

การปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้หลักการการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมที่  
เหมาะสมสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

OPTIMIZATION-BASED PID CONTROLLER TUNING WITH GAIN  
SCHEDULING FOR THE DRUM BOILER LEVEL CONTROL OF THE  
INDUSTRIAL COMBINE CYCLE PLANT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-060-091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMIZATION-BASED PID CONTROLLER TUNING WITH GAIN  
SCHEDULING FOR THE DRUM BOILER LEVEL CONTROL OF THE  
INDUSTRIAL COMBINE CYCLE PLANT



THE THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE MASTER DEGREE OF INSTRUMENTATION ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2023

KMITL-2023-EN-M-060-091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้หลักการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม
นักศึกษา	นายบัณฑิต สุทัศน์
รหัสประจำตัว	60601006
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ วิริยะ กองรัตน์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำแบบคาสเคดสามตัวแปรร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่มีการแบ่งค่าควบคุมพีไอดีออกเป็นสองช่วงในการควบคุม เพื่อใช้งานในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง (On Peak Mode Operation) และช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย (Off Peak Mode Operation) สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โดยมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์พีไอดีใหม่ในชุดของการควบคุมเมื่อโรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องในโหมดของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง และได้มีการพิสูจน์ถึงค่าพีไอดีที่ได้ปรับแต่งขึ้นมานั้นมีความ Optimization มากที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าพีไอดีค่าอื่นที่ได้มีการลองปรับแต่ง โดยใช้หลักการการหาค่าอินทิกรัลผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาด (Integral of the Absolute Value of the Error (IAE) มาใช้ในการพิสูจน์ว่าค่าพีไอดีที่มีการปรับแต่งนั้นมีความ Optimization สูงที่สุดเพื่อใช้ในการควบคุมตัวแปรกระบวนการเพื่อให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนด

โดยผลลัพธ์ที่ได้พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการแบ่งช่วงการควบคุมนี้สามารถควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีเดียวได้อย่างชัดเจน สามารถจัดการกับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบชั่วขณะได้เป็นอย่างดี วิธีการดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงสำหรับการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำของโรงไฟฟ้า

**คำสำคัญ :** Three-element cascade drum boiler level control system, Gain scheduled PID, Peak mode operation, Off-peak mode operation, Combined Cycle Cower Plant (CCPP), Integral of the Absolute Value of the Error (IAE)

<b>Thesis Title</b>	Optimization-based PID Controller Tuning with Gain Scheduling for the Drum Boiler Level Control of the Industrial Combine Cycle Plant
<b>Student</b>	Mr. Badin Suthat
<b>Student ID.</b>	60601006
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2023
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Viriya Kongratana

## ABSTRACT

This work aims to present an application of water level control system for a three-element cascade drum boiler with a PID controller. The PID control value was divided into two control ranges, including on peak mode operation during high power consumption and off peak mode operation during low power consumption for a combined cycle power plant. A new PID parameter was tuning in the set of PID controls when the power plant is operating in on peak mode operation. And it has been proven that the PID value that has been tuning has the most optimization when compared to other PID values that have been adjusted previously. By using the principle of Integral of the Absolute Value of the Error (IAE) is used to prove that the adjusted PID value has the highest optimization in order to control the process variable to reach the set point value.

As a result, it was found that the PID controller with divided control phases was able to clearly control the water level of the drum boiler better than a single PID controller. It was able to handle transient and rapid processes very well. This method could be used practically for controlling the water level in power plant drum boilers.

**Key words :** Three-element cascade drum boiler level control system, Gain scheduled PID, Peak mode operation, Off-peak mode operation, Combined Cycle Cower Plant (CCPP), Integral of the Absolute Value of the Error (IAE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ เพราะได้รับคำปรึกษาและคำแนะนำจาก รศ.วิริยะ กองรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้คำชี้แนะในการทำงานวิจัยนี้ ตลอดจนกระตุ้นเตือนและสอบถามถึงความคืบหน้าของงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง สม่ำเสมอ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างและขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงในความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องที่ผ่านมา

ขอขอบคุณผู้บริหารและหัวหน้างาน บริษัท บางปะอิน โคนเจนเนอเรชั่น จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปการณีสถานที่ และข้อมูลที่ใช้ทำการวิจัยนี้ให้ลุล่วงไปด้วยดี สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทจนสำเร็จการศึกษา ณ สถาบันฯ แห่งนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่เคารพรักอย่างสูง รวมทั้งภรรยา คู่ชีวิต และธิดา ซึ่งเป็นที่รัก ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

บดินทร์ สุทัศน์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combine Cycle Power Plant).....	6
2.1.1 หน่วยผลิตไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine: GT).....	7
2.1.2 หน่วยผลิตไอน้ำ (Heat Recovery Steam Generator: HRSG ).....	8
2.1.3 หน่วยผลิตไฟฟ้าเครื่องกังหันไอน้ำ (Steam Turbine).....	8
2.2 ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller).....	9
2.2.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller).....	10
2.2.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Controller).....	10
2.2.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Controller).....	11
2.3 ระบบควบคุมพีไอดี (Open & Close loop).....	11
2.3.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System).....	11
2.3.2 ระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System).....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 เทคนิคการวัดและการควบคุม (3 Element Control).....	12
2.4.1 การควบคุมแบบคาสแคด.....	12
2.4.2 การควบคุมแบบป้อนไปด้านหน้า (Feed Forward Control).....	13
2.4.3 การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้หลักการควบคุมแบบคาสแคด (Cascade Control) ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control).....	13
2.5 เทคนิคการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ควบคุมพีไอดี.....	14
2.5.1 วิธีการ Ziegler-Nichols.....	14
2.6 โมเดลทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ.....	15
2.6.1 สมการการอนุรักษ์มวลและพลังงาน.....	16
2.7 หลักการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม (Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling).....	17
2.7.1 หลักการพื้นฐานของการทำ Optimization.....	18
2.7.2 Concave Functions และ Convex Functions.....	21
2.7.3 คุณสมบัติควบคู่ (Duality).....	21
2.7.4 คุณสมบัติความเหมาะสม (Optimality).....	22
2.8 การปรับแต่งค่าตัวควบคุมโดยใช้หลักการค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของการอินทิเกรต (Tuning for Minimum Error Integral Criteria).....	25
2.9 สรุป.....	31
บทที่ 3 การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้การควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปร ร่วมกับวิธีการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี.....	32
3.1 โครงสร้างของกระบวนการ.....	32
3.1.1 โครงสร้างกระบวนการวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	32
3.1.2 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง.....	34
3.1.3 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำ.....	36
3.1.4 โครงสร้างการควบคุมคำสั่งการวาล์วควบคุมระดับน้ำป้อน.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปร.....	38
3.3 สมมติฐานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม.....	39
3.3.1 ตัวแปรควบคุมของการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงใน เงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation.....	40
3.3.2 ตัวแปรควบคุมของการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงใน เงื่อนไขของ On-Peak Mode Operation.....	41
3.4 วิธีการออกแบบแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดี (Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling) เพื่อใช้งานบนระบบแบบกระจายส่วนของ Yokokawa Centrum VP Version 5.02.00.....	42
3.4.1 การปรับแต่งค่าตัวควบคุมพีไอดี.....	42
3.4.2 การประเมินประสิทธิภาพของตัวควบคุมบนพื้นฐานของการพิจารณาค่า อินทิกรัล Integral Absolute Error (IAE).....	48
3.4.3 ออกแบบการแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดี.....	51
3.4.4 การเขียนฟังก์ชันการควบคุมเพื่อใช้งานการแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดี (Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling) เพื่อใช้ งานบนระบบ Yokokawa Centrum VP Version 5.02.00.....	52
3.5 สรุป.....	56
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	57
4.1 ตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปร.....	57
4.2 วิธีการทดลอง.....	59
4.2.1 หาค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ ความดันสูง ขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบ Off Peak Mode Operation.....	59
4.2.2 ทำการหาค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ ความดันสูง ขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบ On Peak Mode Operation.....	60

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 วิธีการแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดีเพื่อใช้ในเงื่อนไขโรงไฟฟ้าขณะมีการเดินเครื่อง แบบความต้องการใช้ไฟฟ้า หรือ On-Peak Mode Operation.....	64
4.4 ผลตอบสนองของระบบ.....	68
4.5 สรุปผลการทดลอง.....	69
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา.....	71
5.2 แนวทางการพัฒนา.....	72
บรรณานุกรม.....	73
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	75

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงการใช้ค่า $\alpha$ และ $\tau$ สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม.....	15
2.2 ค่าตัวแปรคงที่ที่กำหนดในสมการการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ.....	17
2.3 ตารางแสดงค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของการปรับแต่งตัวแปรอินทิกรัล โดยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตการรบกวน.....	29
2.4 ตารางแสดงค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของการปรับแต่งตัวแปรอินทิกรัล โดยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุต.....	30
3.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation.....	40
3.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On Peak Mode Operation.....	41
3.3 ตารางแสดงค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีของ 3-Element ที่มีใช้งานอยู่เดิม.....	42
3.4 ตารางแสดงถึงค่าพีไอดีที่มีการปรับแต่งในครั้งที่ 1.....	43
3.5 ตารางแสดงถึงค่าพีไอดีที่มีการปรับแต่งในครั้งที่ 2.....	45
3.6 ตารางแสดงถึงค่าพีไอดีที่มีการปรับแต่งในครั้งที่ 3.....	46
3.7 ตารางแสดงการปรับแต่งค่าควบคุมพีไอดี ทั้ง 3 ครั้ง.....	48
3.8 ตารางแสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลรายวินาทีในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ทั้ง 3 ครั้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่า IAE .....	48
3.9 ตารางแสดงการคำนวณหาค่า IAE ของค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่ใช้งานแต่ต้น.....	49
3.10 ตารางแสดงการคำนวณหาค่า IAE ของค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่ทำการปรับเปลี่ยนครั้งที่ 1..	49
3.11 ตารางแสดงการคำนวณหาค่า IAE ของค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่ทำการปรับเปลี่ยนครั้งที่ 2..	50
3.12 ตารางแสดงการคำนวณหาค่า IAE ของค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่ทำการปรับเปลี่ยนครั้งที่ 3..	50
3.13 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของค่าพีไอดีทั้ง 2 ชุด ในการใช้งานควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak และ On Peak Mode Operation.....	51
4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation.....	59
4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On Peak Mode Operation.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของค่าพีไอดีทั้ง 2 ชุด ในการใช้งานควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำ ความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak และ On Peak Mode Operation.....	64



## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมแบบวัฏจักรผสม .....	6
2.2 แผนภาพกระบวนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม.....	7
2.3 วัฏจักรเบรย์ตันที่ใช้ในการผลิตพลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ.....	8
2.4 เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบคู่ความร้อน.....	8
2.5 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกังหันไอน้ำ.....	9
2.6 วัฏจักรแรงคินที่ใช้ในการผลิตกำลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ.....	9
2.7 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน.....	10
2.8 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์.....	11
2.9 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์.....	11
2.10 แผนผังระบบควบคุมแบบเปิด.....	12
2.11 แผนผังระบบควบคุมแบบปิด.....	12
2.12 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างการควบคุมแบบแคสแคด.....	13
2.13 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....	13
2.14 การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบแคสแคด (Cascade Control) ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) ที่ใช้งานในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม.....	14
2.15 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการด้วยวิธีการผลตอบสนองขั้นบันไดของ Ziegler-Nichols.....	15
2.16 บล็อกไดอะแกรมของโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ.....	16
2.17 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง quadratic form และ hermitian form.....	20
2.18 Convex function และ Concave function.....	21
2.19 แสดงการทำ Linear Programing เพื่อหาจุดต่ำสุดและสูงสุด.....	22
2.20 ความสัมพันธ์ของ minima และ maxima.....	23
2.21 ฟังก์ชันที่ไม่สามารถหาค่าของอนุพันธ์ได้.....	24
2.22 ฟังก์ชันที่มีค่าของอนุพันธ์เป็นศูนย์ที่จุด $x=0$ .....	25
2.23 คำจำกัดความของค่าความผิดพลาดน้อยสุดของการอินทิเกรต สำหรับสัญญาณรบกวนและการเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมาย.....	2

