

การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่ง  
ที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอล

**MODEL PREDICTIVE CONTROL OF AN INTERNALLY HEAT  
INTEGRATED PRESSURE-SWING DISTILLATION PROCESS  
FOR BIOETHANOL SEPARATION**

ผดุงเกียรติ ทวีการณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่ง  
ที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไอเอทานอล

ผดุงเกียรติ ทวีการณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่ง ที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีเอทานอล
ชื่อ-นามสกุล	นายผดุงเกียรติ ทวีการณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ชัยภพ ศิระวารกุล, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) ของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีเอทานอล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการ โดยใช้แบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นเป็นแบบจำลองกระบวนการในตัวควบคุม และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ในการจำลองและการควบคุมกระบวนการ

การวิจัยขั้นตอนแรกศึกษาการสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น เพื่อใช้เป็นแบบจำลองกระบวนการในตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ ขั้นตอนที่สองสร้างตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม ขั้นตอนที่สามประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการรบกวนกระบวนการ และวิเคราะห์ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (IAE)

จากผลการศึกษาพบว่า ตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการโดยรวมดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยที่การรบกวนอัตราการผลิตของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีประสิทธิภาพการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ ส่วนการรบกวนอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารของกระแสป้อนแบบขั้นบันได ตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีประสิทธิภาพการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

**คำสำคัญ:** กระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายใน แบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ การควบคุมกระบวนการ การจำลองกระบวนการ

<b>Thesis title</b>	Model Predictive Control of an Internally Heat Integrated Pressure-Swing Distillation Process for Bioethanol Separation
<b>Name-Surname</b>	Mr.Phadungkiat Thaweekarn
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Mr.Chaiyapop Siraworakun, D. Eng.
<b>Academic Year</b>	2014

## **ABSTRACT**

This thesis investigates the model predictive control (MPC) of an internally heat integrated pressure-swing distillation (IHIPSD) process for bioethanol separation, in order to increase process control performance. The linear state-space model of the IHIPSD process is developed and used as the process model in the MPC. The process simulation is carried out by commercial software.

The methodology is started by developing the linear state space model of the IHIPSD process which is used as the process model in the MPC. Secondly, the model predictive controller is designed, in order to increase process control performance. Thirdly, process control performance is evaluated by applying disturbances into the process using an integral of absolute value of error (IAE).

The simulation results show that MPC gives better overall control performance than conventional control (PID control). In detail, for feed flow step disturbances, conventional control gives slightly better performance than MPC. However, for temperature and feed composition step disturbances, MPC gives better performances than conventional control.

**Keywords:** internally heat integrated pressure-swing distillation process, linear state space model, model predictive control, process control, process simulation

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ ดร.ชัยภพ ศิระวรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัย ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ตริยไชยาพร ประธานกรรมการและกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จูไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ แก้วประดิษฐ์ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ บิดา มารดา และครอบครัวที่สนับสนุน ทั้งกำลังใจและกำลังทรัพย์ คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้และเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้อง

ผดุงเกียรติ ทวีการณ

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C1	หอกลับความดันต่ำ
C2	หอกลับความดันสูง
LC1	รูปการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลับ C1
LC2	รูปการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลับ C1
LC3	รูปการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลับ C2
PC1	รูปการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลับ C1
TC1	รูปการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลับ C2
TC2	รูปการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกลับ C1
IAE	ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (Integral of Absolute value of Error)

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญภาพ.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ.....	16
2.2 สมการปริภูมิสถานะเชิงเส้น.....	21
2.3 การควบคุมแบบดั้งเดิม.....	21
2.4 การประเมินสมรรถนะของการควบคุม.....	25
2.5 การกลั่นแบบความดันแกว่ง.....	27
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 แผนการดำเนินการ.....	32
3.2 กระบวนการ.....	35
3.3 การจำลองกระบวนการ.....	36
3.4 แบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น.....	38
3.5 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิด.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การสร้างตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิคทีฟ.....	40
3.7 การสร้างตัวควบคุมแบบดั้งเดิม.....	41
3.8 การทดสอบสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการ.....	42
3.9 การประเมินสมรรถนะตัวควบคุม.....	42
3.10 การศึกษาค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน.....	43
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์.....	44
4.1 การเปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิด.....	44
4.2 การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิคทีฟ.....	47
4.3 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุม.....	58
4.4 การศึกษาค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม.....	87
ภาคผนวก ข ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่การรบกวนต่างๆ.....	90
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	109



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุม.....	23
ตารางที่ 2.2	การปรับจูนด้วยวิธีการซีเกลอร์-นิโคลส์.....	23
ตารางที่ 3.1	แผนการดำเนินงาน.....	33
ตารางที่ 3.2	ค่าสภาวะและพารามิเตอร์ของแบบจำลองหน่วยกระบวนการ.....	37
ตารางที่ 3.3	แบบจำลองหน่วยกระบวนการที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ.....	38
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรขาเข้าและตัวแปรวัดของกระบวนการ.....	39
ตารางที่ 3.5	ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในการปฏิบัติงาน.....	40
ตารางที่ 3.6	ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมสำหรับตัวควบคุมแบบดั้งเดิม.....	41
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบ โมเดล พรีดิกทีฟเมื่อลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน.....	61
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบ โมเดล พรีดิกทีฟเมื่อลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน.....	65
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบ โมเดล พรีดิกทีฟเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระแสป้อน.....	68
ตารางที่ 4.4	เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบ โมเดล พรีดิกทีฟเมื่อลดอุณหภูมิของกระแสป้อน.....	72
ตารางที่ 4.5	เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบ โมเดล พรีดิกทีฟเมื่อเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของเอทอนอลในกระแสป้อน.....	76
ตารางที่ 4.6	เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบ โมเดล พรีดิกทีฟเมื่อลดสัดส่วนเชิงโมลของเอทอนอลในกระแสป้อน.....	80

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิคทีฟ..... 17
ภาพที่ 2.2	แนวคิดพื้นฐานสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิคทีฟ..... 18
ภาพที่ 2.3	ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน..... 26
ภาพที่ 2.4	T-x,y-ไดอะแกรมของสารผสมอะซิโตนไนไตรต์กับน้ำที่ความดันแตกต่างกัน..... 27
ภาพที่ 2.5	การกลั่นแบบความดันแกว่ง (A) การกลั่นแบบต่อเนื่องที่ความดันแตกต่างกัน (B) การกลั่นแบบกึ่งต่อเนื่องที่ความดันแตกต่างกัน (C1) การกลั่นแบบกะที่ความดัน แตกต่างกัน (อินเวอร์ส) (C2) การกลั่นแบบกะที่ความดันแตกต่างกัน (ปกติ)..... 28
ภาพที่ 2.6	ตัวอย่างการกลั่นแบบความดันแกว่งกับสารผสมอะซิโโทโรป..... 29
ภาพที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน..... 32
ภาพที่ 3.2	โครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายใน..... 35
ภาพที่ 3.3	แผนผังเปรียบเทียบของโครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวม ความร้อนภายใน..... 36
ภาพที่ 3.4	การติดตั้งแผนผังเปรียบเทียบของโครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่ง ที่มีการรวมความร้อนภายใน..... 38
ภาพที่ 3.5	โครงสร้างการควบคุมแบบดั้งเดิม..... 42
ภาพที่ 4.1	ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองเชิงผลวัดแบบวงเปิด..... 45
ภาพที่ 4.2	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ..... 47
ภาพที่ 4.3	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ..... 48
ภาพที่ 4.4	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ..... 49
ภาพที่ 4.5	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ..... 49
ภาพที่ 4.6	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 ที่ค่าจำนวนตัว แปรควบคุมในอนาคตต่างๆ..... 50

## สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.7	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ.....	51
ภาพที่ 4.8	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสัดส่วนเชิง โมลของน้ำในกระแส ETHANOL ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ.....	51
ภาพที่ 4.9	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสัดส่วนเชิง โมลของเอทานอลในกระแส WATER ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ.....	52
ภาพที่ 4.10	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ.....	53
ภาพที่ 4.11	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ.....	53
ภาพที่ 4.12	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ.....	54
ภาพที่ 4.13	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ.....	55
ภาพที่ 4.14	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ.....	55
ภาพที่ 4.15	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ.....	56
ภาพที่ 4.16	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสัดส่วนเชิง โมลของน้ำในกระแส ETHANOL ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ.....	57
ภาพที่ 4.17	เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสัดส่วนเชิง โมลของเอทานอลในกระแส WATER ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ.....	57
ภาพที่ 4.18	ผลการตอบสนองต่อการเพิ่มอัตราการไหลเชิง โมลของกระแสป้อน.....	59
ภาพที่ 4.19	ผลการตอบสนองต่อการลดอัตราการไหลเชิง โมลของกระแสป้อน.....	63
ภาพที่ 4.20	ผลการตอบสนองต่อการเพิ่มอุณหภูมิของกระแสป้อน.....	67
ภาพที่ 4.21	ผลการตอบสนองต่อการลดอุณหภูมิของกระแสป้อน.....	70

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.22 ผลการตอบสนองต่อการเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลของกระแสป้อน.....	73
ภาพที่ 4.23 ผลการตอบสนองต่อการลดสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลของกระแสป้อน.....	78
ภาพที่ 4.24 ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของ อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2.....	81
ภาพที่ 4.25 ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของ ร้อยละ โดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL.....	83

# บทที่ 1

## บทนำ

การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีไอเอทานอล มีที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการกลั่นเป็นกระบวนการที่พบมากในอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้ในการแยกสารผสมตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งปัญหาที่พบส่วนใหญ่ในกระบวนการกลั่นคือการเกิดอะซีโอโทรป (azeotrope) ของสารผสม ส่งผลให้การกลั่นไม่สามารถแยกสารผสมให้เป็นไปตามค่าความบริสุทธิ์ที่ต้องการได้ โดยจากปัญหาดังกล่าวได้มีการเสนอเทคนิคการกลั่นแบบความดันแกว่งเพื่อใช้สำหรับการกลั่นแยกสารผสมอะซีโอโทรป

การกลั่นแบบความดันแกว่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของจุดอะซีโอโทรปเมื่อความดันของระบบเปลี่ยนไป โดยกระบวนการดังกล่าวจะถูกดำเนินการด้วยหอกลั่นที่มีความดันแตกต่างกันจำนวน 2 คอลัมน์ ซึ่งส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการดำเนินงานค่อนข้างสูงด้วยเหตุดังกล่าวได้มีการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดการใช้พลังงาน โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในระหว่างหอกลั่นทั้งสอง ซึ่งแนวคิดนี้ถูกนำเสนอโดย Mulia-Soto and Flores-Tlacuahuac ในปี 2011 ด้วยการจำลองกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีไอเอทานอล ซึ่งจากการปรับปรุงกระบวนการส่งผลให้กระบวนการมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นยากต่อการควบคุม โดยการควบคุมกระบวนการให้ได้ประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีแบบจำลองที่มีความแม่นยำและง่ายต่อการคำนวณ ดังนั้นแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นตัวแทนของกระบวนการนี้ เนื่องจากมีความเป็นเชิงเส้นทำให้ง่ายต่อการคำนวณโดยใช้วิธีกำหนดการเชิงเส้น (linear programming)

แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space) เป็นแบบจำลองในสภาวะพลวัตชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของกระบวนการแทนแบบจำลองเสมือนจริงอย่างกว้างขวาง อันเนื่องมาจากแบบจำลองปริภูมิสถานะมีความเป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้ง่ายต่อการคำนวณและสามารถนำไปใช้เป็นแบบจำลองในตัวควบคุมขั้นสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมของกระบวนการได้ โดยตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟเป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงตัวหนึ่ง เนื่องจากตัวควบคุม

แบบ โมเดลพีรีดิกทีฟอาศัยแบบจำลองของกระบวนการ เพื่อคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมและนำไปใช้ควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ

งานวิจัยนี้จึงศึกษาการออกแบบตัวควบคุมแบบ โมเดลพีรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบ ความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีไอเอทานอล โดยใช้แบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นเป็นแบบจำลองกระบวนการในตัวควบคุม และใช้โปรแกรม Aspen plus, Aspen dynamics และ MATLAB ในการจำลองกระบวนการ แล้วประเมินประสิทธิภาพการควบคุม กระบวนการจากผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (integral of absolute value of error, IAE)

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีไอเอทานอล

1.2.2 เพื่อศึกษาการควบคุมแบบ โมเดลพีรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีไอเอทานอล

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบ โมเดลพีรีดิกทีฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีไอเอทานอล โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.3.1 กระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีไอเอทานอล อ้างอิงจากงานวิจัยของ Jorge Francisco Mulia-Soto และ Antonio Flores-Tlacuahuac [1]

1.3.2 ใช้โปรแกรม Aspen Plus, Aspen Dynamics และ MATLAB ในการจำลองกระบวนการ

1.3.3 ออกแบบตัวควบคุมแบบ โมเดลพีรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบนารีไอเอทานอลและประเมินสมรรถนะของตัวควบคุม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอล

1.4.2 ได้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอล

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive Control : MPC) เป็นเทคนิคการควบคุมขั้นสูงที่สำคัญสำหรับชุดสมการการควบคุมแบบหลายตัวแปร ซึ่งแนวคิดพื้นฐานของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ สมมติว่าต้องการที่จะควบคุมกระบวนการที่มีตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกหลายตัว ในขณะที่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขแบบอินอควอลิตี้ของตัวแปรขาเข้าและขาออก ถ้าแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการที่ใช้มีความถูกต้องและเหมาะสม ค่าตัวแปรขาออกในปัจจุบันที่วัดได้สามารถที่จะนำไปใช้เพื่อทำนายค่าของตัวแปรขาออกในอนาคตได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตัวแปรขาเข้าที่เหมาะสมสามารถที่จะคำนวณได้จากการวัดและการทำนาย โดยในการเปลี่ยนแปลงในแต่ละตัวแปรขาเข้าจะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรขาเข้ากับค่าของตัวแปรขาออกโดยแบบจำลองกระบวนการ ในการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ตัวแปรขาออกจะถูกเรียกว่า ตัวแปรควบคุม (Controlled Variables : CVs) ในขณะที่ตัวแปรขาเข้าจะถูกเรียกว่า ตัวแปรปรับ (Manipulated Variables : MVs) และตัวแปรรบกวนที่วัดได้จะถูกเรียกว่า ตัวแปรป้อนล่วงหน้า (Feedforward Variables : DVs) ดังที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟขึ้นอยู่กับความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ

##### 2.1.1 วัตถุประสงค์โดยรวมของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

###### 2.1.1.1 ป้องกันการละเมิดเงื่อนไขของอินพุตและเอาต์พุต

2.1.1.2 ทำการปรับตัวแปรขาออกบางตัวเพื่อให้ได้ค่าเป้าหมายที่เหมาะสม ในขณะที่ตัวแปรขาออกตัวอื่นๆยังคงอยู่ในช่วงที่กำหนด

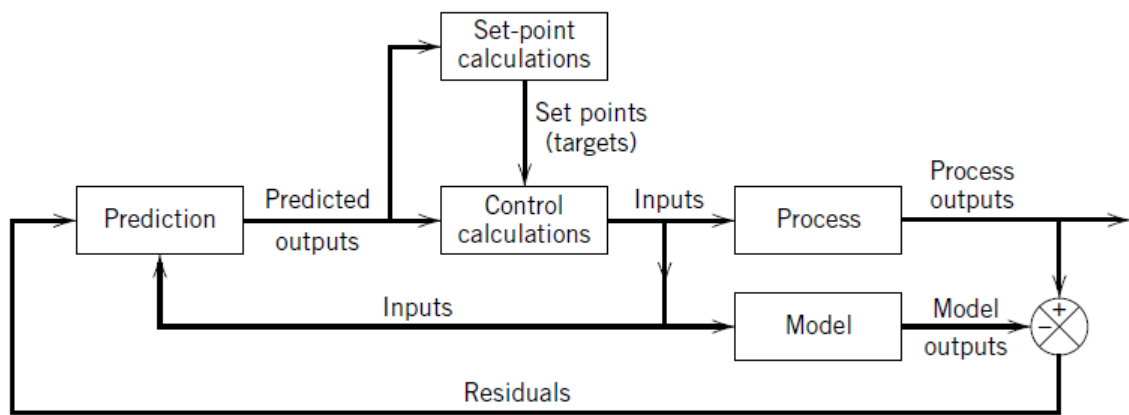
###### 2.1.1.3 ป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่มากเกินไปของตัวแปรอินพุต

##### 2.1.2 ภาพรวมของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟได้แสดงในภาพที่ 2.1 แบบจำลองกระบวนการถูกใช้เพื่อทำนายค่าปัจจุบันของตัวแปรเอาต์พุต แล้วเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตของกระบวนการ โดยสัญญาณของค่าความแตกต่างระหว่างค่าเอาต์พุตของกระบวนการและค่าเอาต์พุตที่ทำนายได้จะถูกป้อนกลับไปยังบล็อกการทำนาย (Prediction) การทำนายจะมีการคำนวณสองรูปแบบ คือ การคำนวณค่าเป้าหมาย และการคำนวณค่าการควบคุม โดยเงื่อนไขแบบอินอควอลิตี้ เช่น ข้อจำกัดต่ำสุดและสูงสุด เป็นต้น สามารถที่จะรวมเข้ากับการคำนวณอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังที่กล่าว



มาจะเห็นว่าองค์ประกอบของการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีความคล้ายคลึงกับองค์ประกอบของการควบคุมแบบ โมเดลภายใน และองค์ประกอบของตัวทำนายแบบสมิธ เพราะแบบจำลองจะทำงานควบคู่ไปกับกระบวนการแล้วเปรียบเทียบค่าส่งกลับไปให้กับตัวทำนายอีกรอบ แต่อย่างไรก็ตามการประสานงานของตัวควบคุมและการคำนวณค่าเป้าหมายเป็นส่วนที่แตกต่างของการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟได้มีความสนใจที่จะนำไปใช้งานในระบบอุตสาหกรรมมากกว่าการควบคุมแบบ โมเดลภายใน หรือตัวทำนายแบบสมิธ เพราะมันมีความเหมาะสมมากสำหรับชุดสมการการควบคุมหลายตัวแปร ( MIMO )

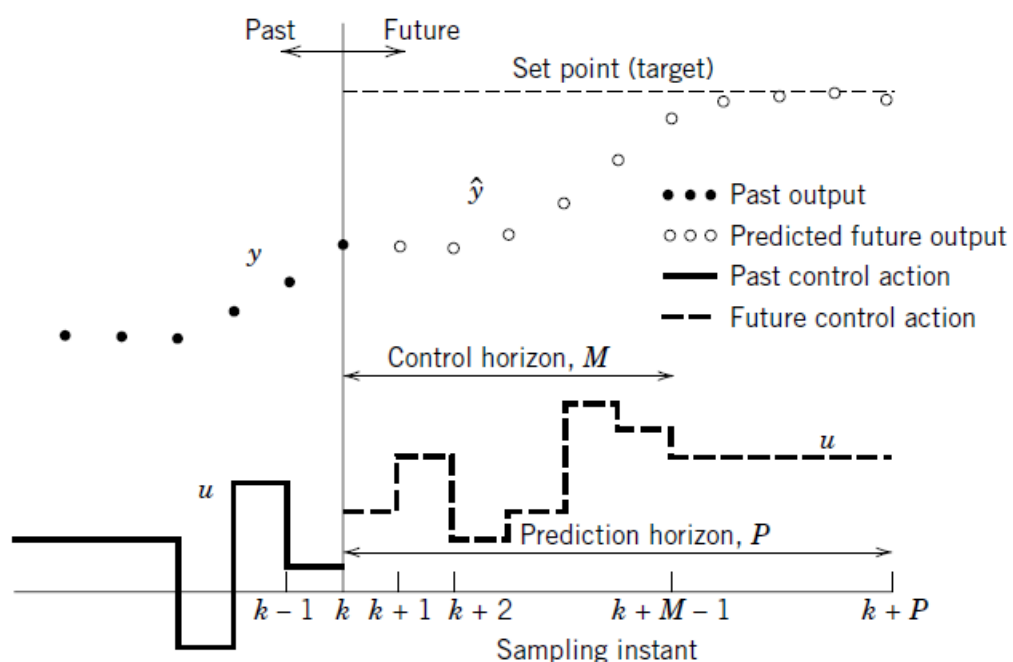


ภาพที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ

ค่าเป้าหมายสำหรับการควบคุมจะถูกคำนวณมาจากการหาค่าที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ โดยใช้แบบจำลองที่สถานะคงที่ของกระบวนการ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้แบบจำลองเชิงเส้น และวัตถุประสงค์ของการเพิ่มประสิทธิภาพโดยทั่วไปประกอบด้วย การทำให้มีกำไรสูงสุด การทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด หรือการทำให้มีอัตราการผลิตสูงสุด ค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าเป้าหมายมักจะมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยเนื่องจากความแปรปรวนของสถานะของกระบวนการและเครื่องมือ เช่นเดียวกับข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น ราคาและค่าใช้จ่ายต่างๆ เป็นต้น การคำนวณค่าเป้าหมายของการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟจะถูกดำเนินการขึ้นในแต่ละครั้งที่มีการคำนวณการควบคุม

การคำนวณการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟขึ้นอยู่กับค่าในเวลานี้ปัจจุบันและการทำนายค่าตัวแปรเอาต์พุตต่างๆ ในอนาคต วัตถุประสงค์ของการคำนวณการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ คือเพื่อหาลำดับของการเปลี่ยนแปลงการควบคุม ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับ เพื่อให้การตอบสนองที่ทำนายไว้เปลี่ยนไปยังค่าเป้าหมายในลักษณะที่เหมาะสม ค่าเอาต์พุตที่เกิดขึ้น

จริง  $y$  ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำนาย  $\hat{y}$  และค่าอินพุตที่ถูกปรับ  $u$  สำหรับการควบคุมแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO) แสดงดังภาพที่ 2.2 ดังตัวอย่างต่อไปนี้ที่เวลา  $k$  กลยุทธ์ของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟจะคำนวณชุดของค่า  $M$  ของอินพุต ซึ่งชุดของค่าอินพุต  $M$  จะถูกคำนวณเพื่อให้ได้ชุดของค่าเอาต์พุต  $P$  การคำนวณการควบคุมขึ้นอยู่กับค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งจำนวนของการทำนาย  $P$  เรียกว่า Prediction horizon ในขณะที่จำนวนของการเปลี่ยนแปลงการควบคุม  $M$  เรียกว่า Control horizon



ภาพที่ 2.2 แนวคิดพื้นฐานสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

### 2.1.3 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่มีข้อจำกัด (Unconstrained MPC)

การคำนวณการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟได้ดำเนินการบนพื้นฐานการวัดค่าอินพุตและเอาต์พุต และการทำนายของแบบจำลอง โดยวัตถุประสงค์การควบคุมคือการคำนวณชุดการเปลี่ยนแปลงอินพุต (control moves or input change) ซึ่งทำให้การทำนายมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นโดยใช้ค่าเป้าหมายอ้างอิง (reference trajectory) และการออปติไมเซชันในการหาค่าการเปลี่ยนแปลงอินพุตที่เหมาะสม

2.1.3.1 ค่าเป้าหมายอ้างอิง (reference trajectory) ในการใช้งานตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ค่าเป้าหมายอ้างอิงได้ถูกนำมาใช้สำหรับการสร้างชุดการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายเพื่อให้ได้ค่าเป้าหมายที่ต้องการ โดยค่าเป้าหมายอ้างอิง ( $y_r$ ) สามารถคำนวณได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้แสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$Y_r(k+1) \triangleq \text{col}[y_r(k+1), y_r(k+2), \dots, y_r(k+P)] \quad (2.1)$$

โดยที่  $Y_r$  คือ เวกเตอร์ของค่าเป้าหมายอ้างอิง

2.1.3.2 กฎการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive Control Law) การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟบนพื้นฐานของแบบจำลองกระบวนการเชิงเส้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.2) โดยการคำนวณการควบคุมจะคำนึงถึงค่าต่ำสุดที่เหมาะสมของค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำนายได้และค่าเวกเตอร์ของอินพุต

$$\min_{\Delta U(k)} J = \hat{E}(k+1)^T Q \hat{E}(k+1) + \Delta U(k)^T R \Delta U(k) \quad (2.2)$$

โดยที่  $Q$  คือเมตริกซ์ค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน,  $R$  คือเมตริกซ์ค่าน้ำหนักของค่าอินพุต,  $\hat{E}(k+1)$  คือเวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำนายได้ และ  $\Delta U(k)$  คือเวกเตอร์ของค่าอินพุตที่คำนวณจากค่าเป้าหมายอ้างอิง โดยเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนที่ทำนายได้สามารถคำนวณได้จากค่าเป้าหมายอ้างอิงและค่าเอาต์พุตที่ทำนายได้ ( $\tilde{Y}(k+1)$ ) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\hat{E}(k+1) \triangleq Y_r(k+1) - \tilde{Y}(k+1) \quad (2.3)$$

