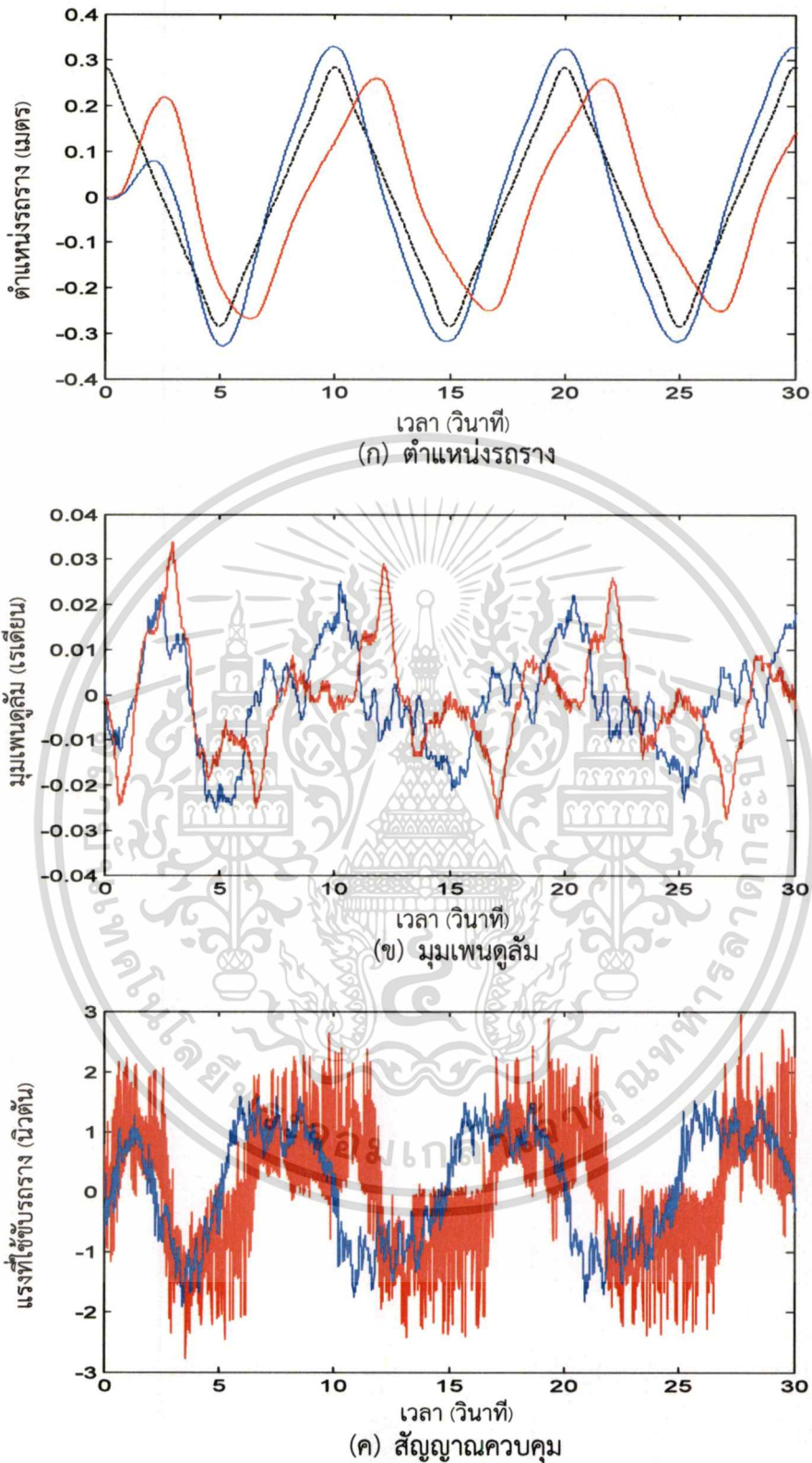
#### 5.3.3.2 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.3.3.1 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.15 โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมได้โดยมีเฟสใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสนำสัญญาณอ้างอิงอยู่เล็กน้อย ประมาณ 1.44 องศา หรือเร็วกว่าประมาณ 0.04 วินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 66.96 องศา หรือล่าช้าประมาณ 1.86 วินาที นอกจากนี้ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีการเบี่ยงเบนของมุมเพนดูลัมช่วงสภาวะคงตัวน้อยมาก และสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุมน้อยกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรูดรางสูงกว่า โดยมีความผิดพลาดประมาณ 8.94 เซนติเมตร คิดเป็น 15.69%



รูปที่ 5.14 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของ  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิง  
มีคาบ 10 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.15** ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของ  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิง  
มีคาบ 10 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้โดยมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรรางประมาณ 4.92 เซนติเมตร คิดเป็น 8.63%

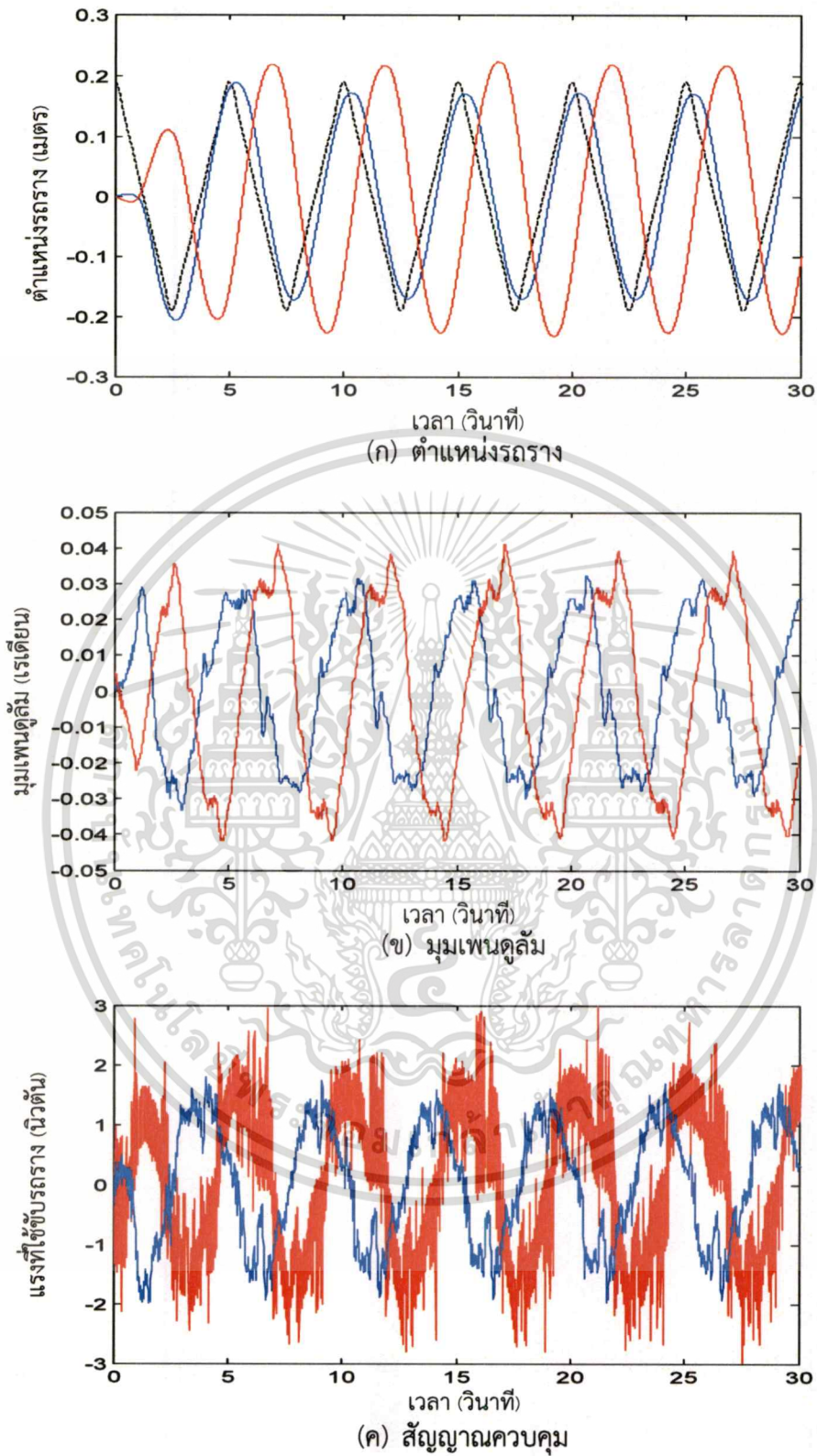
### 5.3.3.3 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.16 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมได้โดยมีเฟสและขนาดใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 25.20 องศาหรือล่าช้าประมาณ 0.35 วินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 131.04 องศาหรือล่าช้าประมาณ 1.82 วินาที นอกจากนี้ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีการเบี่ยงเบนของมุมเพนดูลัมช่วงสภาวะคงตัวน้อยมาก และสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุมน้อยกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรรางประมาณ 3.76 เซนติเมตร คิดเป็น 9.90% ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรรางประมาณ 5.48 เซนติเมตร คิดเป็น 14.43%

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.3.3.3 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในผลการทดลองมีความผิดพลาดในการติดตามสัญญาณสามเหลี่ยมมากกว่าผลการจำลองอยู่มาก ซึ่งอาจเกิดจากพลวัตความถี่สูงในระบบซึ่งมิได้รวมไว้ในแบบจำลอง เพราะจากที่สังเกตในหัวข้อ 5.3.1.1 พบว่ามีความถี่เรโซแนนซ์ในระบบที่ 0.23 เฮิรตซ์ ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมนี้ที่ 0.2 เฮิรตซ์

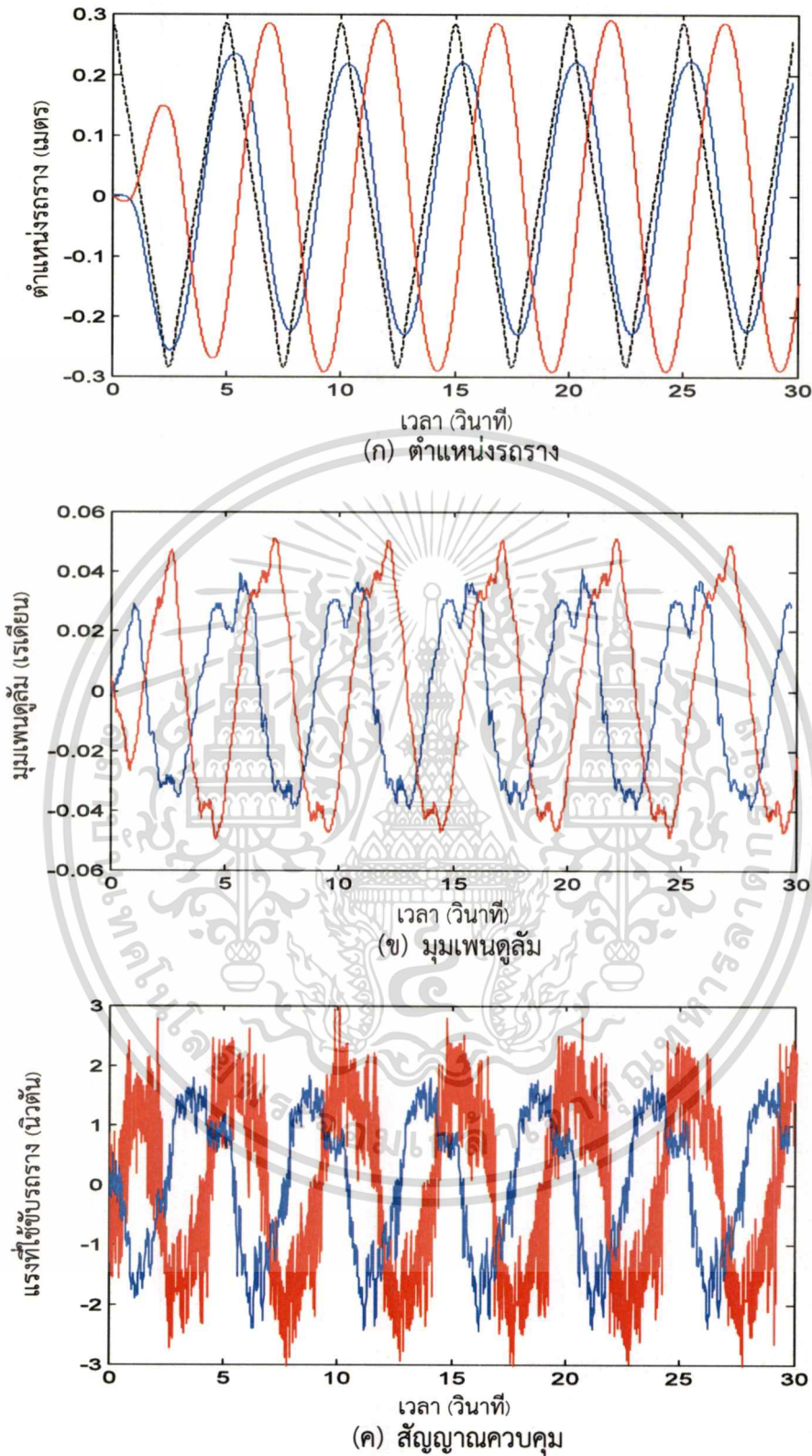
### 5.3.3.4 กรณีสัญญาณอ้างอิงมีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร

เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.3.3.3 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.17 พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมได้โดยมีเฟสใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 28.08 องศา หรือล่าช้าประมาณ 0.39 วินาที และระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิงอยู่ประมาณ 131.76 องศาหรือล่าช้าประมาณ 1.83 วินาที นอกจากนี้ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีมุมเบี่ยงเบนช่วงสภาวะคงตัว และสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุมน้อยกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรรางประมาณ 13.26 เซนติเมตร คิดเป็น 23.27% ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีความผิดพลาดในผลตอบสนองตำแหน่งรรางประมาณ 0.90 เซนติเมตร คิดเป็น 1.58%



รูปที่ 5.16 ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของ  
ตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิง

มีคาบ 5 วินาที และขนาด 40 เซนติเมตร ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.17** ผลการทดลองเปรียบเทียบการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมของตัวควบคุมเอ็มพีซี และตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในกรณีสัญญาณอ้างอิง

มีคาบ 5 วินาที และขนาด 60 เซนติเมตร ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบทำนายแบบจำลองเชิงเส้นสำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรางและวินิจฉัยผลกระทบจากการปรับขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  และคาบชักตัวอย่าง  $T_s$  ของตัวควบคุมเอ็มพีซี นอกจากนี้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในการติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได สัญญาณอ้างอิงรูปซายน์ และสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม

จากการจำลองปรับค่าขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  พบว่าหากปรับค่า  $H_p$  น้อยหรือมากเกินไปจะส่งผลให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาภายในช่วงที่ระบบยังมีเสถียรภาพ กรณีหนึ่งเอาต์พุตและสองเอาต์พุต พบว่ารางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่หนึ่งเมตรได้โดยไม่มีควมผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยเกินไปจะปรากฏการพุ่งเกินในผลตอบสนองตำแหน่งราง แต่การพุ่งเกินดังกล่าวจะถูกกำจัดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง แต่ข้อเสียเมื่อ  $H_p$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  และเวลาเข้าที่  $t_s$  นานขึ้น สำหรับกรณีที่ใช้ตัวสังเกตสถานะร่วมกับตัวควบคุมเอ็มพีซี พบว่าไม่สามารถใช้ตัวสังเกตสถานะกับระบบที่พิจารณาเพียงเอาต์พุตตำแหน่งราง แต่สามารถใช้กับระบบที่มีสองเอาต์พุต โดยสมรรถนะของระบบวงปิดที่ได้มีผลใกล้เคียงกับกรณีตัวแปรสถานะสามารถวัดได้ แต่ช่วง  $H_p$  ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยลง ในการเปรียบเทียบการใช้อัตราการชักตัวอย่างที่ช้าและอัตราการชักตัวอย่างที่เร็ว พบว่าสมรรถนะของระบบวงปิดที่ใช้อัตราการชักตัวอย่างที่เร็วจะดีกว่าการใช้อัตราการชักตัวอย่างที่ช้า โดยมีเวลาเข้าที่สั้นกว่า อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีอัตราการชักตัวอย่างที่เร็วต้องใช้ขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  มากกว่ากรณีอัตราการชักตัวอย่างที่ช้า ทำให้ต้องใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีหน่วยความจำและความเร็วในการประมวลผลมากขึ้น อีกทั้งสัญญาณควบคุมที่ใช้ป้อนให้กับระบบจะสูงกว่ากรณีอัตราการชักตัวอย่างที่ช้า นอกจากนี้ในการจำลองกรณีมีข้อจำกัดพบว่าสามารถจำกัดสัญญาณควบคุมไม่ให้เกิดการอิมพัลส์ ส่วนการจำลองเปรียบเทียบกับระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีและตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ในการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์และสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยม โดยระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีเฟสและขนาดเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง แต่ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีเฟสตามสัญญาณอ้างอิง และขนาดเล็กกว่าสัญญาณอ้างอิงในทุกการจำลอง

ในส่วนการทดลองเนื่องจากคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการเป็นรุ่นเก่า ทำให้ไม่สามารถคำนวณโปรแกรมกำลังสองเชิงเส้นเพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมที่สุดในกรณีมีข้อจำกัดได้ทันที ดังนั้นการทดลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงพิจารณาเพียงกรณีไม่มีข้อจำกัดเท่านั้น โดยการทดลองพบว่าแบบจำลองเชิงเส้นของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางที่คำนวณไว้ สามารถนำไปใช้ในการควบคุม เมื่อทดลองปรับขอบเขตการทำนายตอนบน  $H_p$  ผลตอบสนองของระบบมีแนวโน้มเหมือนกับการจำลอง พบว่าหากปรับค่า  $H_p$  น้อยหรือมากเกินไปจะส่งผลให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาภายในช่วงที่ระบบยังมีเสถียรภาพ กรณีหนึ่งเอาต์พุตและสองเอาต์พุต โดยพบว่ารถรางสามารถไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายได้ และมุมเพนดูลัมสามารถรักษาไว้ในตำแหน่งที่เกือบตรงตลอดการเคลื่อนที่ โดยผลการปรับค่า  $H_p$  พบว่า ถ้า  $H_p$  มีค่าน้อยจะปรากฏการพุ่งเกิน และแกว่งรอบ ๆ จุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง แต่การพุ่งเกินและการแกว่งดังกล่าวจะสามารถลดได้เมื่อเพิ่มค่า  $H_p$  ขึ้น ซึ่งทำให้มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยลง และสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบจะน้อยลงด้วย แต่ข้อเสียเมื่อ  $H_p$  เพิ่มขึ้นคือทำให้ผลตอบสนองช้าลงส่งผลให้เวลาขึ้น  $t_r$  นานขึ้น แต่ถ้าเลือกค่า  $H_p$  มากเกินไป สัญญาณควบคุมที่จ่ายให้ระบบจะสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้นการทำงาน ยิ่งไปกว่านั้นรถรางไม่เคลื่อนที่รอบจุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถราง นอกจากนั้นกรณีที่ใช้ตัวสังเกตสถานะร่วมกับตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีสองเอาต์พุต สมรรถนะของระบบวงปิดกรณีตัวแปรสถานะสามารถวัดได้มีผลลัพธ์ที่ดีกว่า เช่น การแกว่งรอบจุดอ้างอิงในผลตอบสนองตำแหน่งรถรางจะน้อยกว่า มุมเพนดูลัมเบี่ยงเบนน้อยกว่า และสัญญาณควบคุมที่ต้องใช้ในระบจะน้อยกว่าด้วย เมื่อเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกับตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ พบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ และสัญญาณอ้างอิงรูปสามเหลี่ยมได้ดีกว่าตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ โดยมีเฟสใกล้เคียงกับเฟสของสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ แต่ขนาดมีลักษณะต่างจากการจำลอง โดยพบว่าระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีมีขนาดใหญ่กว่าการจำลองในกรณีคาบสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 10 วินาที ส่วนระบบที่อาศัยตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์มีขนาดใหญ่กว่าการจำลองในกรณีคาบสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 5 วินาที ซึ่งคาดว่าเกิดจากพลวัตความถี่สูงในระบบซึ่งมีได้รวมไว้ในแบบจำลอง

## 6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัย

ในการทดลองการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีอัตราการชักรถตัวอย่างที่เร็ว วิธีการคำนวณของตัวควบคุมเอ็มพีซีต้องใช้ค่า  $H_p$  ที่สูงขึ้น ทำให้เมทริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้ต้องใช้หน่วยความจำและความเร็วในการประมวลผลมากขึ้น แต่เนื่องจากคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการเป็นรุ่นเก่า ทำให้ไม่สามารถทดลองการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีในอัตราการชักรถตัวอย่างที่เร็วที่มีคาบชักรถอย่าง  $T_r$  น้อยกว่า 10 มิลลิวินาทีได้ ยิ่งไปกว่านั้นไม่สามารถทดลองการใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีมีข้อจำกัด เนื่องจากจำเป็นต้องใช้โปรแกรมกำลังสองเชิงเส้นในการแก้ปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นการใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่คอมพิวเตอร์ไม่สามารถประมวลผลได้ทัน นอกจากนี้จากการทดลองพบการแกว่งค่อนข้างคงที่ ลักษณะคล้ายสัญญาณรูปขายนที่ความถี่ต่างกันขึ้นกับ  $H_p$  โดยอาจเกิดจากพลวัตความถี่สูงในระบบ ซึ่งมีได้รวมไว้ในแบบจำลอง

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ข้อเสนอแนะในส่วนการศึกษาทางวิชาการ เนื่องจากการควบคุมเอ็มพีซีอาศัยแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมของระบบในอนาคต ดังนั้นสมรรถนะในการติดตามสัญญาณอ้างอิงจึงขึ้นกับแบบจำลอง โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถแก้ปัญหาการติดตามสัญญาณอ้างอิงรูปขยับขึ้นบันไดไม่หามีค่าความผิดพลาดในการติดตามสัญญาณได้โดยเพิ่มการควบคุมปริพันธ์ (Integral control) ในระบบ และสามารถแก้ปัญหาการติดตามสัญญาณรูปแบบอื่น ๆ ที่มีคาบเท่ากันได้โดยใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซี ร่วมกับการควบคุมรีเพทิทีฟ (Repetitive control) [15] สำหรับปัญหาการคำนวณไม่ทันเวลาในอัตราการชกตัวอย่างที่เร็ว หรือคำนวณไม่ทันเวลาในกรณีมีข้อจำกัดของตัวควบคุมเอ็มพีซี สามารถแก้ไขได้โดยใช้การควบคุมอิมพลิซิฟ (Explicit model predictive control: EMPC) ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมแบบออฟไลน์ที่เหมาะสมที่สุด โดยจะคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด  $\Delta u(k)_{opt}$  ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ของตัวแปรสถานะและอินพุตของระบบไว้ล่วงหน้า [21] จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้ในระบบที่มีผลตอบสนองเร็ว

ในส่วนการปรับปรุงการทดลองควรเพิ่มศักยภาพตัวประมวลผลโดยใช้ฮาร์ดแวร์ที่ดีขึ้น และประมวลผลได้ไวขึ้น นอกจากนี้การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมเอ็มพีซีด้วยภาษาซี มีความสลับซับซ้อน ดังนั้นการใช้การ์ดสำเร็จรูปที่ประมวลผลบนโปรแกรมแมทแลบจะทำได้ง่ายกว่า สำหรับการแก้ปัญหาจากการทดลองที่เกิดการแกว่งในผลตอบสนองตำแหน่งรถรางที่สภาวะคงตัว คาดว่าสามารถแก้ไขหรือลดทอนได้ โดยปรับปรุงโครงสร้างและเพิ่มความละเอียดของเอนโคดเดอร์ การใช้คาบการชกตัวอย่าง  $T_s$  ที่สั้นลง หรือรวมพลวัตความถี่สูงในการออกแบบ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D.W. Clarke, C. Mohtadi, P.S. Tuffs. "Generalized Predictive Control - Part I. The Basic Algorithm." *Automatica*, vol. 23, no. 2, March 1987. pp. 137-148.
- [2] D.W. Clarke, C. Mohtadi, P.S. Tuffs. "Generalized Predictive Control - Part II. Extensions and Interpretations." *Automatica*, vol. 23, no. 2, March 1987. pp. 149-160.
- [3] C.E. Garcia, D.M. Prett, M. Morari. "Model Predictive Control: Theory and Practice - a Survey." *Automatica*, vol. 25, no. 3, May 1989. pp. 335-348.
- [4] J.M. Maciejowski. *Predictive Control with Constraints*. Pearson Education Limited, 2002.
- [5] E.F. Camacho, C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer-Verlag, 1999.
- [6] J.S. Dahlen, G.O. Eikrem, T.A. Johansen. "Nonlinear Model Predictive Control using Trust-Region Derivative-Free Optimization" *Journal of Process Control*, vol. 24, no. 7, July 2014, pp. 1106-1120.
- [7] Z. Shahraeini, N. Daneshpour, M.R. Jahed Motlagh, J. Poshtan. "A Nonlinear Model Predictive Control System Based on Wiener Model." *Proc. IEEE-Control, Automation, Robotics and Vision*, December 2006. pp. 1-6.
- [8] Y.T. Shi, D.H. Sun, Q. Wang, S.C. Nian, L.Z. Xiang. "A Nonlinear Model Predictive Control Based on Least Squares Support Vector Machines NARX Model." *Proc. IEEE-Machine Learning and Cybernetics*, August 2007. pp. 721-725.
- [9] R. Sakata, S. Masuda, T. Sugiyama, T. Sato. "A Design Method for Nonlinear Model Predictive Control with a Step-Type Input Constraint." *Proc. ICCAS-SICE*, August 2009. pp. 2169-2172.
- [10] M. Askari, H.A.F. Mohamed, M. Moghavvemi, S.S. Yang. "Parameter Tuning of Model Predictive Controller; a Case Study." *Proc. IEEE-Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications*, July 2009. pp. 348-351.
- [11] S.J. Qin, A. Badgwell, A. Thomas. "A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology." *Control Engineering Practice*, vol. 11, no. 7, 2003, pp. 733-764.
- [12] R. Balan, V. Matieș, V. Hodor, O. Hancu, S. Stan. "Applications of a Model Based Predictive Control to Heat-Exchangers." *Proc. IEEE-Control & Automation*, June