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 แผนภาพโปรเสสบล็อกไดอะแกรมแบบง่ายที่เปรียบเสมือนกับอุปกรณ์เครื่องมือวัดและค่า กระบวนการถูกรวมอยู่ในบล็อกไดอะแกรมเดียวกัน.....	26
3.1 โครงสร้างการวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	33
3.2 โครงสร้างโปรแกรมและสร้างสัญญาณเตือนเมื่อระดับน้ำของหม้อต้มไม่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด.....	34
3.3 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง.....	35
3.4 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำ.....	36
3.5 SAMA Diagram ที่แสดงถึงโครงสร้างการทำงานวาล์วควบคุมทั้ง 2 ตัวของวาล์วควบคุมปริมาณน้ำ ป้อนของหม้อต้มไอน้ำความดันสูง.....	37
3.6 การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบคาสแคด (Cascade Control) ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) ที่ใช้งานในโรงไฟฟ้าพลัง ความร้อนร่วม.....	37
3.7 ค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation.....	39
3.8 ค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On-Peak Mode Operation.....	41
3.9 ระบบควบคุมพีไอดี แบบ 3-Element ไม่สามารถควบคุมค่าตัวแปรกระบวนการให้อยู่ในค่าเป้าหมาย ที่กำหนดได้ ในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation .....	43
3.10 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 1 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายใน การควบคุมจาก -50 เป็น -30 มิลลิเมตร.....	44
3.11 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 1 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายใน การควบคุมจาก -30 เป็น -50 มิลลิเมตร.....	44
3.12 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 2 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายใน การควบคุมจาก -50 เป็น -30 มิลลิเมตร.....	45
3.13 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 1 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายใน การควบคุมจาก -30 เป็น -50 มิลลิเมตร.....	46
3.14 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 2 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายใน การควบคุมจาก -50 เป็น -30 มิลลิเมตร.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 2 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมจาก -50 เป็น -30 มิลลิเมตร.....	47
3.16 การเขียนฟังก์ชันเงื่อนไขเพื่อให้เลือกใช้งานค่าตัวแปรพีไอดีที่เหมาะสมในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation และ On-Peak Mode Operation.....	53
3.17 แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ชุด ที่ถูกดาวน์โหลดเข้าไปในตัวควบคุมพีไอดีของหม้อต้มไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum).....	53
3.18 แสดงฟังก์ชันการเลือกใช้งานค่าควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ชุด ให้ตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดของการเดินเครื่องทั้งแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation และความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง หรือ On-Peak Mode Operation.....	54
3.19 แสดงถึง Faceplate ในการเลือกเพื่อที่จะอนุญาต ให้มีการใช้งานของฟังก์ชันการแบ่งค่าการควบคุมพีไอดี.....	55
3.20 แสดงให้เห็นถึงโลจิกการควบคุมที่เลือกใช้งานระหว่าง 1-Element และ 3-Element ของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum) ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโลจิกการควบคุมแต่อย่างใด.....	55
4.1 โลจิกการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงของโรงไฟฟ้าบางปะอิน แบบกระจายส่วนของบริษัท YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00.....	58
4.2 ค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation .....	59
4.3 ค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On-Peak Mode Operation .....	60
4.4 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -30 มม.....	61
4.5 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -30 มม. เป็น -50 มม.....	61
4.6 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -70 มม.....	62
4.7 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -70 มม. เป็น -50 มม.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ Xii อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงผลของค่าตัวแปรกระบวนการไม่สามารถควบคุมให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ ที่โรงไฟฟ้ามีการเลือกใช้งาน 3-Element Control ในช่วงของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง On Peak Mode Operation .....	63
4.9 การเขียนฟังก์ชันเงื่อนไขเพื่อให้เลือกใช้งานค่าตัวแปรพีเอิตีที่เหมาะสม ในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation และ On-Peak Mode Operation .....	65
4.10 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีเอิตีชุดที่ 2 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -30 มม...	66
4.11 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีเอิตีชุดที่ 2 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -30 มม. เป็น -50 มม...	66
4.12 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีเอิตีชุดที่ 2 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -70 มม...	67
4.13 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีเอิตีชุดที่ 2 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -70 มม. เป็น -50 มม...	67
4.14 แสดงการใช้งานตัวควบคุมพีเอิตี ชุดที่ 1 สำหรับใช้ในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation...	68
4.15 แสดงการใช้งานตัวควบคุมพีเอิตี ชุดที่ 2 สำหรับใช้ในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation...	69

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรงไฟฟ้าบางปะอินโคเจนเนเรชั่น จำกัด โครงการ 1 ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน เลขที่ 456 หมู่ 2 ตำบล คลองจิก อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม หรือ Combine Cycle Power Plant (CCPP) ชนิด Small Power Producer (SPP) ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้าติดตั้ง 117.5 เมกะวัตต์ และกำลังการผลิตไอน้ำ 20 ตันต่อชั่วโมง มีสัญญาซื้อขายไฟฟ้ากับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จำนวน 90 เมกะวัตต์ เป็นระยะเวลา 25 ปี นับจากวันที่เริ่มขายไฟเชิงพาณิชย์ (Commercial Operation Date: COD) โดยสัญญาซื้อขายไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าบางปะอินโคเจนเนเรชั่น จำกัด โครงการ 1 และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ดังกล่าวนั้นทางโรงไฟฟ้าบางปะอินโคเจนเนเรชั่น จำกัด โครงการ 1 จำเป็นต้องเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเพื่อขายไฟฟ้าจำนวน 59 MW ขณะที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation และต้องขายไฟฟ้าจำนวน 90 MW ขณะที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง หรือ On Peak Mode Operation

ซึ่งในเงื่อนไขของการเดินเครื่องที่โหมดการขายไฟฟ้าแตกต่างกันนั้น ส่งผลให้เงื่อนไขของการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum) ไม่สามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ โดยวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ ได้ทำการดัดแปลงตัวควบคุมที่มีอยู่แล้วด้วยวิธีการ “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling” บนระบบควบคุมอัตโนมัติของบริษัท YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00 โดยการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมพีไอดีของระบบควบคุมเพื่อใช้ในการวัดและควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้คงที่ตามค่าเป้าหมายที่กำหนด

ซึ่งผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การแบ่งตัวแปรควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling” นั้นสามารถทำการควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงสามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนด และสอดคล้องกับหลักการที่นำเสนอ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปร ร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยใช้วิธีการการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling” เพื่อใช้สำหรับควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม โดยค่าตัวแปรดังกล่าวประกอบไปด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำความดันสูง (High Pressure Steam Flow Outlet), อัตราการไหลเข้าของน้ำป้อน (High Pressure Feed Water Flow Inlet) และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ (High Pressure Drum Level) ใช้วิธีการของซิกเลอร์-นิโคลส์สำหรับคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้างของระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมชนิดคาสแคดร่วมสามตัวแปร (3 Element Control)

1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบและโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอดีชนิดคาสแคดร่วมสามตัวแปร เพื่อใช้สำหรับควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้ได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนด ทั้งในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation และ On-Peak Mode Operation โดยใช้หลักการของ “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling”

1.2.3 ดัดแปลงตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้หลักการ “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling” ที่มีการเชื่อมโยงแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปร ด้วยโปรแกรมระบบควบคุมแบบกระจายส่วน YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00 เพื่อทดสอบสมรรถนะของกระบวนการ และทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการตามหลักการของซิกเลอร์นิโคลส์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 ตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคดร่วมสามตัวแปร ที่ใช้ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงที่มีตัวควบคุมพีไอดีใช้งานอยู่เพียงชุดเดียวนั้น ไม่สามารถใช้งานในการควบคุมระดับน้ำได้ทั้งสองเงื่อนไขของการเดินเครื่อง คือความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ (Off-Peak Mode Operation) และความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง (On-Peak Mode Operation)

1.3.2 วิธีการการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี โดยใช้หลักการของ “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling” เพื่อควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงชนิดคาสแคดร่วมสามตัวแปรสามารถใช้ควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

ทำการวิจัยโดยการศึกษา ออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง โดยการใช้งานตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคดร่วมสามตัวแปรออกแบบร่วมกับวิธีการควบคุมแบบ Optimization ซึ่งสอดคล้องและเป็นไปตามเนื้อหาของงานวิจัยนี้คือ “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling” สำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม วัตถุประสงค์เพื่อควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดทั้งสองเงื่อนไขของการเดินเครื่อง คือความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ (Off-Peak Mode Operation) และความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง (On-Peak Mode Operation)ภายใต้เงื่อนไขของการดำเนินการที่ปลอดภัย และสอดคล้องกับกระบวนการเดินเครื่องผลิตไฟฟ้า

## 1.5 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

หลักการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง ด้วยวิธีการควบคุมชนิดพีไอดีแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปร (3 Element Control) โดยอาศัยวิธีการของการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling” สำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ซึ่งทั้งสามตัวแปรดังกล่าว ประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำ และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง เพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง ให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดในทุก ๆ เงื่อนไขของการเดินเครื่อง คือสามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ ทั้งการเดินเครื่องในเงื่อนไขของความ ต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ (Off-Peak Mode Operation) และความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง (On-Peak Mode Operation)

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.6.1 สามารถเข้าใจถึงวิธีการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง ที่มีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคดร่วมสามตัวแปร เพื่อควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้

1.6.2 สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคดร่วมสามตัวแปร เพื่อใช้ในการควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดในเงื่อนไขของการเดินเครื่องทั้ง Off-Peak Mode Operation และ On-Peak Mode Operation โดยอาศัยหลักการของการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling”

## 1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยและนำเสนอการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ความดันสูง สำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคดร่วมสามตัวแปร โดยอาศัยหลักการของ “Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling” เพื่อให้สามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ ทั้งในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation และ On-Peak Mode Operation ซึ่งวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยเนื้อหา ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา, ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา, สมมติฐานของการศึกษา, ขอบเขตการวิจัย, ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์, ประโยชน์ที่ได้รับ, และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้การควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปร ร่วมกับวิธีการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม และอธิบายถึงการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง ซึ่งในที่นี้จะใช้การควบคุมระดับน้ำ ที่มีการควบคุมแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปร เพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด ซึ่งค่าตัวแปรดังกล่าวประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ, อัตราการไหลเข้าของน้ำป้อน และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมระดับน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมตลอดจนพื้นฐานของตัวควบคุมพีไอดี โดยความมุ่งหมายของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมคือ การนำเอาเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine Power Plant) และโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ (Steam Turbine Power Plant) มาใช้งานเป็นระบบร่วมกัน โดยการนำเอาไอเสีย (Exhaust Gas) จากโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ ซึ่งมีความร้อนสูงไปผ่านเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน (Heat Recovery Steam Generator: HRSG) และถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำแล้วนำไอน้ำที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อนนั้นมาขับผ่านเครื่องกังหันไอน้ำสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาการทำงานของกระบวนการเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบวิธีการวัดและออกแบบตัวควบคุม ที่จะใช้ควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

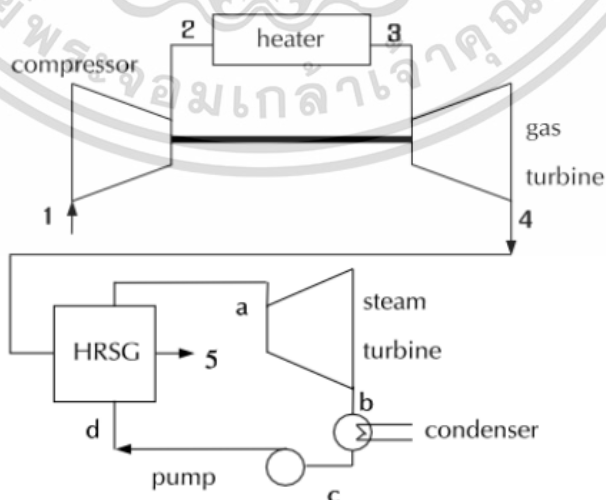
โรงไฟฟ้าบางปะอินโคเจนเนอเรชัน นั้นเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมขนาดเล็ก ที่ได้รับสัญญาการซื้อขายไฟฟ้ากับทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่มีสัญญาการซื้อขายไฟฟ้าเป็น Small Power Producer (SPP) แบบยืนยันรับรองการขายไฟฟ้า (Firm contract) ตลอดระยะเวลา 25 ปีของสัญญาซื้อขายไฟฟ้านับจากวันที่เริ่มเดินเครื่องเชิงพาณิชย์ โดยสัญญาซื้อขายไฟฟ้าดังกล่าวนั้น โรงไฟฟ้าบางปะอินโคเจนเนอเรชัน จำกัด โครงการ 1 จำเป็นต้องเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเพื่อขายไฟฟ้าจำนวน 59 MW ขณะที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation และต้องขายไฟฟ้าจำนวน 90 MW ขณะที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง หรือ On Peak Mode Operation โดยวันและเวลาของการเดินเครื่องใน Off-Peak และ On-Peak Mode Operation นั้นเป็นดังนี้