โดยค่าเอาต์พุตที่ทำนายได้ ( $\tilde{Y}(k+1)$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$\tilde{Y}(k+1) \triangleq \text{col}[\tilde{y}(k+1), \tilde{y}(k+1), \dots, \tilde{y}(k+P)] \quad (2.4)$$

และเวกเตอร์ของค่าอินพุตที่คำนวณจากค่าเป้าหมายอ้างอิง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

$$\Delta U(k) \triangleq \text{col}[\Delta U(k+1), \Delta U(k+1), \dots, \Delta U(k+M-1)] \quad (2.5)$$

## 2.1.4 ค่าพารามิเตอร์การปรับจูนสำหรับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

2.1.4.1 ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคต (Prediction horizon, P) เมื่อลดค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตจะทำให้เกิดโอเวอร์ชูตสูงขึ้น

2.1.4.2 ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคต (Control horizon, C) เมื่อมีการเพิ่มค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตจะส่งผลให้เกิดโอเวอร์ชูตสูงขึ้นและทำให้เพิ่มการคำนวณมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 5 – 20

2.1.4.3 ค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน (Weighting Matrices Q) การกำหนดค่าจะขึ้นอยู่กับความสำคัญของตัวแปรเอาต์พุตที่ส่งผลต่อกระบวนการทั้งในด้านความปลอดภัย หรือด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะนำมาร่วมพิจารณาด้วย

2.1.4.4 ค่าน้ำหนักของค่าความอินพุต (Weighting Matrices R) การกำหนดค่าจะขึ้นอยู่กับความสำคัญของตัวแปรอินพุตที่ส่งผลต่อกระบวนการทั้งในด้านความปลอดภัย หรือด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะนำมาร่วมพิจารณาด้วย

## 2.1.5 ข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

2.1.5.1 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ สามารถใช้เพื่อจัดการกับกระบวนการที่มีการควบคุมหลายตัวแปรได้

2.1.5.2 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถพิจารณาข้อจำกัดของแอกทูเอเตอร์ (Actuator)

2.1.5.3 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถเพิ่มกำไร โดยให้มีการดำเนินการใกล้เคียงกับเงื่อนไขของระบบได้

2.1.5.4 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถใช้สำหรับกระบวนการที่ไม่เสถียร และมีหลายสถานะได้

2.1.5.6 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความง่ายต่อการปรับค่า

2.1.5.7 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถจัดการกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกระบวนการได้

2.1.5.8 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถที่จะคำนวณค่าแบบออนไลน์ได้อย่างรวดเร็ว

## 2.2 สมการปริภูมิสถานะเชิงเส้น (Linear State Space Equation)

ระบบพลวัตส่วนใหญ่ก็มีพฤติกรรมที่สามารถใช้สมการอนุพันธ์อันดับใด ๆ มาอธิบายได้ ในขณะที่เดียวกันสมการเชิงอนุพันธ์อันดับใด ๆ ก็สามารถลดอันดับให้เหลือเพียงสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ จากความจริงตรงนี้จึงได้มีการเสนอวิธีการใหม่ในการวิเคราะห์และควบคุมระบบ ซึ่งจะวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและได้มีการนำแบบจำลองปริภูมิสถานะมาใช้ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งและแตกต่างจากระบบควบคุมแบบดั้งเดิมที่นิยมวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบบนโดเมนความถี่ นอกจากนี้การนำแบบจำลองปริภูมิสถานะมาใช้ทำให้เราสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแบบสัญญาณขาเข้าหลายตัวแปรสัญญาณขาออกหลายตัวแปร (MIMO) ได้โดยการกำหนดมิติของตัวแปรในสมการปริภูมิสถานะอย่างเหมาะสม ซึ่งสมการทั่วไปสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.6)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.7)$$

โดยที่:  $x(\cdot)$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ (state vector)

$y(\cdot)$  คือ เวกเตอร์ของสัญญาณขาออก (output vector)

$u(\cdot)$  คือ เวกเตอร์ของสัญญาณขาเข้า หรือ เวกเตอร์ของสัญญาณควบคุม (input vector, control vector)

A คือ เมทริกซ์ของตัวแปรสถานะ หรือ เมทริกซ์พลวัต (state matrix, dynamics matrix)

B คือ เมทริกซ์ขาเข้า (input matrix)

C คือ เมทริกซ์ขาออก (output matrix)

D คือ เมทริกซ์ป้อนผ่าน (feedthrough (or feedforward) matrix) (ในกรณีที่ระบบไม่มีการป้อนสัญญาณขาเข้า, D เป็นเมทริกซ์ศูนย์)

## 2.3 การควบคุมแบบดั้งเดิม (PID Control)[9]

การควบคุมแบบดั้งเดิม หรือการควบคุมควบคุมแบบพีไอดี มีพื้นฐานมาจากการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) วัตถุประสงค์ของการควบคุมแบบป้อนกลับคือเพื่อลดค่าความผิดพลาด (Error,  $e(t)$ ) ให้เป็นศูนย์แสดงดังสมการที่ (2.8)

$$e(t) = R(t) - B(t) \quad (2.8)$$

$R(t)$  คือ ค่าเป้าหมาย (Set point)

$B(t)$  คือ ค่าของตัวแปรควบคุม (Controlled Variable) ที่วัดได้

วิธีการควบคุมป้อนกลับประกอบด้วย 3 โหมด คือ สัดส่วน (Proportional, หรือ โหมดพี) ปริพันธ์ (Integral, หรือ โหมดไอ) และอนุพันธ์ (Derivative, หรือ โหมดดี) จะให้ค่าการควบคุมเป็นไปตามสมการที่ (2.9)

$$p(t) = p + K_c e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

$p(t)$  คือ เอาท์พุทตัวควบคุม

$p$  คือ ค่าเบี่ยงเบนหรือค่าเอาท์พุทตัวควบคุมที่สถานะคงตัว

$K_c$  คือ อัตราขยายตัวควบคุม (Controller Gain)

$\tau_I$  คือ เวลาปริพันธ์ (Integral Time) หรือเวลารีเซต (Reset Time)

$\tau_D$  คือ เวลาอนุพันธ์ (Derivative Time)

ค่าอัตราการขยายตัวควบคุมหรือค่าเกนของการควบคุม ( $K_c$ ) จะใช้เพื่อปรับเอาท์พุทตัวควบคุมให้เปลี่ยนแปลงตามต้องการโดยนำไปคูณกับผลต่างระหว่างค่าเป้าหมายกับตัวแปรควบคุม โดยทั่วไปอัตราการขยายตัวควบคุมจะไม่มีหน่วยการควบคุมปริพันธ์ให้ผลตอบสนองค่อนข้างช้า ไม่สามารถทำให้เอาท์พุทของกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว การควบคุมอนุพันธ์จะให้ผลตอบสนองรวดเร็วมาก ทำให้ตัวแปรปรับมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างรุนแรง และยังส่งผลให้ตัวแปรควบคุมเกิดการแกว่ง

### 2.3.1 การออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี

วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เป็นที่นิยมมีอยู่ 2 วิธีการคือ วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Compensation) และวิธีการของเชน-ฮรอน-เรสวิก (Chien-Hrones-Reswick)

#### 2.3.1.1 ขั้นตอนในการออกแบบวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ [4]

1) นำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ของระบบที่แสดงในตารางที่ 2.1 มาทดสอบด้วยการทำให้ระบบและตัวควบคุมเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดสัดส่วนเพียงอย่างเดียว หากใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีอยู่แล้วในระบบ ให้ทำการลดค่าเกนตัวควบคุมแบบปริพันธ์และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ลงให้เหลือน้อยที่สุด

2) จากนั้นค่อยๆ เพิ่มค่าเกนตัวควบคุมแบบสัดส่วนให้มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งระบบเริ่มมีการแกว่ง (Oscillate) ด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) คงที่ ณ สภาวะนี้ระบบเริ่ม

ไม่มีความสมดุล (Unstable) จึงทำการบันทึกค่าเกณฑ์ควบคุมแบบสัดส่วนตรงตำแหน่งนี้ไว้ สมมุติให้มีค่าเท่ากับ  $K_U$

ตารางที่ 2.1 ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุม

ชนิดของการควบคุม	ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุม
P	$\frac{P'(s)}{E(s)} = K_C$
PI	$\frac{P'(s)}{E(s)} = K_C(1 + \frac{1}{\tau_I s}) = K_C(\frac{\tau_I s + 1}{\tau_I s})$
PID	$\frac{P'(s)}{E(s)} = K_C[1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s]$

ตารางที่ 2.2 การปรับจูนด้วยวิธีการซีเกลอร์-นิโคลส์

ชนิดของการควบคุม	$K_C$	$1/\tau_I$	$\tau_D$
P	$0.50K_U$	-	-
PI	$0.45 K_U$	$1.2T_C$	-
PID	$0.60 K_U$	$2T_C$	$T_C/8$

3) ในขณะเดียวกันทำการวัดคาบเวลาการแกว่ง โดยสมมุติให้มีค่าเป็น  $T_C$  จากค่าของ  $K_U$  และ  $T_C$  เราจะสามารถคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมได้จากตารางที่ 2.2

### 2.3.1.2 การปรับจูนพีโอดีแบบการลองผิดลองถูก(Trial and Error)

การปรับจูนพีโอดีแบบการลองผิดลองถูก(Trial and Error)[4] โดยขั้นตอนในการทดสอบและปรับจูนค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีโอดีสำหรับระบบที่ไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ต่อระบบควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยตัวควบคุมแบบพี
- 2) ปรับค่าเกณฑ์ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ สังเกตผลตอบสนองที่ได้
- 3) ถ้าปรับค่าเกณฑ์ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ แล้วผลตอบสนองที่ได้ไม่มีการพุ่งเกิน (ระบบมีอันดับเป็นหนึ่ง) ให้สังเกตดูว่าระบบมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวหรือไม่

(1) ถ้าไม่มีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว ใช้ตัวควบคุมแบบพีอย่าง เดียวโดยปรับค่าเกนของตัวควบคุมให้สูงๆเข้าไป

(2) ถ้ามีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดย ปรับค่าเกนของตัวควบคุมพีให้สูงพอประมาณ แล้วจึงปรับค่าเกนของตัวควบคุมไอจนกระทั่งค่าความ ผิดพลาดในสภาวะคงตัวเป็นศูนย์

4) ถ้าผลตอบสนองที่ได้มีการพุ่งเกินของผลตอบสนอง (ระบบมีอันดับสูง กว่าหนึ่ง)

(1) ถ้าต้องการลดการพุ่งเกินของผลตอบสนองอย่างเดียวโดยยอมรับค่า ความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ให้ใช้ตัวควบคุมแบบพีดี โดยปรับค่าเกนพีให้สูงพอประมาณจนกระทั่ง ได้ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวเป็นที่พอใจแล้วจึงปรับค่าเกนของตัวควบคุมดีเพื่อลดการพุ่งเกิน ของผลตอบสนอง

(2) ถ้าต้องการปรับทั้งความเร็วและการพุ่งเกินของผลการตอบสนอง รวมไปถึงค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวให้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยลองทดสอบแบบซีเกลอร์ นิโคลส์ก่อนและจึงปรับจนกระทั่งผลการตอบสนองเป็นแบบไม่มีการหน่วงแล้วทำตามขั้นตอนของ การทดสอบแบบซีเกลอร์นิโคลส์แต่ถ้าทดสอบแบบซีเกลอร์นิโคลส์แล้วไม่เกิดผลตอบสนองแบบไม่ มีการหน่วงจึงทดสอบด้วยวิธีการของเซน-ฮรอน-เรสวิก ซึ่งในการเลือกใช้วิธีการใดให้คำนึงถึงผลการ ตอบสนองที่ได้ว่าระบบยอมรับการพุ่งเกินได้มากน้อยแค่ไหนเพราะวิธีการของซีเกลอร์นิโคลส์จะให้ ผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินที่สูงกว่าวิธีการของเซน-ฮรอน-เรสวิกแต่ผลตอบสนองที่ได้ จะมีความเร็ว สูงกว่าวิธีการของเซน-ฮรอน-เรสวิก

### 2.3.2 ประเภทของการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุม

ประเภทของการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การปรับ พารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบลูปเปิด (Open –loop Tuning)และการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบลูป ปิด (Closed –loop Tuning) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบลูปปิดซึ่งจะแตกต่าง จากระบบควบคุมแบบลูปเปิดคือ มีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการป้อนกลับมาเข้าเป็นส่วนหนึ่ง ของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบ การที่เราจะทราบค่าเอาต์พุตได้ เราจะต้องมีการ วัดข้อมูลของเอาต์พุต เมื่อเราทราบค่าเอาต์พุตแล้ว เรามักจะนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ เอาต์พุตที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริง จะถูกส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างระหว่าง



เอาที่พูดที่ต้องการและเอาที่พูดที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง จึงได้เอาที่พูดของระบบตามที่ต้องการ

### 2.3.3 แนวทางในการเลือกใช้ตัวควบคุมสำหรับกระบวนการแบบต่างๆ [5]

การเลือกใช้ตัวควบคุมสำหรับกระบวนการแบบต่างๆ โดยพิจารณาการเลือกชนิดของการควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับกระบวนการต่างๆ แสดงได้ดังนี้

2.3.3.1 การควบคุมระดับของของเหลว โดยทั่วไปจะใช้การควบคุมแบบพีหรือพีไอ แต่ใช้การควบคุมแบบพีอย่างเดียวก็เป็นที่น่าพอใจแล้ว

2.3.3.2 การควบคุมความดันของแก๊ส โดยทั่วไปการควบคุมความดันแก๊ส จะทำการควบคุมความดันให้อยู่ในช่วงของค่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงเลือกใช้การควบคุมแบบพีก็เพียงพอ

2.3.3.3 การควบคุมความดันไอ สำหรับระบบควบคุมความดันไอที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว การควบคุมแบบพีไอก็เพียงพอต่อการควบคุม แต่ระบบที่มีการตอบสนองช้า การควบคุมแบบพีไอดีจะเหมาะสมกว่าในการควบคุมระบบนี้ เนื่องจากมีความเร็วและมีความทนทานมากกว่า

2.3.3.4 การควบคุมการไหล โดยทั่วไปเลือกใช้การควบคุมแบบพีไอเนื่องจากสามารถกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัวและการตอบสนองของระบบมีความรวดเร็วอยู่แล้วค่าเกนของการควบคุมจะอยู่ระหว่าง 0.5-0.7 และค่าเวลาอินทิกรัลจะอยู่ระหว่าง 0.2-0.3 นาที

2.3.3.5 การควบคุมอุณหภูมิ เป็นการควบคุมที่ยากที่จะกำหนด เนื่องจากความหลากหลายของกระบวนการและความหลากหลายของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน จึงใช้การควบคุมแบบพีไอดีจะเหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถเพิ่มค่าเกนของเครื่องควบคุมเพื่อเพิ่มความเร็วของการตอบสนองของระบบและระบบยังคงมีเสถียรภาพ

2.3.3.6 การควบคุมองค์ประกอบ โดยทั่วไปจะใช้การควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิโดยการควบคุมแบบพีไอดีเหมาะสมสำหรับการควบคุม

## 2.4 การประเมินสมรรถนะของการควบคุม

การประเมินสมรรถนะของการควบคุมจะพิจารณาถึงการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิด โดยจะพิจารณาผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงเวลาของการควบคุม ตั้งแต่เกิดการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลง แสดงโดยพื้นที่แรเงาในภาพที่ 2.3 โดยเป้าหมายของการควบคุมคือ ต้องการให้พื้นที่แรเงามีค่าน้อยที่สุด โดยเกณฑ์อาจกำหนดได้ในลักษณะต่างกัน ดังสมการที่ 2.10-2.12 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.4.1 ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (Integral of Absolute value of Error, (IAE))

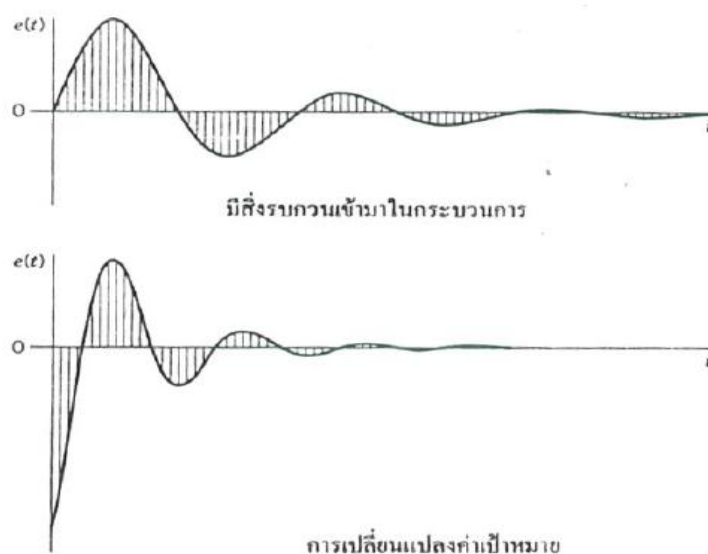
$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.10)$$

2.4.2 ผลรวมค่ากำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน (Integral of Square of Error, (ISE))

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2.11)$$

2.4.3 ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่คิดน้ำหนักตามเวลาที่ผ่านไป (Integral of Time weighted Absolute value of Error, (ITAE))

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (2.12)$$

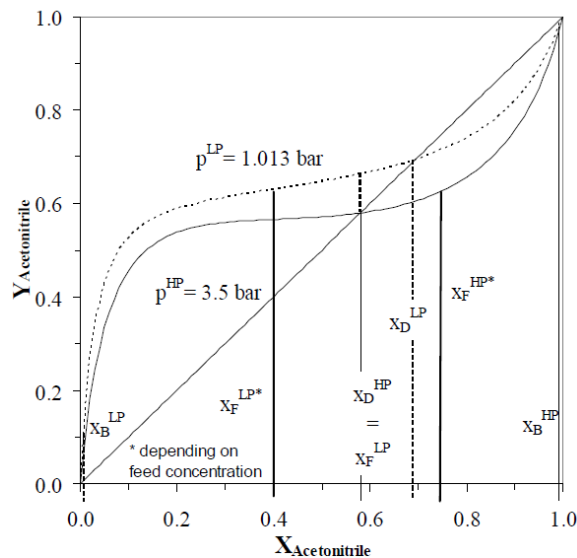


ภาพที่ 2.3 ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน

เกณฑ์การพิจารณาทั้ง 3 แบบมีลักษณะแตกต่างกันที่การให้น้ำหนักหรือความสำคัญกับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า IAE ซึ่งเป็นค่าที่ให้ความสำคัญกับค่าความคลาดเคลื่อนจะพิจารณาตามขนาดของความคลาดเคลื่อน

## 2.5 การกลั่นแบบความดันแกว่ง

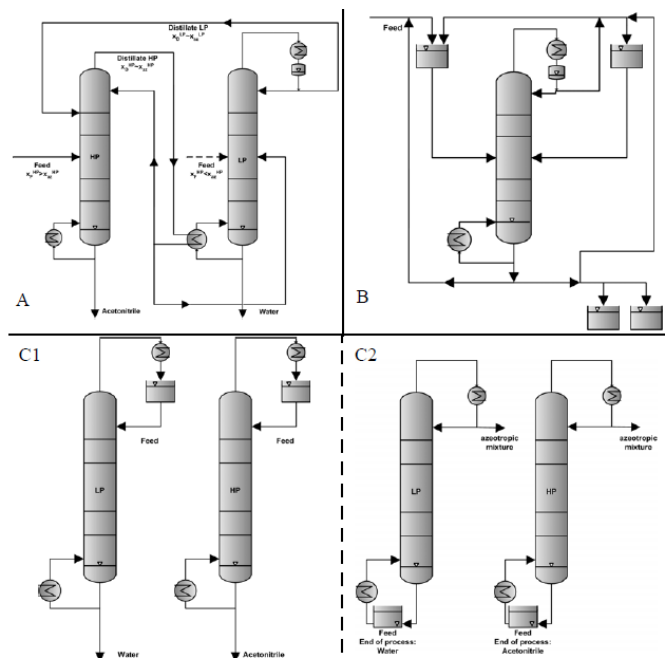
การกลั่นแบบความดันแกว่ง (Pressure swing distillation: PSD) เป็นกระบวนการแยกสารผสมอะซิโตนไทรอปเนื้อเดียว ซึ่งกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งนี้ใช้หลักการของความว่องไวของความดันสำหรับจุดอะซิโตนไทรอปของสารผสมทวิภาคคือ ถ้ามีการเพิ่มความดันจะทำให้จุดอะซิโตนไทรอปเลื่อนตำแหน่งจากจุดเดิมไปยังความเข้มข้นที่ต่ำกว่าขององค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำ ดังนั้นการแยกสารผสมอะซิโตนไทรอปจึงสามารถที่จะดำเนินการขึ้นได้ในสภาวะที่ความดันแตกต่างกัน ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างคือการแยกสารผสมอะซิโตนไทรอปกับน้ำ ดังภาพที่ 2.4 ความเข้มข้นของกระแสป้อนอาจจะต่ำหรือสูงกว่าจุดอะซิโตนไทรอป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอะซิโตนไทรอปในกระแสป้อน ถ้าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรอปในกระแสป้อนต่ำกว่าจุดอะซิโตนไทรอปผลิตภัณฑ์ด้านล่างคอลัมน์จะเป็นน้ำ



ภาพที่ 2.4 T-x,y-ไดอะแกรมของสารผสมอะซิโตนไทรอปกับน้ำที่ความดันแตกต่างกัน

ส่วนผลิตภัณฑ์ด้านบนจะเป็นอะซิโตนในไตรล์สำหรับโครงสร้างของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งสามารถทำได้ทั้งแบบคอลัมน์เดี่ยวและสองคอลัมน์ โดยการกลั่นแบบคอลัมน์เดี่ยวจะเป็นการกลั่นแบบกะที่ความดันแตกต่างกัน ซึ่งจะมี การวนรอบอย่างน้อยสองรอบ ส่วนกระบวนการกลั่นที่ใช้สองคอลัมน์จะเป็นการกลั่นแบบต่อเนื่อง ซึ่งคอลัมน์ทั้งสองจะมีความดันที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.5

ข้อได้เปรียบหลักของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่ง คือ ไม่ใช่เอนเทรปีทำให้ช่วยลดขั้นตอนและคอลัมน์ที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการรีไซเคิลเอนเทรปี นอกจากนี้ยังสามารถทำการรวมความร้อนของคอลัมน์สำหรับกระบวนการกลั่นแบบต่อเนื่องได้อีกด้วย โดยนำความร้อนจากเครื่องความแน่นของคอลัมน์ความดันสูงไปให้กับคอลัมน์ความดันต่ำ ส่วนข้อเสียของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งนี้คือกระบวนการมีความซับซ้อนสูงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนสูงตาม และนอกจากนั้นยังไม่มีข้อมูลจากการทดลอง รวมถึงข้อมูลในการประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งไม่มีการเผยแพร่ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ การประยุกต์ใช้งานการกลั่นแบบความดันแกว่งในระบบอุตสาหกรรมที่เหมาะสมแสดงได้ภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การกลั่นแบบความดันแกว่ง (A) การกลั่นแบบต่อเนื่องที่ความดันแตกต่างกัน (B) การกลั่นแบบกะต่อเนื่องที่ความดันแตกต่างกัน (C1) การกลั่นแบบกะที่ความดันแตกต่างกัน (อินเวอร์ส) (C2) การกลั่นแบบกะที่ความดันแตกต่างกัน (ปกติ)

โดยการกลั่นแบบความดันแกว่งสามารถดำเนินการได้สามแบบ คือ การกลั่นแบบต่อเนื่อง การกลั่นแบบกะ และการกลั่นแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยในที่นี้จะอธิบายเพียงการกลั่นแบบต่อเนื่อง และการกลั่นแบบกะ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.5.1 การกลั่นแบบต่อเนื่องที่ความดันแตกต่างกัน

การกลั่นแบบต่อเนื่องที่ความดันแตกต่างกันประกอบไปด้วยคอลัมน์สองคอลัมน์ ที่ความดันต่างกัน โดยกระแสน้ำที่มีความเข้มข้นต่างๆจะต้องป้อนเข้าสู่คอลัมน์ได้คอลัมน์หนึ่งตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่ากระแสน้ำนั้นๆมีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่ำหรือสูงกว่า จุดอะซิโตรีป ด้วยเหตุนี้ถ้ากระแสน้ำมีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่ำกว่า จุดอะซิโตรีป กระแสน้ำจะถูกป้อนเข้าไปในคอลัมน์ที่มีความดันต่ำ แต่ถ้ากระแสน้ำมีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูงกว่าจุดอะซิโตรีป กระแสน้ำจะถูกป้อนเข้าไปในคอลัมน์ที่มีความดันสูง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาที่ด้านล่างของทั้งสองคอลัมน์ ซึ่งอะซิโตรีปในไตรล์ จะออกที่ด้านล่างของคอลัมน์ความดันสูง และน้ำจะออกที่ด้านล่างของคอลัมน์ความดันต่ำ ส่วนด้านบนของทั้งสองคอลัมน์จะเป็นสารผสมอะซิโตรีปในไตรล์กับน้ำ ซึ่งความเข้มข้นจะขึ้นอยู่กับความดันของแต่ละคอลัมน์

azeotropic Mixture
tetrahydrofuran (THF) / water <sup>i</sup>
acetonitrile / water <sup>i</sup>
methanol / methyl ethyl ketone (MEK) <sup>i</sup>
acetone / methanol <sup>i</sup>
ethanol / ethyl acetate <sup>s</sup>
benzene / isopropanol <sup>s</sup>
ethanol / 1,4-dioxane <sup>s</sup>
aniline / octane
phenol / butyl acetate
propanol / cyclohexane
methanol / ethyl acetate
MEK / benzene
propanol / toluene
acetic acid / toluene
carbon tetrachloride / ethyl acetate

a. i = industrial application; s = suitable mixture

ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างการกลั่นแบบความดันแกว่งกับสารผสมอะซิโตรีป