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] U. Mathur, R. D. Rounding, D. R. Webb, R. J. Conroy. "Use Model-Predictive Control to Improve Distillation Operations." *Chemical Engineering Progress*, vol. 104, no. 1, January 2008. pp. 35-41.
- [14] A. Bemporad. "Model Predictive Control: Basic Concepts." [Online]. Available : <http://www.seas.upenn.edu/~ese680/papers/IntroductionMPC.pdf>. 2009.
- [15] C.Y. Lin, Y.C. Liu. "Precision Tracking Control and Constraint Handling of Mechatronic Servo Systems Using Model Predictive Control." *Mechatronics*, vol. 17, no. 4, August 2012. pp. 593-605.
- [16] M. Askari, H.A.F. Mohamed, M. Moghavvemi, S.S. Yang. "Model Predictive Control of an Inverted Pendulum." *Proc. IEEE-Technical Postgraduates*, December 2009. pp. 1-4.
- [17] C.N. Lu, C.C Tsai, M.C Tsai, K.V. Ling, W.S. Yao. "Application of Model Predictive Control to Parallel-Type Double Inverted Pendulum Driven by a Linear Motor." *Proc. IEEE-Industrial Electronics Society*, November 2007. pp 2904-2909.
- [18] R.F. Harrison. "Asymptotically Optimal Stabilising Quadratic Control of an Inverted Pendulum." *Control Theory and Applications*, vol. 150, no. 1, January 2003. pp. 7-16.
- [19] C.W. Tao, J.S. Taur, T.W. Hsieh, C.L. Tsai. "Design of a Fuzzy Controller with Fuzzy Swing-Up and Parallel Distributed Pole Assignment Schemes for an Inverted Pendulum and Cart System." *Control Systems Technology*, vol. 16, no. 6, November 2008. pp. 1277-1288.
- [20] T. Coleman, M.A. Branch, A. Grace. *Optimization Toolbox for Use with Matlab*. The MathWorks, Inc. January 1999.
- [21] L. Magni, D.M. Raimondo, F. Allgower. *Nonlinear Model Predictive Control: Toward New Challenging Applications*. Springer, 2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

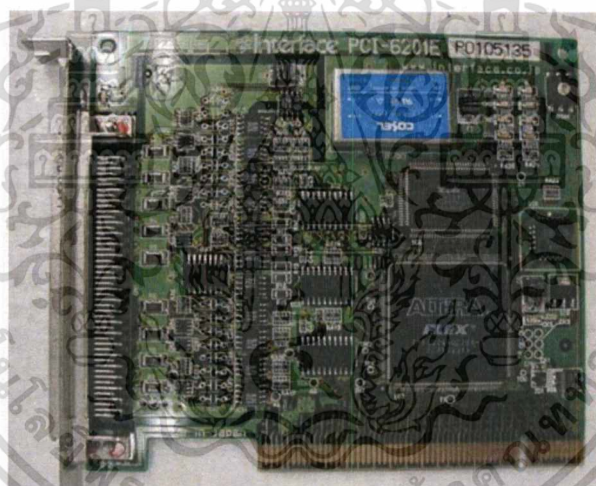
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางด้วยโปรแกรมภาษาซี (C language) ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับการ์ดแอนโคดเดอร์สำหรับวัดตำแหน่งรถรางและมุมเพนดูลัม และการ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อนำค่าวัดจากเซนเซอร์มาใช้ประมวลผลในคอมพิวเตอร์ และส่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้เข้าสู่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

### ก.2 การ์ดแอนโคดเดอร์

การ์ดแอนโคดเดอร์มีไว้เพื่อนับจำนวนพัลส์จากแอนโคดเดอร์แบบหมุนสำหรับวัดตำแหน่งรถรางและมุมเพนดูลัม โดยมีลักษณะเป็นการ์ดแบบ PCI ของบริษัท INTERFACE รหัส PCI-6201E ซึ่งเป็นการดัดแปลงที่สามารถต่อใช้งานร่วมกับแอนโคดเดอร์มากที่สุดได้ถึง 4 ตัว โดยภาพถ่ายการ์ดแอนโคดเดอร์ เบอร์ PCI-6201E แสดงดังรูปที่ ก.1 โดยตำแหน่ง และการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 ภาพถ่ายการ์ดแอนโคดเดอร์

### ก.3 การ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อก

การ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก จะมีลักษณะเป็นการ์ดแบบ PCI ของบริษัท INTERFACE รหัส PCI-3345A ใช้เชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับชุดขับเคลื่อนรถราง โดยการ์ดจะรับข้อมูลดิจิตอลขนาด 12 บิตจากคอมพิวเตอร์และแปลงข้อมูลนี้เป็นสัญญาณแอนะล็อกในรูปของแรงดันไฟฟ้าขนาด -10 โวลต์ ถึง +10 โวลต์ (ขนาดแรงดันไฟฟ้านี้สามารถปรับแต่งได้จากตัวการ์ด โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่าข้อมูลดิจิตอลที่ส่งมาให้ อธิบายความสัมพันธ์ดังนี้

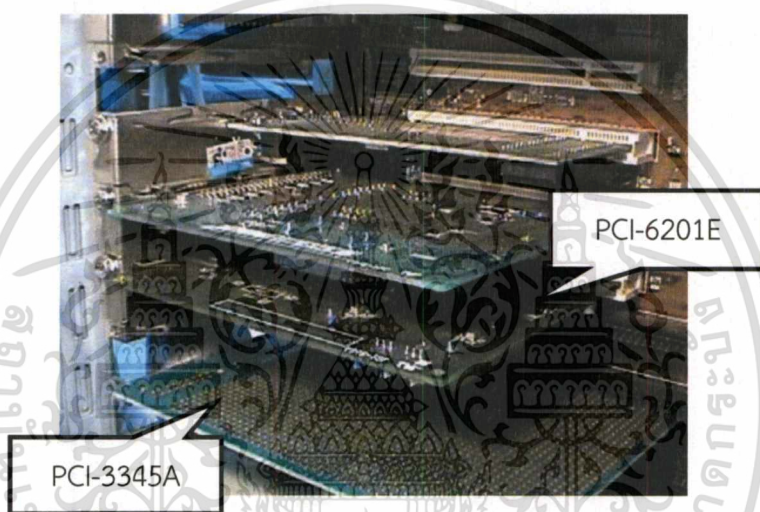
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าส่งค่า FFFH จะได้ค่าเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงสุดคือ 10 โวลต์

ถ้าส่งค่า 7FFH จะได้ค่าเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าขนาดครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดคือ 0 โวลต์

ถ้าส่งค่า 000H จะได้ค่าเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าขนาดต่ำสุดคือ -10 โวลต์

เนื่องจากการ์ด PCI-3345A มีขนาด 12 บิต จึงมีความละเอียด 4096 ค่าจากย่านความกว้างเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าทั้งหมด ในที่นี้ต้องการส่งค่าแรงดันไฟฟ้าออกไปสู่ชุดขับเคลื่อนเพื่อใช้ขับรรางอยู่ในช่วง  $\pm 10$  โวลต์ ดังนั้นจะได้ความละเอียดของเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าต่อข้อมูลดิจิทัลเท่ากับ  $20/4096 = 0.004883$  โวลต์ต่อข้อมูลดิจิทัลหนึ่งระดับ โดยภาพถ่ายแสดงการ์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกแสดงดังรูปที่ ก.3 และตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ภาพถ่ายการติดตั้งการ์ดกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล



รูปที่ ก.3 ภาพถ่ายการ์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

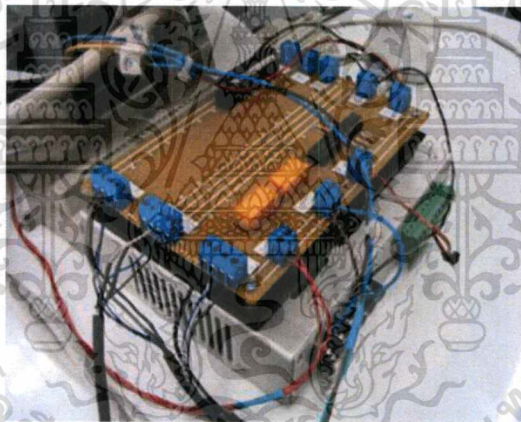
#### ก.4 ชุดขับมอเตอร์

ชุดขับมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ ก.4 โดยทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าจากการ์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกในหัวข้อ ก.3 และแปลงเป็นสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-width modulation: PWM) เพื่อใช้ขับมอเตอร์ โดยสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มจะมีขนาด  $\pm 24$  โวลต์ และมีความถี่ของสัญญาณ 25 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) จะขึ้นอยู่กับอินพุตแรงดันไฟฟ้า โดยลักษณะของสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มแสดงดังรูปที่ ก.5 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอินพุตแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ดิวตี้ไซเคิลเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น อธิบายความสัมพันธ์ดังนี้

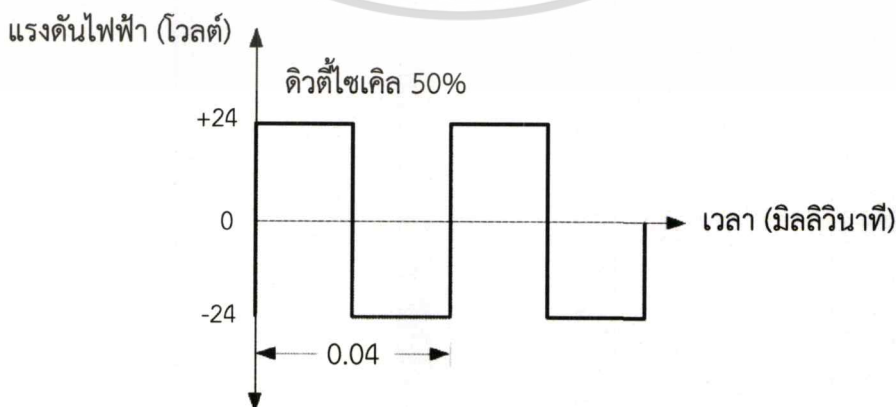
ถ้าอินพุตแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ +10 โวลต์ จะให้ดิวตี้ไซเคิล 100% มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วสูงสุด

ถ้าอินพุตแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 โวลต์ จะให้ดิวตี้ไซเคิล 50% มอเตอร์จะหยุดหมุน

ถ้าอินพุตแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -10 โวลต์ จะให้ดิวตี้ไซเคิล 0% มอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วสูงสุด



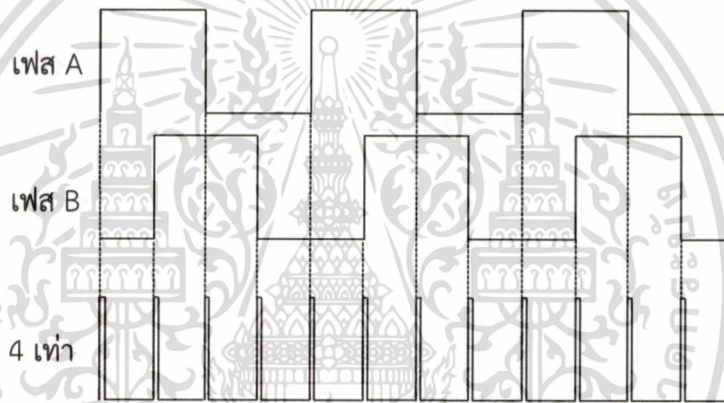
รูปที่ ก.4 ภาพถ่ายชุดขับมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.5 เอนโคเดอ์แบบหมุน

เซนเซอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ โดยชุดทดลองอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถรางนี้อาศัยเอนโคเดอ์แบบหมุนของบริษัท OMRON รหัส E6B2-CWZ6C เป็นเซนเซอร์วัดตำแหน่งรถรางและมุมเพนดูลัม โดยมีความละเอียด 2000 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ (360 องศา) แต่เนื่องจากเอนโคเดอ์หมุนจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ขึ้นที่ขาเฟส A และเฟส B ของเอนโคเดอ์ซึ่งต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา โดยทั้งสองสัญญาณนี้จะถูกขยายสัญญาณและส่งเข้าสู่วงจรรับซึ่งวงจรรับสามารถปรับความละเอียดการนับได้สูงสุด 4 เท่า โดยอาศัยการอ่านแบบควอดเรเจอร์ (Quadrature) แสดงดังรูปที่ ก.6 ดังนั้นความละเอียดของสัญญาณพัลส์เพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า นั่นคือ  $2000 \times 4 = 8000$  พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ และความละเอียดของมุมที่วัดได้คือ  $360/8000 = 0.045$  องศาต่อสัญญาณ 1 พัลส์