	ระยะเวลา	กำหนดเป็น
วันจันทร์ – วันเสาร์ ยกเว้นวันหยุดพิเศษ	08:00 – 24:00 น.	On-Peak
วันจันทร์ – วันเสาร์ ยกเว้นวันหยุดพิเศษ	24:00 – 08:00 น.	Off-Peak
วันอาทิตย์ และวันหยุดพิเศษ	00:00 – 24:00 น.	Off-Peak

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

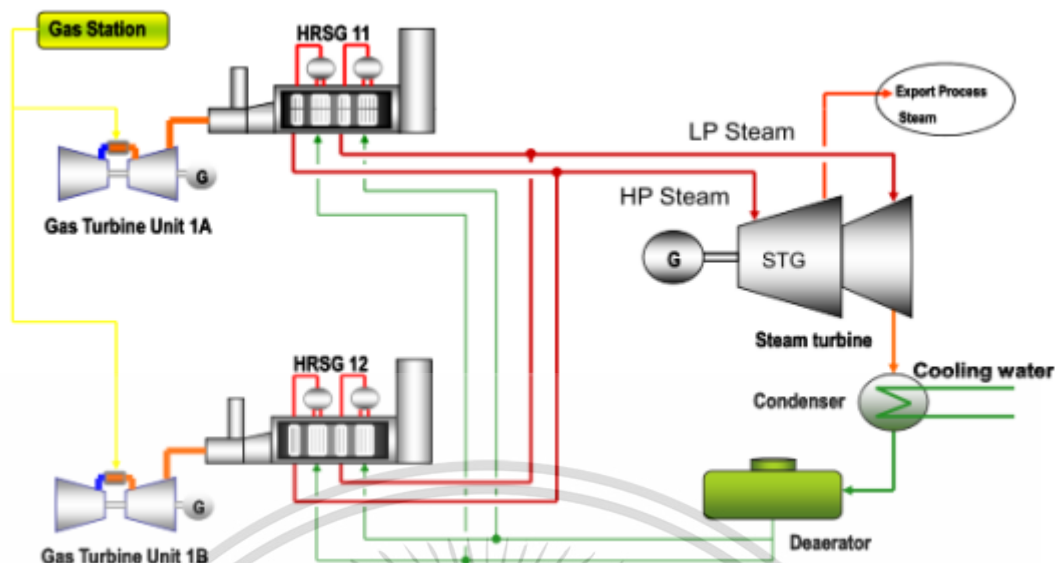
## 2.1 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combine Cycle Power Plant)

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า มีการทำงาน 2 ระบบร่วมกัน คือระบบโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine: GT) ที่ผลิตกำลังงานโดยใช้วัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton Cycle) และกังหันไอน้ำ (Steam Turbine: ST) ที่ผลิตกำลังงานโดยใช้วัฏจักรแรงคิน (Rankine Cycle) เข้าเป็นระบบเดียวกัน โดยการนำเอาก๊าซร้อนที่ออกจากเครื่องกังหันก๊าซป้อนเข้าสู่เตาเผาของหม้อต้มความดันไอน้ำ เพื่อต้มน้ำให้เกิดไอน้ำแล้วนำไอน้ำนั้นไปขับเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อให้เกิดการทำงานขึ้น ซึ่งการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมจะสอดคล้องกับวัฏจักรผสม ดังรูปที่ 2.1 โดยความร้อนที่ออกจากวัฏจักรเบรย์ตันจะใช้ในวัฏจักรแรงคินโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน (Heat Recovery Steam Generator: HRSG) โดยมีการทำงานดังนี้คือ เชื้อเพลิงก๊าซจะถูกส่งเข้าไปยังห้องเผาไหม้โดยอุปกรณ์เพิ่มความดันก๊าซ (Gas Compressor) เพื่อนำไปผสมกับอากาศที่ถูกอัดด้วยความดันสูงประมาณ 25 – 35 เท่าจากเครื่องอัดอากาศกังหันก๊าซ (Gas Turbine Compressor Blade) เพื่อนำก๊าซและอากาศที่ถูกอัดมาผสมกันและจุดระเบิดที่ห้องเผาไหม้ของเครื่องกังหันก๊าซ (Gas Turbine Combustor) จากนั้นเครื่องกังหันก๊าซจะเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากห้องเผาไหม้ กลายเป็นพลังงานกลเพื่อต่อร่วมกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ที่ต่ออยู่บนเพลลาเดียวกัน ส่วนก๊าซร้อนที่ขับดันกังหันก๊าซแล้วและถูกส่งออกไปยังเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน เพื่อนำความร้อนนี้ไปต้มน้ำที่หม้อน้ำ โดยน้ำที่ถูกต้มจะกลายเป็นไอน้ำความดันสูงไปขับกังหันไอน้ำ เพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นเดียวกัน และเมื่อไอน้ำความดันลดลงก็จะถูกส่งเข้าไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งจะระบายความร้อนของไอน้ำด้วยน้ำจากหอหล่อเย็น (Cooling Tower) โดยไอน้ำจะถูกควบแน่นเป็นน้ำและถูกปั๊มส่งผ่านไปยังถังพักน้ำเพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำต่อไป ซึ่งแผนภาพการบวนการผลิตดังกล่าวแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.2 โดยหน่วยการผลิตหลักๆในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมมีดังนี้



รูปที่ 2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมแบบวัฏจักรผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

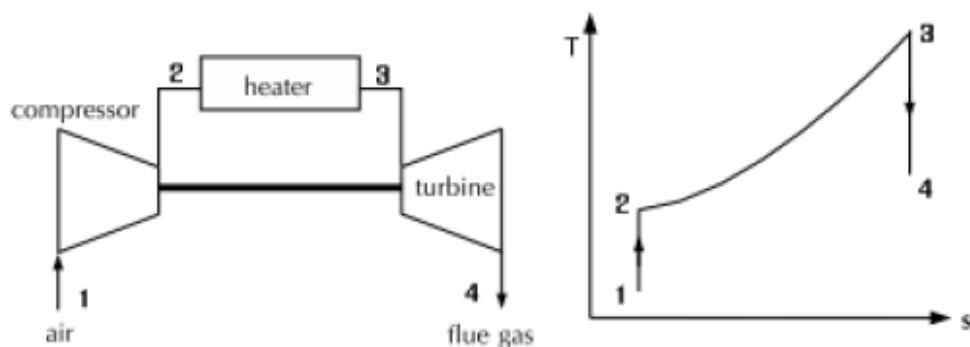


รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม

### 2.1.1 หน่วยผลิตไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine: GT)

อุปกรณ์หลักประกอบด้วยเครื่องกังหันก๊าซและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ทำงานโดยอาศัยก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นตัวขับเคลื่อนใบพัดของเครื่องกังหันก๊าซให้หมุน (Gas Turbine Blade) ชิ้นส่วนหลักของเครื่องกังหันก๊าซประกอบด้วยเพลลาซึ่งมีชุดใบพัดติดตั้งอยู่หลายชุดสำหรับอัดอากาศให้มีความหนาแน่นและความดันเพิ่มขึ้นประมาณ 25 – 35 เท่าจากอากาศในบรรยากาศทั่วไป โดยชุดใบพัดเหล่านี้เรียกว่าเครื่องอัดอากาศ (Gas Turbine Compressor) ก่อนที่จะเข้าเครื่องอัดอากาศนี้ อากาศจะถูกกรองด้วยเครื่องกรองอากาศ (Air Filter House) และเมื่อถูกอัดเพิ่มความดันแล้ว จะถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้ (Gas Turbine Combustor) ร่วมกับเชื้อเพลิงซึ่งเป็นก๊าซ และใช้หัวเทียนเป็นตัวจุดระเบิด เมื่อเชื้อเพลิงติดไฟจะเกิดการเผาไหม้กลายเป็นก๊าซร้อนที่มีการขยายตัวสูง ถูกส่งออกจากห้องเผาไหม้ไปขับเคลื่อนชุดใบพัดอีกชุดหนึ่งซึ่งเรียกว่าเครื่องกังหัน (Gas Turbine Blade) ซึ่งติดตั้งบนเพลลาเดียวกันกับเครื่องอัดอากาศให้หมุน โดยการถ่ายเทพลังงานจะเป็นกระบวนการต่อเนื่อง และสอดคล้องกับวัฏจักรเบรย์ตัน ดังรูปที่

2.3



รูปที่ 2.3 วงจรเบรย์ตันที่ใช้ในการผลิตพลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ

### 2.1.2 หน่วยผลิตไอน้ำ (Heat Recovery Steam Generator: HRSG)

หน่วยผลิตไอน้ำหรือ เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อนทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำเป็นไอน้ำยิ่งยวดโดยใช้ความร้อนจากก๊าซเสียที่ได้จากเครื่องกังหันก๊าซ โดยเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน ดังรูปที่ 2.4 โครงสร้างประกอบขึ้นจากโครงเหล็กที่แข็งแรง ภายในติดตั้งท่อเหล็กทนความร้อน หลากหลายชุด ซึ่งเป็นทางผ่านของก๊าซเสียจากเครื่องกังหันก๊าซที่ปล่อยเข้ามาในหม้อต้มน้ำ น้ำและไอน้ำ จะไหลเวียนเข้ามารับความร้อนภายในท่อ ภายนอกหม้อน้ำจะเชื่อมปิดหมดเพื่อไม่ให้ก๊าซร้อนรั่วออก ทิศทางการไหลของก๊าซร้อนในหม้อน้ำอาจจะบังคับด้วยพัดลมชนิดดูดหรือเป่า หรือปล่อยให้ไหลตามธรรมชาติลอยขึ้นเบื้องบน แล้วออกทางปล่องขึ้นกับการออกแบบ

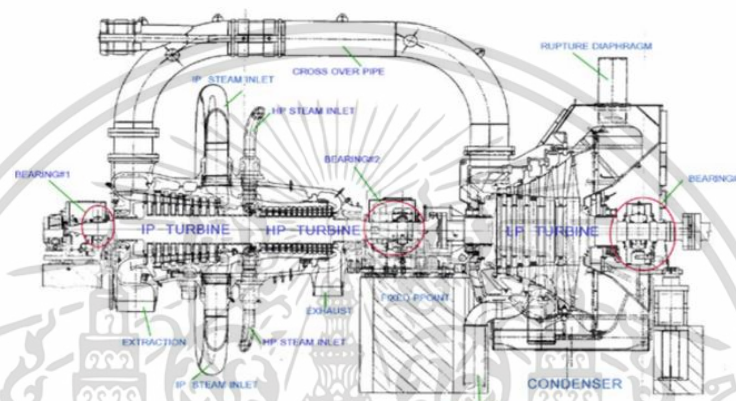


รูปที่ 2.4 เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน

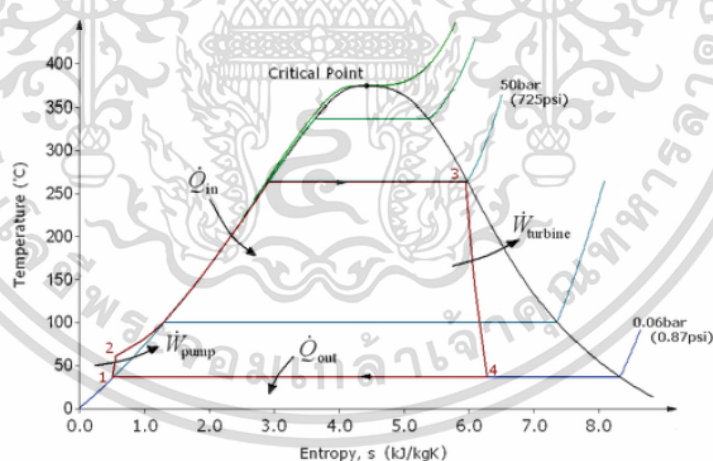
### 2.1.3 หน่วยผลิตไฟฟ้าเครื่องกังหันไอน้ำ (Steam Turbine)