การรวมความร้อนเนื่องจากความดันที่แตกต่างกันของทั้งสองคอลัมน์จึงสามารถที่จะจับคู่การให้พลังงานได้ ซึ่งหมายถึงการนำกระแสของไอที่มีความดันสูงที่ด้านบนของคอลัมน์ความดันสูงไปให้ความร้อนกับด้านล่างของคอลัมน์ความดันต่ำ ข้อได้เปรียบสำคัญของการจับคู่แบบนี้ก็คือการประหยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 40 การประยุกต์ใช้งานอื่นๆสำหรับการรวมความร้อนคือ การแยกสารผสมหลายองค์ประกอบเพื่อประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวถึงความจริงที่ว่าการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในเป็นกระบวนการที่ประหยัดค่าใช้จ่ายอย่างมาก แต่การควบคุมกระบวนการดังกล่าวเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เพราะกระบวนการมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นจึงต้องใช้กลยุทธ์การควบคุมที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

### 2.5.2 การกลั่นแบบกะที่มีความดันแตกต่างกัน

การกลั่นแบบกะเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่รู้จักกันดี มันถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเภสัชกรรม โดยการกลั่นแบบกะจะใช้พลังงานสูงกว่าการกลั่นแบบต่อเนื่องมาก แต่ถ้าค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมดค่าเปรียบเทียบกัน การกลั่นแบบกะจะมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการกลั่นแบบต่อเนื่อง แต่ข้อดีอีกข้อหนึ่งของกระบวนการกลั่นแบบกะก็คือ โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งมีความง่ายกว่ากระบวนการกลั่นแบบต่อเนื่อง และมีความยืดหยุ่นในการทำงานดีกว่ากระบวนการกลั่นแบบต่อเนื่อง เช่น การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ หรือการเปลี่ยนกำลังการผลิต เป็นต้น กระบวนการกลั่นแบบกะใช้คอลัมน์เดียวในการทำงาน โดยมีการวนรอบของการกลั่นสองรอบที่ความดันแตกต่างกันในรอบแรกสารผสมจะถูกป้อนเข้าไปในคอลัมน์ โดยในขณะนั้นความดันในคอลัมน์จะมีค่าต่ำ ซึ่งจะทำให้ได้อัตราการกลั่นด้านล่างของคอลัมน์เป็นน้ำ ส่วนด้านบนจะเป็นสารผสมอะซิโตนในไตรล์ เมื่อทำการกลั่นจนถึงจุดอะซิโตนจะหยุดการทำงานของกระบวนการ แล้วจะเพิ่มความดันให้กับคอลัมน์ ซึ่งการเปลี่ยนความดันนี้จะทำให้จุดอะซิโตนเปลี่ยนไปด้วย หลังจากนั้นจะทำการกลั่นต่อที่สภาวะใหม่

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 2011 Jorge Francisco Mulia-Soto และคณะ [1] ศึกษาการเปรียบเทียบการใช้พลังงานการจำลองกระบวนการและการควบคุมของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่รวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอล โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการดุลมวล สมการดุลพลังงาน และสมการทางอุณหพลศาสตร์ แล้วนำไปจำลองกระบวนการหาค่าการใช้พลังงานของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอลกับการกลั่นแบบความดันแกว่งแบบปกติ ผลที่ได้คือกระบวนการกลั่นแบบความดัน

แกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในใช้พลังงานน้อยกว่าการกลั่นแยกแบบความดันแกว่งแบบปกติ และจากการศึกษาการควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบพีไอ (PI Control) ซึ่งผลที่ได้คือ การควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอลได้

ปี 2001 R.A. Abou-Jeyab และคณะ [2] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟชนิดหนึ่งตัวแปรขาเข้าและหนึ่งตัวแปรขาออกในระบบอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษากับหอกลั่นที่ใช้สำหรับเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับน้ำมัน โดยใช้แบบจำลองกระบวนการเชิงเส้นในการจำลองการควบคุม ซึ่งผลที่ได้คือ อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น 2.5 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการคืนสภาพผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงได้ว่าการเพิ่มขึ้นของผลกำไร

ปี 2000 Taketoshi Kurooka และคณะ [7] ศึกษาการควบคุมหอกลั่นสำหรับแยกสารผสมอะซิโตนที่โปรปที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำการควบคุมการกลั่นแยกสารผสมระหว่าง นอร์มอลบิวทิลอะซิเตรท กรดอะซิตรีค และน้ำ โดยใช้ตัวจำลองกระบวนการแบบไดนามิก และทำการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นหลายตัวแปร ซึ่งผลที่ได้คือ ระบบควบคุมที่ได้นำเสนอสามารถตอบสนองต่อการควบคุมได้ดีโดยมีการแกว่งเพียงเล็กน้อย

ปี 2013 S.Meenakshi และคณะ [8] ได้ศึกษาการจำลองกระบวนการควบคุมสำหรับกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเอทานอลกับเอทิลีน โดยใช้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับแบบจำลองชนิดหลายตัวแปรขาเข้าและหลายตัวแปรขาออก (MIMO) ซึ่งผลที่ได้คือตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมกระบวนการได้

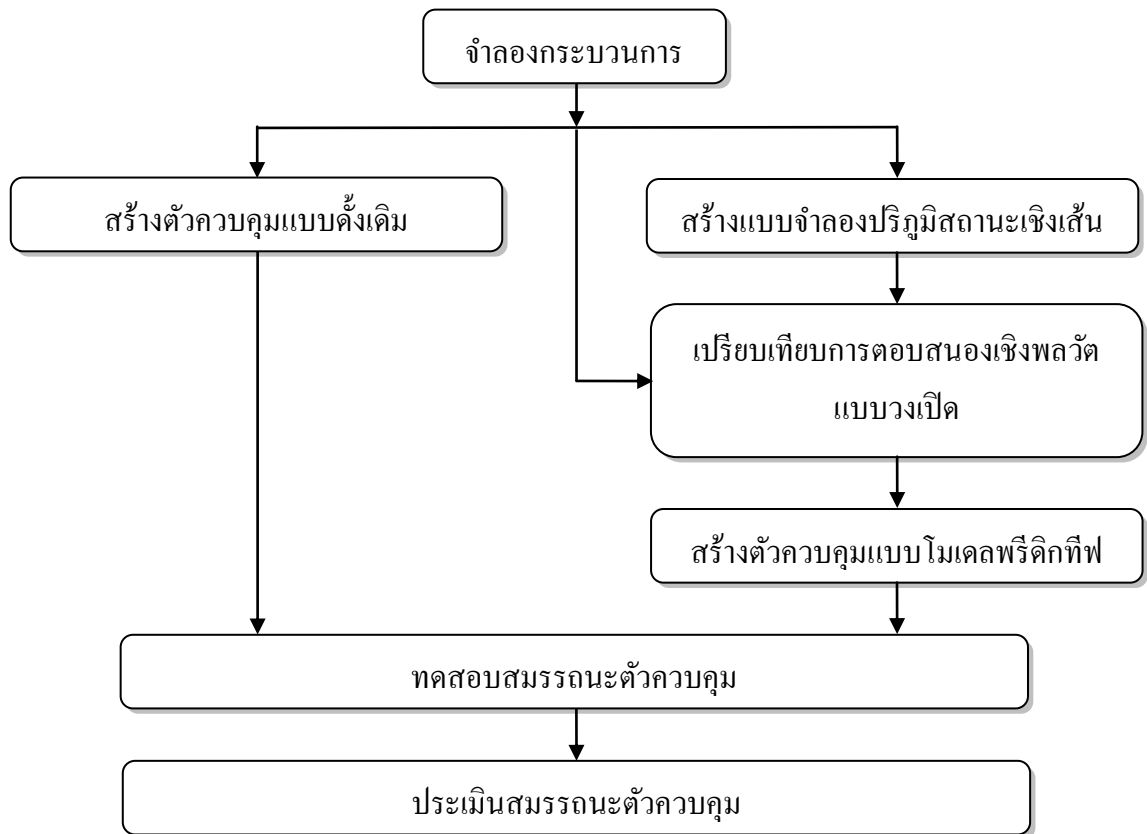
### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย แผนการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แสดงดังต่อไปนี้

### 3.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยต่างๆจะต้องมีการวางแผนเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นในการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์การวิจัย ซึ่งแสดงแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2556			2557			2558		
	มิ.ย.-ส.ค.	ก.ย.-ต.ค.	พ.ย.-ธ.ค.	ม.ค.-มี.ค.	เม.ย.-มิ.ย.	ก.ค.-ก.ย.	ต.ค.-ธ.ค.	ม.ค.-ก.พ.	มี.ค.-เม.ย.
1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล	.....								
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม Aspen plus Aspen dynamic และ MATLAB	.....								
3. จำลองกระบวนการกลั่นที่มีการรวม ความร้อนภายในสำหรับการแยกไบ โอเอทานอล	.....								
4. สร้างแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิง เส้น	.....								
5. เปรียบเทียบการตอบสนองเชิง พลวัตแบบวงเปิด	.....								
6. สร้างตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิก ทีฟ	.....								
7. สร้างตัวควบคุมแบบดั้งเดิม	.....								

หมายเหตุ ..... แสดงแผนการดำเนินงาน      \_\_\_\_\_ แสดงการดำเนินงานจริง

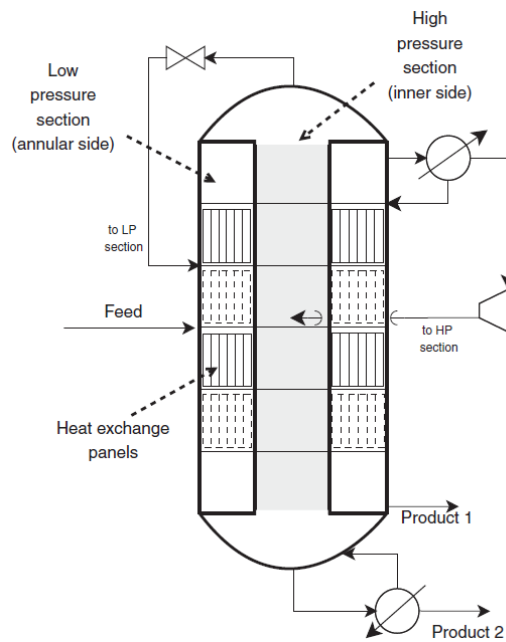
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน (ต่อ)

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2556			2557			2558		
	มิ.ย.-ส.ค.	ก.ย.-ต.ค.	พ.ย.-ธ.ค.	ม.ค.-มี.ค.	เม.ย.-มิ.ย.	ก.ค.-ก.ย.	ต.ค.-ธ.ค.	ม.ค.-ก.พ.	มี.ค.-เม.ย.
8. ทดสอบและประเมินสมรรถนะตัว ควบคุม								..... _____	
9. วิเคราะห์ผลและจัดทำรูปเล่ม								..... _____	

หมายเหตุ ..... แสดงแผนการดำเนินงาน      \_\_\_\_\_ แสดงการดำเนินงานจริง

### 3.2 กระบวนการ

กระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอลได้ถูกนำเสนอโดย Jorge Fraceisco Mulia-Soto และ Antonio Flores-Tlacuahuac ในปี ค.ศ. 2011 โดยการนำแนวคิดของหอกลั่นที่มีการรวมความร้อนภายในมารวมกับหอกลั่นแบบความดันแกว่ง ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.2

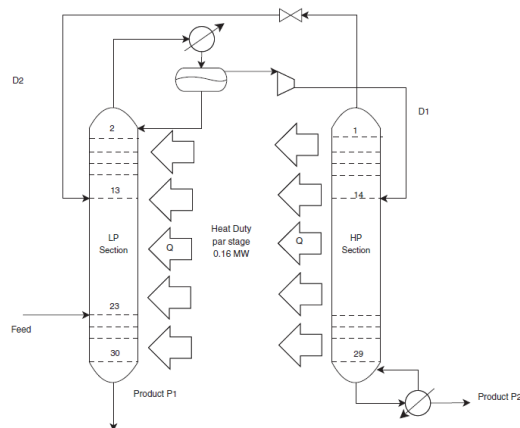


ภาพที่ 3.2 โครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายใน

ซึ่งโครงสร้างของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในประกอบด้วย (1) หอกลั่นที่ถูกแบ่งออกไปสองส่วนดังภาพ โดยส่วนแรกจะอยู่ด้านในและมีความดันสูง ส่วนที่สองจะอยู่ด้านนอกและมีความดันต่ำ ซึ่งระหว่างชั้นของหอกลั่นด้านนอกและหอกลั่นด้านในจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนในขณะดำเนินงาน (2) เครื่องควบแน่นซึ่งจะอยู่ด้านบนของหอกลั่นด้านนอก (3) เครื่องอัดความดัน (4) หม้อต้มซึ่งจะอยู่ด้านล่างของหอกลั่นด้านใน และ (5) วาล์วซึ่งกระบวนการจะเริ่มด้วยกระแสป้อนถูกป้อนเข้าสู่หอกลั่นด้านนอก และเพื่อกลั่นแยกสารผสมทวิภาค โดยสารผลิตภัณฑ์ตัวที่ 1 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีจุดเดือดสูงจะถูกแยกออกที่กระแสน้ำกลางของหอกลั่นด้านนอก ส่วนผลิตภัณฑ์ด้านบนของหอกลั่นด้านนอกคือสารผสมอะซิโโทรป ซึ่งจะถูกส่งผ่านเครื่องอัดความดันไปยังหอกลั่นด้านใน โดยหอกลั่นด้านในจะทำการแยกสารผลิตภัณฑ์ตัวที่ 2

ออกที่กระแสด้านล่างของหอกลับด้านใน ส่วนกระแสด้านบนของหอกลับด้านในจะถูกรีไซเคิลกลับมายังหอกลับด้านนอก

จากกระบวนการข้างต้น ได้มีการนำเสนอแผนผังเปรียบเทียบของ โครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในเพื่อใช้ในการจำลองกระบวนการ เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา โดยแผนผังเปรียบเทียบของ โครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในแสดงได้ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แผนผังเปรียบเทียบของ โครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายใน

### 3.3 การจำลองกระบวนการ

การจำลองกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกโบโอเอทานอลได้จำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen plus และ Aspen dynamic โดยเริ่มจำลองกระบวนการที่สภาวะคงตัวด้วยโปรแกรม Aspen plus แล้วจำลองกระบวนการที่สภาวะพลวัตด้วยโปรแกรม Aspen dynamic ซึ่งมีขั้นตอนโดยละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การติดตั้งแบบจำลองหน่วยกระบวนการ

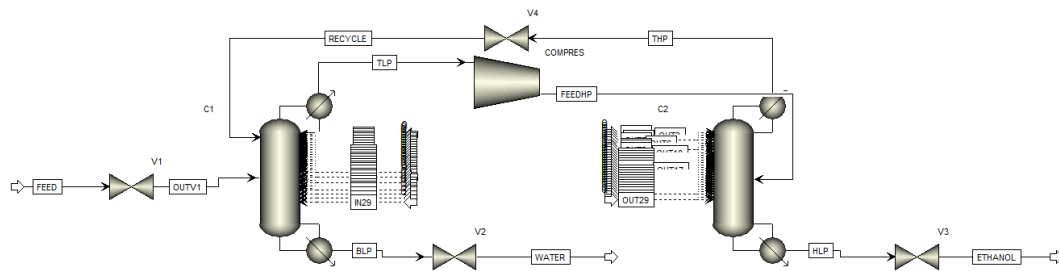
การจำลองกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกโบโอเอทานอลมีแบบจำลองหน่วยกระบวนการที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งจะถูกรวบรวมแสดงในภาพที่ 3.4 ด้วยโปรแกรม Aspen plus

#### 3.3.2 การกำหนดค่าสภาวะของแบบจำลองหน่วยกระบวนการ

ในการจำลองกระบวนการจำเป็นต้องกำหนดค่าสภาวะและพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองหน่วยกระบวนการเช่น อุณหภูมิ ความดัน จำนวนชั้น เป็นต้น โดยแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ค่าสถานะและพารามิเตอร์ของแบบจำลองหน่วยกระบวนการ

รหัส	ชนิดสถานะและพารามิเตอร์	ค่าสถานะและพารามิเตอร์	
C1	จำนวนชั้น	30	
	ชั้นป้อน	23	
	ชั้นรีไซเคิล	13	
	ความดัน (atm)	1	
	ความดันลดต่อชั้น (atm)	0.0068	
	อัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง กระแสผลิตภัณฑ์ด้านบนต่อ กระแสป้อน	0.55	
	พลังงานแต่ละชั้น (MW)	0.16	
	C2	จำนวนชั้น	30
		ชั้นป้อน	14
		ความดัน (atm)	10
ความดันลดต่อชั้น (atm)		0.0068	
V1 ถึง V3	อัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง กระแสผลิตภัณฑ์ด้านบนต่อ กระแสป้อน	0.8	
	พลังงานแต่ละชั้น (MW)	- 0.16	
V4	ความดันลด (atm)	0.1	
COMPRES	ความดันขาออก (atm)	1	
FEED	ความดันขาออก (atm)	10	
	อัตราการไหลเชิงโมล (kmol/hr)	100	
	องค์ประกอบของเอทานอล	0.2	
	อุณหภูมิ (°C)	90	
	ความดัน (atm)	1	



ภาพที่ 3.4 การติดตั้งแผนผังเปรียบเทียบของ โครงสร้างกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่ง  
ที่มีการรวมความร้อนภายใน

ตารางที่ 3.3 แบบจำลองหน่วยกระบวนการที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ

รหัส	รายชื่ออุปกรณ์
COMPRES	เครื่องอัดความดัน
V1 ถึง V4	วาล์ว
C1 ถึง C2	หอกกลั่น

### 3.3.2 การกำหนดค่าสถานะของแบบจำลองหน่วยกระบวนการ

ในการจำลองกระบวนการจำเป็นต้องกำหนดค่าสถานะและพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองหน่วยกระบวนการเช่น อุณหภูมิ ความดัน จำนวนชั้น เป็นต้น โดยแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

3.3.3 การเลือกสมการสถานะของสารในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการสถานะ Wilson-RK (Wilson and Redlich-Kwong)

3.3.4 การส่งข้อมูลที่ได้จากการจำลองกระบวนการในโปรแกรม Aspen Plus ไปยังการจำลองกระบวนการในโปรแกรม Aspen Dynamics โดยเลือกใช้อัตราการใช้เป็นตัวแปรหลักในการคำนวณ

## 3.4 แบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น

แบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นสำหรับกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไอเอทานอลได้ถูกสร้างโดยโปรแกรม Aspen dynamic และโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 สร้างเมทริกซ์ของตัวแปรสถานะ เมทริกซ์ของตัวแปรขาเข้า และเมทริกซ์ของตัวแปรวัด โดยการนำแบบจำลองกระบวนการจากหัวข้อ 3.3 มากำหนดตัวแปรขาเข้าและตัวแปรวัดของ

กระบวนการด้วยชุดคำสั่งในโปรแกรม Aspen dynamic โดยมีจำนวนตัวแปรขาเข้าและตัวแปรวัดแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

3.4.2 นำเมทริกซ์ที่ได้ในหัวข้อ 3.4.2 มาสร้างแบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นด้วยโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรขาเข้าและตัวแปรวัดของกระบวนการ

ตัวแปรขาเข้า		ตัวแปรวัด	
รายชื่อตัวแปร	รหัส	รายชื่อตัวแปร	รหัส
1. อัตราการไหลของกระแสด้านล่างของหอกถัน C1	U1	1. ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1	Y1
2. อัตราการไหลของกระแสรีฟรักซ์ของหอกถัน C1	U2	2. ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1	Y2
3. อัตราการไหลของกระแสด้านล่างของหอกถัน C2	U3	3. ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2	Y3
4. อัตราการไหลของกระแสด้านบนของหอกถัน C2	U4	4. ความดันของหอกถัน C2	Y4
5. พลังงานของหม้อต้มของหอกถัน C2	U5	5. อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2	Y5
6. พลังงานของเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1	U6	6. อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1	Y6
7. อัตราการไหลของกระแสป้อน	U7	7. สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส WATER	Y7
8. อุณหภูมิของกระแสป้อน	U8	8. สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในกระแส ETHANOL	Y8
9. สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแสป้อน	U9		

### 3.5 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิด

การเปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดเป็นการตรวจสอบความใกล้เคียงของแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นกับแบบจำลองกระบวนการ โดยการนำแบบจำลองกระบวนการในหัวข้อที่ 3.3 และแบบจำลองปริภูมิสถานะในหัวข้อ 3.4 มาเปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดด้วยการเพิ่มอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อนแบบขั้นบันได โดยใช้โปรแกรม Aspen dynamic สำหรับแบบจำลองกระบวนการ และใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น

### 3.6 การสร้างตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสร้างด้วยชุดคำสั่งในโปรแกรม MATLAB โดยที่ใช้แบบจำลองปริภูมิสถานะเป็นแบบจำลองกระบวนการในตัวควบคุม ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.6.1 สร้างแบบจำลองกระบวนการโดยการนำแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นในหัวข้อ 3.4 มากำหนดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในการปฏิบัติงาน โดยแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในการปฏิบัติงาน

	ตัวแปรขาเข้า			ตัวแปรวัด	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
U1	0	3,266.868	Y1	0	1.554
U2	0	37,362.134	Y2	0	3.531
U3	0	1,458.322	Y3	0	3.934
U4	0	127.043	Y4	0	20.265
U5	0	31.449	Y5	0	304.037
U6	0	-34.967	Y6	0	156.316
U7	0	200	Y7	0	1
U8	0	180	Y8	0	1
U9	0	0.4			

3.6.2 หาค่าตัวแปรควบคุมในอนาคตและค่าตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมกระบวนการ โดยการใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) เริ่มด้วยการหาค่าตัวแปรควบคุม



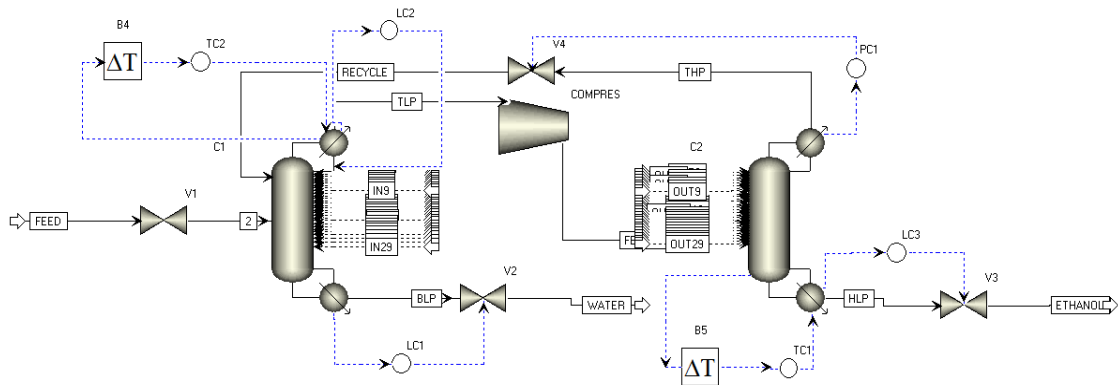
ในอนาคตโดยให้ค่าตัวแปรปรับในอนาคตครั้งที่ 5 และเปลี่ยนค่าตัวแปรควบคุมในอนาคตตั้งแต่ 30, 40, 50 และ 60 แล้ววิเคราะห์ผลการตอบสนองด้วยการรบกวนอัตราการใช้พลังงานโมลของกระแสนอนแบบขั้นบันได เมื่อได้ค่าตัวแปรควบคุมในอนาคตแล้วนำค่าที่ได้ไปใช้ในการหาค่าตัวแปรปรับในอนาคตโดยเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับตั้งแต่ 2, 3, 4 และ 5 แล้ววิเคราะห์ผลการตอบสนองด้วยการรบกวนอัตราการใช้พลังงานโมลของกระแสนอนแบบขั้นบันได