รูปที่ ก.6 การอ่านสัญญาณเอนโคเดอ์แบบควอดเรเจอร์

### ก.5.1 เอนโคเดอ์แบบหมุนสำหรับวัดตำแหน่งรถราง

เอนโคเดอ์แบบหมุนตัวนี้ติดตั้งอยู่บริเวณขอบของรางรถ และเชื่อมต่อกับเฟืองทดเพื่อขับสายพานที่ต่อกับตัวรถราง ซึ่งการติดตั้งเอนโคเดอ์แบบหมุนสำหรับวัดตำแหน่งรถรางแสดงดังรูปที่ ก.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาาใช้ขงวมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ ก.7 การติดตั้งเอนโคเดอ์แบบหมุนสำหรับวัดตำแหน่งรถราง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.5.2 เอนโคตเตอร์แบบหมุนสำหรับวัดมุมเพนดูลัม

เอนโคตเตอร์แบบหมุนตัวนี้ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนบนของตัวรอราง โดยแกนของเอนโคตเตอร์แบบหมุนต่อกับแท่งเพนดูลัม โดยที่แท่งเพนดูลัมนี้สามารถหมุนได้ในระนาบแนวแกนตั้ง การติดตั้งเอนโคตเตอร์แบบหมุนสำหรับวัดมุมเพนดูลัมแสดงดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 การติดตั้งเอนโคตเตอร์แบบหมุนสำหรับวัดมุมเพนดูลัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

**โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและการจำลอง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.1 ฟังก์ชันคำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมเอ็มพีซี (โปรแกรมแมทแลป)

การจำลองอาศัยซิมูลิงค์ (Simulink) ในโปรแกรมแมทแลปดังรูปที่ ข.1 หรือ ข.2 ซึ่งอาศัยแบบจำลองของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรรางดังรูปที่ ข.3 กับการทำงานของตัวควบคุมเอ็มพีซีอาศัยบล็อกฟังก์ชัน Interpreted MATLAB เพื่อใช้คำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด โดยชุดคำสั่งสำหรับบล็อกฟังก์ชันแสดงดังนี้

```
function Uk = CountU(Ts,Hp,Hu,xkold1,xkold2,xkold3,xkold4,ukold)
```

```
% พารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง
```

```
M = 1.7520;
```

```
m = 0.178;
```

```
l = 0.206;
```

```
f = 3.7950;
```

```
g = 9.8;
```

```
% แบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง
```

```
a1 = 4*m*(M+m)- 3*(m^2)*l;      a2 = (M+m) - (3/4)*m ;
```

```
a = [ 0      1      0      0      ;
```

```
      (3*(M+m)*m*g)/a1  0      0      -3*m*f/a1;
```

```
      0      0      0      1      ;
```

```
      3*m*g/(4*a2)  0      0      -f/a2  ];
```

```
b = [ 0 ;
```

```
      (3*m)/a1;
```

```
      0 ;
```

```
      1/a2 ];
```

```
c = [0 0 1 0];
```

```
d = [0];
```

```
sysc = ss(a,b,c,d,'staname',{'theta','x','theta_dot','x_dot'});
```

```
sys = c2d(sysc,Ts,'zoh');          %แบบจำลองเวลาดีสครีต
```

```
A = sys.a;      B = sys.b;
```

```
C = sys.c;      D = sys.d;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%เมทริกซ์น้ำหนัก

$Q = 1.0 * \text{eye}(H_p);$        $R = 1.0 * \text{eye}(H_u);$

$S_q = \text{chol}(Q);$        $S_r = \text{chol}(R);$

%ตัวแปรสถานะ

$x_{\text{kold}} = [x_{\text{kold}1}; x_{\text{kold}2}; x_{\text{kold}3}; x_{\text{kold}4}];$

% เมทริกซ์สัญญาณอ้างอิง

$T = 1.0 * \text{ones}(H_p, 1);$

$[r_C, c_C] = \text{size}(C);$

$[r_B, c_B] = \text{size}(B);$

%เมทริกซ์ PSI ใช้ในการคำนวณการทำนายของ MPC

$\text{Psi\_temp} = [];$

for  $i = 1:H_p$

$\text{Psi\_temp} = [\text{Psi\_temp}; C * A^i];$

end

$\text{Psi} = \text{Psi\_temp};$

%เมทริกซ์ Upsilon ใช้ในการคำนวณการทำนายของ MPC

$[n_y, n_u] = \text{size}(C * B);$

$\text{row\_temp} = \text{zeros}(n_y, n_u);$

$\text{Upsilon\_temp} = [];$

for  $i = 0:H_p - 1$

$\text{row\_temp} = \text{row\_temp} + C * (A^i) * B;$

$\text{Upsilon\_temp} = [\text{Upsilon\_temp}; \text{row\_temp}];$

end

$\text{Upsilon} = \text{Upsilon\_temp};$

%เมทริกซ์ Theta ใช้ในการคำนวณการทำนายของ MPC

$\text{Theta\_temp} = [];$

$\text{Su\_temp} = \text{Upsilon\_temp};$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i = 0:Hu-1
    Su_temp = circshift(Su_temp,i*ny);
    %i = 0, first row isn't zero
    if(i>0)
        Su_temp(1:i*ny,:) = 0;
    end
    Theta_temp = [Theta_temp Su_temp];
end
Theta = Theta_temp;

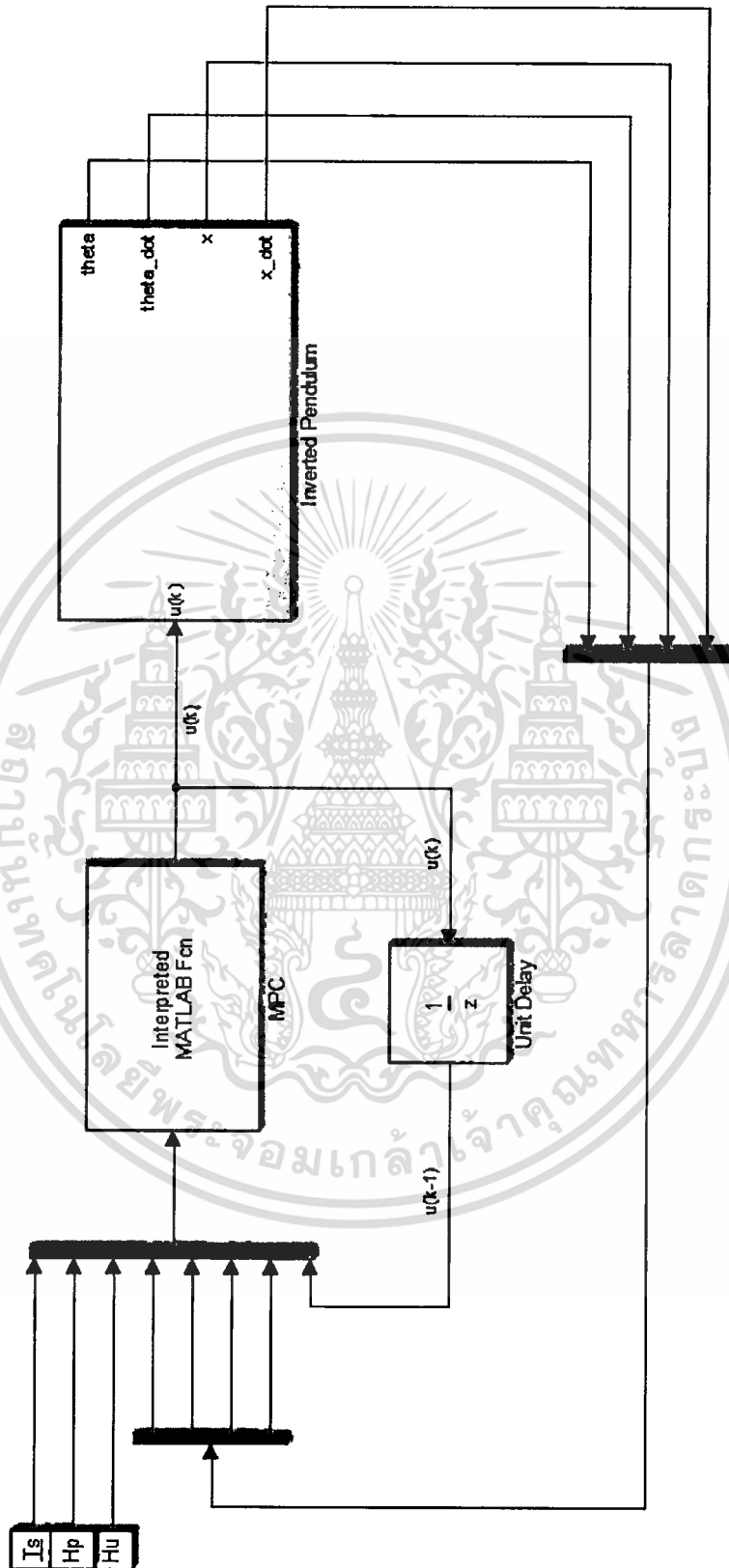
% เมทริกซ์สำหรับการคำนวณ
E = T - Psi*xkold - Upsilon*ukold;    H = Theta'*Q*Theta + R;
f = -Theta'*Q*E;                    G = 2*Theta' * Q * E;

% กรณีไม่มีข้อจำกัด
[rSq,cSq] = size(Sq);
[rSr,cSr] = size(Sr);
Kfull = [Sq*Theta;Sr]\[Sq;zeros(cSr,cSq)];
Kmpc = Kfull(1,:);
DelU = Kmpc*E;
Uk = DelU + ukold;

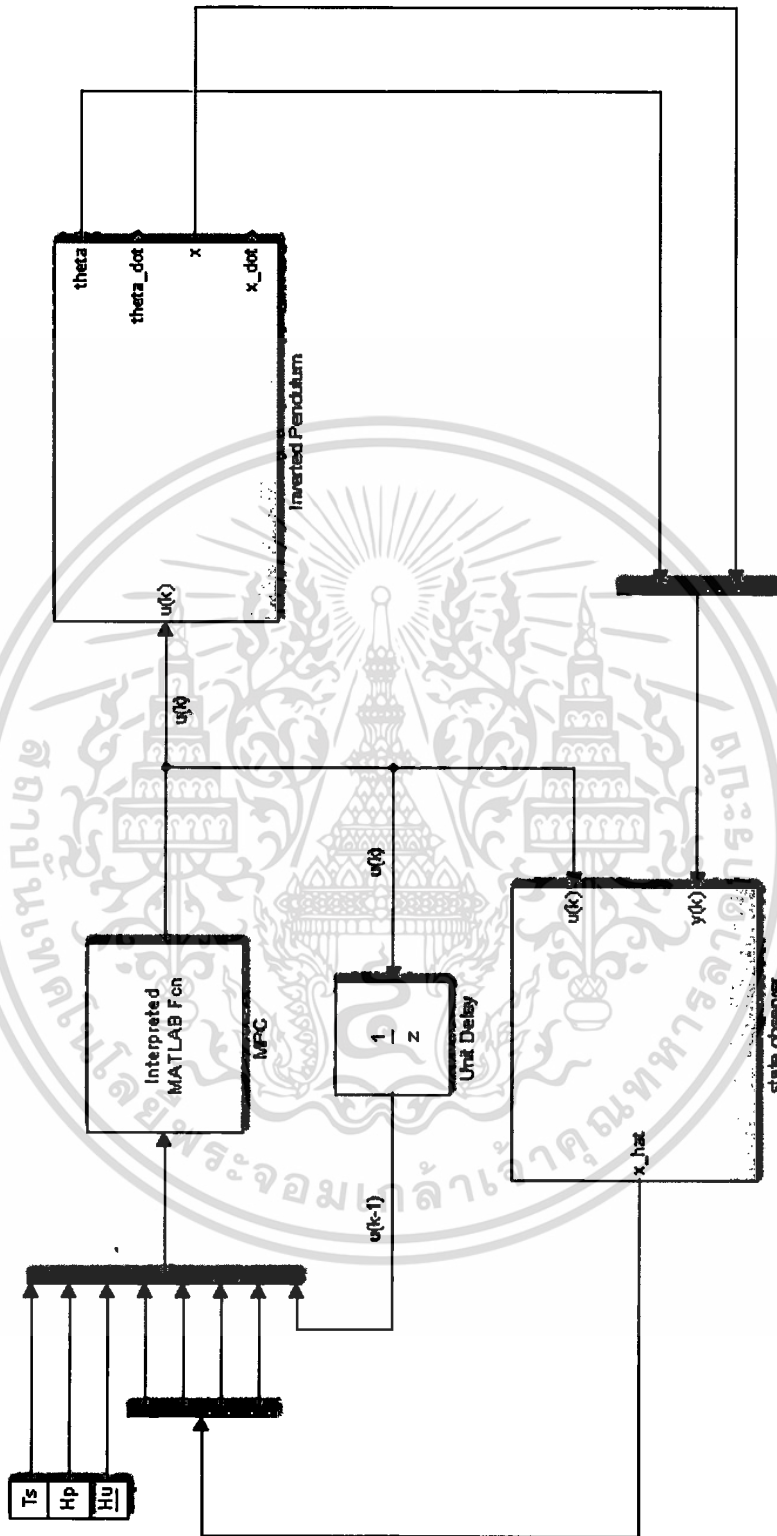
% กรณีข้อจำกัด
DelUmin = [-inf]';    DelUmax = [inf]';
Umin = [-3]';        Umax = [3]';
NdelU = eye(Hu);    NU = tril(ones(Hu,Hu),0);
GdelU = DelUmax*ones(Hu,1);    GdelL = -DelUmin*ones(Hu,1);
Gu = (Umax - ukold)*ones(Hu,1);    Gl = (-Umin + ukold)*ones(Hu,1);
N = [NdelU ; -NdelU ; NU ; -NU ];    g = [GdelU ; GdelL ; Gu ; Gl];
[Deluopt,fval,exitflag] = quadprog(H,f,N,g);    % QP program
DelU = Deluopt(1:cB,1);
Uk = DelU + ukold;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



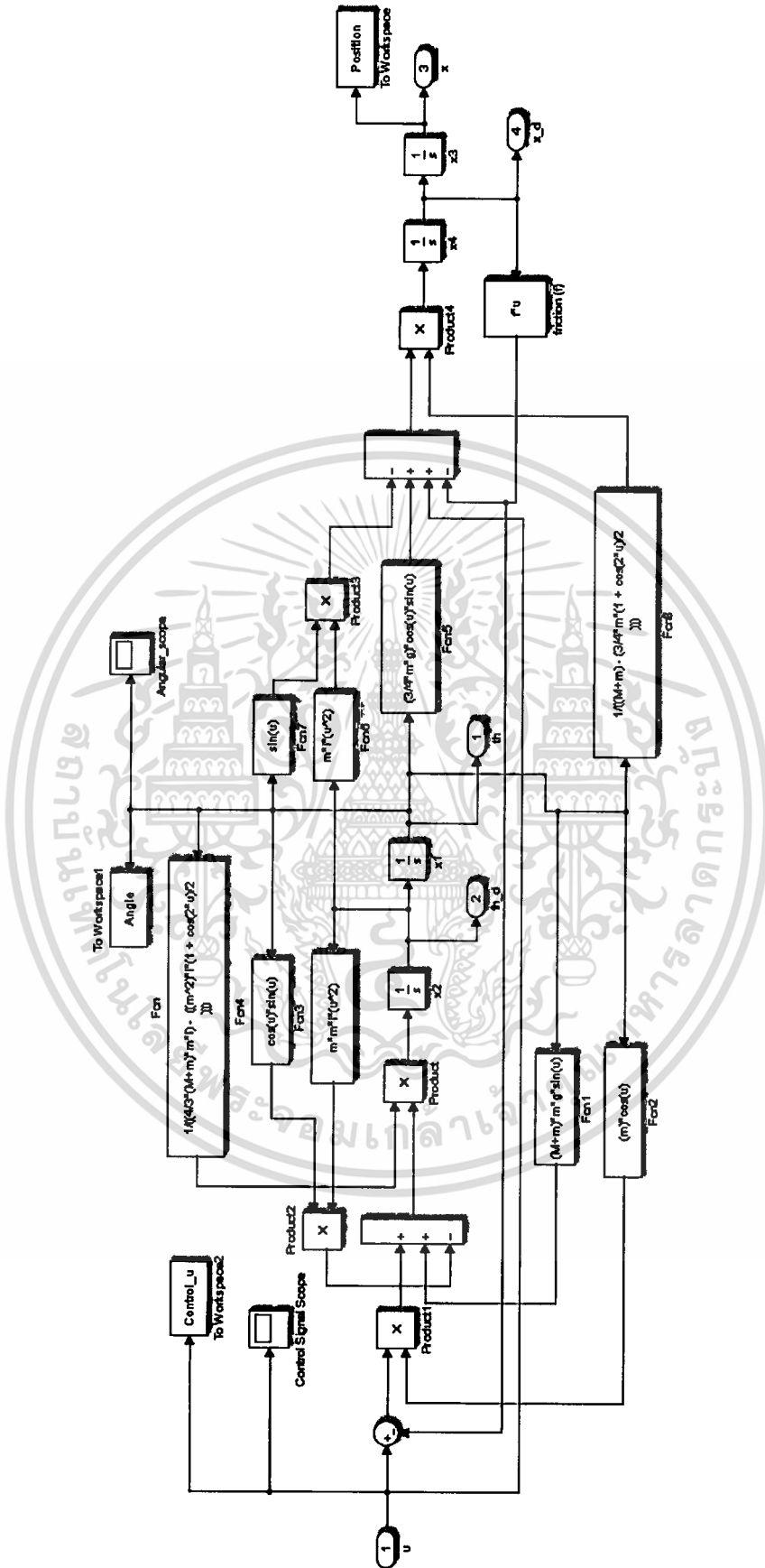
รูปที่ ข.1 แบบจำลองในโปรแกรมแมทแลบของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีหนึ่ง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
เอาต์พุต สองเอาต์พุต และตัวแปรสถานะสามารถวัดได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 แบบจำลองในโปรแกรมแมทแลบของระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซีกรณีสอง

เอาต์พุต และตัวแปรสถานะไม่สามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ข.3** แบบจำลองในโปรแกรมแมทแล็บของระบบอินเวอร์ทเพนดูลิมบนรตราง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.2 โปรแกรมหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์

(โปรแกรมแมทแลป)

โปรแกรมแมทแลปสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์แสดงชุดคำสั่งในหัวข้อนี้ เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้กับซิมูเลชันในแมทแลป ดังรูปที่ ข.4

% ค่าพารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

M = 1.7520;

m = 0.178;

l = 0.206;

f = 3.7950;

g = 9.8;

cycle = 11;

Ts = 0.00091\*cycle; %คาบการซีกตัวอย่าง

% แบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง

a1 = (4\*m\*(M+m)) - (3\*(m^2)\*l);

a2 = (M+m) - (3/4\*m);

ac = [ 0 1 0 0 ;  
 (3\*(M+m)\*m\*g)/a1 0 0 -3\*m\*f/a1 ;  
 0 0 0 1 ;  
 3\*m\*g/(4\*a2) 0 0 -f/a2 ];

bc = [ 0 ;

(3\*m)/a1;

0 ;

1/a2 ];

cc = [0 0 1 0];

dc = [0];

sysc = ss(ac,bc,cc,dc,'statename',{'th\_1','th\_1\_d','x','x\_d'});

% แบบจำลองเวลาดีสครีต

sysd = c2d(sysc,Ts,'zoh');

%เมทริกซ์ที่เพิ่มอินทิเกรเตอร์