เครื่องกังหันไอน้ำโดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่เป็นส่วนที่ไม่มีการหมุน ได้แก่ กรอบนอก (Casing) ซึ่งเป็นเปลือกนอกที่ห่อหุ้มชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องกังหัน และ ส่วนหมุนเป็นส่วนที่มีการหมุนโดยมีเพลลาเป็นแกนกลางและมีใบพัดหลายชุดยึดติดอยู่บนเพลลา เมื่อไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูงฉีดมาปะทะใบพัดก็ผลักดันให้เกิดการหมุน ดังรูปที่ 2.5 เครื่องกังหันไอน้ำที่เมื่อการหมุนเร็วเกินไป อาจทำให้การไหลของน้ำไม่สม่ำเสมอและทำให้เกิดการสั่นไหวได้ ซึ่งอาจทำให้เครื่องเสียหายได้ การออกแบบเครื่องกังหันไอน้ำต้องคำนึงถึงทั้งการไหลของน้ำและการสั่นไหวของเครื่องกังหันไอน้ำ

ไอน้ำจะมีสอง 2 ส่วน คือความดันสูง (HP Turbine) และความดันต่ำ (LP Turbine) ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบวงจรผลิตและการไหลเวียนของไอน้ำที่ผลิตกำลังงานโดยใช้วัฏจักรแรงคิน ดังรูปที่ 2.6 ไอน้ำความดันสูงและความดันต่ำจะไหลเข้ากั้นความดันสูงและกั้นความดันต่ำตามระดับและรวมกันออกด้านล่างเข้าสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) โดยที่ระบบวัฏจักรแรงคินจะกล่าวถึงกระบวนการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งการเปลี่ยนแปลงจากน้ำเป็นไอน้ำนั้นจะแปรผันกับอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) และ ค่าเอนโทรปี ( $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}^{-1}$ ) โดยที่ระดับแรงดันไอน้ำที่ได้จะแปรผันตามแผนภาพอุณหภูมิและเอนโทรปี (Temperature-entropy diagram: T-S Diagram)



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกังหันไอน้ำ



รูปที่ 2.6 วัฏจักรแรงคินที่ใช้ในการผลิตกำลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

## 2.2 ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller)

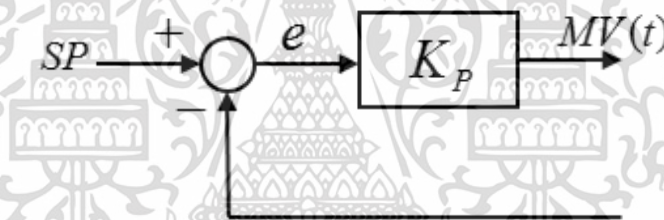
รูปแบบโครงสร้างของตัวควบคุมที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับควบคุมค่ากระบวนการคือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อินทิกรัล-อนุพันธ์ (PID controller) เรียกสั้นๆว่า ตัวควบคุมพีไอดี เนื่องจากง่ายต่อการทำความเข้าใจ และมีเสถียรภาพ ค่าที่จะนำไปคำนวณเป็นค่าความผิดพลาด ซึ่งได้จากค่าความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการจะควบคุม โดยตัวควบคุมจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พยายามลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ โดยสมรรถนะของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆข้างต้น ดังนั้นวิธีการคำนวณหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุม เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพสูงสุด เรียกว่า การจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (PID control tuning) ซึ่งปัญหาที่สำคัญยิ่งในการหา ค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่เหมาะสมนั้น เรียกว่าวิธีการจูนค่าพารามิเตอร์ โดยพื้นฐานแล้ววิธีที่นิยมใช้ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่เหมาะสมนั้นมักจะใช้วิธีการของ Ziegler-Nichols เป็นต้น

### 2.2.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน คือ ตัวควบคุมที่นำค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิง หรือ ค่าเป้าหมาย กับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม จากนั้นตัวควบคุมจะทำการสร้าง สัญญาณกระตุ้น (Manipulated Variable) ด้วยการขยายค่าสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่า เกนของตัวควบคุม ทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบ ลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงที่ ของระบบการทำงาน ดังสมการที่ 1

$$MV(t) = K_P e(t) \quad (1)$$



รูปที่ 2.7 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

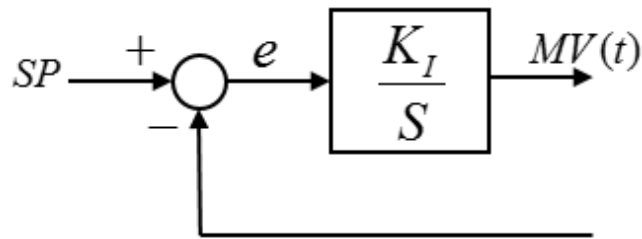
### 2.2.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Controller)

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ คือ ตัวควบคุมที่นำค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิง หรือ ค่าเป้าหมาย กับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้าง สัญญาณกระตุ้นด้วยการอินทิเกรตค่าสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว และคูณด้วยค่าเกนของตัว ควบคุม โดยจะทำให้ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงที่ของระบบลดต่ำลงจนสามารถกลับสู่สภาวะปกติ มีผลให้ความเร็วในการตอบสนองของระบบลดลง ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลงตามสมการที่ 2 และ อยู่ในเทอมของค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายปริพันธ์ ( $T_i$ ) หน่วยวินาที ดังสมการที่ 3

$$MV(t) = K_I \int e(t) dt \quad (2)$$

$$MV(t) = \frac{K_P}{T_i} \int e(t) dt \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



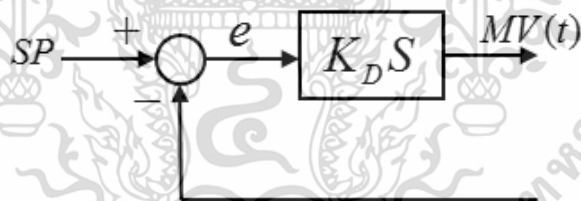
รูปที่ 2.8 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์

### 2.2.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Controller)

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ คือ ตัวควบคุมที่นำเอาค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย กับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณกระตุ้น ด้วยการอนุพันธ์ค่าสัญญาณความผิดพลาดข้างต้น แล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพมากขึ้น และเพิ่มค่าอัตราส่วนความหน่วงให้กับระบบการทำงานตามสมการที่ 4 และ อยู่ในเทอมของค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายอนุพันธ์ ( $T_d$ ) หน่วยวินาที ดังสมการที่ 5

$$MV(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

$$MV(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$



รูปที่ 2.9 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

## 2.3 ระบบควบคุมพีไอดี (Open & Close loop)

ระบบควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System) และระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System)

### 2.3.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System)

ระบบควบคุมแบบเปิด คือการควบคุมแบบเปิดเอาต์พุตของระบบจะไม่ถูกวัดหรือป้อนกลับมาเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุต เป็นระบบที่เอาต์พุตจะไม่มีผลต่อการควบคุมเลยในทางปฏิบัติแล้วจะสามารถใช้การควบคุมแบบเปิดได้ ถ้าทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุตของระบบ

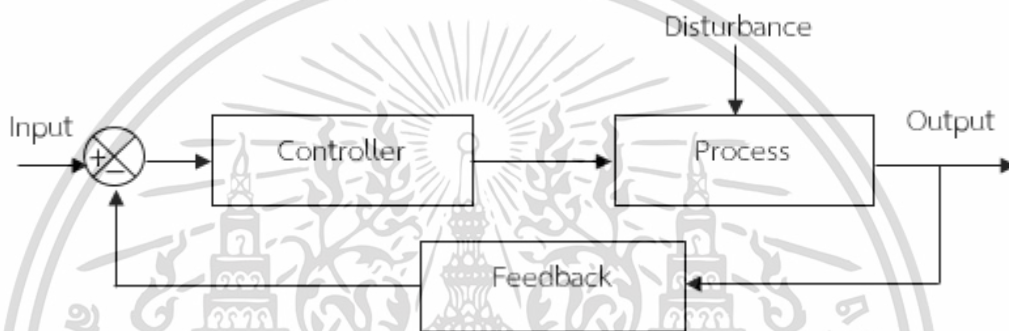
โดยที่จะต้องไม่มีการรบกวนต่อระบบเท่านั้น ดังรูปที่ 2.10  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนผังระบบควบคุมแบบเปิด

### 2.3.2 ระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System)

ระบบควบคุมแบบปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นระบบควบคุมที่เอาต์พุตส่งสัญญาณป้อนกลับ (Feedback Signal) ซึ่งจะมาเปรียบเทียบกับอินพุตเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ (Error) ที่ส่งให้กับตัวควบคุม (Controller) เพื่อสร้างสัญญาณกระตุ้นเพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady Error) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนผังระบบควบคุมแบบปิด

## 2.4 เทคนิคการวัดและการควบคุม (3 Element Control)

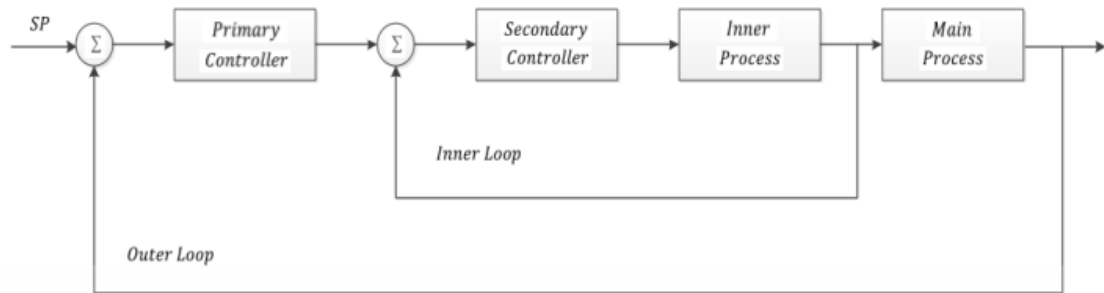
ในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงนั้น จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปร ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ, อัตราการไหลเข้าของน้ำป้อน และระดับน้ำภายในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง เพื่อความไวในการตอบสนองของระบบที่เปลี่ยนแปลง และเพื่อลดความผิดพลาดในการควบคุมค่ากระบวนการให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด โดยการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงนั้นจะมีการควบคุมร่วมกันระหว่าง 2 ชุดการควบคุม ได้แก่ การควบคุมแบบคาสแคด (Cascade Control) และการควบคุมแบบป้อนไปด้านหน้า (Feed Forward Control) ซึ่งมี Loop การควบคุมหลักคือ Cascade Control แล้ววัดเอาค่าแปรปรวนของระบบ (Disturbance) ของระบบเข้ามาทำการประมวลผลล่วงหน้า โดยใช้การควบคุมแบบ Feed Forward Control

### 2.4.1 การควบคุมแบบคาสแคด

การควบคุมแบบคาสแคดเป็นเทคนิคการควบคุมหนึ่ง que พบแพร่หลายในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งมักจะพบในลักษณะการควบคุมที่มีระบบสองระบบอนุกรมกัน โดยปัจจัยของตัวแปรกระบวนการที่ตอบสนองสัญญาณรบกวนได้ช้า นั้นหมายความว่าตัวแปรกระบวนการ (Process Variable: PV) มีโอกาสเบี่ยงเบนจากสมดุลนานขึ้น โครงสร้างของการควบคุมแบบคาสแคดก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

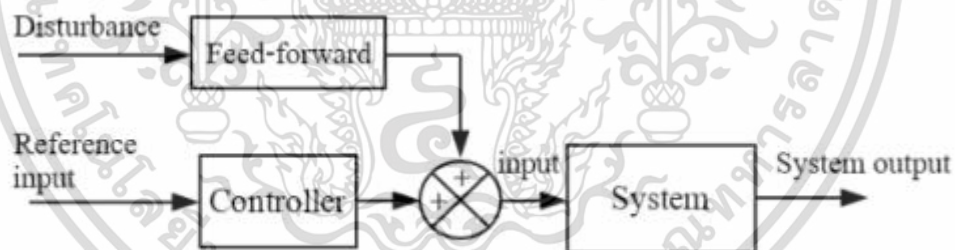
ประกอบด้วยลูปการควบคุม 2 ลูปซ้อนเรียงกัน โดยลูปที่เพิ่มขึ้นจากปกติจะเรียกลูปนี้ว่า ลูปรองหรือลูปทุติยภูมิ (Secondary loop) แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างการควบคุมแบบแคสแคด

#### 2.4.2 การควบคุมแบบป้อนไปด้านหน้า (Feed Forward Control)

การควบคุมแบบป้อนไปด้านหน้า (Feed-forward Control) เป็นการควบคุมที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การควบคุมปกติในสถานะที่มีการรบกวน (Disturbance) ดังรูปที่ 2.13 โดยระบบรับสัญญาณอ้างอิง (Reference input,  $r(t)$ ) ผ่านกล่องการควบคุม (Controller) และ รวมสัญญาณกับสัญญาณการรบกวนผ่านกล่องป้อนไปด้านหน้า (Feed-forward) เพื่อคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนแล้วทำการปรับแต่งหรือเพิ่มพารามิเตอร์ ก่อนที่จะส่งไปที่จุดรวมสัญญาณ (Comparator) ทำให้ สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณควบคุม (System input หรือ Control signal) ป้อนเข้าสู่ระบบพลวัต (Plant, Dynamic systems) และได้ผลตอบสนองของระบบที่ทางออก(System output)