### 3.7 การสร้างตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

การสร้างตัวควบคุมแบบดั้งเดิม หรือตัวควบคุมแบบพีไอดีใช้โปรแกรม Aspen dynamic โดยติดตั้งตัวควบคุมตามแบบของ Mulia-Soto และ Flores-Tlacuahuac [1] ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.5 โดยมีจำนวนตัวแปรปรับและจำนวนตัวแปรควบคุมแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมสำหรับตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

ตัวควบคุม	ตัวแปรปรับ	ตัวแปรควบคุม
LC1	1. อัตราการใช้พลังงานของกระแสนอนล่างของหอกันความดันต่ำ	1. ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกันความดันต่ำ
LC2	2. อัตราการใช้พลังงานของกระแสนอนบนของหอกันความดันต่ำ	2. ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกันความดันต่ำ
LC3	3. อัตราการใช้พลังงานของกระแสนอนบนของหอกันความดันสูง	3. ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกันความดันสูง
PC1	4. อัตราการใช้พลังงานของกระแสนอนบนของหอกันความดันสูง	4. ความดันของหอกันความดันสูง
TC1	5. พลังงานของหม้อต้มของหอกันความดันสูง	5. อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกันความดันสูง
TC2	6. พลังงานของเครื่องควบแน่นของหอกันความดันต่ำ	6. อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกันความดันต่ำ



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างการควบคุมแบบดั้งเดิม

### 3.8 การทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระบวนการ

การทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระบวนการเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดำเนินการของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ โดยใช้ตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษากรณีการรบกวนกระบวนการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.8.1 การรบกวนอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน โดยการเพิ่มอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จาก 100 กิโลโมลต่อชั่วโมงเป็น 110 กิโลโมลต่อชั่วโมง และลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จาก 100 กิโลโมลต่อชั่วโมงเป็น 90 กิโลโมลต่อชั่วโมง โดยใช้เวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง

3.8.2 การรบกวนอุณหภูมิของกระแสป้อน โดยการเพิ่มอุณหภูมิของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จาก 90 องศาเซลเซียสเป็น 99 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จาก 90 องศาเซลเซียสเป็น 81 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง

3.8.3 การรบกวนองค์ประกอบของสารของกระแสป้อน โดยการเพิ่มองค์ประกอบของเอทานอลของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จาก 0.2 เป็น 0.22 และลดองค์ประกอบของเอทานอลของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จาก 0.2 เป็น 0.18 โดยใช้เวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง

### 3.9 การประเมินสมรรถนะตัวควบคุมกระบวนการ

จากผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระบวนการจากหัวข้อที่ 3.8 นำไปวิเคราะห์การประเมินสมรรถนะตัวควบคุมกระบวนการ โดยพิจารณาจากพฤติกรรมการตอบสนองของ

กระบวนการของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟเทียบกับตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยที่มีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (integral of absolute value of error, (IAE)) เท่ากัน

### 3.10 การศึกษาค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน

ค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน (Q) เป็นพารามิเตอร์ในการปรับจูนของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ โดยวิธีการปรับจูนจะคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ซึ่งมีความซับซ้อนในการพิจารณา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน โดยเลือกพิจารณาค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ที่ส่งผลรุนแรงต่อกระบวนการ คือ อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 และร้อยละ โดยโมลน้ำในกระแส ETHANOL ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.10.1 ศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 (Y5) เริ่มจากปรับจูนค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 เท่ากับ 1, 5 และ 10 โดยกำหนดค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรขาเข้าอีกเจ็ดตัวที่เหลือ (Y1-Y4 และ Y6-Y7) เท่ากับ 1 แล้ววิเคราะห์ผลการตอบสนองของกระบวนการ

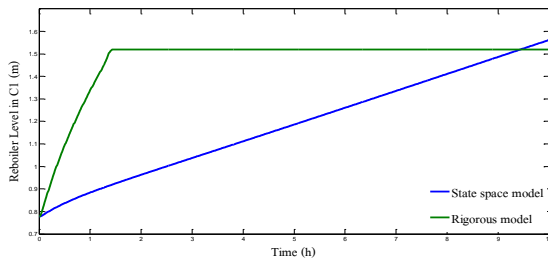
3.10.2 ศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละ โดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL (Y7) เริ่มจากปรับจูนค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละ โดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL เท่ากับ 1, 5 และ 10 โดยกำหนดค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรขาเข้าอีกเจ็ดตัวที่เหลือ (Y1-Y6 และ Y8) เท่ากับ 1 แล้ววิเคราะห์ผลการตอบสนองของกระบวนการ

## บทที่ 4

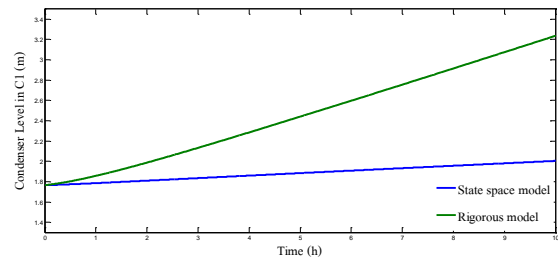
### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

#### 4.1 การเปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิด

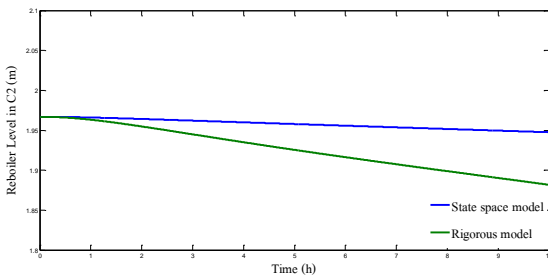
จากการสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นของกระบวนการกั้นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไอโอเอทานอล และนำมาเปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดกับแบบจำลองกระบวนการ โดยการเพิ่มอัตราการใช้ไฮโดรเจนโมลของกระแสป้อนแบบขั้นบันได เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นก่อนที่จะนำไปใช้เป็นแบบจำลองกระบวนการในตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ซึ่งผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดแสดงได้ดังภาพที่ 4.1 โดยประกอบด้วยผลการตอบสนองของตัวแปรวัดจำนวน 8 ตัวแปรคือ (1) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 (2) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 (3) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 (4) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 (5) อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 (6) อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 (7) สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส ETHANOL และ (8) สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในกระแส WATER โดยจากภาพแกนนอนแสดงเวลาในการจำลองกระบวนการคือ 10 ชั่วโมง และแกนตั้งแสดงค่าตัวแปรวัดต่างๆ โดยที่กราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น ส่วนกราฟเส้นสีเขียวแสดงผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของแบบจำลองกระบวนการ ซึ่งผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 แสดงได้ดังภาพที่ 4.1 (ก) จากภาพจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการใช้ไฮโดรเจนโมลของกระแสป้อนแบบขั้นบันได ทำให้ระดับของเหลวในหม้อต้มมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทั้งสองแบบจำลอง โดยแบบจำลองกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0.777 เมตร ไปยัง 1.554 เมตร ภายในเวลาประมาณ 1.4 ชั่วโมง และคงที่ที่ค่า 1.554 เมตร ไปจนถึงสิ้นสุดการจำลองกระบวนการ เหตุที่ระดับของเหลวมีค่าคงที่เนื่องมาจากระดับความสูงของหม้อต้มถูกจำกัดที่ 1.554 เมตร ส่วนแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0.777 เมตร ไปยังค่า 1.561 เมตร ภายในเวลา 10 ชั่วโมง และคาดว่าจะเพิ่มต่อไปเรื่อยๆ เนื่องจากไม่ได้มีการจำกัดระดับความสูงของหม้อต้ม และจากภาพที่ 4.1 (ข) แสดงการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 โดยแบบจำลองกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 1.765 เมตร ไปจนถึงค่า 3.237 เมตร ภายในเวลา 10 ชั่วโมง



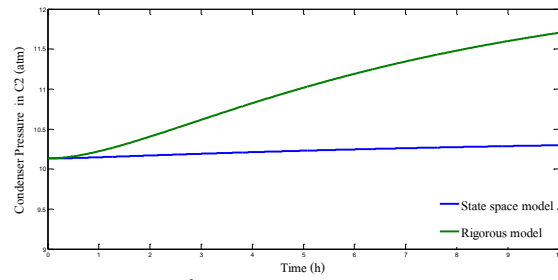
(ก) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1



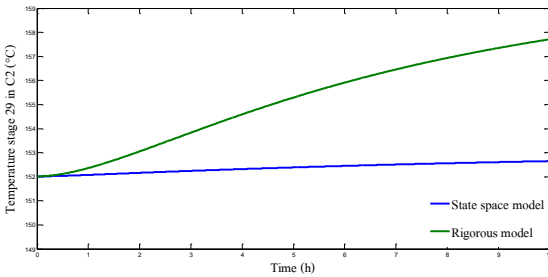
(ข) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1



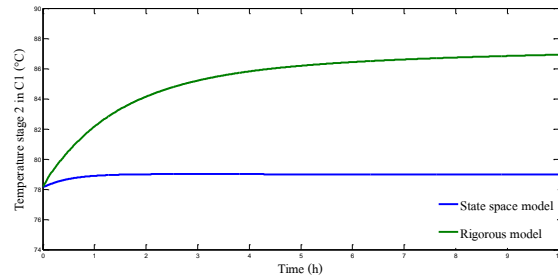
(ค) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2



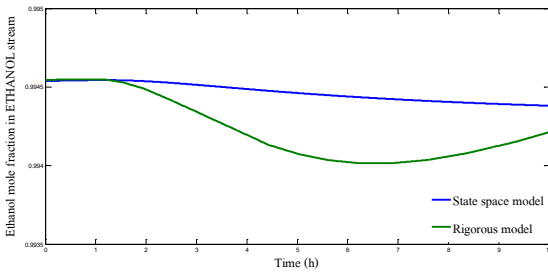
(ง) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2



(จ) อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2

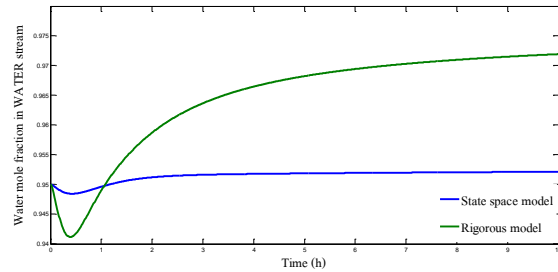


(ฉ) อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1



(ช) สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส

ETHANOL



(ฉ) สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในกระแส WATER

#### ภาพที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิด

ส่วนแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงจากค่า 1.765 เมตรไปสิ้นสุดยังค่า 2.004 เมตรภายในเวลา 10 ชั่วโมง และจากภาพที่ 4.1 (ค) แสดงผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2 โดยแบบจำลองกระบวนการ

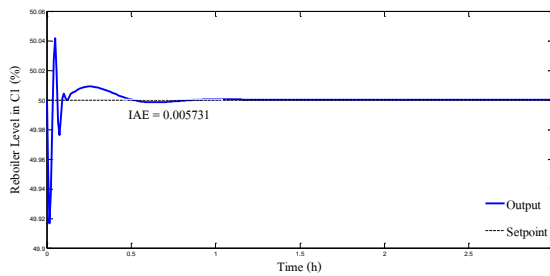
มีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 1.967 เมตรไปสิ้นสุดที่ค่า 1.882 เมตรภายในเวลา 10 ชั่วโมง ส่วนแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 1.967 เมตรไปสิ้นสุดที่ค่า 1.947 เมตรภายในเวลา 10 ชั่วโมง และการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของความดันในเครื่องควบแน่น แสดงได้ดังภาพที่ 4.1 (ง) โดยที่แบบจำลองกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 10.132 บรรยากาศไปสิ้นสุดที่ 11.703 บรรยากาศภายในเวลา 10 ชั่วโมง ส่วนแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 10.132 บรรยากาศไปสิ้นสุดที่ค่า 10.298 บรรยากาศภายในเวลา 10 ชั่วโมง และจากภาพที่ 4.1 (จ) แสดงผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2 โดยแบบจำลองกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 152.02 องศาเซลเซียสไปสิ้นสุดที่ค่า 157.71 องศาเซลเซียสภายในเวลา 10 ชั่วโมง ส่วนแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 152.02 องศาเซลเซียสไปสิ้นสุดที่ค่า 152.65 องศาเซลเซียสภายในเวลา 10 ชั่วโมง และจากภาพที่ 4.1 (ฉ) แสดงผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1 โดยแบบจำลองกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 78.16 องศาเซลเซียสไปสิ้นสุดที่ค่า 86.92 องศาเซลเซียสภายในเวลา 10 ชั่วโมง ส่วนแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 78.16 องศาเซลเซียสไปสิ้นสุดที่ค่า 78.97 องศาเซลเซียสภายในเวลา 10 ชั่วโมง และจากภาพที่ 4.1 (ช) แสดงผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส ETHANOL โดยแบบจำลองกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0.9945 ไปยังค่าต่ำสุดที่ 0.9941 ที่เวลา 6 ชั่วโมงก่อนที่จะเพิ่มขึ้นและไปสิ้นสุดที่ 0.9942 ส่วนแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงจากค่า 0.9945 ไปสิ้นสุดที่ค่า 0.9943 ภายในเวลา 10 ชั่วโมง และสุดท้ายภาพที่ 4.2 (ฌ) แสดงผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดของสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในกระแส WATER โดยที่แบบจำลองกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0.9500 ไปสิ้นสุดที่ค่า 0.9719 ภายในเวลา 10 ชั่วโมง ส่วนแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0.9500 ไปสิ้นสุดที่ค่า 0.9521 ภายในเวลา 10 ชั่วโมง

จากผลการตอบสนองเชิงพลวัตแบบวงเปิดทั้งหมดจะสังเกตได้ว่า แบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับแบบจำลองกระบวนการ แต่มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าแบบจำลองกระบวนการ เนื่องจากกระบวนการมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นมีค่าแตกต่างกับแบบจำลองกระบวนการ จากผลการศึกษาข้างต้นได้นำแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้นไปใช้เป็นแบบจำลองกระบวนการในควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในหัวข้อต่อไป

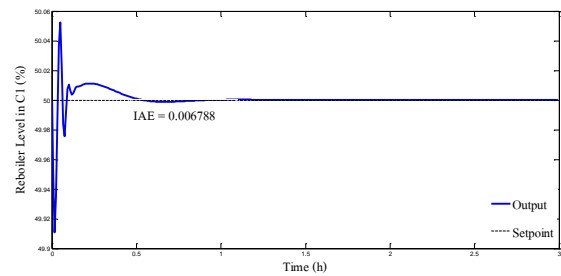
## 4.2 การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

จากการสร้างตัวควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอะเอทานอล โดยโปรแกรม MATLAB และหาค่าพารามิเตอร์การปรับจูนที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ประกอบด้วยจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคต (Prediction Horizon) และจำนวนตัวแปรปรับในอนาคต (Control Horizon) ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยพิจารณาจากผลการตอบสนองต่อการรบกวนอัตราไหลของกระแสป้อนแบบขั้นบันได และประเมินผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนประกอบการพิจารณา ซึ่งแสดงผลได้ดังนี้

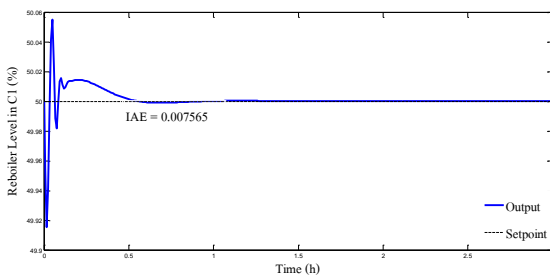
4.2.1 การหาค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตจากการเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อการเพิ่มอัตราไหลเชิงโมลของกระแสป้อนร้อยละ 10 จากเริ่มต้นที่ 100 กิโลโมลต่อชั่วโมง เป็น 110 กิโลโมลต่อชั่วโมง ขณะระบบคงที่ที่ 3 ชั่วโมง โดยเส้นสีน้ำเงินแสดงค่าเอาต์พุตและเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายแสดงดังภาพที่ 4.2 ถึงภาพที่ 4.9



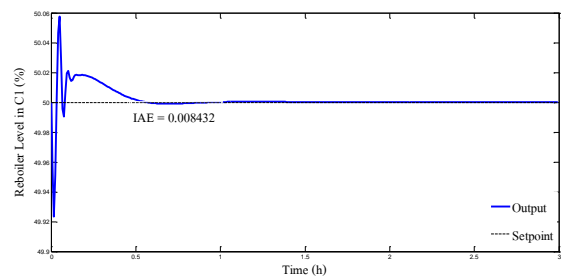
(ก)  $P = 30, C = 5$



(ข)  $P = 40, C = 5$



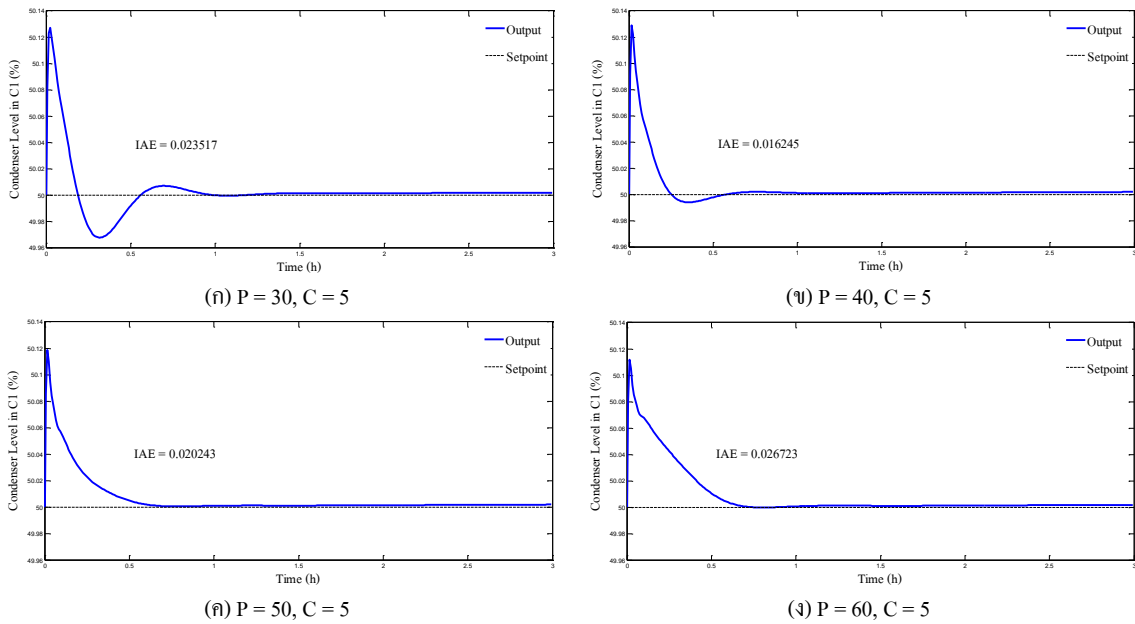
(ค)  $P = 50, C = 5$



(ง)  $P = 60, C = 5$

ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ

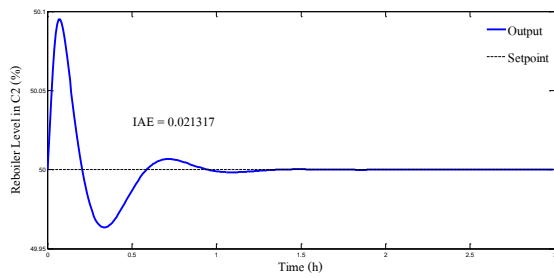
จากภาพที่ 4.2 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.2 (ก) มีลักษณะการตอบสนองดีที่สุดคือมีการสั่นในช่วงที่แคบกว่าภาพอื่นๆ และมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.005731 ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1 คือ 30



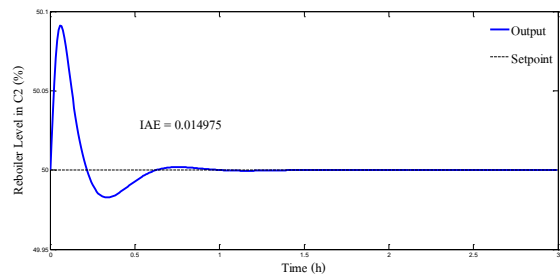
ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ

จากภาพที่ 4.3 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.3 (ก) มีลักษณะการตอบสนองดีที่สุด และมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.020243 ส่วนภาพที่ 4.3 (ข) มีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.016245 แต่ลักษณะการตอบสนองมีการสั่นเกิดขึ้น ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1 คือ 50 จากภาพที่ 4.4 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.3 (ง) มีลักษณะการตอบสนองที่ดีที่สุดและมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.014093 ส่วนภาพที่ 4.4 (ค) มีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.011199 และมีลักษณะการตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้ ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2 คือ 50

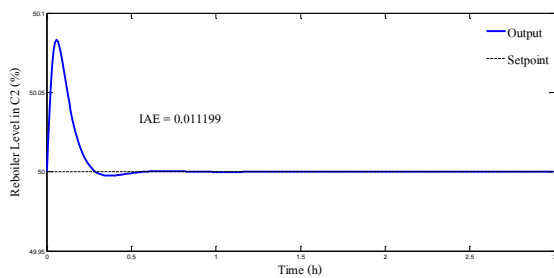




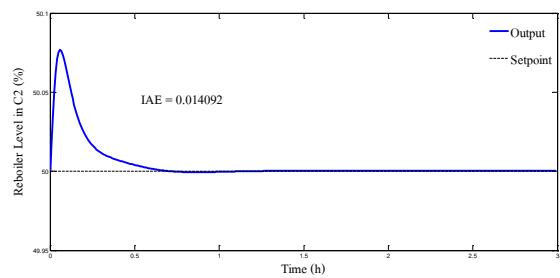
(ก)  $P = 30, C = 5$



(ข)  $P = 40, C = 5$

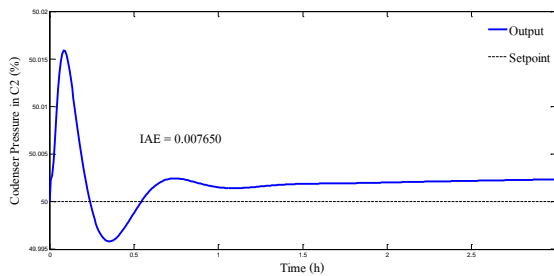


(ค)  $P = 50, C = 5$

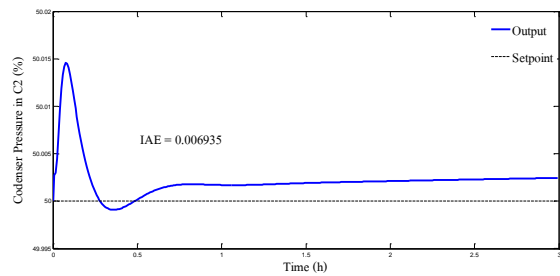


(ง)  $P = 60, C = 5$

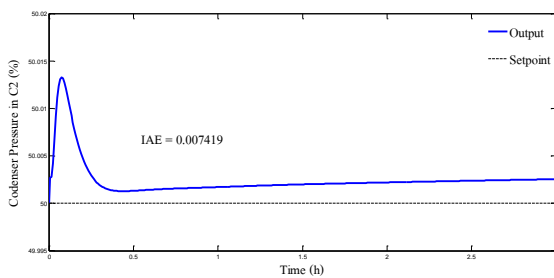
ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ



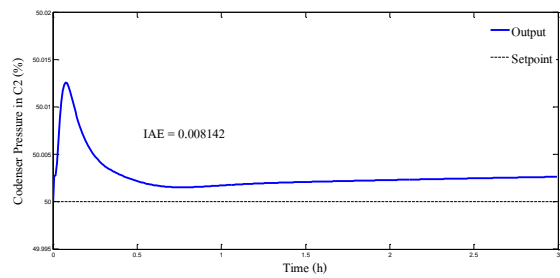
(ก)  $P = 30, C = 5$



(ข)  $P = 40, C = 5$



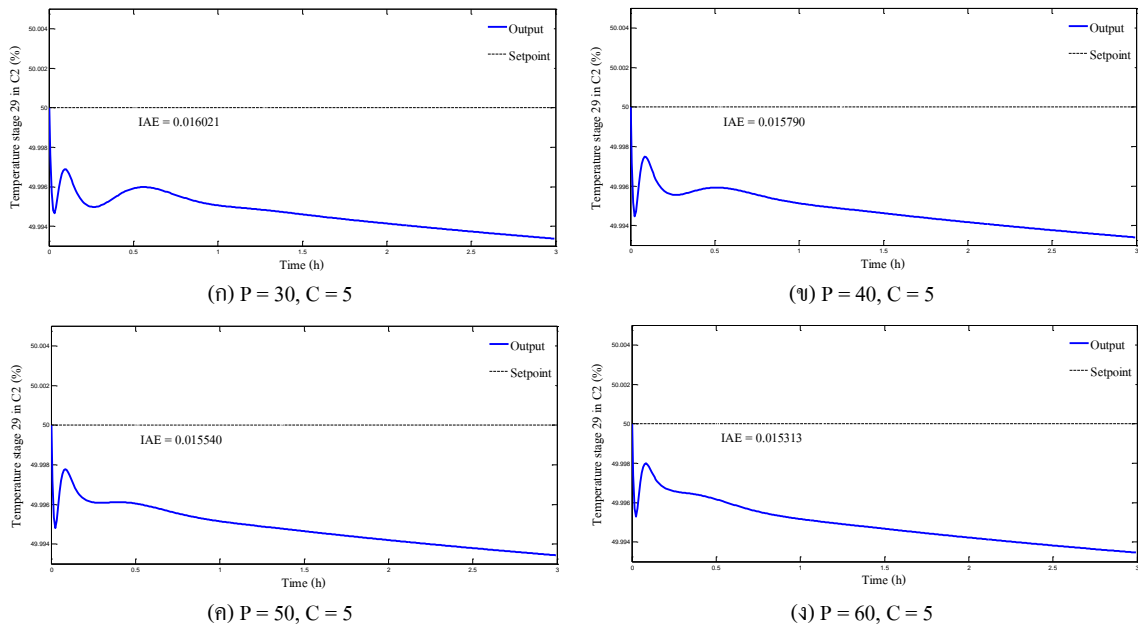
(ค)  $P = 50, C = 5$



(ง)  $P = 60, C = 5$

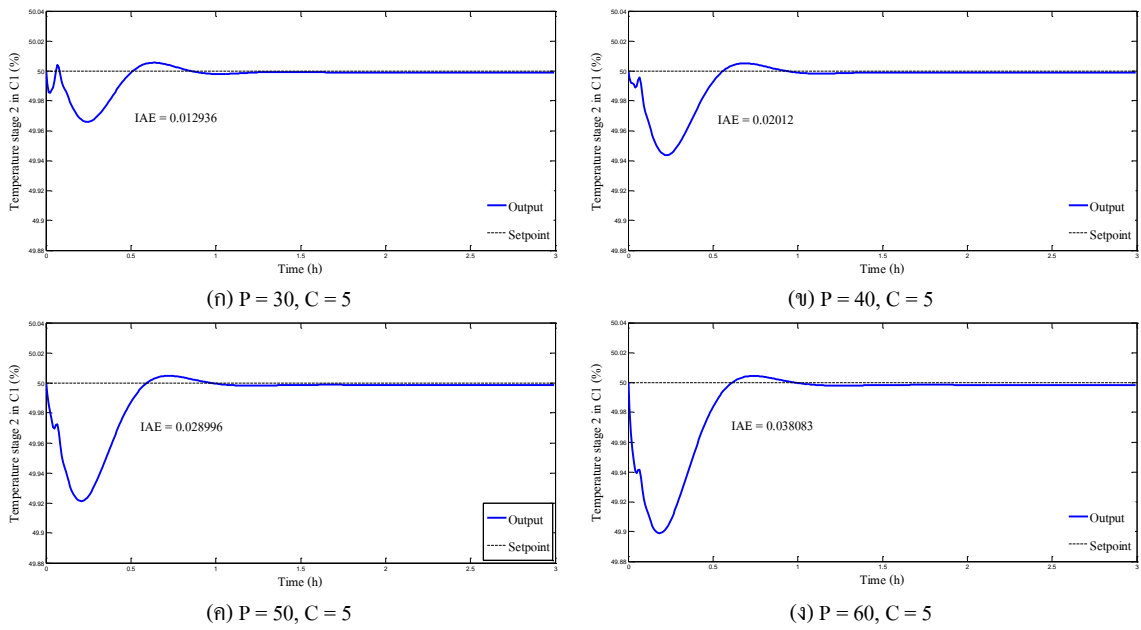
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ

จากภาพที่ 4.5 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.5 (ข) มีลักษณะการตอบสนองดีที่สุด และมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.006935 ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2 คือ 50

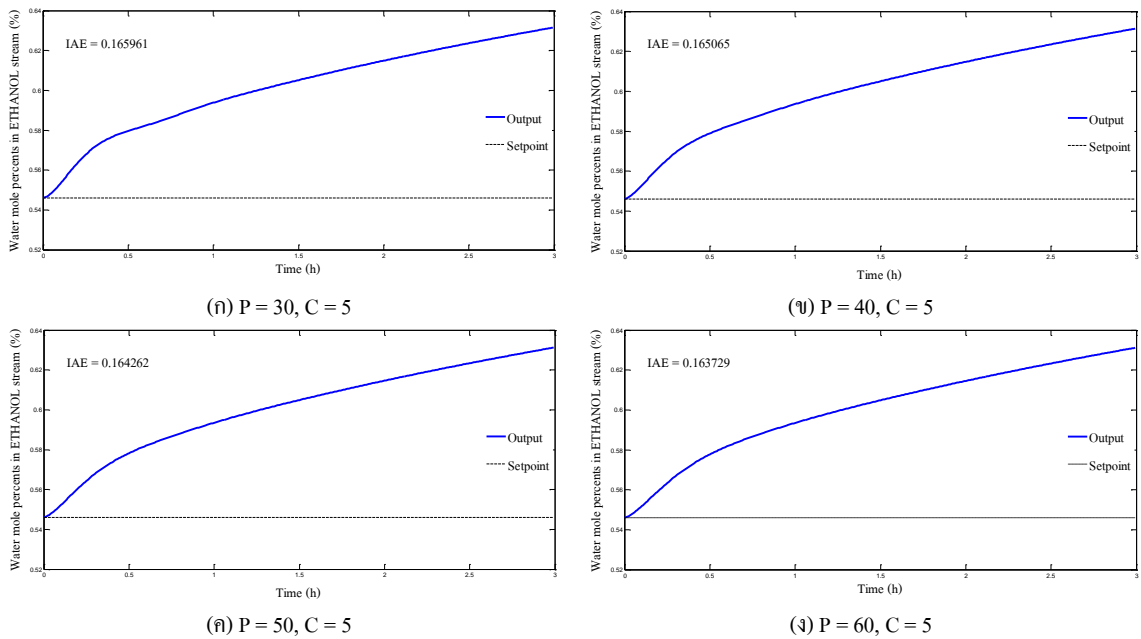


**ภาพที่ 4.6** เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ

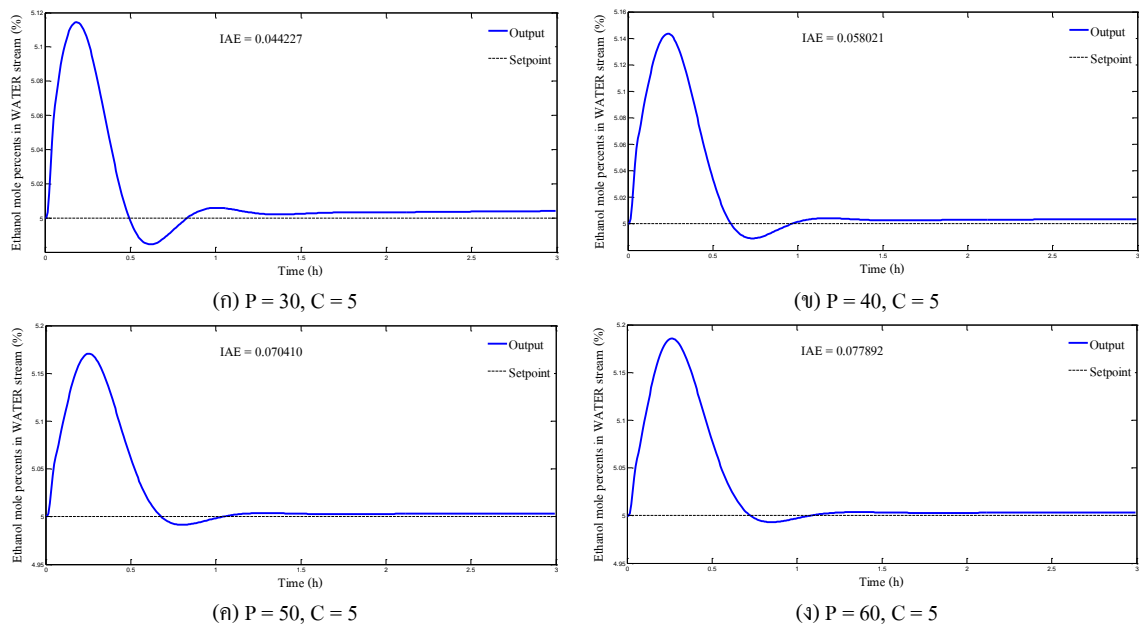
จากภาพที่ 4.6 สังเกตได้ว่าผลการตอบสนองทั้งหมดมีลักษณะการตอบสนองใกล้เคียงกัน และมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2 คือ 30, 40, 50 หรือ 60 จากภาพที่ 4.7 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.7 (ก) มีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.012986 แต่ลักษณะการตอบสนองเกิดการสั่นขึ้น ส่วนภาพที่ 4.7 (ค) มีลักษณะการตอบสนองที่ดีที่สุดคือมีค่าโอเวอร์ชูตน้อยกว่าภาพที่ 4.7 (ง) และมีความราบเรียบในการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย โดยมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.028996 ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกลั่น C2 คือ 50 จากภาพที่ 4.8 สังเกตได้ว่าผลการตอบสนองทั้งหมดมีลักษณะการตอบสนองใกล้เคียงกันและมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิขั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1  
ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ



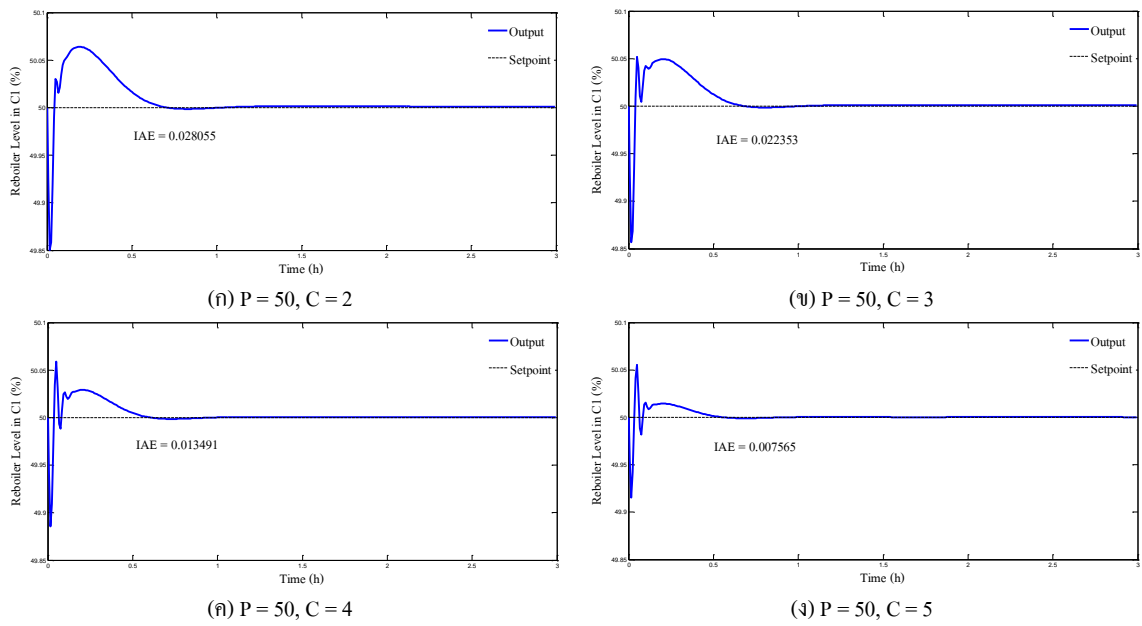
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL  
ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ



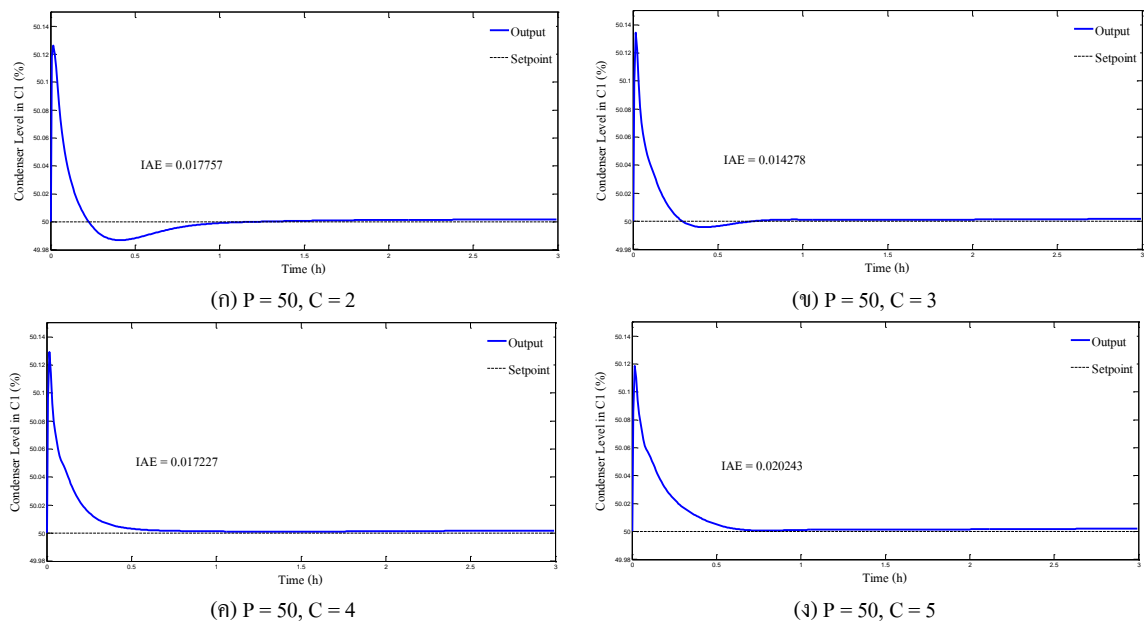
**ภาพที่ 4.9** เปรียบเทียบผลการตอบสนองของร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตต่างๆ

ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL คือ 30, 40, 50 หรือ 60 จากภาพที่ 4.9 สังเกตได้ว่า ภาพที่ 4.3 (ก) มีลักษณะการตอบสนองดีที่สุด และมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.0044227 ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER คือ 30 จากผลการเปรียบเทียบการตอบสนองทั้งหมดของตัวแปรวัดต่างๆ ที่ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตที่แตกต่างกัน สรุปได้ว่าค่าจำนวนตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการคือ 50

4.2.2 การหาค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตจากการเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อการเพิ่มอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อนร้อยละ 10 จากเริ่มต้นที่ 100 กิโลโมลต่อชั่วโมง เป็น 110 กิโลโมลต่อชั่วโมง ขณะระบบคงที่ที่ 3 ชั่วโมง โดยเส้นสีน้ำเงินแสดงค่าเอาต์พุตและเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายแสดงดังภาพที่ 4.10 ถึงภาพที่ 4.17 จากภาพที่ 4.10 สังเกตได้ว่า ภาพที่ 4.10 (ก) มีการสั่นของผลการตอบสนองน้อยที่สุดแต่มีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเยอะที่สุดคือ 0.028055 ส่วนภาพที่ 4.10 (ง) มีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน

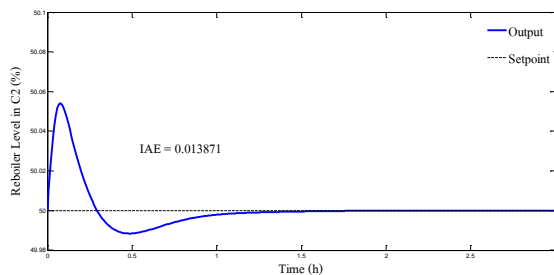


ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ

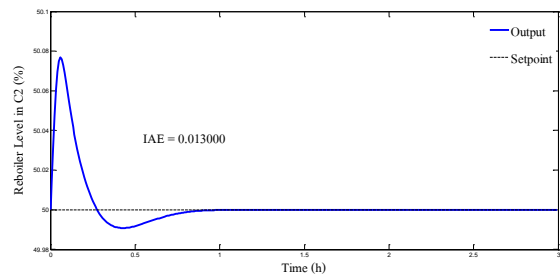


ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ

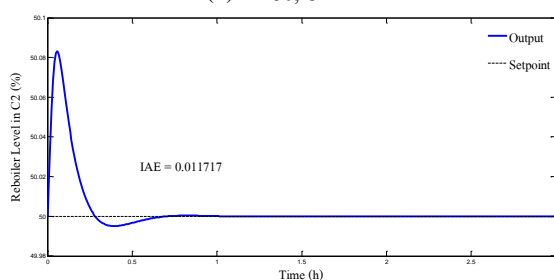
น้อยที่สุดคือ 0.007565 แต่มีการสั่นของผลการตอบสนองอยู่ในช่วงแคบๆ ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 คือ 5 จากภาพที่ 4.11 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.11 (ข) ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.0014278 ส่วนภาพที่ 4.11 (ค) มีลักษณะการตอบสนองที่ดีที่สุด โดยมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.0017227 แต่ลักษณะการตอบสนองของภาพที่ 4.11 (ข) สามารถที่จะยอมรับได้ ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 คือ 3 จากภาพที่ 4.12 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.12 (ง) มีลักษณะการตอบสนองที่ดีที่สุด และมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.001199 ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 คือ 5 จากภาพที่ 4.13 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.13 (ข) มีลักษณะการตอบสนองที่ดีที่สุดและมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.08232 ส่วนภาพที่ 4.13 (ง) มีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0.007419 แต่ลักษณะการตอบสนองไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 คือ 3



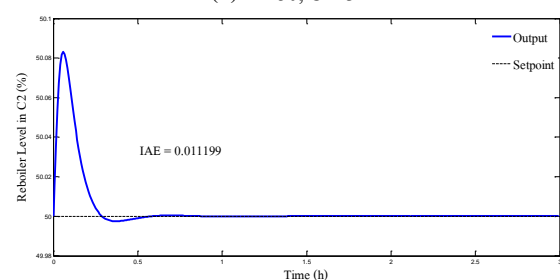
(ก)  $P = 50, C = 2$



(ข)  $P = 50, C = 3$

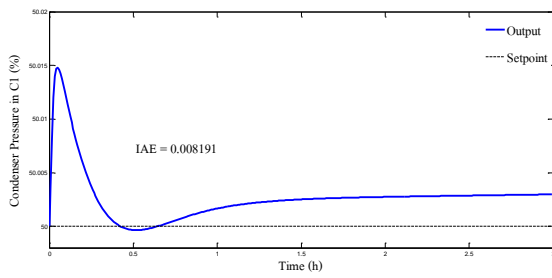


(ค)  $P = 50, C = 4$

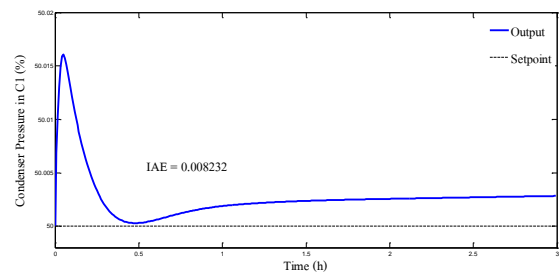


(ง)  $P = 50, C = 5$

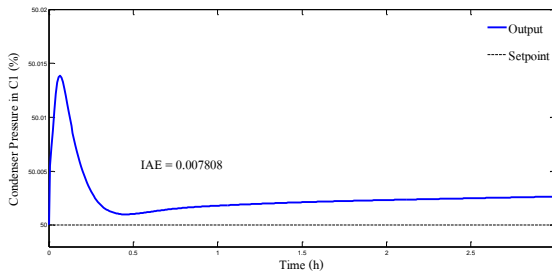
ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ



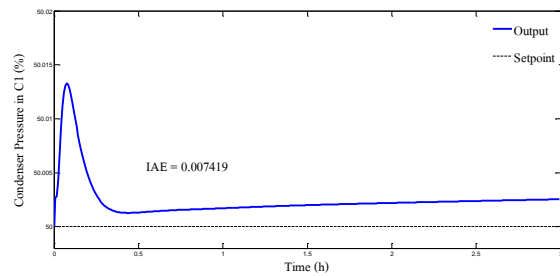
(ก)  $P = 50, C = 2$



(ข)  $P = 50, C = 3$

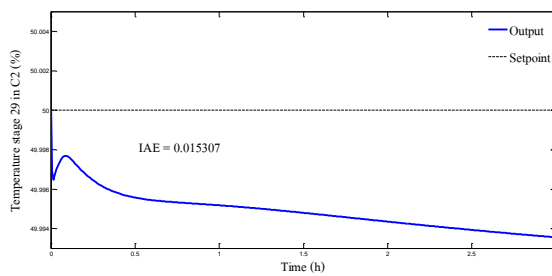


(ค)  $P = 50, C = 4$

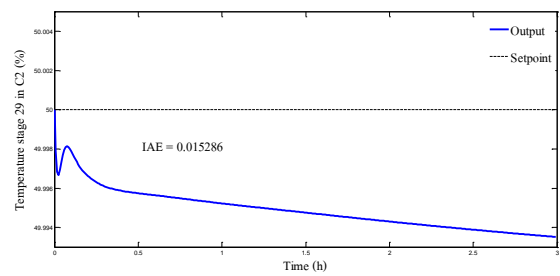


(ง)  $P = 50, C = 5$

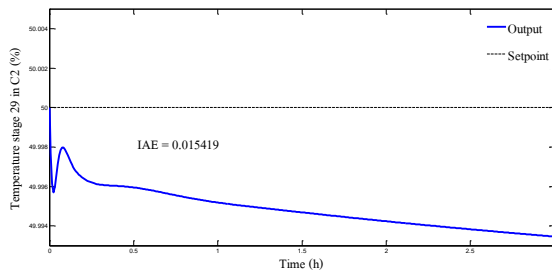
ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ



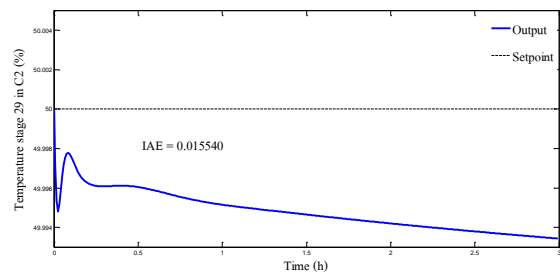
(ก)  $P = 50, C = 2$



(ข)  $P = 50, C = 3$



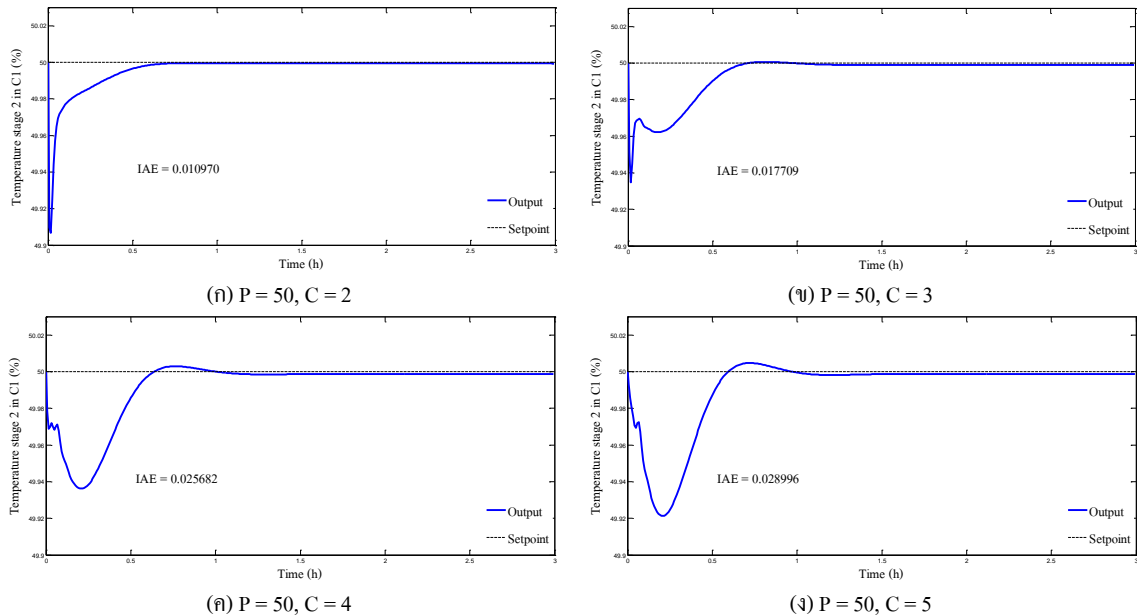
(ค)  $P = 50, C = 4$



(ง)  $P = 50, C = 5$

ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ

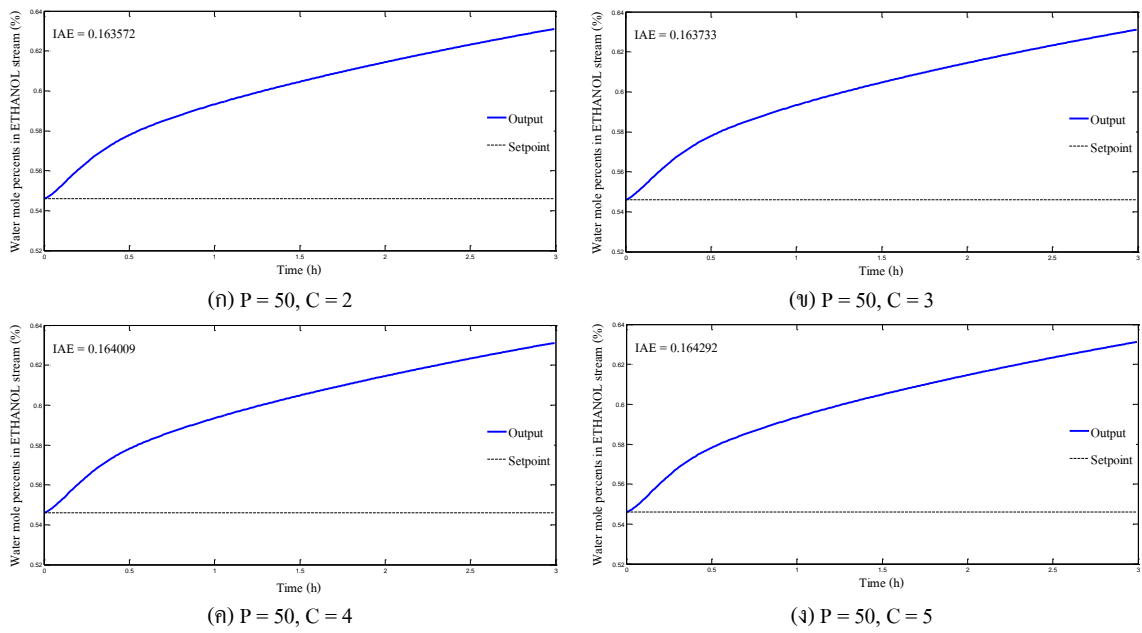
จากภาพที่ 4.14 สังเกตได้ว่าผลการตอบสนองทั้งหมดมีลักษณะใกล้เคียงกัน และมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 คือ 2, 3, 4 หรือ 5