```
[rA,cA] = size(sysd.a); [rB,cB] = size(sysd.b); [rC,cC] = size(sysd.c);
```

```
A = [sysd.a zeros(rA,cB);-sysd.c ones(rC,cB)];
```

```
B = [sysd.b ; zeros(cB,rC)];
```

```
C = [sysd.c zeros(rC,cB)];
```

```
D = 0;
```

```
states = {'th_1','th_1_d','x','x_d','xi'};
```

```
sys = ss(A,B,C,D,Ts,'statename',states);
```

%เมทริกซ์น้ำหนักของ LQR

```
Q = diag([0,0,0,0,1]);
```

```
R = 1/Ts;
```

%คำนวณค่า K ของ LQR

```
[K,S,e] = dlqr(A,B,Q,R,0);
```

```
Kf = K(1,(1:4));
```

```
Ki = K(1,5);
```







ภาคผนวก ค.

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.1 โปรแกรมควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรตราง

(โปรแกรมภาษาซี)

โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรตราง โดยภายในโปรแกรมประกอบด้วยชุดคำสั่งเพื่อใช้งานตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ และชุดคำสั่งเพื่อใช้งานตัวควบคุมเอ็มพีซี ซึ่งถ้าเลือกใช้ตัวควบคุมเอ็มพีซี ชุดคำสั่งเพื่อใช้งานตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ต้องทำการปิดคำสั่งด้วยเครื่องหมาย "//" หรือ "/\*.....\*/"

```
#include <stdio.h> // for encoder
#include <bios.h> // for encoder
#include <conio.h> // for encoder
#include <stdlib.h> // for D to A
#include <string.h> // for D to A
#include <time.h> // for D to A
#include <dos.h> // for D to A
#include <process.h> // for D to A
#include <math.h> // for D to A
#include "DA.H" // for D to A
#include "GETBAR.H" // for encoder
void interrupt (*oldIrq3)(void);
void interrupt countToggle(void);
#define drive_port 0x378 // จำนวนของ drive port
#define file_out "c:\data.m" // เปิดไฟล์ (ชื่อ data.m )
#define cls(l); { short i; for(i=l; i<25; i++) lineclr(i); } // for D to A
#define Locate(x,y) printf("\x1b[%d;%dH", (y)+1, (x)+1) // for D to A
#define lineclr(l) printf("\x1b[s\x1b[%d;1H\x1b[0K\x1b[u", l+1) // for D to A
#define range DA_10V // for D to A
#define IRQ3 0x0B /* IRQ3 address */
PCI_CONFIG PciData; // for encoder
DASMP_LCHREQ SmplChReq[2]; // for D to A
DABOARDSPEC BoardSpec; // for D to A
HANDLE OpenBoard(void); // for D to A
void INITIAL_DTOA(void); // for D to A
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void CLOSE_DTOA(void);          // for D to A
int  hexout = 2047;
float volt = 0.0;
WORD DaData[1];
int  swith = 1;
int  key = 0;
long count = 0;
float time_r = 0.0;
HANDLE hDevice;
int  adr0,adr1,bus_info = 0.0;
int  lByte = 0.0;
int  mByte = 0.0;
int  hByte = 0.0;
long dwCounter1 = 0.0;
long dwCounter2 = 0.0;
long dwCounter3 = 0.0;
int  direction_1 = 0.0;
int  direction_2 = 0.0;
int  direction = 1;
//ค่าชดเชยแรงเสียดทาน-----
//เมื่อ fs คือแรงเสียดทานขณะรถวางอยู่กับที่ และ fc คือแรงเสียดทานขณะรถวางเคลื่อนที่
float f_hat = 0.0;
float fs2 = 2.6;          //2 คือ ทิศบวก (รถวางวิ่งไปทางขวา)
float fc2 = 1.7;
float fs1 = 2.5;          //1 คือ ทิศลบ (รถวางวิ่งไปทางซ้าย)
float fc1 = 1.1;
// พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเอ็มพีซี (ใช้พิจารณาช่วง Hp 200 ถึง 300)-----
#define MAX_Hp 10          // เอาค่า Hp ที่ใช้ทำนายลบด้วย 200
#define MAX_Hu 5
int  Hp = 210;            // ค่า Hp ที่ใช้ทำนาย
int  Hu = MAX_Hu;
int  cycle = 11;         //(sampling of external interrupt 0.00091)*(100 cycle) = 0.091 sec

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float SP_x = 0.5; // สัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได
int period = 10; // สัญญาณอ้างอิงรูปซายน์
float amp = 0.2;
// ค่า Kmpc
float Kmpc1[1][100] = { }; //เอาข้อมูลการคำนวณจากโปรแกรมแมทแลป
float Kmpc2[1][100] = { }; //เอาข้อมูลการคำนวณจากโปรแกรมแมทแลป
float Kmpc3[1][MAX_Hp] = { }; //เอาข้อมูลการคำนวณจากโปรแกรมแมทแลป
// พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์ -----
float K[1][5] = {67.85703, 11.14561, -14.848699, -15.57587, 0.0930834}; // for cycle 11
float setpoint = 0.5; // สัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได
int period = 10; // สัญญาณอ้างอิงรูปซายน์
// สมการปริภูมิสถานะเวลาดีสครีต เมื่อ cycle = 11 หรือ คาบซีกตัวอย่าง  $T_s = 10$  msec -----
float A[4][4] = {1.0019, 0.0100, 0.0000, -0.0004,
                 0.3837, 1.0019, 0.0000, -0.0762,
                 0.0000, 0.0000, 1.0000, 0.0099,
                 0.0072, 0.0000, 0.0000, 0.9791};

float B[4][1] = {0.0001, 0.0201, 0.000, 0.0055};
float C[1][4] = {0.0,0.0,1.0,0.0};
// ค่าเริ่มต้น-----
float distance = 0.0;
float th_1 = 0.00;
float th_1_dot = 0.00;
float x = 0.00;
float x_dot = 0.00;
float th_1_old = 0.00;
float x_old = 0.00;
int ij,p,k,s;
int n = 0;
float SP1[100][1];
float SP2[100][1];
float SP3[MAX_Hp][1];
float step_time;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float PSI_1[100][4] = {0};
float PSI_2[100][4] = {0};
float PSI_3[MAX_Hp][4] = {0};
float Upsilon_1[100][1] = {0};
float Upsilon_2[100][1] = {0};
float Upsilon_3[MAX_Hp][1] = {0};
float sum = 0.0;
float sum1 = 0.0;
float sum2 = 0.0;
float ans1 = 0.0;
float ans2 = 0.0;
float ans3 = 0.0;
float xk[4][1];
float uk_old = 0.0;
float delUk = 0.0;
float u = 0.0;
float loop = 0.0;
float u = 0.00;
float ui = 0.00;
float ui_old = 0.00;
float err = 0.0;
// ----- เริ่มโปรแกรม -----
int main(void){
// เปิดไฟล์
    FILE *data_fout;
    clrscr();
    data_fout = fopen(file_out,"wt+");
    //fprintf(data_fout,"sm = [\n");
// Initial value of Digital to Analog PCI Card (PCI-3345A) -----
    INITIAL_DTOA();
    hDevice = OpenBoard();
    DaGetDeviceInfo(hDevice, &BoardSpec);

```