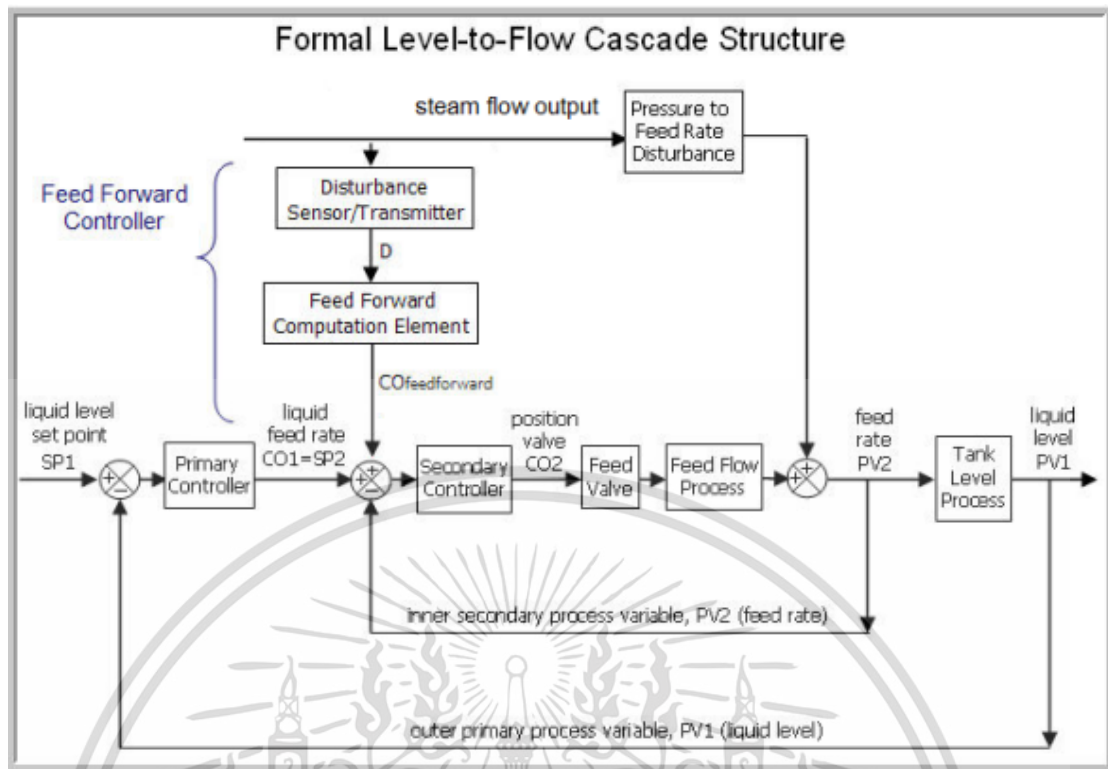


รูปที่ 2.13 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

2.4.3 การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้หลักการควบคุมแบบแคสแคด (Cascade Control) ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control)

ในการใช้งานจริงของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมนั้น จะนิยมมากในการใช้เทคนิคการควบคุมแบบแคสแคด (Cascade Control) ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) เพื่อความไวในการตอบสนองของระบบที่เปลี่ยนแปลง และเพื่อลดความผิดพลาดในการควบคุมค่ากระบวนการให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด โดยสามารถเขียนเป็นแผนผังการควบคุมดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

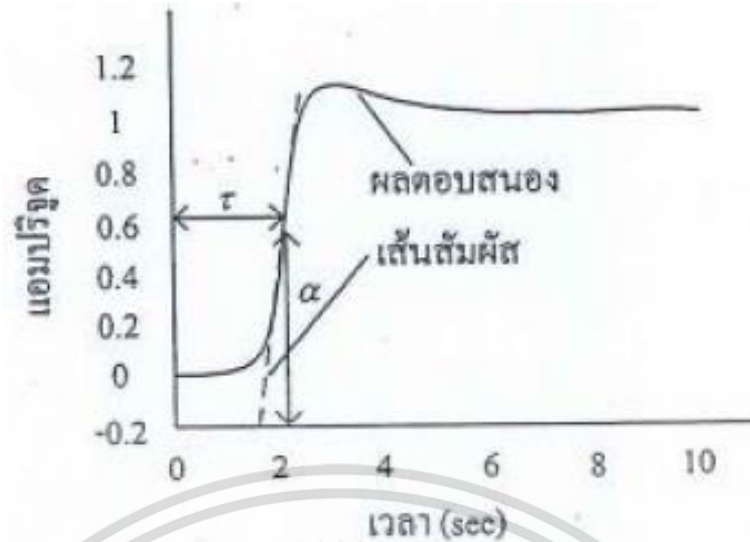


รูปที่ 2.14 การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบคาสเคด (Cascade Control) ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) ที่ใช้งานในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม

## 2.5 เทคนิคการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ควบคุมพีไอดี

### 2.5.1 วิธีการ Ziegler-Nichols

วิธีการผลตอบสนองความถี่และผลตอบสนองขั้นบันไดของ Ziegler-Nichols เป็นวิธีการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดีแบบเดิม ที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นพื้นฐานของการจูนตัวควบคุม วิธีการผลตอบสนองขั้นบันไดอาศัยหลักการทดลองผลตอบสนองลูฟเปิดของกระบวนการ ซึ่งต้องการให้กระบวนการมีเสถียรภาพ พฤติกรรมของผลตอบสนองขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของกระบวนการระบุได้ด้วยพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $\tau$  พารามิเตอร์ทั้งสองคำนวณได้ด้วยการเขียนเส้นสัมผัสที่จุดไม่โค้งงอ นั่นก็คือ จุดที่ความชันของผลตอบสนองของขั้นบันไดมีค่าสูงสุด จุดตัดของเส้นสัมผัสบนแกนพิกัดทางเวลา จะได้พารามิเตอร์ของกระบวนการดังรูปที่ 2.15 จากนั้นใช้ค่า  $\alpha$  และ  $\tau$  สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังตารางที่ 2.1



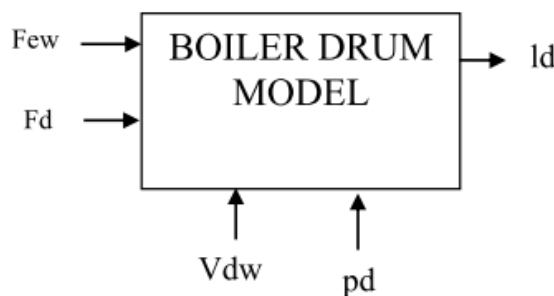
รูปที่ 2.15 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการด้วยวิธีการผลตอบสนองขั้นบันไดของ Ziegler-Nichols

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการใช้ค่า  $\alpha$  และ  $\tau$  สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ตัวควบคุม	$K_p$	$T_i$	$T_d$
พี	$\frac{1}{\alpha}$		
พีไอ	$\frac{0.9}{\alpha}$	$3\tau$	
พีไอดี	$\frac{1.2}{\alpha}$	$2\tau$	$\frac{\tau}{2}$

2.6 โมเดลทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ

สมการการโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง ถูกเขียนอยู่ในรูปของสมการการอนุรักษ์มวลและพลังงาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมของโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 สมการการอนุรักษ์มวลและพลังงาน

การควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำ  $l_d$  มีการตอบสนองจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลออกของไอน้ำ  $F_d$  และอัตราการไหลของน้ำป้อน  $F_{ew}$  โดยทั่วไปโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ นั้นถูกอธิบายด้วยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในหม้อต้มไอน้ำ  $V_{dw}$  ในด้านของสมการการอนุรักษ์มวลและพลังงาน โดยความสัมพันธ์ที่แยกระหว่างปริมาตรภายในหม้อต้มไอน้ำ  $V_{dw}$  และระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำ  $l_d$  คือได้มาจากการแก้สมการเรขาคณิตโดยใช้ทฤษฎีของวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) เพื่อคำนวณหาระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำ  $l_d$  โดยสมการการอนุรักษ์มวลและพลังงาน สำหรับหม้อต้มไอน้ำ มีที่มาดังนี้

#### สมการการอนุรักษ์มวล (Mass Balance)

อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของไอน้ำและน้ำในหม้อต้มไอน้ำ มีค่าเท่ากับ อัตราการไหลเข้าของน้ำป้อน ( $F_{ew}$ ) ลบด้วยอัตราการไหลออกของไอน้ำ ( $F_d$ ) ดังถูกเขียนในสมการที่ (6)

$$\frac{d}{dt} [(V_d - V_{dw}) \rho_d + V_{dw} \rho_{dw}] = F_{ew} - F_d \quad (6)$$

#### สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Balance)

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของไอน้ำและน้ำในหม้อต้มไอน้ำ มีค่าเท่ากับ ค่าพลังงานรวมของไอน้ำและน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ลบด้วยค่าพลังงานไอน้ำในหม้อต้มไอน้ำ และลบด้วยค่าพลังงานน้ำในหม้อต้มไอน้ำ ดังถูกเขียนในสมการที่ (7)

$$\frac{d}{dt} [(V_d - V_{dw}) \rho_d h_d + V_{dw} \rho_{dw} h_{dw}] = F_D h_w - (F_D - F_{ew}) h_{dw} - F_D h_d \quad (7)$$

สมการอนุพันธ์ที่ได้คือ

$$\frac{d\rho_d}{dt} = \frac{1}{q_2 q_4 \rho_{dw}} \{ \rho_d F_{ew} - \rho_{dw} F_d + X_q F_D (\rho_{dw} - \rho_d) \} \quad (8)$$

$$\frac{dV_{dw}}{dt} = \frac{1}{q_4 \rho_{dw}} \{ (1 + q_3) F_{ew} - q_3 F_d + X_q F_D h_{ew} l_d \rho_d T_d \} \quad (9)$$

เมื่อ  $X_q$  คือค่าคุณภาพของไอน้ำ

การคำนวณค่าระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ ( $l_d$ ) โดยใช้วิธี Newton-Raphson สามารถแสดงได้ในสมการที่ (10)

$$l_d(k+1) = l_d(k) - \frac{f(l_d(k))}{f'(l_d(k))} \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวแปรคงที่ที่กำหนดในสมการการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ

Variables	Description	Value	Unit
$\rho_d$	Density of drum steam	$8.221 \times 10^{-5}$	Kg/cm <sup>3</sup>
$\rho_{dw}$	Density of water in drum	$63.097 \times 10^{-5}$	Kg/sec
Few	Feedwater flow	163.5023	Kcal/kg
hew	Enthalpy of feedwater	131.97	Kg/sec
Fd	Steam flow from drum	175.014	Kg/sec
ld	Drum level	88.90	Cm
pd	Steam pressure in the drum	176.8	Kg/cm <sup>2</sup>
Td	Saturated steam temperature	354	°C
Xq	Steam quality	0.95	-
$\delta_{hd}$	Gradient of drum steam enthalpy	-657954.52	Kcal-cm <sup>3</sup> /Kg <sup>2</sup>
$\delta_{hdw}$	Gradient of water enthalpy at drum Conditions	1128547.11	Kcal-cm <sup>3</sup> /Kg <sup>2</sup>
$\delta_{\rho_{dw}}$	Gradient of drum steam density	-2.0132	-
Vd	Volume of drum	40185469.46	cm <sup>3</sup>
Vdw	Drum water volume	20092734.73	cm <sup>3</sup>
l	Length of drum	1500	cm
r	Radius of drum	88.9	cm

## 2.7 หลักการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม (Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling)

การทำ optimization เกิดขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ออกมาเหมาะสมที่สุด ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มาจากหลักพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของระบบนั้น ๆ ก่อนปี ค.ศ. 1940 วิธีที่ใช้ในการทำ optimization ของฟังก์ชันที่มีหลายตัวแปรนั้นมีไม่มากนัก เช่น การทำ least square ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านฟิสิกส์บางประเภท แต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับ คือการทำ newton method ซึ่งถูกนำมาใช้กับปัญหาของระบบที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางเคมี ในช่วงปี ค.ศ. 1940 – ค.ศ. 1950 มีการแนะนำสาขาใหม่ทางด้าน optimization ที่เรียกกันว่า กำหนดการเชิงเส้น (linear programming) จากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง จนถึงปัจจุบันนี้ได้มีการนำวิธีการทำ optimization มาใช้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์, วิศวกรรมศาสตร์, คณิตศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น