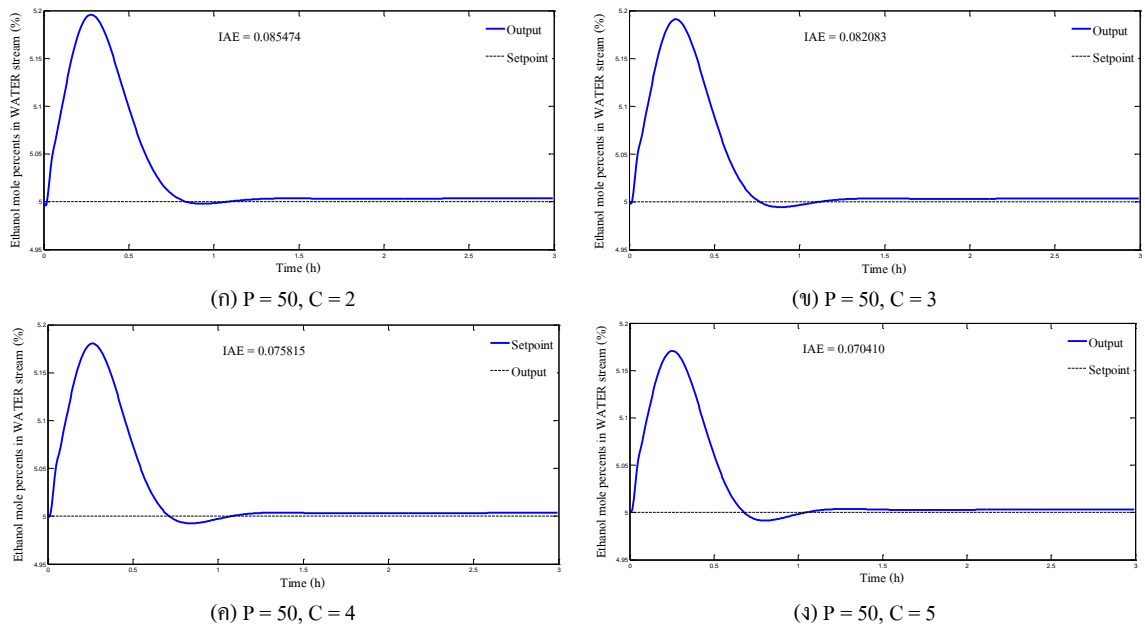
ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ

จากภาพที่ 4.15 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.15 (ก) มีลักษณะการตอบสนองที่ดีที่สุดและมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดคือ 0.010970 ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 คือ 2 จากภาพที่ 4.16 สังเกตได้ว่าผลการตอบสนองทั้งหมดมีลักษณะใกล้เคียงกัน และมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส WATER คือ 2, 3, 4 หรือ 5 จากภาพที่ 4.17 สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.17 (ก) มีลักษณะการตอบสนองที่ดีที่สุดและมีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.085474 ส่วนภาพที่ 4.17 (ง) มีผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดคือ 0.007041 ดังนั้นค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่เหมาะสมกับการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 คือ 2 จากผลการเปรียบเทียบการตอบสนองทั้งหมดของตัวแปรวัดต่างๆที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตที่แตกต่างกัน





ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ



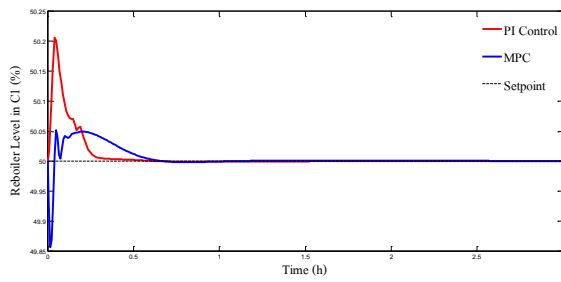
ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER ที่ค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตต่างๆ

สรุปได้ว่าค่าจำนวนตัวแปรปรับที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการคือ 3

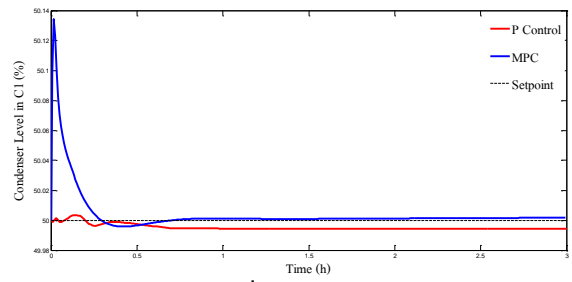
### 4.3 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุม

จากการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยการรบกวนกระบวนการ 6 แบบการรบกวน ให้ผลการตอบสนองดังแสดงได้ต่อไปนี้

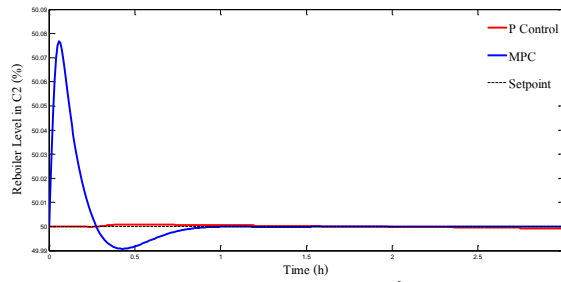
4.3.1 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมต่อการเพิ่มอัตราการผลิตเชิงโมลของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จากเริ่มต้นที่ 100 กิโลโมลต่อชั่วโมง เป็น 110 กิโลโมลต่อชั่วโมง ขณะระบบคงที่ที่เวลา 3 ชั่วโมง โดยเส้นสีแดงแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ และเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายที่สถานะคงตัว แสดงได้ดังภาพที่ 4.18 โดยจากภาพที่ 4.18 (ก) แสดงผลการควบคุมของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.2 ที่เวลา 3 นาที และกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลา 36 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.052 ที่เวลา 3.5 นาที และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.14 ที่เวลา 1.5 นาที และกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลา 41.5 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าถึงแม้ว่าจะมีค่าโอเวอร์ชูตสูงกว่า แต่มีการตอบสนองที่ราบเรียบและเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ จากภาพที่ 4.18 (ข) แสดงผลการควบคุมของระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นในช่วงเวลา 0 - 58.8 นาที ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.00348 ที่เวลา 7.8 นาที และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.00558 ที่เวลา 58.8 นาที และคงที่ที่ร้อยละ 49.99442 ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.1344 ที่เวลา 1.5 นาที และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9958 ที่เวลา 25.5 นาที และกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 85 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ถึงแม้ว่าจะมีค่าโอเวอร์ชูตสูงกว่าแต่สามารถที่จะรักษาค่าเป้าหมายได้ซึ่งต่างจากผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมที่ไม่สามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ จากภาพที่ 4.18 (ค) แสดงผลการควบคุมของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.99975 ที่เวลา 13.8 นาที และค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.00076 ที่เวลา 22.8 นาที



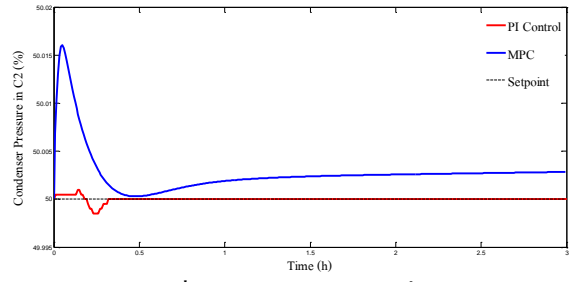
(ก) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1



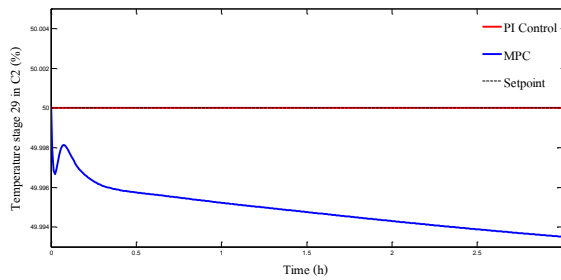
(ข) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1



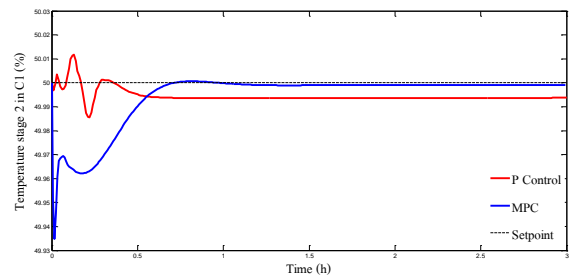
(ค) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2



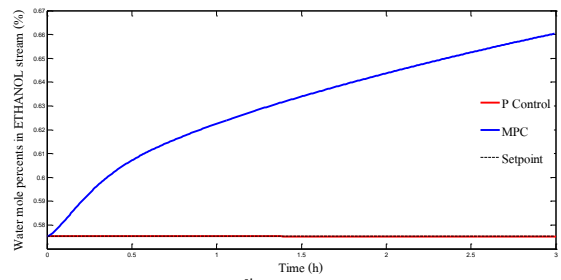
(ง) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2



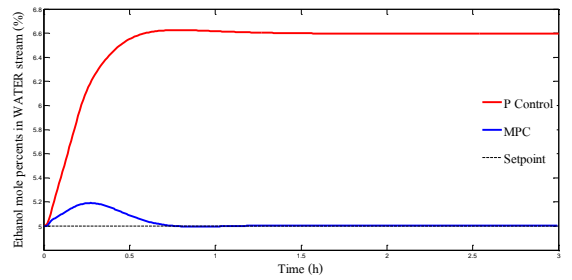
(จ) อุณหภูมิขั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2



(ฉ) อุณหภูมิขั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1



(ช) ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL



(ฌ) ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER

ภาพที่ 4.18 ผลการตอบสนองต่อการเพิ่มอัตราการผลิตเชิงโมลของกระแสป้อน

แล้วกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 93 นาทีที่ส่วนผลการตอบสนอง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0768 ที่เวลา 3.5 นาที และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9908 ที่เวลา 25 นาที และกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 58.5 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการตอบสนองของ

ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของผลการตอบสนองน้อยกว่า จากภาพที่ 4.18 (ง) แสดงผลการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.00099 ที่เวลา 8.4 นาที และค่าต่ำสุดที่ 49.99852 ที่เวลา 13.8 นาที แล้วกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 19.2 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0161 ที่เวลา 3 นาที และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 50.0003 ที่เวลา 26.5 นาที และมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าร้อยละ 50.0028 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของผลการตอบสนองที่น้อยกว่าและสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ จากภาพที่ 4.18 (จ) แสดงผลการควบคุมของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการแกว่งเกิดขึ้นในช่วงแรกโดยมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9967 ที่เวลา 1.5 นาที และค่าสูงสุดที่ร้อยละ 49.9981 ที่เวลา 4 นาที และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าที่ร้อยละ 49.9935 ที่เวลา 3 ชั่วโมงและมีแนวโน้มลดลงต่อไป ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าผลการตอบสนองแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เนื่องจากสามารถที่จะรักษาค่าเป้าหมายได้ จากภาพที่ 4.18 (ฉ) แสดงผลการควบคุมของอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นเกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 - 42 นาที โดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.01177 ที่เวลา 6.3 นาที และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.98554 ที่เวลา 12.2 นาที และเข้าสู่ค่าคงที่ที่ร้อยละ 49.99367 ที่เวลา 42.1 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการสั่นเกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 - 73 นาที โดยมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9968 ที่เวลา 1 นาที และค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0006 ที่เวลา 47 นาที และเข้าสู่ค่าคงที่ที่ร้อยละ 49.9990 ที่เวลา 74 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม เนื่องจากสามารถเข้าสู่ค่าคงที่ใหม่ไกล่เคียงกลับค่าเป้าหมายเดิมได้มากกว่ากว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม จากภาพที่ 4.18 (ซ) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 0.6603 ที่เวลา 3 ชั่วโมง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุม

แบบดั้งเดิม เนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ จากภาพที่ 4.18 (ฉ) แสดงผลการควบคุมของร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าคงที่ที่ร้อยละ 6.59548 ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.1911 ที่เวลา 16.5 นาที และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9946 ที่เวลา 53 นาที และเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 67 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้

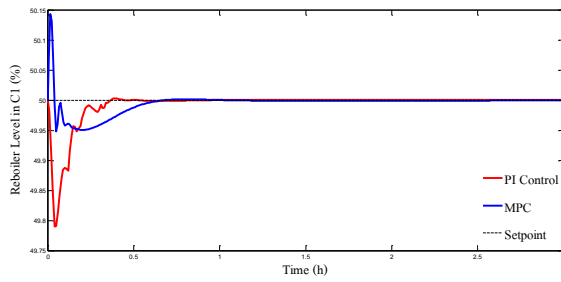
**ตารางที่ 4.1** เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบโมเดลพรีดิกทีฟเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน

ตัวแปรวัด	ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ	ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1		✓
ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2		✓
ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2		✓
อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2		✓
อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1	✓	
ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL		✓
ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER	✓	

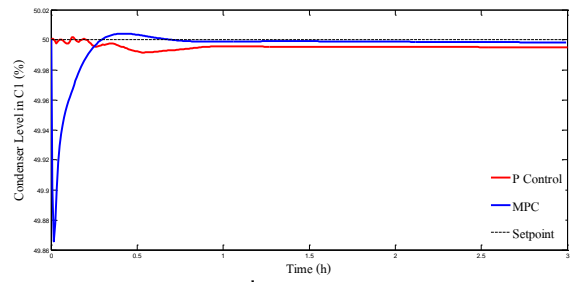
จากผลการควบคุมทั้งหมดที่แสดงในภาพที่ 4.18 สามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับการเพิ่มอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อนร้อยละ 10 โดยตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ 5 ลูปการควบคุมจากทั้งสิ้น 8 ลูปการควบคุม ซึ่งประกอบด้วย ลูปการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 ลูปการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 ลูปการควบคุมความดัน ในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 ลูปการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 และลูปการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ส่วนลูปการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 ลูปการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1

และรูปการควบคุมของร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

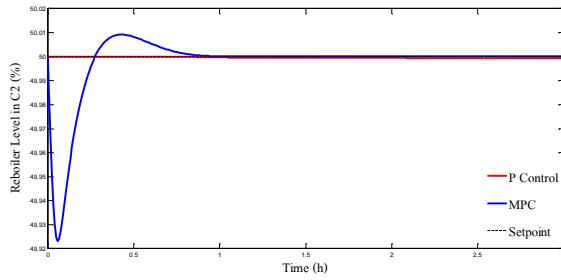
4.3.2 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมต่อการลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จากเริ่มต้นที่ 100 กิโลโมลต่อชั่วโมง เป็น 90 กิโลโมลต่อชั่วโมง ขณะระบบคงที่ที่เวลา 3 ชั่วโมง โดยเส้นสีแดงแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ และเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายที่สภาวะคงตัว แสดงได้ดังภาพที่ 4.19 โดยจากภาพที่ 4.19 (ก) แสดงผลการควบคุมของระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.78957 ที่เวลา 2.4 นาที และค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.00315 ที่เวลา 24 นาที และเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 48.8 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.1432 ที่เวลา 1 นาที และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9483 ที่เวลา 3 นาที และเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 46.5 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีค่าโอเวอร์ชูตน้อยกว่าและมีการเข้าสู่ค่าเป้าหมายราบเรียบกว่า จากภาพที่ 4.19 (ข) แสดงผลการควบคุมของระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นเกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 – 55.8 นาที โดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0017 ที่เวลา 7.2 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9915 ที่เวลา 49.9915 และเข้าสู่ค่าคงที่ที่ร้อยละ 49.99547 ที่เวลา 74.4 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.8656 ที่เวลา 1 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0042 ที่เวลา 25 นาที และกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 42 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้จากภาพที่ 4.19 (ค) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อลดอัตราการไหลของกระแสป้อน ส่วนผลการตอบสนองแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9232 ที่เวลา 3.5 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0092 ที่เวลา 25 นาที และกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 50 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน จากภาพที่ 4.19 (ง) แสดงผลการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่า



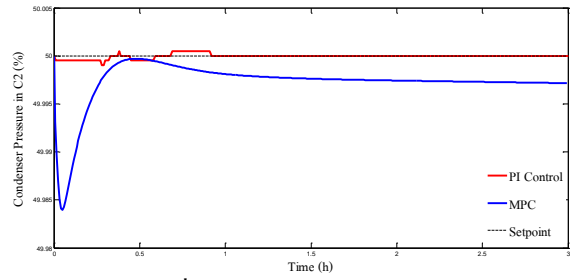
(ก) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1



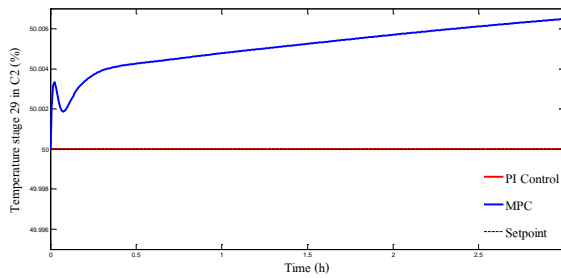
(ข) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1



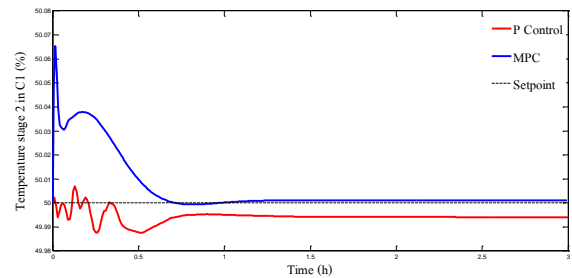
(ค) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2



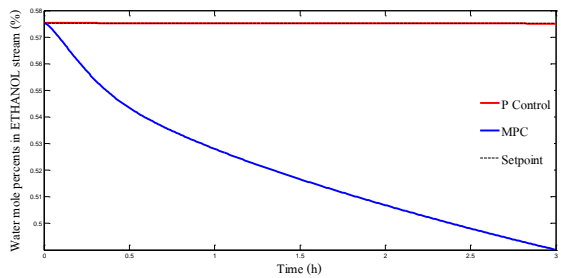
(ง) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2



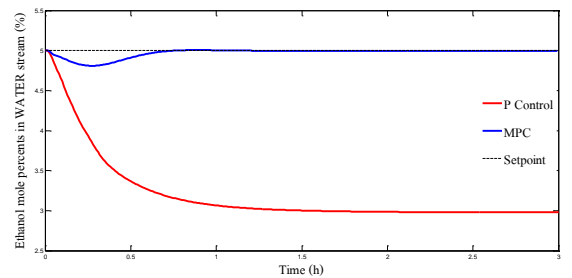
(จ) อุณหภูมิขั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2



(ฉ) อุณหภูมิขั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1



(ช) ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL



(ฌ) ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER

**ภาพที่ 4.19** ผลการตอบสนองต่อการลดอัตราไหลเชิงโมลของกระแสป้อน

จากเดิมไปสู่ค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.99901 ที่เวลา 16.8 นาทีและค่าสูงสุดที่เวลา 50.00049 ที่เวลา 22.8 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 55.2 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าต่ำสุดที่ 49.9839 ที่เวลา 3 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 49.9997 ที่เวลา 26.5 นาทีและลดลงไปยังค่าร้อยละ 49.9972 ที่เวลา 3 ชั่วโมง

ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ต่างจากตัวควบคุมแบบดั้งเดิมที่ไม่สามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ จากภาพที่ 4.19 (จ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเกิดการผันในช่วงเวลา 0 – 12 นาที โดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0033 ที่เวลา 1.5 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 50.019 ที่เวลา 4 นาทีและเพิ่มขึ้นไปสู่ค่าร้อยละ 50.0065 ที่เวลา 3 ชั่วโมงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อไป ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ จากภาพที่ 4.19 (ข) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการผันอยู่ในช่วงเวลา 0 – 87 นาทีโดยมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.00685 ที่เวลา 7.8 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.98746 ที่เวลา 32.2 นาทีและคงที่ที่ค่าร้อยละ 49.9924 ที่เวลา 87 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปสู่ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0653 ที่เวลา 1 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9994 ที่เวลา 47 นาทีและคงที่ที่ค่าร้อยละ 50.0010 ที่เวลา 73 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่า ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม เนื่องจากเข้าใกล้ค่าเป้าหมายได้ใกล้เคียงกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ภาพที่ 4.19 (ข) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงโดยลดลงอย่างต่อเนื่องจากค่าเดิมที่ร้อยละ 0.5753 ไปยังค่าร้อยละ 0.4902 ที่เวลา 3 ชั่วโมงและมีแนวโน้มลดลงต่อไป ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ ภาพที่ 4.19 (ค) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของเอทานอลในการแสด WATER โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากค่าเดิมที่ร้อยละ 5 ไปยังค่าร้อยละ 2.97791 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 5 ไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 4.8089 ที่เวลา 16.5 นาทีและเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลา 46 นาที ซึ่งผลการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม เนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายเดิมได้ จากผลการควบคุมทั้งหมดที่แสดงในภาพที่ 4.19 สามารถ



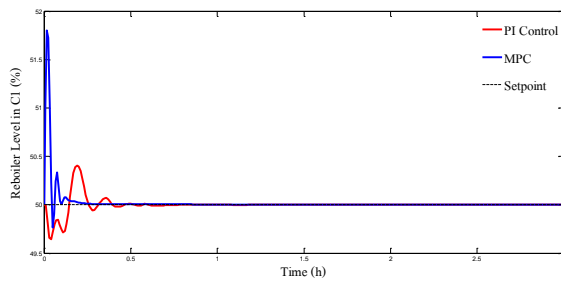
สรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองใกล้เคียงกัน สำหรับการลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อนร้อยละ 10 โดยตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ 4 ลูปการควบคุมจากทั้งสิ้น 8 ลูปการควบคุม ซึ่งประกอบด้วย ลูปการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 ลูปการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 ลูปการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 และลูปการควบคุม ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ส่วนลูปการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของ หอกถัน C1 ลูปการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 ลูปการควบคุม อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 และลูปการควบคุมของร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER ตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ เมื่อลดอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน

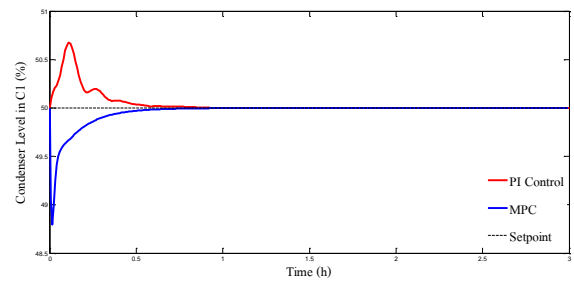
ตัวแปรวัด	ตัวควบคุม แบบ โมเดลพรีดิกทีฟ	ตัวควบคุม แบบดั้งเดิม
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2		✓
ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2		✓
อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2		✓
อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1	✓	
ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL		✓
ร้อยละโดยเชิงโมลของเอทานอลในกระแส WATER	✓	