```

SmplChReq[0].ulChNo = 1;
SmplChReq[0].ulRange = range;

// Initial Encoder PCI Card (PCI-6201E)-----
PciGetConfigRegEx(1, 0x1147, 6201, 0x1147, 0x0011,&bus_info, &PciData);
adr0=PciData.BaseAddresses[0]&0xffff;
adr1=PciData.BaseAddresses[1]&0xffff;
outp(adr0+0x08,0x06); // time of encoder 1
outp(adr0+0x09,0x06); // time of encoder 2
outp(adr0+0x0A,0x06); // time of encoder 3
outp(adr0+0x0d,0x01); // reset counter

//คาบการซีกตัวอย่าง  $T_s$  -----
step_time = cycle * 0.00091;
// สร้างเมทริกซ์สำหรับใช้ทำนาย -----
// คำนวณเมทริกซ์  $\Psi$  (PSI)
for(i = 0; i < Hp; i++)
{ if(i < 100)
  { for(j =0; j<4; j++){
    PSI_1[i][j] = 0.0;
    if(i < 1){
      for (k = 0; k<4; k++) {
        PSI_1[i][j] = PSI_1[i][j] + (C[0][k] * A[k][j]);}
    }
    else
      for (k = 0; k<4; k++){
        PSI_1[i][j] = PSI_1[i][j] + (PSI_1[i-1][k] * A[k][j]);} // PSI_1 matrix
      }
    }
  else if (i >= 100 && i < 200)
    { for(j =0; j<4; j++){
      PSI_2[i-100][j] = 0.0;
      if(i < (100)+1){
        for(k = 0; k<4; k++){
          PSI_2[i-100][j] = PSI_2[i-100][j] + (PSI_1[i-1][k] * A[k][j]);} }
        }
      }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เฝ้าเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else {
    for(k = 0; k<4; k++){
        PSI_2[i-100][j] = PSI_2[i-100][j] + (PSI_2[(i-100)-1][k] * A[k][j]); } } }
else
{
    for(j =0; j<4; j++){
        PSI_3[i-200][j] = 0.0;
        if(i <(200+1))
            {for (k = 0; k<4; k++){
                PSI_3[i-200][j] = PSI_3[i-200][j] + (PSI_2[(i-100)-1][k] * A[k][j]);
            }}
        else{
            for (k = 0; k<4; k++){
                PSI_3[i-200][j] = PSI_3[i-200][j] + (PSI_3[(i-200)-1][k] * A[k][j]); }
            }}
    }
}
//คำนวณเมทริกซ์ Υ (Upsilon)
for(i = 0; i < Hp; i++)
{
    if (i < 100)
    {
        Upsilon_1[i][0] = 0.0;
        if(i < 1){
            for (k = 0; k<4; k++)
            {
                Upsilon_1[i][0] = Upsilon_1[i][0] + (C[0][k] * B[k][0]);
            }
        }
        else {
            // (i > 1)
            sum = 0;
            for (k = 0; k<4; k++)
            {
                sum = sum + (PSI_1[i-1][k] * B[k][0]);
                Upsilon_1[i][0] = Upsilon_1[i-1][0] + sum;
            }
        }
    }
    else if(i >= 100 && i < 200)
    {
        Upsilon_2[i-100][0] = 0.0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        sum = 0;
        for (k = 0; k<4; k++){

            if(i <(100)+1){

                sum = sum + (PSI_1[i-1][k] * B[k][0]);
                Upsilon_2[i-100][0] = Upsilon_1[i-1][0] + sum;
            }
            else{

                sum = sum + (PSI_2[(i-100)-1][k] * B[k][0]);
                Upsilon_2[i-100][0] = Upsilon_2[(i-100)-1][0] + sum;
            } // Upsilon_2
        }
    else // (i > 200)
        {sum = 0;
        for (k = 0; k<4; k++)
        {
            if(i < 200+1){
                sum = sum + (PSI_2[(i-100)-1][k] * B[k][0]);
                Upsilon_3[i-200][0] = Upsilon_2[(i-100)-1][0] + sum;
            }
            else {
                sum = sum + (PSI_3[(i-200)-1][k] * B[k][0]);
                Upsilon_3[i-200][0] = Upsilon_3[(i-200)-1][0] + sum;}}// Upsilon_3
// ก่อนกด Enter จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรราง-----
while( !kbhit())
{
// in data of encoder_2 (th_1)-----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x01);
    mByte=inp(adr0+0x01);
    hByte=inp(adr0+0x01);
    dwCounter2= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// in data of encoder_1 (distance) -----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x00);
    mByte=inp(adr0+0x00);
    hByte=inp(adr0+0x00);
    dwCounter1= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
// Modify data of encoder_2 (th_1)-----
    if ( dwCounter2 > 0x7fffff )
    {
        direction_1 = 2 ;
        dwCounter2 = 0xfffff - dwCounter2 ;
    }
else
    {
        direction_1 = 1 ;
    }
while ( dwCounter2 > 8000 )
    {
        dwCounter2 = dwCounter2 - 8000 ;
    }
if ( direction_1 == 2 )
    {
        dwCounter2 = 8000 - dwCounter2 ;
    }
    dwCounter2 = dwCounter2 - 4000 ;
    th_1 = dwCounter2*0.045 ; // 1 pulse is 0.045 degree
if ( th_1 < 0 )
    {
        // th_1 = 360 + th_1 ;
    }

    th_1 = th_1 * 0.0175 ; // เปลี่ยน deg เป็น rad
// Modofly data of encoder_1 (Distance) -----
    if ( dwCounter1 > 0x7fffff )
        {dwCounter1 = 0xfffff - dwCounter1 ;
        }
else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {      dwCounter1 = dwCounter1*-1 ;
    }

    distance = dwCounter1*0.000019;
    x = distance ;
    x_dot = ( x - x_old )/step_time ;
    th_1_dot = ( th_1 - th_1_old )/step_time ;
// แสดงผลการอ่านค่ามุมเพนดูลัม และตำแหน่งรถ -----
    printf(" th_1: %3.4lf", th_1);
    printf(" th_1_dot: %3.4lf ", th_1_dot);
    printf(" x : %3.4lf ", distance);
    printf(" x_dot: %3.4lf \n", x_dot);
// อัปเดตค่า
    x_old = x ;
    th_1_old = th_1;
    }
    oldIrq3 = getvect(IRQ3); /* save the old interrupt vector */
    setvect(IRQ3, countToggle); /* install the new interrupt handler */
    outportb(0x21, ( inportb(0x21) & 0xF7 ) ); /* Unmask (Enable) IRQ3 */
label:

// หลังจากกด Enter (จ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อไปควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถราง)-----
while( key == 1 )
    {
    if (n == 0)
    {
// Modify data of encoder_2 (th_1)-----
    if ( dwCounter2 > 0x7fffff )
        {
            direction_1 = 2 ;
            dwCounter2 = 0xfffff - dwCounter2 ; }
        else
            {      direction_1 = 1 ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
while ( dwCounter2 > 8000 )
    {
        dwCounter2 = dwCounter2 - 8000 ; }
if ( direction_1 == 2 )
    {
        dwCounter2 = 8000 - dwCounter2 ;
    }
    dwCounter2 = dwCounter2 - 4000 ;
    th_1 = dwCounter2*0.045 ;

if ( th_1 < 0 )
    {
        // th_1 = 360 + th_1 ;
    }
th_1 = th_1 * 0.0175 ; // เปลี่ยน deg เป็น rad
// Modofly data of encoder_1 (Distance)
if ( dwCounter1 > 0x7fffff )
    {
        dwCounter1 = 0xfffff - dwCounter1 ;
    }
else
    {
        dwCounter1 = dwCounter1*-1 ; }
distance = dwCounter1*0.000019;
x = distance ;
x_dot = ( x - x_old )/step_time ;
th_1_dot = ( th_1 - th_1_old )/step_time ;
// รับค่าเริ่มต้นหลังจากจ่ายแรงดันไฟฟ้า (หลังกดปุ่ม enter )-----
xk[0][0] = th_1;
xk[1][0] = th_1_dot;
xk[2][0] = x;
xk[3][0] = x_dot;
//-----
// การคำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด (ระบบที่อาศัยตัวควบคุมเอ็มพีซี)-----
//-----
for(i = 0; i < Hp; i++)
    {if (i<100)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{ // สัญญาณอ้างอิงรูปขายน
  //SP1[i][0] = amp * sin(2.0 * 3.14/period * (loop+i)*step_time);

  // สัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได
  SP1[i][0] = SP_x;
}
else if (i >= 100 && i<200)
{ // สัญญาณอ้างอิงรูปขายน
  //SP2[i-100][0] = amp * sin(2.0 * 3.14/period * (loop+i)*step_time);
  // สัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได
  SP2[i-100][0] = SP_x; }
else // i >= 200
{ // สัญญาณอ้างอิงรูปขายน
  //SP3[i-200][0] = amp * sin(2.0 * 3.14/period * (loop+i)*step_time);
  // สัญญาณอ้างอิงรูปขั้นบันได
  SP3[i-200][0] = SP_x; }}
// คำนวณ Kmpc และอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด
ans1 = 0.0;
ans2 = 0.0;
ans3 = 0.0;
for(i = 0; i< Hp ; i++)
{
  sum = 0.0;
  sum1 = 0.0;
  sum2 = 0.0;
  if (i<100)
  { for(k = 0; k<4 ; k++)
      {
          sum = sum + ( PSI_1[i][k] * xk[k][0] );
          sum1 = sum1 + ( PSI_2[i][k] * xk[k][0] );
        }
    ans1 = ans1 + (Kmpc1[0][i] * (SP1[i][0] - sum - (Upsilon_1[i][0] * uk_old )));
    ans2 = ans2 + (Kmpc2[0][i] * (SP2[i][0] - sum1 - (Upsilon_2[i][0] * uk_old )));
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if (i >=100 && i<200)
{
}

else // i >= 200
{
for(k = 0; k<4 ; k++)
    {sum2 = sum2 + ( PSI_3[i-200][k] * xk[k][0] );}
ans3 = ans3 + (Kmpc3[0][i-200]*(SP3[i-200][0] - sum2 - (Upsilon_3[i-200][0] * uk_old )));
}
// คำอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด-----
delUk = ans1 + ans2 + ans3;
u = delUk + uk_old; // คำนวณสัญญาณควบคุมเพื่อจ่ายให้ระบบ

//-----
//สัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์-----
//-----
//สัญญาณอ้างอิงรูปซายน์
//setpoint = 0.3*sin(2*3.1416/5*time_r);
// คำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด
err = setpoint - x;
if (u >= 10 && err > 0 )
{err = 0;
}
else if (u <= -10 && err < 0)
{err = 0;
}
ui = ui_old + err;
// สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของระบบที่ใช้ตัวควบคุมเซอร์โวแอลคิวอาร์
u = -(K[0][0] * th_1 + K[0][1] * th_1_dot + K[0][2] * x + K[0][3] * x_dot)- K[0][4] * ui;

// คำนวณเพื่อชดเชยแรงเสียดทาน-----
if (x_dot == 0)
    {if (u > 0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        f_hat = fs1 ;
    else if (u < 0)
        f_hat = -fs2 ;}
else
    {if (x_dot > 0 && u > 0)
        f_hat = fc1 ;
    else if (x_dot > 0 && u < 0)
        f_hat = -fc2;
    else if (x_dot < 0 && u < 0)
        f_hat = -fc2;
    else if (x_dot < 0 && u > 0)
        f_hat = fc1;
    }
    if (u == 0)
        f_hat = 0;

// แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์
    volt = u + f_hat ;
    volt = volt*0.36;
// ข้อจำกัด
    if (volt > 10)
        volt = 10;
    if (volt < -10)
        volt = -10;
    hexout=((volt+10)/20)*4095;
    DaData[0] = hexout;
    DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] ); // เอาต์พุต

// อัปเดตข้อมูล
    x_old = x ;
    th_1_old = th_1;
    uk_old = u;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        n = n + 1;
        loop = loop + 1;