ในปัจจุบันนี้การทำ optimization ไม่ได้จำกัดอยู่แค่สาขาวิชาทางด้านวิศวกรรม แต่กลายมาเป็นสิ่งสำคัญในทุก ๆ สาขาวิชา โดยเฉพาะทางด้านเศรษฐศาสตร์ การทำ optimization ถือว่ามีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมีการนำหลักการของการทำ optimization มาช่วยในเรื่องของเงินทุนและผลกำไร เช่น การลดต้นทุนการผลิตและการเพิ่มผลผลิต เป็นต้น สำหรับในด้านอื่นๆ เช่น สาขาทางด้านการบินและยานอวกาศ มีการใช้หลักการของ optimization เพื่อหาเส้นทางการบินจาก

โลกไปที่ดวงจันทร์และกลับลงมายังโลกอีกครั้ง โดยใช้เชื้อเพลิงให้น้อยที่สุด หรือการหาโครงสร้างของเครื่องบินที่มวลน้อยที่สุด เป็นต้น

สำหรับในภาคอุตสาหกรรมนั้น การตัดสินใจที่จะปรับปรุงให้ได้สิ่งที่ดีที่สุด เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นให้เห็นอยู่บ่อยครั้ง ตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตทั้งหมด, การลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งผู้จัดการต้องมีการวางแผนการทำงานที่ดีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ ให้ได้ตามที่ต้องการ และในทางเดียวกัน วิศวกรต้องออกแบบระบบใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยลง บางปัญหาที่เกิดขึ้นกลายเป็นเรื่องยุ่งยากขึ้นมาเมื่อผู้จัดการหรือวิศวกรพบกับทางเลือกมากมายในการแก้ไขปัญหาเหล่านั้น และจะอย่างไรถึงจะสามารถเลือกทางที่ให้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการและดีที่สุด

### 2.7.1 หลักการพื้นฐานของการทำ Optimization

การทำ optimization สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลายสาขาวิชาดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยหลักการแล้วการทำ optimization เป็นขบวนการทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่ง ซึ่งจะให้ผลในเชิงปริมาณ (quantity) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจำนวน หรือค่าของตัวเลขของปัญหาที่กำหนด ดังนั้นปัญหาที่นำมาเลือกใช้ในการทำ optimization จะอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จุดประสงค์ของการทำ optimization คือเพื่อต้องการหาค่าสูงสุด (maximum) หรือค่าต่ำสุด (minimum) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด (objective function) และการหาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ บางครั้งอาจจะมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ที่เรียกว่า ข้อจำกัด (constraints) ไว้ด้วย ดังนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการทำ optimization คือการกำหนด objective function และการกำหนด constraints เพื่อใช้ในการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด

#### 2.7.1.1 ตัวแปรออกแบบ (Design Variable)

ตัวแปรออกแบบ (design variable) หมายถึง ตัวแปรที่เป็นคำตอบของการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งตัวแปรออกแบบจะถูกกำหนดเพื่อใช้อธิบายลักษณะของระบบทางด้านวิศวกรรมอย่างชัดเจน เช่น ขนาด, น้ำหนัก, รูปทรงของวัสดุ, จำนวนของฟันในเกียร์, จำนวนของคอยล์ในสปริง หรือจำนวนของท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการกำหนดตัวแปรออกแบบนั้นต้องเลือกตัวแปรที่ใช้กำหนดในระบบให้ถูกต้องกับโจทย์แต่ละประเภท

#### 2.7.1.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) คือ ฟังก์ชันที่เราต้องการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดโดยเราจะต้องทำการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ติดอยู่ในรูปของตัวแปรออกแบบ เพื่อที่จะทำการหาค่าของตัวแปรที่เป็นจุด maximum หรือ minimum ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น โดยทั่วไปแล้วเราสามารถเขียน Objective function ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็นดังสมการที่ (11)

$$J = f(x) \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$  หรือตัวแปรที่มีจำนวน dimension เป็น  $m$  โดยทั่วไปแล้วปัญหาของการทำ optimization ส่วนมากจะเป็นปัญหาในรูปของ minimization problem เช่นจะออกแบบผลิตภัณฑ์อย่างไรเพื่อให้เกิดต้นทุนน้อยที่สุด หรือจะขับรถด้วยความเร็วเท่าใดที่จะทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด

### 2.7.1.3 ข้อจำกัด (Constraints)

Constraints เป็นเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของ objective function ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว constraints จะแบ่งเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ external constraints และ internal constraints ซึ่ง external constraints เป็นข้อจำกัดของระบบที่อยู่เหนือการควบคุมของผู้ออกแบบ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราทราบว่า material A สามารถลดต้นทุนได้มากกว่าการใช้ material B แต่ material A นั้นหาซื้อได้ยากกว่า ซึ่งความยากในการหาซื้อ material A นี้คือ external constraint ในโจทย์นี้และสำหรับ internal constraints เป็นข้อจำกัดที่กำหนดขึ้นโดยผู้ออกแบบระบบ ซึ่งในตัวอย่างที่แล้ว internal constraint อาจหมายถึงจำนวนของ material แต่ละประเภท รูปแบบทั่วไปของ constraints เป็นไปดังสมการที่ (12)

$$U_{min} \leq u(t) \leq U_{max} \quad (12)$$

constraints จะมีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรที่เลือกไว้ใน objective function ด้วยหมายความว่า ถ้าฟังก์ชันของ constraints มีการเปลี่ยนแปลงค่า ค่าตอบที่ได้จาก objective function ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการทำ optimization สิ่งสำคัญคือค่าที่ได้จาก objective function จะต้องสอดคล้องกับ constraints ที่กำหนดไว้ การแบ่งประเภทของ constraints สามารถแบ่งได้ตามเครื่องหมายทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ equality constraints เป็นเงื่อนไขที่กำหนดด้วยเครื่องหมาย (=) และ inequality constraints เป็นเงื่อนไขที่กำหนดด้วยเครื่องหมาย ( $\leq, \geq$ ) สำหรับบางปัญหาที่ไม่ได้มีการกำหนด constraints เอาไว้จะเรียกปัญหานี้ว่า unconstrained problem เทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่อยู่ในรูปของ unconstrained problem และ constrained problem

### 2.7.1.4 ฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic Function)

ในการทำ optimization ส่วนมากเราจะพบกับปัญหาที่เป็นแบบ non-linear หรือเป็นปัญหาที่มี objective function ที่อยู่ในรูปสมการที่มีเลขชี้กำลังมากกว่าสอง ซึ่งเราสามารถทำการประมาณสมการดังกล่าวให้มีเลขชี้กำลังต่ำ ๆ เพื่อง่ายแก่การหาคำตอบได้ โดยถ้าเราประมาณให้เป็นสมการที่มีเลขชี้กำลังเป็นหนึ่ง สมการดังกล่าวจะเรียกว่า ฟังก์ชันเชิงเส้น (linear function) แต่ถ้าเราประมาณให้เป็นสมการที่มีเลขชี้กำลังเท่ากับสองแล้ว เราก็จะเรียกสมการนี้ว่าเป็น ฟังก์ชันกำลังสอง (quadratic function) โดยแบบฟอร์มทั่วไปของ quadratic function สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (13)

$$f(x) = x^T A x \quad (13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $A$  เป็นเมทริกซ์สมมาตรจำนวนจริง (real symmetric matrix) สำหรับ  $x$  ทุกตัวที่เป็นจำนวนจริงที่ไม่ใช่ศูนย์ ในกรณีของจำนวนเชิงซ้อน (complex number) เราจะเรียกรูปแบบสมการที่ (13) นี้ว่า Hermitian form สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (14)

$$f(x) = x^* Ax \quad (14)$$

โดยที่  $A$  เป็น Hermitian matrix สำหรับ  $x$  ทุกตัวที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน และเครื่องหมาย  $*$  แสดงถึงการทำ conjugate transpose โดยที่ความแตกต่างของเมทริกซ์  $A$  ใน quadratic form และ hermitian form จะเป็นรูปแบบ ดังนี้

Quadratic Form (Real)	Hermitian Form (Complex)
$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{12} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & \cdots & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$	$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{12}^* & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{1n}^* & \cdots & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$

รูปที่ 2.17 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง quadratic form และ hermitian form

โดยที่  $a_{ij}^*$  เป็น complex conjugate เทอมของ  $a_{ij}$  เมื่อเราเขียนฟังก์ชันใด ๆ ให้อยู่ในรูปของ quadratic form แล้ว ลำดับต่อมาเราจะพิจารณาว่าเมทริกซ์  $A$  เป็น positive definite matrix หรือไม่ โดยนิยามของ positive definite matrix กล่าวไว้ว่า เมทริกซ์สมมาตร  $A$  ใดๆ จะเป็น positive definite ก็ต่อเมื่อ  $x^T Ax > 0$  สำหรับเวกเตอร์  $x$  ทุกตัวที่ไม่ใช่ศูนย์ คุณสมบัติของ positive definite matrix มีอยู่ด้วยกัน 3 ข้อดังนี้

1) ถ้า  $K_1$  และ  $K_2$  เป็น positive definite matrix แล้ว  $K_1 + K_2$  ก็จะเป็น positive definite matrix ด้วย

2) ผลคูณของ positive definite matrix  $K = A^T A$  จะเป็น positive definite matrix หรือ positive semidefinite matrix

3) ค่า pivot และ eigenvalue ทุกตัวของ positive definite matrix จะมีค่าเป็นบวกเสมอ ประเภทของเมทริกซ์ สามารถแบ่งออกได้โดยจัดให้อยู่ในรูป quadratic form (หรือดูจากค่า eigenvalue) โดย

- ถ้า  $X^T Ax > 0$  สำหรับเวกเตอร์  $X$  ทุกตัวที่ไม่ใช่ศูนย์ เรียก  $A$  ว่า Positive definite matrix (eigenvalue ของ  $A$  มีค่ามากกว่า 0)
- ถ้า  $X^T Ax \geq 0$  สำหรับเวกเตอร์  $X$  ทุกตัวที่ไม่ใช่ศูนย์ เรียก  $A$  ว่า Positive semi-definite matrix (eigenvalue ของ  $A$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0)
- ถ้า  $X^T Ax < 0$  สำหรับเวกเตอร์  $X$  ทุกตัวที่ไม่ใช่ศูนย์ เรียก  $A$  ว่า Negative definite matrix (eigenvalue ของ  $A$  มีค่าน้อยกว่า 0)

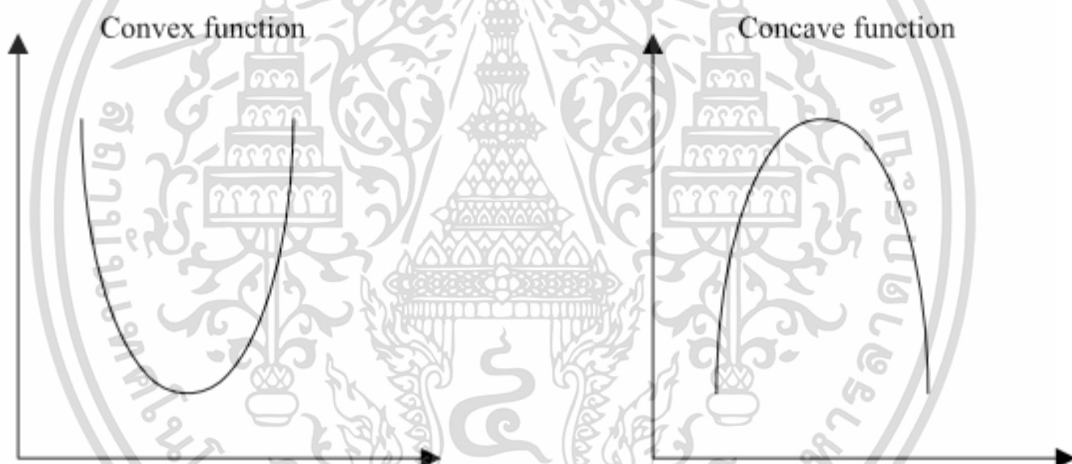
- ถ้า  $X^T Ax \leq 0$  สำหรับเวกเตอร์  $X$  ทุกตัวที่ไม่ใช่ศูนย์ เรียก  $A$  ว่า Negative semi-definite matrix (eigenvalue ของ  $A$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0)
- ถ้า  $X^T Ax < 0$  หรือ  $X^T Ax > 0$  สำหรับ  $X$  บางตัว เรียก  $A$  ว่า Indefinite matrix