4.3.3 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมต่อการเพิ่มอุณหภูมิของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จากเริ่มต้นที่ 90 องศาเซลเซียสเป็น 99 องศาเซลเซียส ขณะระบบคงที่ ที่เวลา 3 ชั่วโมง โดยเส้นสีแดงแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ส่วนเส้นสีน้ำเงิน แสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ และเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมาย ที่สภาวะคงตัว แสดงได้ดังภาพที่ 4.20 โดยจากภาพที่ 4.20 (ก) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวใน หม้อต้มของหอกถัน C1 โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ใน

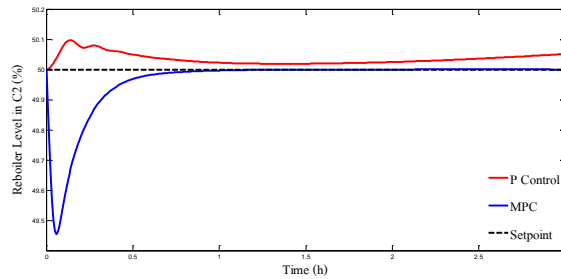
ช่วงเวลา 0 – 48 นาทีโดยมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.64515 ที่เวลา 2.4 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.4058 ที่เวลา 11.4 นาที และกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 48 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ มีการสั้นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 21 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 51.8033 ที่เวลา 1 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.7648 ที่เวลา 3 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 21 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการสั้นน้อยกว่าและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่า ถึงแม้ว่าจะมีค่าโอเวอร์ชูตสูงกว่าก็ตาม จากภาพที่ 4.20 (ข) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.67352 ที่เวลา 6.6 นาทีและมีการสั้นเล็กน้อยก่อนที่จะกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 57.6 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ มีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 48.7957 ที่เวลา 1 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 49.5 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ราบเรียบกว่า จากภาพที่ 4.20 (ค) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.09737 ที่เวลา 8.4 นาทีและไม่สามารถกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมได้โดยที่เวลา 3 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 50.05135 ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.4543 ที่เวลา 3.5 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 57.5 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนอง จากภาพที่ 4.20 (ง) แสดงผลการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั้นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 40.2 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.12139 ที่เวลา 4.2 นาที และมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.93684 ที่เวลา 9 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลา ประมาณ 100.2 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลง ค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.8987 ที่เวลา 4 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลา ประมาณ 48 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ราบเรียบกว่าและเกิดการสั้นน้อยกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม จากภาพที่ 4.20 (จ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั้นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 42 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0277 ที่เวลา 5.4 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.93684



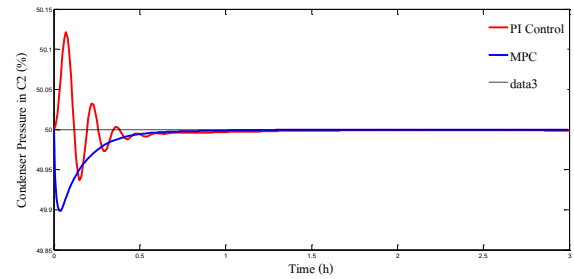
(ก) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1



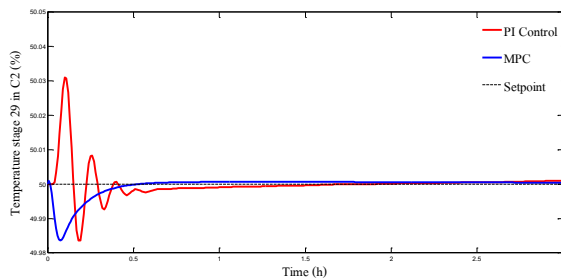
(ข) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1



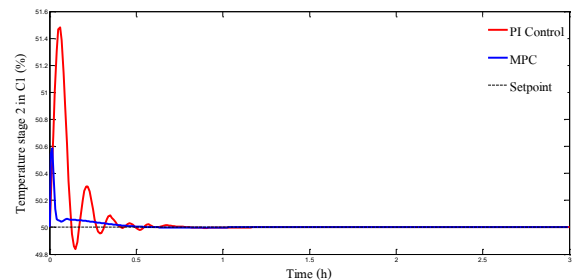
(ค) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2



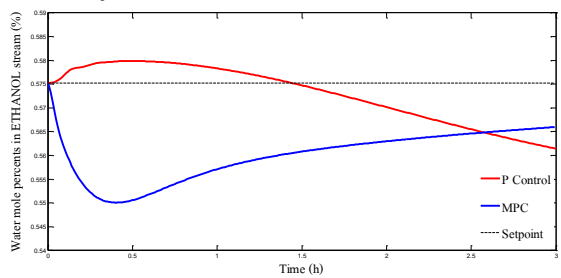
(ง) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2



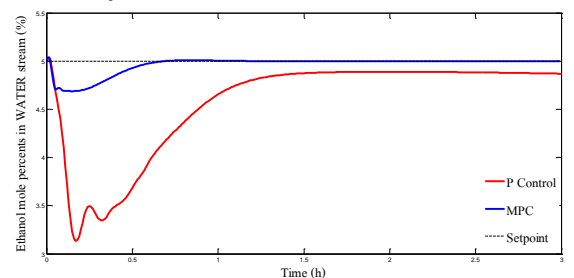
(จ) อุณหภูมิขั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2



(ฉ) อุณหภูมิขั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1



(ข) สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในกระแส ETHANOL



(ฅ) สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแส WATER

ภาพที่ 4.20 ผลการตอบสนองต่อการเพิ่มอุณหภูมิของกระแสป้อน

ที่เวลา 10.8 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 95 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9839 ที่เวลา 4.5 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 24 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนอง

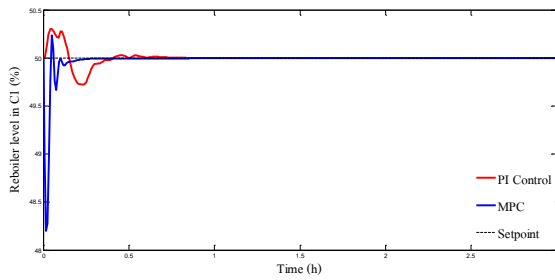
ของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่าและมีความราบเรียบกว่า จากภาพที่ 4.20 (ฉ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิขั้นที่ 2 ของหอกลับ C1 โดยผลการตอบสนองของ ตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 48.6 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 51.48327 ที่เวลา 3.6 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.83866 ที่เวลา 9 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลา ประมาณ 71.4 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่า จากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.5873 ที่เวลา 1 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 64 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการ ตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการสั่นน้อยกว่าและเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมได้เร็วกว่า จากภาพที่ 4.20 (ซ) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL โดยผลการ ตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 0.5753 ไปยังค่าสูงสุดที่ ร้อยละ 0.57987 ที่เวลา 29.4 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 0.561437 ที่เวลา 3 ชั่วโมงและมีแนวโน้ม ลดลงต่อไป ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมที่ ร้อยละ 0.5753 ไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 0.5501 ที่เวลา 22.5 นาทีและเพิ่มขึ้นจนไปถึงค่า 0.5660 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่า ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิม จากภาพที่ 4.20 (ณ) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER

**ตารางที่ 4.3** เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระแสป้อน

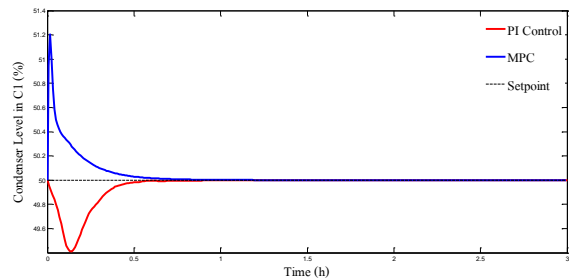
ตัวแปรวัด	ตัวควบคุม แบบโมเดลพรีดิกทีฟ	ตัวควบคุม แบบดั้งเดิม
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลับ C1	✓	
ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลับ C1	✓	
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลับ C2	✓	
ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลับ C2	✓	
อุณหภูมิขั้นที่ 29 ของหอกลับ C2	✓	
อุณหภูมิขั้นที่ 2 ของหอกลับ C1	✓	
ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL	✓	
ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER	✓	

โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 5 ไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 3.13156 ที่เวลา 10.2 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าคงที่ที่ร้อยละ 4.88036 ที่เวลาประมาณ 95 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีผลการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 5 ไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 4.6875 ที่เวลา 9 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลาประมาณ 42 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายเดิมได้และมีโอเวอร์ชูตน้อยกว่า จากผลการควบคุมทั้งหมดที่แสดงในภาพที่ 4.20 สามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของกระแสป้อนร้อยละ 10 ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

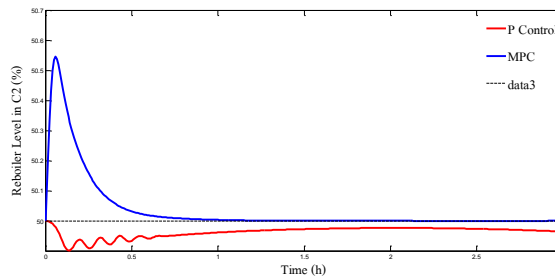
4.3.4 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมต่อการลดอุณหภูมิของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จากเริ่มต้นที่ 90 องศาเซลเซียสเป็น 81 องศาเซลเซียส ขณะระบบคงที่ที่เวลา 3 ชั่วโมง โดยเส้นสีแดงแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ และเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายที่สถานะคงตัว แสดงได้ดังภาพที่ 4.21 จากภาพที่ 4.21 (ก) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 - 50.4 นาที โดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.30339 ที่เวลา 3 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.72402 ที่เวลา 12.6 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 50.4 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 48.2757 ที่เวลา 1.5 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.2352 ที่เวลา 3 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลาประมาณ 20 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่าและมีความราบเรียบกว่า จากภาพที่ 4.21 (ข) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.41089 ที่เวลา 8.4 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลาประมาณ 55.8 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 51.2043 ที่เวลา 1 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลาประมาณ 45 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเนื่องจากมีค่าโอเวอร์ชูตต่ำกว่า จากภาพที่ 4.21 (ค) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2



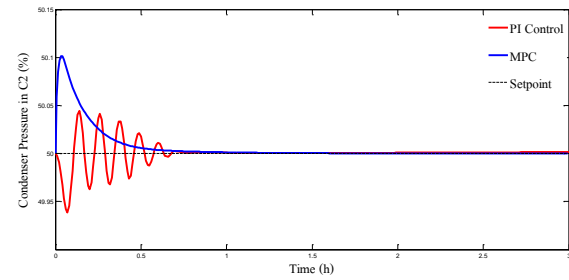
(ก) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1



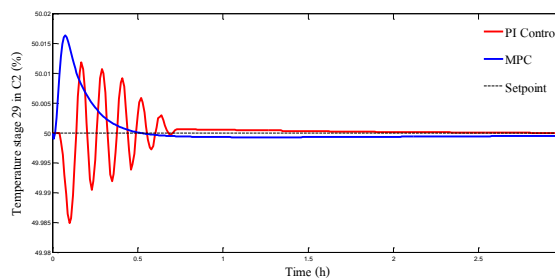
(ข) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1



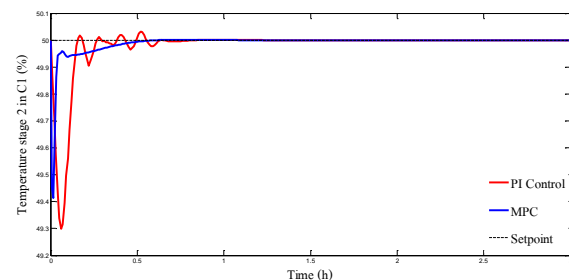
(ค) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2



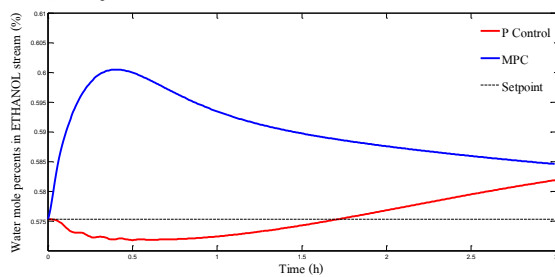
(ง) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2



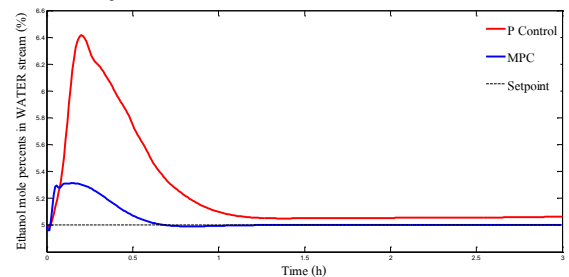
(จ) อุณหภูมิขั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2



(ฉ) อุณหภูมิขั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1



(ช) ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL



(ฉ) ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER

ภาพที่ 4.21 ผลการตอบสนองต่อการลดอุณหภูมิของกระแสป้อน

โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.90111 ที่เวลา 8.4 นาทีและเพิ่มขึ้นไปยังค่าร้อยละ 49.96441 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.5457 ที่เวลา 3.5 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลาประมาณ 60 นาที

ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ จากภาพที่ 4.21 (ง) แสดงผลการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 40 นาที โดยมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.93832 ที่เวลา 4.2 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.04441 ที่เวลา 8.4 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 45 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.1013 ที่เวลา 4 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 40 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากเข้าสู่เป้าหมายได้ราบเรียบและไม่เกิดการสั่น จากภาพที่ 4.21 (จ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 43 นาที โดยมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.985 ที่เวลา 6 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0119 ที่เวลา 10.2 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 43 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0164 ที่เวลา 4.5 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 32 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากเข้าสู่เป้าหมายได้ราบเรียบและไม่เกิดการสั่น จากภาพที่ 4.21 (ฉ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 51 นาที โดยมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.29835 ที่เวลา 3.6 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.03147 ที่เวลา 31.2 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 52 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.4129 ที่เวลา 1 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 35 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากเข้าสู่เป้าหมายได้ราบเรียบและไม่เกิดการสั่น จากภาพที่ 4.21 (ช) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 0.571772 ที่เวลา 30 นาทีและเพิ่มไปยังค่า 0.581873 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 0.6005 ที่เวลา 23.5 นาทีและลดลงไปยังค่า 0.5846 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากแนวโน้มเข้าสู่ค่า

เป้าหมายเดิม จากภาพที่ 4.21 (ฉ) แสดงผลการควบคุมร้อยละ โดยโมลของเอทานอล ในกระแส WATER โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิม ไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 6.41509 ที่เวลา 12 นาทีและลดลงไปยังค่าร้อยละ 5.0502 ที่เวลา 83.4 นาที และเพิ่มขึ้นไปยังค่า 5.06328 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุม แบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 5.3125 ที่เวลา 9 นาที และกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลา 39 นาที ซึ่งซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุม แบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม เนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายเดิมได้ จากผลการควบคุมทั้งหมดที่แสดงในภาพที่ 4.20 สามารถ สรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิม สำหรับการลดอุณหภูมิของกระแสป้อนร้อยละ 10 ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

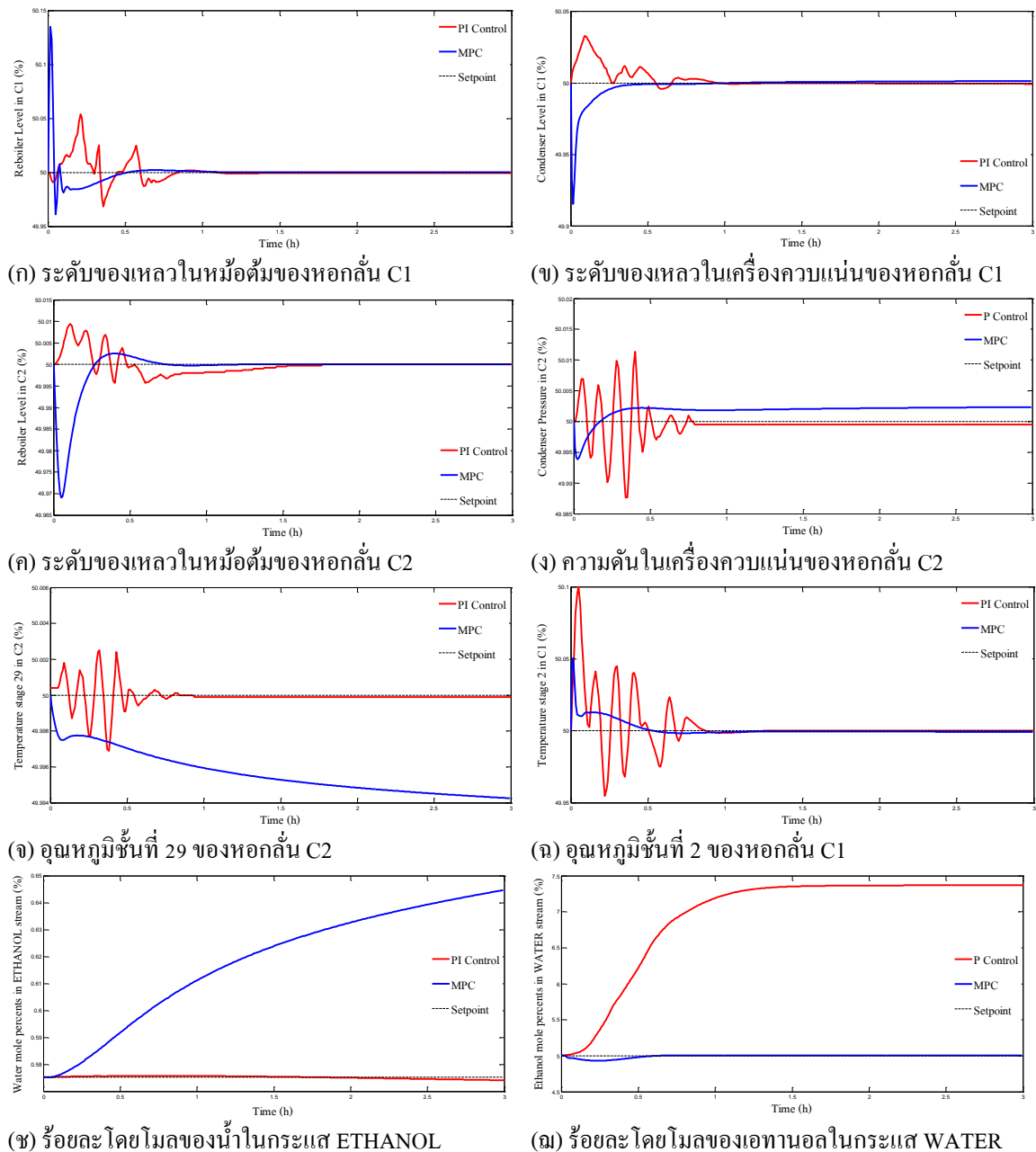
**ตารางที่ 4.4** เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เมื่อลดอุณหภูมิของกระแสป้อน

ตัวแปรวัด	ตัวควบคุม แบบโมเดลพรีดิกทีฟ	ตัวควบคุม แบบดั้งเดิม
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2	✓	
ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2	✓	
อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2	✓	
อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1	✓	
ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL	✓	
ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER	✓	

4.3.5 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมต่อการเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอล ของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จากเริ่มต้นที่ 0.2 เป็น 0.22 ขณะระบบคงที่ที่เวลา 3 ชั่วโมง โดยเส้นสีแดงแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการควบคุม ของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ และเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายที่สภาวะคงตัว แสดงได้ดัง ภาพที่ 4.22 จากภาพที่ 4.22 (ก) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1



โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 51 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.05442 ที่เวลา 12.6 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.96867 ที่เวลา 22.8 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 90 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 12 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.1354 ที่เวลา 1 นาที



ภาพที่ 4.22 ผลการตอบสนองต่อการเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลของกระแสป้อน

และค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9614 ที่เวลา 3 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 29 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการสั้นน้อยกว่าและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่า จากภาพที่ 4.22 (ข) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1 โดยผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั้นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 57.6 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.03285 ที่เวลา 5.4 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.99603 ที่เวลา 34.8 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 57.6 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9155 ที่เวลา 1 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 25 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ราบเรียบและเร็วกว่า จากภาพที่ 4.22 (ค) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั้นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 47.4 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.00941 ที่เวลา 6.6 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.99568 ที่เวลา 36 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 105.6 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9691 ที่เวลา 3 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0025 ที่เวลา 22.5 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 44 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ราบเรียบและเร็วกว่า จากภาพที่ 4.22 (ง) แสดงผลการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั้นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 47.4 นาทีโดยมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.98776 ที่เวลา 20.4 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.01135 ที่เวลา 24 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 47.4 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9938 ที่เวลา 1.5 นาทีและคงที่ที่ร้อยละ 50.0020 ตั้งแต่เวลา 20 นาทีจนถึงเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการสั้นน้อยกว่าถึงแม้จะไม่สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมได้แต่เข้าสู่ค่าคงที่ค่าใหม่ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย จากภาพที่ 4.22 (จ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั้นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 50.4 นาทีโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0025 ที่เวลา 19.2 นาทีและค่าต่ำสุด

ที่ร้อยละ 49.9969 ที่เวลา 22.8 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลาประมาณ 50.4 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าร้อยละ 49.9975 ที่เวลา 4 นาทีและเพิ่มขึ้นมายังค่าร้อยละ 49.9978 ที่เวลา 10.5 นาทีและลดลงไปยังค่าร้อยละ 49.9943 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ถึงแม้จะเกิดการสั่นในช่วงแรกก็ตาม จากภาพที่ 4.22 (ฉ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ ชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 52.2 นาทีซึ่งมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.09986 ที่เวลา 3 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.95477 ที่เวลา 13.2 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 66.6 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0505 ที่เวลา 1 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 30 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เร็วและราบเรียบกว่า จากภาพที่ 4.22 (ช) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 0.575275 ไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 0.575765 ที่เวลา 33 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 0.574107 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 0.575275 ไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 0.6446 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าและมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย จากภาพที่ 4.22 (ฉ) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 5 ไปยังค่าร้อยละ 7.36907 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 5 ไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 4.9310 ที่เวลา 14.5 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 37 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ จากผลการควบคุมทั้งหมดที่แสดงในภาพที่ 4.22 สามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมสำหรับการเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลของกระแสป้อนร้อยละ 10 โดยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิม 6 ลูกการควบคุม

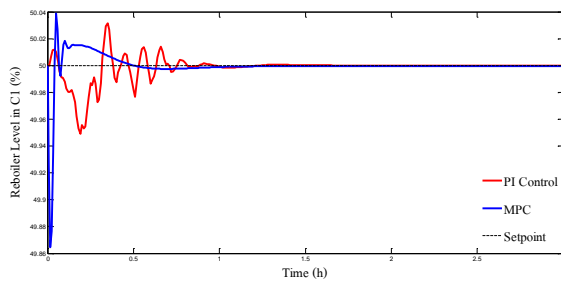
จากทั้งสิ้น 8 ลูบการควบคุม ซึ่งประกอบด้วยลูบการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของ หอกถัน C1 ลูบการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 ลูบการควบคุม ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 ลูบการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 ลูบการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 และลูบการควบคุมของร้อยละโดยโมลของเอทานอล ในกระแส WATER ส่วนลูบการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 และลูบการควบคุม ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เมื่อเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแสป้อน

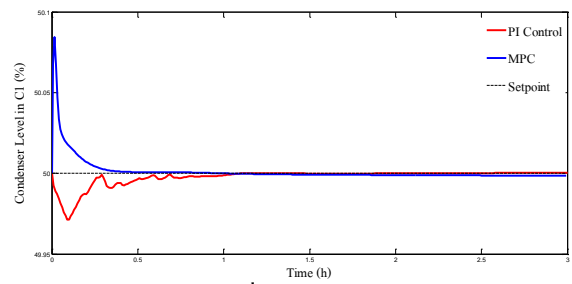
ตัวแปรวัด	ตัวควบคุม แบบโมเดลพรีดิกทีฟ	ตัวควบคุม แบบดั้งเดิม
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2	✓	
ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2	✓	
อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2		✓
อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1	✓	
ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL		✓
ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER	✓	

4.3.6 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมต่อการลดสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอล ของกระแสป้อนแบบขั้นบันไดร้อยละ 10 จากเริ่มต้นที่ 0.2 เป็น 0.18 ขณะระบบคงที่ที่เวลา 3 ชั่วโมง โดยเส้นสีแดงแสดงผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการควบคุม ของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ และเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายที่สภาวะคงตัว แสดงได้ดัง ภาพที่ 4.23 จากภาพที่ 4.23 (ก) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 58.2 นาที ซึ่งมีค่าต่ำสุด ที่ร้อยละ 49.94899 ที่เวลา 11.4 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50 .03159 ที่เวลา 21 นาทีและวกกลับเข้าสู่ ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 68.9 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ

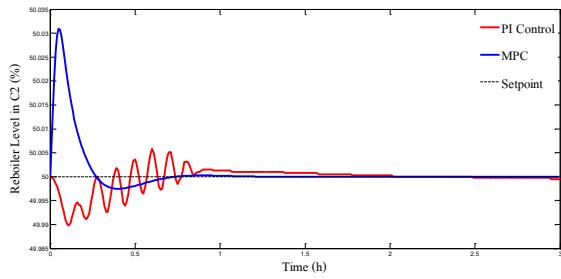
มีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.8646 ที่เวลา 1 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0386 ที่เวลา 3 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 61 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีการสั่นน้อยกว่าและเข้าสู่ค่าเป้าหมายเร็วกว่า จากภาพที่ 4.23 (ข) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นในช่วงเวลา 0 - 46 นาที ซึ่งมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.97139 ที่เวลา 5.4 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 61 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0845 ที่เวลา 1 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 25 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ราบเรียบและเร็วกว่า จากภาพที่ 4.23 (ค) แสดงผลการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 - 46.8 นาทีซึ่งมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.98983 ที่เวลา 6.6 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.00585 ที่เวลา 36 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 88 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0309 ที่เวลา 3 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9975 ที่เวลา 22.5 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 35.5 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ราบเรียบและเร็วกว่า จากภาพที่ 4.16 (ง) แสดงผลการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วง 0 - 51.6 นาทีซึ่งมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.01135 ที่เวลา 33 นาทีและมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.98766 ที่เวลา 36 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 52 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0062 ที่เวลา 1.5 นาทีและค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9978 ที่เวลา 23 นาทีและคงที่ไปจนถึงเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากไม่เกิดการสั่นถึงแม้ว่าจะไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมแต่เข้าสู่ค่าคงที่ที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายเดิม จากภาพที่ 4.23 (จ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั่นอยู่ในช่วงเวลา 0 - 46.2 นาทีซึ่งมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9971 ที่เวลา 25.2 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0028 ที่เวลา 34.8 นาที



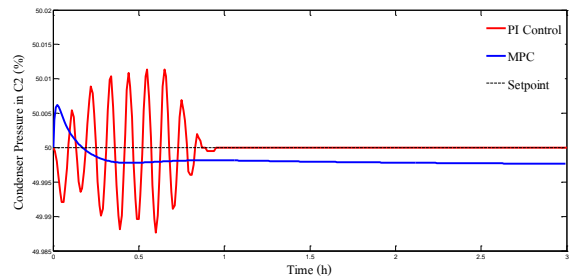
(ก) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1



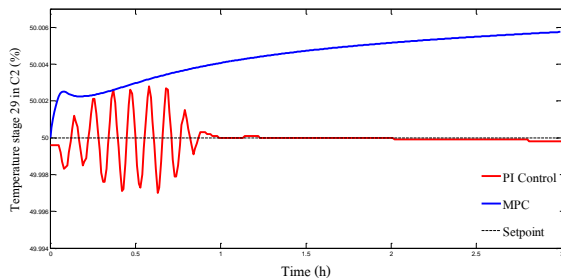
(ข) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1



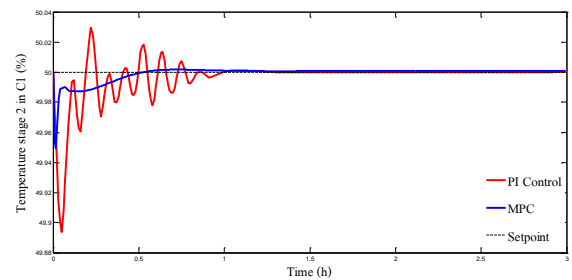
(ค) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2



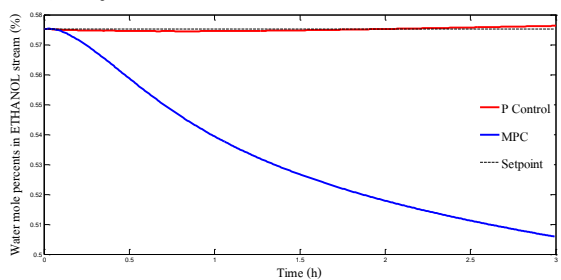
(ง) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2



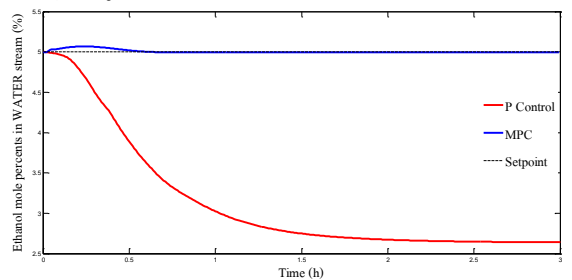
(จ) อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2



(ฉ) อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1



(ช) ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL



(ฅ) ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER

ภาพที่ 4.23 ผลการตอบสนองต่อการลดสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลของกระแสป้อน

ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.0057 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ถึงจะมีเกิดการสั่นเกิดขึ้นในช่วงแรก จากภาพที่ 4.23 (ฅ) แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ

ชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการสั้นอยู่ในช่วงเวลา 0 – 60 นาที ซึ่งมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.89374 ที่เวลา 3 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 50.02943 ที่เวลา 13.2 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 69 นาที ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 49.9495 ที่เวลา 1 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลาประมาณ 30 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากไม่เกิดการสั้นและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่า จากภาพที่ 4.23 (ข) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 0.575275 ไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 0.574581 ที่เวลา 27 นาทีและค่าสูงสุดที่ร้อยละ 0.576317 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 0.575275 ไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 4.9971 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเนื่องจากมีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากกว่า จากภาพที่ 4.23 (ค) แสดงผลการควบคุมร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER โดยผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 5 ไปยังค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 2.6393 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเดิมที่ร้อยละ 5 ไปยังค่าสูงสุดที่ร้อยละ 5.0690 ที่เวลา 14.5 นาทีและกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่เวลาประมาณ 45 นาที ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการตอบสนองดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเนื่องจากสามารถรักษาค่าเป้าหมายได้ จากผลการควบคุมทั้งหมดที่แสดงในภาพที่ 4.23 สามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมสำหรับการลดสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลของกระแสป้อนร้อยละ 10 โดยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิม 6 รูปการควบคุมจากทั้งสิ้น 8 รูปการควบคุม ซึ่งประกอบด้วยรูปการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1 รูปการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1 รูปการควบคุมระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2 รูปการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 รูปการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1 และรูปการควบคุมของร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER ส่วนรูปการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 และรูปการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ผลการควบคุมที่ต่ำกว่า

**ตารางที่ 4.6** เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับแบบโมเดลพรีดิกทีฟ  
เมื่อลดสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลในกระแสป้อน

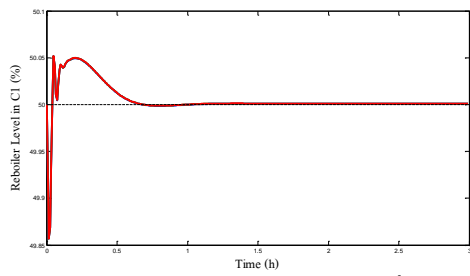
ตัวแปรวัด	ตัวควบคุม แบบ โมเดลพรีดิกทีฟ	ตัวควบคุม แบบดั้งเดิม
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C1	✓	
ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกถัน C2	✓	
ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2	✓	
อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2		✓
อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกถัน C1	✓	
ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL		✓
ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER	✓	

#### 4.4 ผลการศึกษาค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน

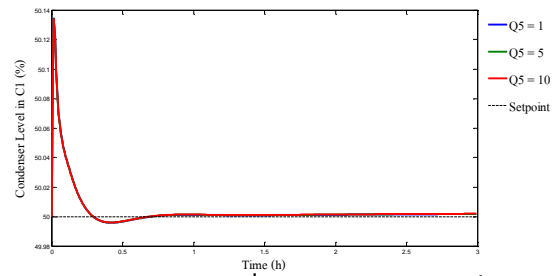
จากการศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อน โดยเลือกพิจารณาค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ คือ อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 และร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 ที่ 1, 5 และ 10 โดยแกนนอนแสดงเวลาในการดำเนินงานที่ 3 ชั่วโมง แกนตั้งแสดงผลการตอบสนองของตัวแปรวัดต่างๆ ซึ่งเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 ที่เท่ากับ 1 เส้นสีเขียวแสดงผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 ที่เท่ากับ 5 เส้นสีแดงแสดงผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2 ที่เท่ากับ 10 และเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายของกระบวนการ ซึ่งจากภาพที่ 4.24 จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C จะส่งผลให้กระบวนการเกิดการตอบสนองอย่างชัดเจนในรูปการควบคุมความดันในเครื่องควบแน่นของหอกถัน C2 และรูปการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกถัน C2

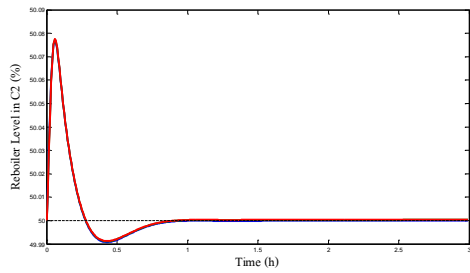




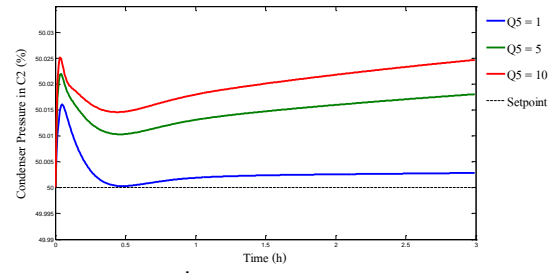
(ก) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1



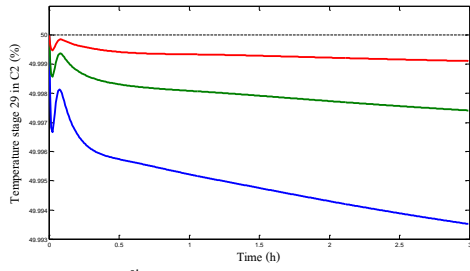
(ข) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1



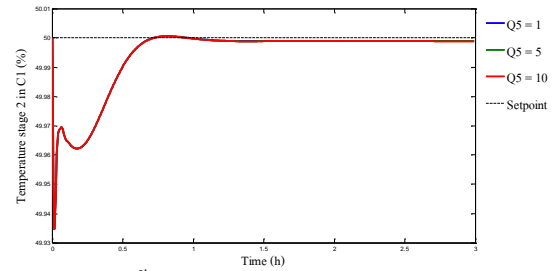
(ค) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2



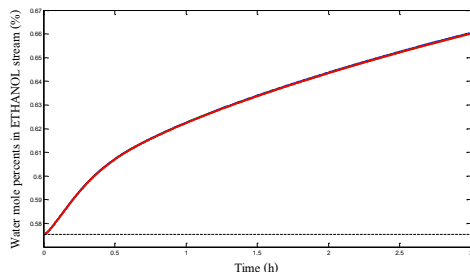
(ง) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2



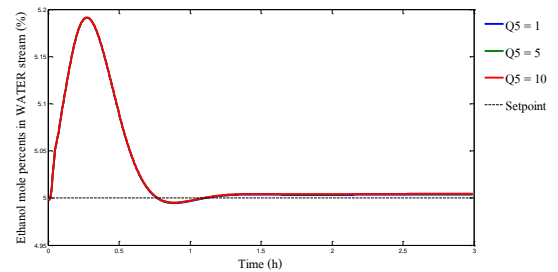
(จ) อุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2



(ฉ) อุณหภูมิชั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1



(ช) ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL



(ฅ) ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER

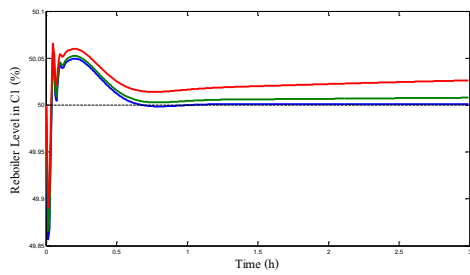
ภาพที่ 4.24 ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2

แสดงดังภาพที่ 4.24 (ง) และ 4.24 (จ) ตามลำดับ โดยหลักการความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2 มีพฤติกรรมตอบสนองออกห่างจากค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2 ส่วนหลักการควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของ

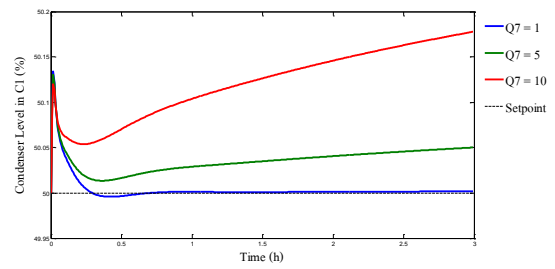
หอกลิ้น C2 มีพฤติกรรมการตอบสนองเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้น เมื่อเพิ่มค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของหอกลิ้น C2

4.4.2 ผลการศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ที่ 1, 5 และ 10 โดยแกนนอนแสดงเวลาในการดำเนินงานที่ 3 ชั่วโมง แกนตั้งแสดงผลการตอบสนองของตัวแปรวัดต่างๆ ซึ่งเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ที่เท่ากับ 1 เส้นสีเขียวแสดงผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ที่เท่ากับ 5 เส้นสีแดงแสดงผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ที่เท่ากับ 10 และเส้นประสีดำแสดงค่าเป้าหมายของกระบวนการ ซึ่งจากภาพที่ 4.25 จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยรูปการควบคุมร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL มีพฤติกรรมการตอบสนองเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้น เมื่อเพิ่มค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL ส่วนรูปการควบคุมอื่นๆ มีพฤติกรรมการตอบสนองออกห่างจากค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้น เมื่อเพิ่มค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL

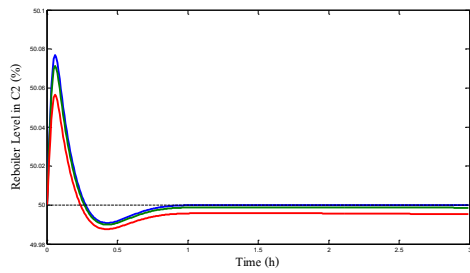
จากผลการศึกษาค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิชั้นที่ 29 ของ หอกลิ้น C2 และร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรวัดตัวใดจะส่งผลให้พฤติกรรมการตอบสนองของตัวแปรวัด ตัวนั้นเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้น แต่จะส่งผลให้พฤติกรรมการตอบสนองของตัวแปรวัดตัวอื่นออกห่างจากค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้นด้วย



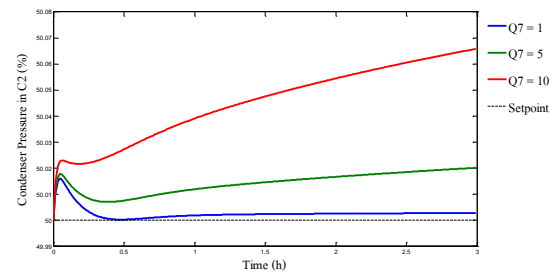
(ก) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C1



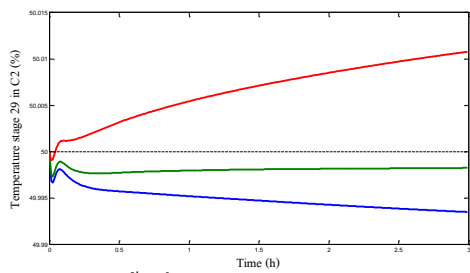
(ข) ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C1



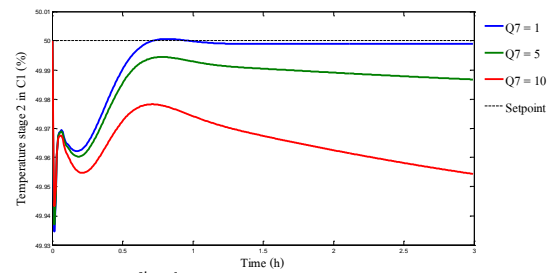
(ค) ระดับของเหลวในหม้อต้มของหอกลั่น C2



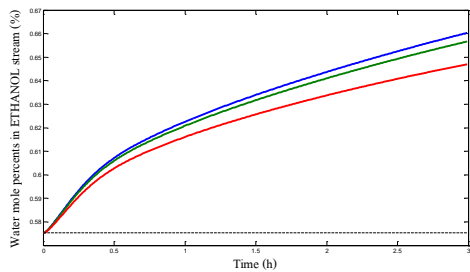
(ง) ความดันในเครื่องควบแน่นของหอกลั่น C2



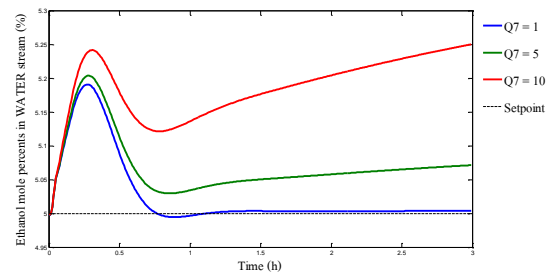
(จ) อุณหภูมิขั้นที่ 29 ของหอกลั่น C2



(ฉ) อุณหภูมิขั้นที่ 2 ของหอกลั่น C1



(ช) ร้อยละโดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL



(ฌ) ร้อยละโดยโมลของเอทานอลในกระแส WATER

ภาพที่ 4.25 ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของ ร้อยละ โดยโมลของน้ำในกระแส ETHANOL

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

5.1.1 แบบจำลองปฏิภูมิสถานะเชิงเส้นของกระบวนการกลั่นแบบความดันแกว่งที่มีการรวมความร้อนภายในสำหรับการแยกไบโอเอทานอล มีแนวโน้มการตอบสนองในทิศทางเดียวกันกับแบบจำลองกระบวนการ แต่มีค่าต่างจากกันเล็กน้อย เนื่องจากกระบวนการมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง

5.1.2 ค่าจำนวนตัวแปรควบคุมในอนาคตและค่าจำนวนตัวแปรปรับในอนาคตสำหรับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีค่าเท่ากับ 50 และ 3 ตามลำดับ

5.1.3 ผลการประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.3.1 การรบกวนอัตราการไหลเชิงโมลของกระแสป้อน ตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

5.1.3.2 การรบกวนอุณหภูมิของกระแสป้อน ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมดั้งเดิม

5.1.3.3 การรบกวนสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลของกระแสป้อนตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมดั้งเดิม

5.1.4 การเพิ่มค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรวัดใดๆจะส่งผลให้พฤติกรรมตอบสนองของตัวแปรวัดตัวนั้นมีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้น แต่ส่งผลให้พฤติกรรมตอบสนองของตัวแปรวัดตัวอื่นออกห่างจากค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้นด้วย

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปรับปรุงแบบจำลองกระบวนการในตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้มีความใกล้เคียงกับกระบวนการมากยิ่งขึ้น เพื่อให้การจำลองกระบวนการมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ศึกษาค่าน้ำหนักของค่าความคลาดเคลื่อนและค่าน้ำหนักของตัวแปรปรับที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

## บรรณานุกรม

- [1] Jorge Francisco Mulia-Soto., and Antonio Flores-Tlacuahuac. 2011. “Modeling, Simulation and Control of An Internally Heat Integrated Pressure-Swing Distillation Process for Bioethanol Separation.” *Computers and Chemical Engineering*. 2011. 35 : 1532-1546.
- [2] R.A. Abou-Jeyab., Y.P. Gupta., J.R. Gervais., P.A. Branchi., and S.S. Woo. 2001. “Constrained multivariable control of a distillation column using a simplified model predictive control algorithm.” *Journal of Process Control*. 2001. 11 : 509-517.
- [3] Bradley Anderson., Aaron Bennick., and Michael Saliccioli., **2007. Advantages of MPC.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/MPC> ( 19 กันยายน 2556).
- [4] ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. “สถิติพลังงานของประเทศไทย.” กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (อัดสำเนา)
- [5] Andreas Klein. 2008. *Pressure swing distillation*. Berlin.
- [6] Dale E. Seborg., Thomas F. Edgar., and Duncan A. Mellichamp. 2003. *Model Predictive Control*. 2nd ed. United States of America.
- [7] Taketoshi Kurooka., Yuh Yamashita., Hirokazu Nishitani., Yoshihiro Hashimoto., Masatoshi Yoshida., and Motoki Numata. 2000. “Dynamic simulation and nonlinear control system design of a heterogeneous azeotropic distillation column.” *Computer and Chemical Engineering*. 2000. 24 : 887-892.
- [8] S.Meenakshi., A.Almusthaliba., and V.Vijayageetha. 2013. “MIMO Identification and Controller design for Distillation Column.” *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*. 2013. 1 : 44-48.
- [9] William L. Luyben. 2006. “Distillation design and control using aspen<sup>TM</sup> simulation”.USA :Wiley-Interscience.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

## ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

**ตารางผนวกที่ ก.1** ค่าพารามิเตอร์การปรับจูนของตัวสำหรับการรบกวนการเพิ่มและการลดอัตรา  
การไหลเชิงโมลของกระแสป้อนร้อยละ 10

ตัวควบคุม	เพิ่ม		ลด	
	$K_c$	$\tau_I$ (min)	$K_c$	$\tau_I$ (min)
LC1	29	5	28	5
LC2	2.9	-	1	-
LC3	1	-	2	-
PC1	4	2	4	2
TC1	1	20	1	20
TC2	1.8	-	0.8	-

**ตารางผนวกที่ ก.2** ค่าพารามิเตอร์การปรับจูนของตัวสำหรับการรบกวนการเพิ่มและการลด  
สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลกระแสป้อนร้อยละ 10

ตัวควบคุม	เพิ่ม		ลด	
	$K_c$	$\tau_I$ (min)	$K_c$	$\tau_I$ (min)
LC1	36	5	32	5
LC2	6.5	10	8	10
LC3	15.5	20	15	50
PC1	1.6	-	1.6	-
TC1	20	50	20	50
TC2	3	6	3	6



ตารางผนวกที่ ก.3 ค่าพารามิเตอร์การปรับจูนของตัวสำหรับการรบกวนการเพิ่มและการลดอุณหภูมิ  
ของกระแสน้ำร้อนร้อยละ 10

ตัวควบคุม	เพิ่ม		ลด	
	$K_c$	$\tau_I$ (min)	$K_c$	$\tau_I$ (min)
LC1	60	5	40	5
LC2	5.5	10	2.3	10
LC3	4.5	-	2.7	-
PC1	8	12	1	2
TC1	15	70	18	50
TC2	3	6	2.5	6

ภาคผนวก ข

ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่การรบกวนต่างๆ

## ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่การรบกวนต่างๆ

**ตารางผนวกที่ ข.1** ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่การรบกวนอัตราการไหลเชิงโมล  
ของกระแสน้ำ

รูปการควบคุม	เพิ่ม		ลด	
	MPC	PI Control	MPC	PI Control
LC1	0.02235	0.02258	0.02235	0.02283
LC2	0.01428	0.01450	0.01428	0.01415
LC3	0.01300	0.00114	0.01300	0.00128
PC1	0.00823	0.00022	0.00823	0.00036
TC1	0.01529	0	0.01529	0
TC2	0.01771	0.01787	0.01771	0.01772
WATER	0.16373	0.00587	0.16373	0.00021
ETHANOL	0.08208	4.49041	0.08208	5.41307

**ตารางผนวกที่ ข.2** ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่การรบกวนอุณหภูมิของกระแสน้ำ

รูปการควบคุม	เพิ่ม		ลด	
	MPC	PI Control	MPC	PI Control
LC1	0.06794	0.06677	0.06794	0.06786
LC2	0.11803	0.11790	0.11803	0.11801
LC3	0.10765	0.10607	0.10765	0.11167
PC1	0.02000	0.01939	0.02000	0.01534
TC1	0.00400	0.00532	0.00400	0.00406
TC2	0.11803	0.14234	0.11803	0.06881
WATER	0.04582	0.01547	0.04582	0.00834
ETHANOL	0.11727	1.30461	0.11727	0.72859

ตารางผนวกที่ ข.3 ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่การรบกวนสัดส่วนเชิง โมล  
ของเอทานอลของกระแสป้อน

รูปการควบคุม	เพิ่ม		ลด	
	MPC	PI Control	MPC	PI Control
LC1	0.01001	0.01068	0.01001	0.01112
LC2	0.00783	0.00809	0.00783	0.00693
LC3	0.00433	0.00385	0.00433	0.00416
PC1	0.00631	0.00389	0.00631	0.00481
TC1	0.01310	0.00084	0.01310	0.00127
TC2	0.00783	0.01871	0.00783	0.001560
WATER	0.12810	1.7163	0.12810	1.71376
ETHANOL	0.03168	5.86071	0.03168	5.60106

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายผดุงเกียรติ ทวีการณ์
วัน เดือน ปีเกิด	22 กุมภาพันธ์ 2532
ที่อยู่	7/3 หมู่ 3 ตำบลสะแกแก้ว อำเภอลาดยาว จังหวัดนครสวรรค์ 60150
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	08-7099-0973
อีเมล	t.phadungkiat@hotmail.com