// บันทึกข้อมูล-----
fprintf(data_fout,"%4.5f %4.5f %4.5f %4.5f %4.5f %4.5f %4.5f %4.5f\n",time_r, th_1,
th_1_dot, x, x_dot, delUk, u, volt);
        time_r = time_r + step_time ;
//-----
    }
    else if(n == (cycle - 1)){
        n = 0; }
    else {
        n = n + 1; }
// set key off -----
        key = 0;
        count = 0;
} // end while loop (Key == 1)
if ( count <= 0xfffff)
{   count = count + 1;
    goto label; }
else
{setvect(IRQ3, oldIrq3);
  outportb(0x21, (inportb(0x21) | 0x08) ); // disable IRQ3
  outp(drive_port,0);
  DaClose(hDevice);
  CLOSE_DTOA();
}
return(0);}

// this ISR should execute each time IRQ3 goes high-----
void interrupt countToggle(void)
{
  disable();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// in data of encoder_2 (th_1) -----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x01);
    mByte=inp(adr0+0x01);
    hByte=inp(adr0+0x01);
    dwCounter2= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
// in data of encoder_1 (distance) -----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x00);
    mByte=inp(adr0+0x00);
    hByte=inp(adr0+0x00);
    dwCounter1= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
    key = 1;
    outportb(0x20, 0x20); // send EOI signal
    enable(); }
// Function for D to A -----
HANDLE OpenBoard(void)
    {HANDLE hDevice;
    hDevice = DaOpen(3345, 0x0001, 0);
    return hDevice; }
void CLOSE_DTOA(void)
    { char *pString;
    pString = "/R";
    spawnl(P_WAIT,"dadrvi.exe",pString,NULL); }
void INITIAL_DTOA(void)
    {char *pString;
    pString = "/B=1";
    spawnl(P_WAIT,"dadrvi.exe",pString,NULL); }
//-----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# TENCON 2011



**Trends and Development in Converging Technology towards 2020**

21-24 November 2011, Bali, Indonesia

[www.tencon2011.org](http://www.tencon2011.org)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Parameters Tuning Effects in the Model Predictive Control of an Inverted Pendulum

Pongtom Chunhacha

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Bangkok, Thailand

ptchun\_08@hotmail.com

Taworn Benjanarasuth

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Bangkok, Thailand

kbtaworn@kmitl.ac.th

**Abstract**—This paper investigates the applicability of using model predictive control for an inverted pendulum system and observes its parameters tuning effects. The linear model predictive control under an input saturation constraint is applied to the nonlinear model of the inverted pendulum on cart system. Sampling period and prediction horizon are varied for investigating their influences to the system's stability and performance. The comparison between the linear quadratic regulator and the model predictive control with the same weighting matrices is additionally implemented.

**Keywords**- inverted pendulum; model predictive control; MPC; linear quadratic regulator; LQR

## I. INTRODUCTION

The inverted pendulum is popular benchmark system for testing control techniques because of its inheriting nonlinear and unstable nature. Many control schemes have been proposed and applied to the inverted pendulum such as state linear quadratic regulator [1], Fuzzy [2] and so on.

Among various control methodologies, Model Predictive Control (MPC) has become an attractive technique for systems with input and state constraints. MPC is an on-line open-loop optimal control strategy, requiring a process model, any process models, capable to predict future output signals based on initial conditions (past input and output) and future input signals [3], [4]. In MPC algorithm, the predicted output signals are used to minimize the performance index and calculate the future input signal within prediction horizon and control horizon. The computed input is sent to the process until a new measurement gets available. The most famous representative of MPC is Generalized Predictive Control (GPC). GPC has been proven to be a successful approach for linear systems [5]. However, most of processes are nonlinear. Various nonlinear GPC methods have then been developed [6]. The main shortcoming of these methods is that on-line dynamic optimization is required, which is a non-convex problem in general.

This paper investigates the applicability of using Model Predictive Control for the inverted pendulum system and observes its parameters tuning effects. Particularly, the effects of sampling time and prediction horizon to the system's

performance are numerically compared. The simulation results when applying MPC and LQR are also compared.

## II. INVERTED PENDULUM

The inverted pendulum on cart is depicted in Fig.1 and its dynamic behavior can be described by (1) and (2).

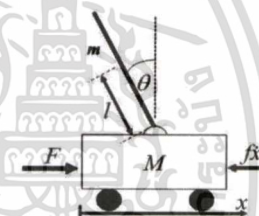


Figure 1. Inverted pendulum on cart structure.

$$\ddot{x} = \frac{F - fx - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta + \frac{3}{4} mg \sin \theta \cos \theta}{(M + m) - \frac{3}{4} m \cos^2 \theta}, \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{mg \sin \theta + \frac{m \cos \theta}{(M + m)} [F - fx - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta]}{\frac{4}{3} ml - \frac{m^2 l \cos^2 \theta}{(M + m)}}, \quad (2)$$

where  $M$  and  $m$  are the mass of cart and mass of pendulum,  $f$  and  $l$  are a kinetic friction constant and distance from the pivot point to the center of mass of the pendulum, respectively.  $F$  is an applied force,  $x$  and  $\theta$  are the position of the cart and angular position of the pendulum.

Defining the state vector  $\mathbf{x} = [\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]^T$  and linearizing (1) and (2) about the upper equilibrium point, the linear state equation and output equation are obtained in (3) and (4),

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = G\mathbf{x}(t) + H\mathbf{u}(t), \quad (3)$$

$$y(t) = C\mathbf{x}(t), \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

when the control signal  $u(t)$  is the applied force  $F$ , the output  $y(t)$  is the position of cart  $x$  and

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-3(M+m)ng}{4ml(M+m)-3m^2l} & 0 & 0 & \frac{-3mf}{4ml(M+m)-3m^2l} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{3ng}{4\left((M+m)-\frac{3}{4}m\right)} & 0 & 0 & \frac{-f}{(M+m)-\frac{3}{4}m} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ -3m \\ 0 \\ 1 \\ (M+m)-\frac{3}{4}m \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

Discretizing (3) and (4) with a zero-order-hold method, the discrete-time state equation and output equation are obtained in (5) and (6),

$$\mathbf{x}(k+1) = A\mathbf{x}(k) + B u(k), \tag{5}$$

$$y(k) = C\mathbf{x}(k), \tag{6}$$

where  $A = e^{AT_s}$  and  $B = \left( \int_0^{T_s} e^{A\lambda} d\lambda \right) H$  when  $T_s$  is a sampling period.

### III. MODEL PREDICTIVE CONTROL

The MPC problem is generally presented in discrete-time state space models and all state variables are assumed to be measurable. If state variables are not available, the observer can easily be combined [7].

In MPC algorithm, the performance index of the predictive controller must be minimized. The performance index  $J$  is generally the weighted sum of squared control errors and control moves as shown in (7),

$$J = \sum_{i=H_u}^{H_p} \|\hat{y}(k+i|k) - \hat{r}(k+i)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2 \tag{7}$$

Variables marked by  $\hat{\cdot}$  are predicted values.  $\hat{r}$  is the reference trajectory.  $k$  is the current time step.  $H_p$  and  $H_w$  are upper prediction horizon and lower horizon.  $H_u$  is control horizon.  $Q(i)$  and  $R(i)$  are square, symmetric and positive definite matrices. The future output can be predicted along the horizon as given in (8),

$$Y(k) = \Psi \hat{\mathbf{x}}(k) + \Upsilon u(k-1) + \Theta \Delta U(k), \tag{8}$$

where

$$Y(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}(k+H_w|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+H_p|k) \end{bmatrix}, \Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k+H_u-1|k) \end{bmatrix}$$

and the matrices  $\Psi$ ,  $\Upsilon$  and  $\Theta$  are defined as

$$\Psi = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{H_p} \end{bmatrix}, \Upsilon = \begin{bmatrix} CB \\ CA^2 B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} CA^i B \end{bmatrix}, \Theta = \begin{bmatrix} B & \dots & 0 \\ C(AB+B) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} CA^i B & \dots & \sum_{i=0}^{H_p-H_u} CA^i B \end{bmatrix}$$

Equivalently, the performance index in (7) can be rewritten as (9),

$$J = \Delta U(k)^T (\Theta^T Q \Theta + R) \Delta U(k) - (2\Theta^T Q \mathcal{E}(k))^T \Delta U(k). \tag{9}$$

The predictive control laws can be divided as unconstrained and constrained cases.

In absence of constraints, an analytical solution exists that provides the optimum by

$$\Delta U(k) = \left[ \frac{1}{2} (\Theta^T Q \Theta + R)^{-1} (2\Theta^T Q \mathcal{E}(k)) \right]. \tag{10}$$

The matrices  $Q$  and  $R$  are given by

$$Q = \text{diag}(Q(H_w), \dots, Q(H_p)), \quad R = \text{diag}(R(0), \dots, R(H_u-1)).$$

The tracking error  $\mathcal{E}(k)$  can be represented as in (11),

$$\mathcal{E}(k) = \tau(k) - \Psi \hat{\mathbf{x}}(k) - \Upsilon u(k-1), \tag{11}$$

where the value  $u(k-1)$  is known at time step  $k$  and

$$\tau(k) = \begin{bmatrix} \hat{r}(k+H_w|k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k+H_p|k) \end{bmatrix}$$

The first element of  $\Delta U(k)$  is summed with  $u(k-1)$  and used as input signal  $u(k)$  for the real process, all other elements are not used for control, but can serve as the initial values for the next optimization run.

In case of constrained problem, control signal and output are usually subjected to the inequalities constraints (12) to (14).

$$u_{\min} \leq u(k+i) \leq u_{\max} \quad \forall i = 0, \dots, H_u, \tag{12}$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+i) \leq \Delta u_{\max} \quad \forall i = 0, \dots, H_u, \tag{13}$$

$$y_{\min} \leq y(k+i) \leq y_{\max} \quad \forall i = H_w, \dots, H_p. \tag{14}$$

The minimization of the cost function (9) subjected to the inequality constraints (12), (13) and (14) is proven to be a standard Quadratic Programming (QP) problem [3]. The problem can then be solved at every integration step with several existing efficient numerical algorithms. In this paper, Dantzig-Wolfe's algorithm is applied [8].

### IV. SIMULATIONS

In the following simulations, the MPC is applied to the model of the inverted pendulum in the laboratory [9]. Its parameters are listed in Table I.

TABLE I. PARAMETERS OF THE INVERTED PENDULUM

| Symbols | Description   | Values | Units              |
|---------|---|--------|--------------------|
| $M$     | mass of cart  | 0.624  | kg                 |
| $m$     | mass of pendulum  | 0.123  | kg                 |
| $l$     | distance from the pivot point to the center of mass of the pendulum | 0.250  | m                  |
| $f$     | constant of inertia   | 0.165  | kg/sec             |
| $g$     | gravity   | 9.8    | m/sec <sup>2</sup> |

In MPC algorithm, the weighting matrices in the performance index (7) are selected as

$$Q(i) = \text{diag}(1, 1, 1, 1) \quad \forall i = H_w, \dots, H_p,$$

$$R(i) = 1 \quad \forall i = 0, \dots, H_u - 1.$$

Normally, the prediction horizon  $H_p$  can be chosen less than 100 for a stable plant. However in this case for an unstable plant,  $H_p$  must be chosen suitably because of its influences to the system's stability and performance [10]. To illustrate the importance of the proper choices of the prediction horizon, the control horizon is therefore fixed at  $H_u = 2$ . The nonlinear model of the inverted pendulum on the cart system in (1) and (2) are employed and the input saturation of  $\pm 3N$  constraint is added to reflect the reality of the actual system.

To observe the effects of the prediction horizon and sampling period, the simulations are conducted by MATLAB/Simulink in two cases. The reference trajectory in all cases is set to be a step signal of one-meter cart position.

Case 1:  $T_s = 10$  ms,  $H_p = 21$  to 36

The simulation results of the output cart position, pendulum angle and force control input signal are shown in Fig. 2 and the corresponding systems' performances are numerated in Table II.

TABLE II. SYSTEMS' PERFORMANCES FOR CASE 1

| $H_p$ | $t_r$ (sec) | $ \theta_{\max} $ (rad) | $ u_{\max} $ (N) |
|-------|-------------|-------------------------|------------------|
| 21    | 4.9161      | 0.1200                  | 1.6421           |
| 24    | 4.8848      | 0.0847                  | 1.1605           |
| 27    | 5.3645      | 0.0644                  | 0.8599           |
| 30    | 5.8219      | 0.0513                  | 0.6634           |
| 33    | 6.2193      | 0.0422                  | 0.5338           |
| 36    | 6.5407      | 0.0355                  | 0.4417           |

As can be observed from the simulations, if  $H_p$  is too small, the cart position response exhibits an oscillatory behavior. When  $H_p$  is increased, the cart position responses become smooth. However, when  $H_p$  gets bigger, the response is slower as the rise time ( $t_r$ ) and the settling time ( $t_s$ ) are longer. In all cases, the cart reaches the desired position at

one meter without steady-state error and the pedulum angle can be kept nearly at the upright position. Denote that when  $H_p$  is larger, the pedulum angle exhibits less deviation and the supplied input force to the system gets lower.