### 2.7.2 Concave Functions และ Convex Functions

นิยามของ convex function คือฟังก์ชันที่สอดคล้องกับสมการที่ (10)

$$f(\theta x_1 + (1 - \theta)x_2) \leq \theta f(x_1) + (1 - \theta)f(x_2) \quad (15)$$

โดย  $x_1$  และ  $x_2$  เป็นจุดใดๆที่เป็นสมาชิกของจำนวนจริง  $x_1, x_2 \in R$  และ  $\theta$  มีค่าอยู่ในช่วง  $0 \leq \theta \leq 1$  เราอาจจะพิจารณา convex function โดยดูจาก hessian matrix ได้ โดยฟังก์ชัน  $f(x)$  จะเป็น convex function ได้ต่อเมื่อ hessian matrix ของ  $f(x)$  เป็น positive definite หรือ positive semi-definite แต่ถ้า hessian matrix ของ  $f(x)$  เป็น negative definite หรือ negative semi-definite จะเรียกฟังก์ชันนั้นว่า concave function



รูปที่ 2.18 Convex function และ Concave function

คุณสมบัติของ Concave function

- 1) ทำให้เกิดจุดสูงสุดในฟังก์ชัน
- 2) ค่า eigenvalue ของ hessian matrix  $\nabla^2 \geq 0$
- 3) Hessian matrix เป็น negative-definite/semidefinite สำหรับทุกๆค่าของ  $X$

### 2.7.3 คุณสมบัติควคู่ (Duality)

Duality เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่สำคัญและน่าสนใจในเรื่องของการกำหนดการเชิงเส้น หลักการพื้นฐานของ duality กล่าวไว้ว่าปัญหาเชิงเส้นใด ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของการหา Maximization หรือ Minimization ได้ โดยในการวิเคราะห์ปัญหาเราสามารถที่จะเขียนรูปแบบของ

duality ขึ้นมาก่อน แล้วจึงใช้วิธี Linear Programming เพื่อหาจุดต่ำสุดหรือสูงสุดต่อไป รูปแบบของ duality โดยทั่วไปเป็นดังนี้

ปัญหาของการหาจุดสูงสุด

$$\text{Maximize } C^T x$$

$$\text{ภายใต้ข้อจำกัด } Ax \leq b \text{ และ } x \geq 0$$

จะเป็น dual กับปัญหาของการหาจุดต่ำสุด

$$\text{Minimize } y^T b$$

$$\text{ภายใต้ข้อจำกัด } y^T A \geq c^T \text{ และ } y \geq 0$$

	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_n$	
$y_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$\dots$	$a_{1n}$	$\leq b_1$
$y_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$\dots$	$a_{2n}$	$\leq b_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$y_m$	$a_{m1}$	$a_{m2}$	$\dots$	$a_{mn}$	$\leq b_m$
	$\geq c_1$	$\geq c_2$	$\dots$	$\geq c_n$	

รูปที่ 2.19 แสดงการทำ Linear Programming เพื่อหาจุดต่ำสุดและสูงสุด

#### 2.7.4 คุณสมบัติความเหมาะสม (Optimality)

โดยทั่วไปปัญหาในการทำ optimization ส่วนใหญ่นั้นจะเป็นการหาค่าต่ำสุด เช่น ปัญหาการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สามารถลดต้นทุนได้ต่ำสุด เราจะเน้นอธิบายเพียงหลักการหาค่าจุดต่ำสุดเท่านั้น เนื่องจากเทคนิคต่างๆที่จะใช้ในการหาค่า Maximization และ Minimization นั้นจะคล้ายกัน และเราสามารถเปลี่ยนปัญหาที่เป็นแบบ maximization problem ให้เป็นปัญหา minimization problem ได้โดยการใส่เครื่องหมายลบ (-) เข้าไปใน objective function แล้วทำการหาค่า minimum หลังจากนั้นจึงใส่เครื่องหมายลบ (-) ของคำตอบที่ได้จากการทำ minimization อีกที ซึ่งเราเรียกหลักการนี้ว่า คุณสมบัติความเหมาะสม (optimality) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{maximize } f(x) = -\text{minimize}[-f(x)] \quad (16)$$

##### 2.7.4.1 Local Maxima/ Local Minima และ Global Maxima/ Global Minima

คำจำกัดความของ Local maxima และ Global minima นั้นสามารถอธิบายได้จากกราฟรูปที่ 2.17 จุดที่อยู่สูงกว่าจุดข้างเคียง จะเรียกว่า local maximum และจุดที่อยู่สูงที่สุดของ local maximum ทั้งหมด จะเรียกว่า global maximum ในทางกลับกัน global minimum เป็นจุดที่อยู่ต่ำที่สุดของ local minimum ทั้งหมด ในที่นี้ เราสามารถเขียนอธิบายในเชิงคณิตศาสตร์ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ฟังก์ชัน  $f(x)$  จะมี local maximum ที่จุด  $x^*$  ก็ต่อเมื่อ

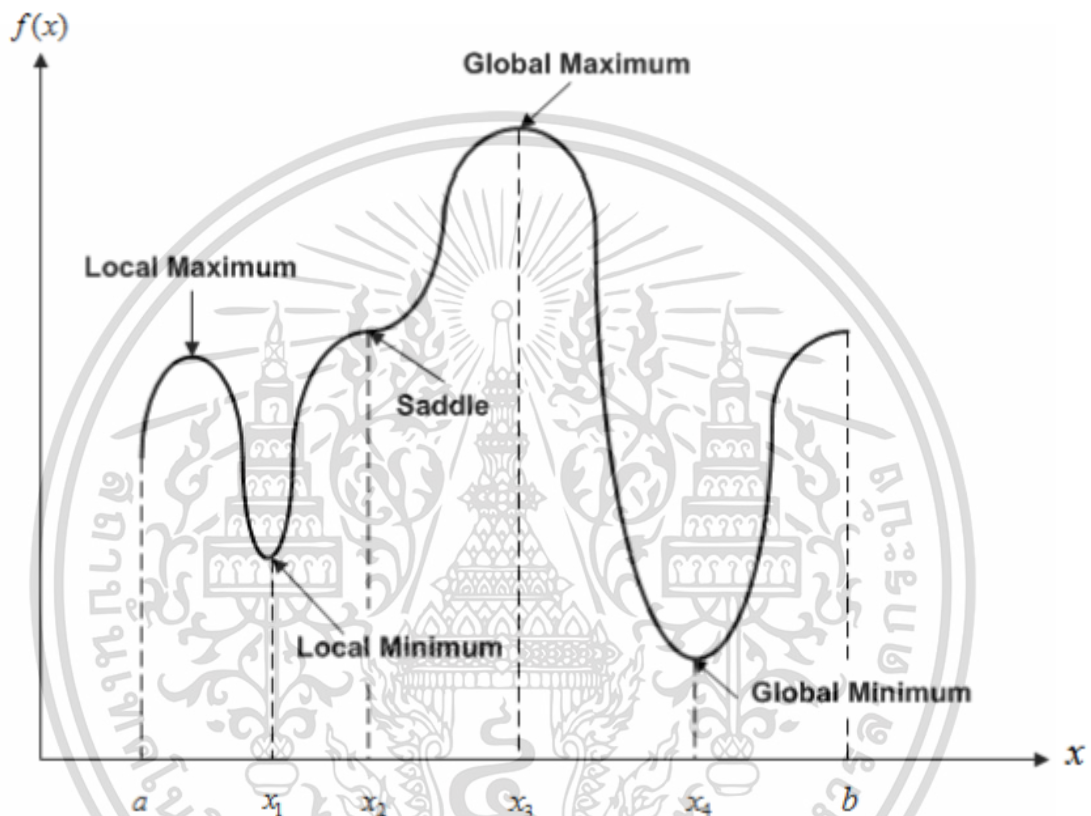
$$f(x) \leq f(x^*)$$

โดยที่จุด  $x$  ทุกตัว สอดคล้องกับเงื่อนไข  $|x - x^*| < \varepsilon, \varepsilon > 0$

2. ฟังก์ชัน  $f(x)$  จะมี local minimum ที่จุด  $x^*$  ก็ต่อเมื่อ

$$f(x) \geq f(x^*)$$

โดยที่จุด  $x$  ทุกตัว สอดคล้องกับเงื่อนไข  $|x - x^*| < \varepsilon, \varepsilon > 0$



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของ minima และ maxima

2.7.4.2 Necessary Conditions และ Sufficient Conditions ของ local minima/ local maxima

ฟังก์ชัน  $f(x)$  ที่ถูกกำหนดภายในช่วง  $a \leq x \leq b$  จะมี relative minimum ที่จุด  $x^*$  โดยที่  $a < x^* < b$  ก็ต่อเมื่อมีค่า  $\varepsilon > 0$  ใดๆ ที่ทำให้  $f(x) - f(x^*) \geq 0$  โดย  $|x - x^*| \leq \varepsilon$  ทั้งนี้กำหนดให้ว่าเราสามารถหาค่าอนุพันธ์ของ  $f(x)$  ที่จุด  $x^*$  ได้

ในที่นี้เราสามารถพิจารณา Taylor Series Expansion ของเทอม  $f(x) - f(x^*) \geq 0$

$$f(x) \approx f(x^*) + \nabla f(x^*)(x - x^*) + \frac{1}{2!}(x - x^*)^T \nabla^2 f(x^*)(x - x^*)$$

$$f(x) - f(x^*) \approx \nabla f(x^*)(x - x^*) + \frac{1}{2!}(x - x^*)^T \nabla^2 f(x^*)(x - x^*)$$

ถ้า  $f(x) - f(x^*) \geq 0$  นั้นหมายความว่า  $\nabla f(x^*)(x - x^*) + \frac{1}{2!}(x - x^*)^T \nabla^2 f(x^*)(x - x^*) \geq 0$  ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.  $\nabla f(x^*) = 0$  หรือการเกิด weak minimum ที่จุด  $x^*$  (Necessary condition) เราสามารถกล่าวได้ว่าถ้าจุด  $x^*$  จะเป็นจุด local minimum แล้ว  $\nabla f(x^*) = 0$  แต่ในทางกลับกัน ถ้า  $\nabla f(x^*) = 0$  แล้ว เราไม่สามารถกล่าวได้ว่าจะมีจุด local minimum อยู่ที่จุด  $x^*$  เพราะ  $x^*$  อาจทำให้เกิดจุด maximum หรือ saddle point ก็ได้

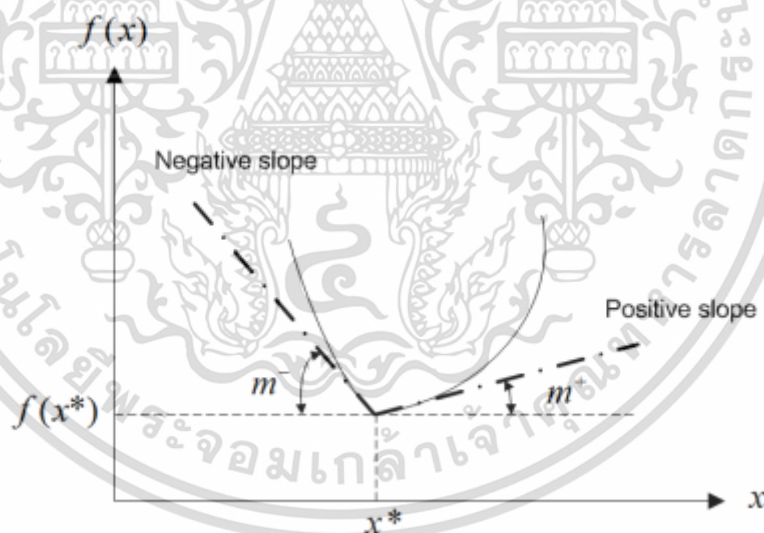
2.  $\nabla^2 f(x^*) > 0$  หรือการเกิด strong minimum ที่จุด  $x^*$  (Sufficient condition) เราสามารถกล่าวได้ว่าถ้าจุด  $x^*$  จะเป็นจุด local minimum แล้ว  $\nabla^2 f(x^*) > 0$  และในทางกลับกัน ถ้า  $\nabla^2 f(x^*) > 0$  แล้ว เราสามารถสรุปได้ว่าจะมีจุด local minimum อยู่ที่จุด  $x^*$

หมายเหตุ

1. ทฤษฎีนี้สามารถนำไปใช้ได้กับจุด  $x^*$  ที่เป็น relative maximum
2. ถ้าค่า minimum หรือ maximum เกิดขึ้นที่จุด  $x^*$  โดยที่ไม่สามารถหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันได้ตรงรูป จะได้ว่า

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x^*+h) - f(x^*)}{h} = m^+ (\text{positive}) \text{ or } m^- (\text{negative})$$