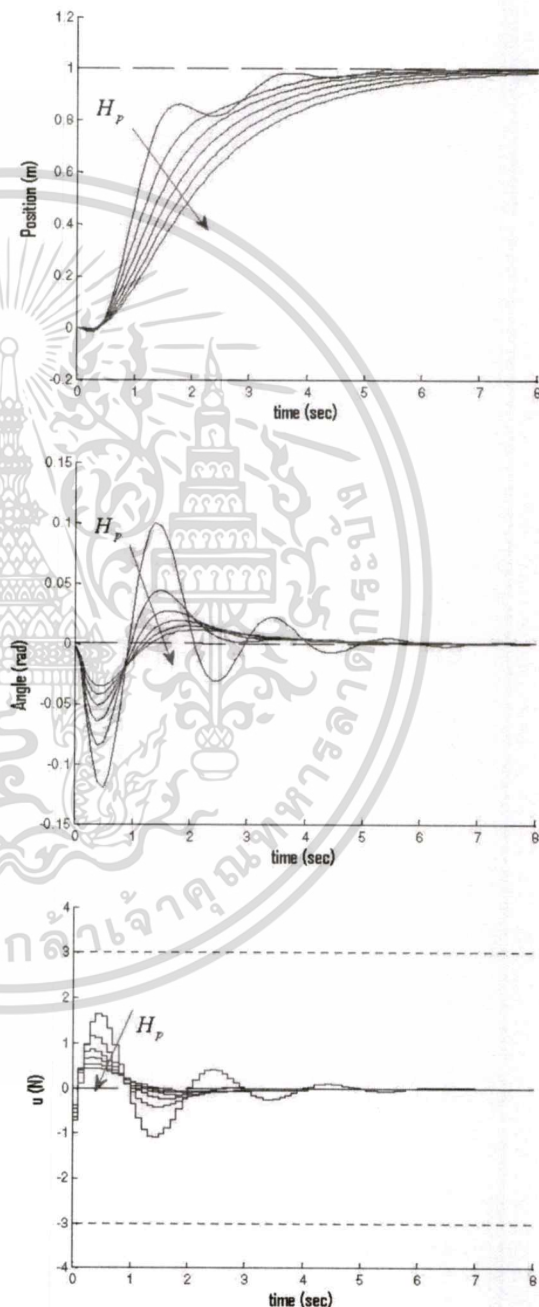


Figure 2. Position, angle and input signals for Case 1.

Case 2:  $T_s = 1$  ms,  $H_p = 180$  to 340

In this case, the simulation results are illustrated in Fig. 3 and the corresponding performances are summarized in Table III.

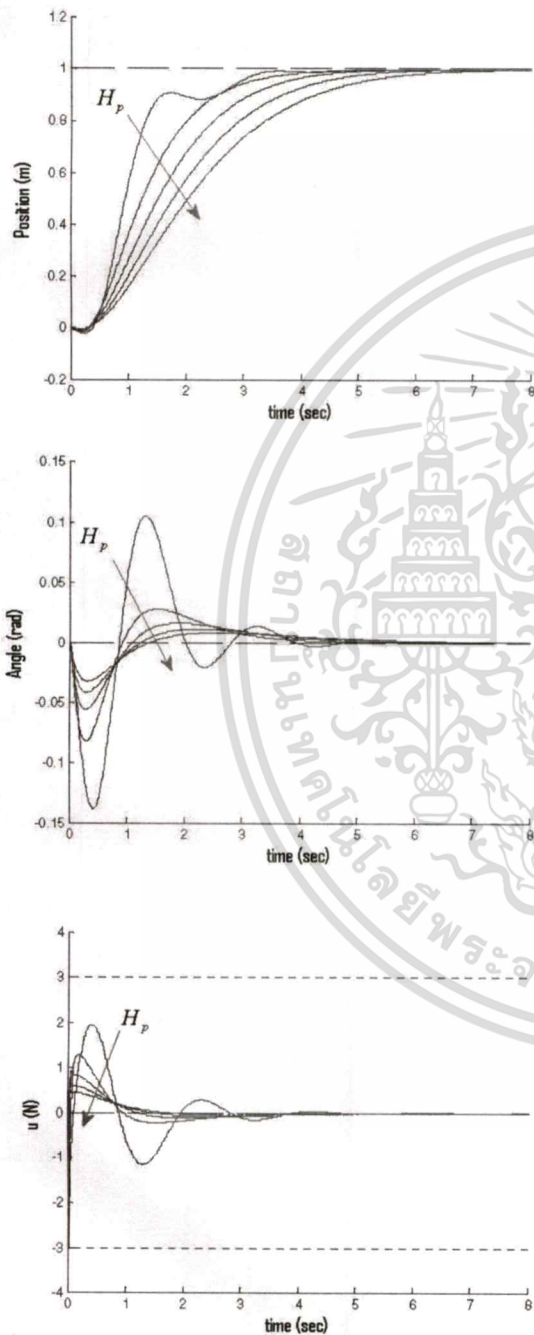


Figure 3. Position, angle and input signals for Case 2.

TABLE III. SYSTEMS' PERFORMANCES FOR CASE 2

| $H_p$ | $t_r$ (sec) | $ \theta_{max} $ (rad) | $ u_{max} $ (N) |
|-------|-------------|------------------------|-----------------|
| 180   | 3.2264      | 0.1387                 | 1.9421          |
| 220   | 3.8032      | 0.0823                 | 2.7489          |
| 260   | 4.4228      | 0.0558                 | 3.0000          |
| 300   | 5.1673      | 0.0415                 | 3.0000          |
| 340   | 5.8914      | 0.0325                 | 3.0000          |

In the similar way to Case 1, if  $H_p$  is too small, the cart position response exhibits an oscillatory behavior. When  $H_p$  is increased, the cart position responses become smooth. However, when  $H_p$  gets bigger, the response is slower as the rise time ( $t_r$ ) and the settling time ( $t_s$ ) are longer. The cart reaches the desired position at one meter without steady-state error and the pedulum angle can be maintained nearly at the upright position in all responses. When increasing  $H_p$ , the pedulum angle exhibits less deviation from its upright position but the system requires a higher maximum supplied input force as it reaches the saturation limit at its initial. This also demonstrates the superior of using MPC in that it can satisfy the constraints successfully.

The difference between Case 1 and Case 2 is that, the performance of the closed-loop system using a fast sample rate (Case 2) is better than using a slow sample rate (Case 1); i.e., the settling time is shorter and the maximum deviation pendulum angle is smaller. However, the prediction range for a fast sample rate case is much higher than for a slow sample rate case and the supplied input force to the system gets higher when a faster sample rate is chosen. Therefore, it requires a better controller hardware (PIC, dsPIC, AVR, etc.) that is usually more expensive.

Comparison to LQR

The comparison between utilizing the Model Predictive Control (MPC) and Linear Quadratic Regulator (LQR) for controlling the inverted pendulum is made in the following simulations. The same weighting matrices,  $Q = diag(1, 1, 1, 1)$  and  $R=1$ , are selected for designing the LQR control system. The MPC controllers are here implemented in two cases for

Case 1:  $H_p = 23$  with  $T_s = 10$  ms, and

Case 2:  $H_p = 230$  with  $T_s = 1$  ms.

The comparative simulation results are depicted in Fig. 4 and the systems' performances are compared in Table IV. It is seen that both MPC control systems cause less oscillatory angle responses than that of the LQR control system. Moreover, there is an overshoot in the cart position response

of the LQR control system but this naturally speeds up the cart to reach the set-point with a shorter rise time.

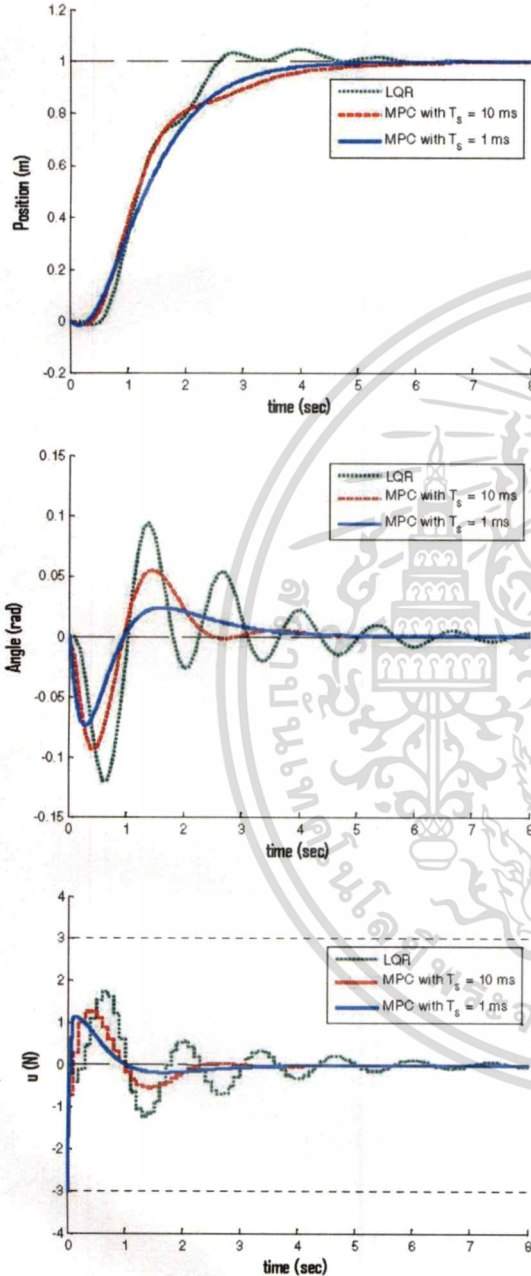


Figure 4. Comparison of position, angle and input signals between LQR and MPC control systems

TABLE IV. COMPARATIVE SYSTEM'S PERFORMANCES

| Controller   | $M_p$ (%) | $t_s$ (sec) | $ \theta_{max} $ (rad) | $ u_{max} $ (N) |
|--------------|-----------|-------------|------------------------|-----------------|
| LQR          | 4.5149    | 4.3930      | 0.1200                 | 1.7426          |
| MPC (Case 1) | 0.0000    | 4.7556      | 0.0938                 | 1.2777          |
| MPC (Case 2) | 0.0000    | 3.9320      | 0.0737                 | 2.9983          |

## V. CONCLUSION

This paper investigates the applicability of using linear model predictive control for the inverted pendulum system and observes its parameters tuning effects. It is found that if prediction horizon is too short, the response exhibits an oscillatory behavior. When prediction horizon is increased, the responses of system become smoother but these responses will be slower as well. Considering different sample rates, the performance of the closed-loop system using a fast sample rate is better than that using a slow sample rate. However, the prediction range for a fast sample rate case is much higher than for a slow sample rate case and the supplied input force to the system gets higher as well. In addition, the MPC control system yields a better response than the LQR control systems with the same weighting matrices.

## REFERENCES

- [1] R.F. Harrison, "Asymptotically optimal stabilizing quadratic control of an inverted pendulum", IEE Proceeding of Control Theory and Application, vol. 150, no.1, pp. 7-16, January 2003
- [2] C.W. Tao, J.S. Taur, T.W. Hsieh, and C.L. Tsai, "Design of a fuzzy controller with fuzzy swing-up and parallel distributed pole assignment schemes for an inverted pendulum and cart system", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 16, no. 6, pp. 1277 - 1288, November 2008
- [3] J.M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints. Pearson Education Limited, pp. 53-56, 2002.
- [4] E.F. Camacho and C. Bordons, Model Predictive Control. Springer-Varleg, pp. 2-5, 1999.
- [5] M.H. Reaci and P.J. Maralani, "Application of hierarchical control in generalized predictive control", Proceeding of International conference on intelligent an - advanced systems, pp. 1 - 5, 2010.
- [6] Y.B. Zhao, G.P. Liu, and D. Rees, "Networked predictive control systems based on the Hammerstein model" IEEE Transactions on Circuits and systems—II: express briefs, vol. 55, no. 5, pp. 469 - 473, May 2008.
- [7] G. Pannocchia and A. Bemporad, "Combined design of disturbance model and observer for offset-free model predictive control" Proceeding of IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 52, no.6, pp. 1048 - 1053, June 2007.
- [8] R. Fletcher, Practical Methods of Optimization, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1987.
- [9] S. Panya, J. Ngamwiwit, T. Benjanarasuth, S. Nundrakwang, and N. Komine, "Hybrid controller for inverted pendulum system", Proceeding of International Symposium on Communications and Information Technologies ( ISCIT), pp. 385 - 388, 2008.
- [10] M. Askari, H.A.F. Mohamed, M. Moghavvemi, and S.S. Yang, "Parameter tuning of model predictive controller; a case study" Proceeding of Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA), 2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายพงศ์ธร ชุณหชา
- วัน เดือน ปีเกิด 6 กรกฎาคม 2530
- ที่อยู่ 256 ซอยฉลองกรุง 23 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520
- ประวัติการศึกษา 2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลอัจฉริยะ สถาบันเทคโนโลยีฟูกูโอกะ (Fukuoka Institute of Technology)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้