ขึ้นอยู่กับว่าค่า  $h$  เข้าใกล้ศูนย์ทางด้านบวกหรือทางด้านลบ เว้นแต่ว่าค่า  $m^+$  และ  $m^-$  มีค่าเท่ากัน จะไม่มีค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน และถ้าไม่มีค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน ทฤษฎีนี้ไม่สามารถใช้ได้

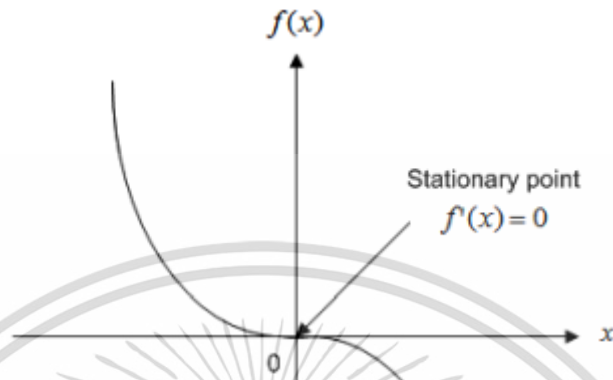


รูปที่ 2.21 ฟังก์ชันที่ไม่สามารถหาค่าของอนุพันธ์ได้

3. ถ้าค่า minimum หรือ maximum เกิดขึ้นที่จุดสุดท้าย (endpoint) ของช่วงการทำงาน ของฟังก์ชัน จะได้ของฟังก์ชันที่ค่า  $h$  เป็นบวกหรือเป็นลบเท่านั้น ดังนั้นจะไม่สามารถหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่จุดสุดท้ายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

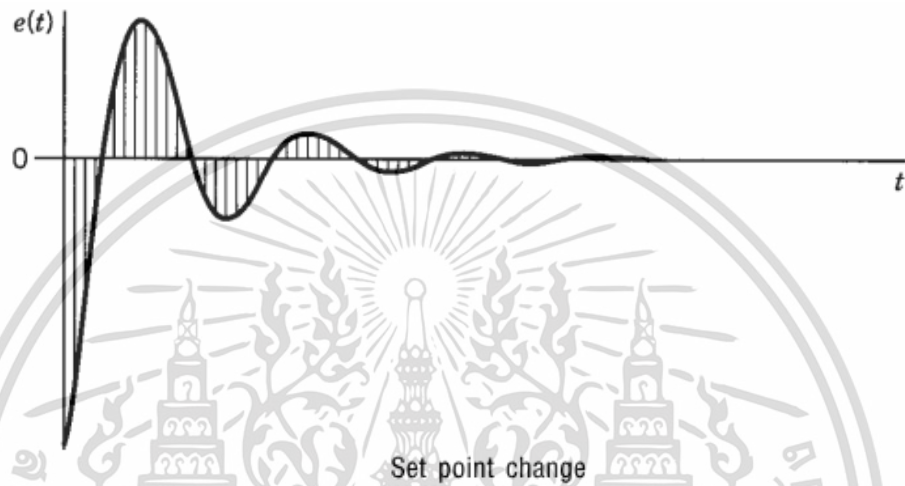
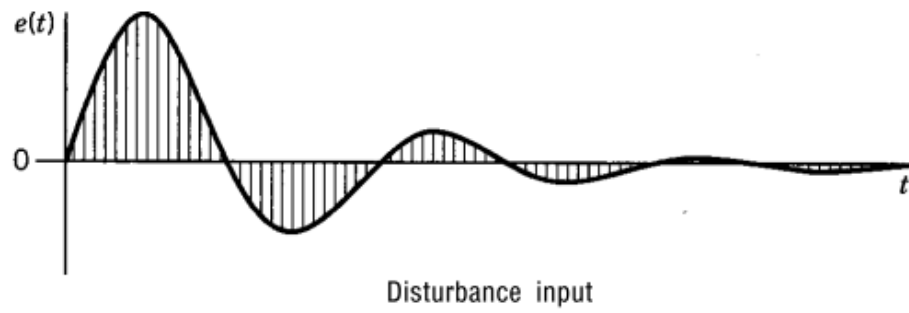
4. สำหรับฟังก์ชันที่มีค่า minimum หรือ maximum ที่ทุกๆจุด โดยที่ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันเป็นศูนย์ ดังรูปจะเห็นได้ว่าค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันเป็นศูนย์ที่จุด  $x = 0$  ซึ่งจุดนี้ไม่ได้เป็นทั้ง minimum หรือ maximum โดยทั่วไปแล้วจะเรียกจุดนี้ว่า stationary point



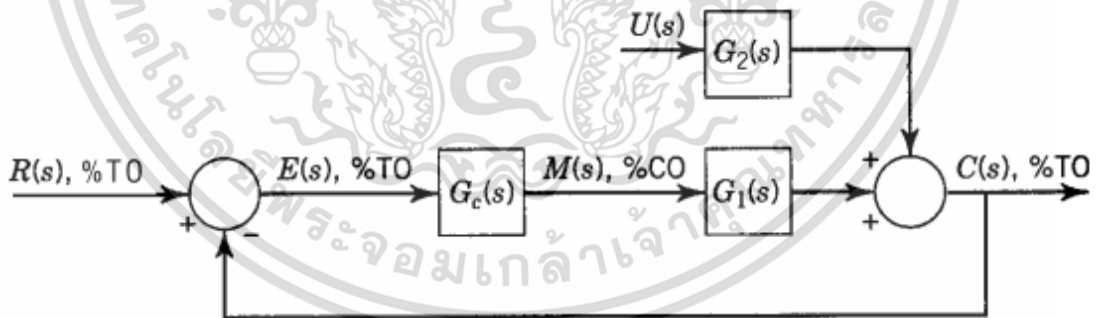
รูปที่ 2.22 ฟังก์ชันที่มีค่าของอนุพันธ์เป็นศูนย์ที่จุด  $x = 0$

## 2.8 การปรับแต่งค่าตัวควบคุมโดยใช้หลักการค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของการอินทิเกรต (Tuning for Minimum Error Integral Criteria)

เนื่องจากการปรับแต่งอัตราส่วนพารามิเตอร์ของการควบคุมไม่ซ้ำกัน โครงการวิจัยที่สำคัญโครงการหนึ่งจึงได้ดำเนินการขึ้นที่มหาวิทยาลัยแห่งรัฐหลุยเซียน่าภายใต้ศาสตราจารย์ Paul W. Murrill และ Cecil L. Smith เพื่อพัฒนาการปรับแต่งที่ไม่เหมือนใคร โดยพวกเขาได้ใช้พารามิเตอร์โมเดล first-order-plus-dead-time (FOPDT) เพื่อระบุลักษณะของกระบวนการข้อมูลจำเพาะของการตอบสนองแบบวงปิด (Close Loop) นั้นเป็นข้อผิดพลาดขั้นต่ำหรือความเบี่ยงเบนขั้นต่ำของตัวแปรควบคุมจากจุดที่ตั้งไว้ โดยข้อผิดพลาดดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของเวลาสำหรับระยะเวลาของการตอบสนอง ดังนั้นผลรวมของข้อผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลาจะต้องถูกลดให้เหลือน้อยที่สุด นี่เป็นไปตามนิยามอินทิกรัลของข้อผิดพลาดตามเวลา หรือพื้นที่แรเงาในคำตอบที่แสดงในรูปที่ 2.23 เนื่องจากความสัมพันธ์ในการปรับจูนมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าอินทิกรัลของข้อผิดพลาดให้น้อยที่สุด การใช้งานจึงเรียกว่าการปรับค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของการอินทิเกรต



รูปที่ 2.23 ค่าจำกัดความของค่าความผิดพลาดน้อยสุดของการอินทิเกรต สำหรับสัญญาณรบกวน และการเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมาย



รูปที่ 2.24 แผนภาพโพรเสจบล็อกไดอะแกรมแบบง่ายที่เปรียบเสมือนกับอุปกรณ์เครื่องมือวัดและค่ากระบวนการถูกรวมอยู่ในบล็อกไดอะแกรมเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม ค่าอินทิกรัลของข้อผิดพลาดไม่สามารถลดลงได้โดยตรง เนื่องจากข้อผิดพลาดเชิงลบที่มีขนาดใหญ่มากจะเป็นค่าต่ำสุด เพื่อป้องกันค่าลบของฟังก์ชันประสิทธิภาพ สามารถเสนอสูตรอินทิกรัลได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าอินทิกรัลผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาด (Integral of the Absolute Value of the Error (IAE))

$$\text{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (17)$$

การหาอินทิกรัลผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาด (Integral of the Square of the Error (ISE))

$$\text{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (18)$$

ค่าอินทิกรัลขยายจากการเกิดขึ้นของการรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงในจุดที่กำหนด  $t = 0$  เป็นเวลานานถึงจุดที่  $t = \infty$  เนื่องจากไม่สามารถแก้ไขปัญหาผลการตอบสนองของระบบได้ ปัญหาเพียงสิ่งเดียวของค่าจำกัดความของค่าอินทิกรัลนี้คือ ค่าตัวแปรกระบวนการความผิดพลาดไม่สามารถทำให้ได้เท่ากับศูนย์ โดยสิ่งนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อระบบมีออฟเซต (Offset) หรือมีค่าความผิดพลาดแบบคงที่ (Steady-state error) โดยคอนโทรลเลอร์นี้ไม่มีโหมดอินทิกรัล ในกรณีนี้ข้อผิดพลาดในค่าจำกัดความจะถูกแทนที่ด้วยความแตกต่างระหว่างตัวแปรควบคุมและค่าสถานะคงตัวสุดท้าย

ความแตกต่างระหว่างเกณฑ์ IAE และ ISE คือ ISE ให้น้ำหนักมากกว่ากับข้อผิดพลาดที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่จุดเริ่มต้นของการตอบสนอง และน้ำหนักน้อยกว่าสำหรับข้อผิดพลาดขนาดเล็กซึ่งเกิดขึ้นในช่วงท้ายของการตอบสนอง ในการพยายามลดข้อผิดพลาดเริ่มต้น เกณฑ์ ISE ขึ้นต่ำจะส่งผลให้คอนโทรลเลอร์ได้รับอัตราขยายสูงและการตอบสนองที่มีการแกว่งมาก (เช่น อัตราส่วนการสลายตัวสูง) โดยที่ข้อผิดพลาดจะแกว่งไปมาประมาณศูนย์เป็นเวลานานพอสมควร ปรากฏการณ์นี้ชี้ให้เห็นว่าเกณฑ์ประสิทธิภาพควรมีการปรับสำหรับเวลาที่ผ่านไปตั้งแต่เริ่มตอบกลับ โดยค่าความผิดพลาดของอินทิกรัลนี้มีการคิดค่าความผิดพลาดทั้งหมดแบบถ่วงน้ำหนักในทุกช่วงเวลาที่ผ่านมา

การหาค่าอินทิกรัลแบบถ่วงน้ำหนักโดยคิดค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาด (Integral of the Time-Weighted Absolute Value of the Error: ZTAE)

$$\text{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าอินทิกรัลแบบถ่วงน้ำหนักโดยคิดค่ากำลังสองของค่าความผิดพลาด (Integral of the Time-Weighted Square of the Error: ZSE)

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (20)$$

จากสมการที่ 19 ถึง สมการที่ 20 ประกอบด้วยค่าอินทิกรัลของข้อผิดพลาดพื้นฐานสี่ค่าที่สามารถทำให้ลดลงเหลือน้อยที่สุดสำหรับการควบคุมโดยการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุม แต่เป็นที่น่าเสียดายที่ชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือฟังก์ชันที่ไม่เพียงแต่เลือกจากค่าจำกัดความอินทิกรัลทั้งสิ้นเท่านั้น แต่ยังรวมถึงประเภทของอินพุต (นั่นคือ สัญญาณรบกวนหรือค่าเป้าหมาย) และรวมไปถึงลักษณะของสัญญาณ (เช่น การเปลี่ยนแปลงอินพุตแบบขั้นบันได, การค่อยๆเพิ่ม-ลดค่าอินพุต และอื่นๆ) ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุต โดยการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นขั้น (Step change) มักจะถูกเลือกใช้งาน เนื่องจากเป็นสิ่งที่ก่อความถี่มากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติ ในขณะที่การปรับค่าเป้าหมายของกระบวนการมีความสำคัญมาก ดังนั้นวัตถุประสงค์ของตัวควบคุมคือจำเป็นต้องใช้งานตัวควบคุมเพื่อให้สามารถทำการควบคุมกระบวนการได้ตามค่าอินพุตที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเราสามารถเปรียบเทียบตัวควบคุมได้อย่างกับอุปกรณ์ตัวควบคุมเซอร์โว Servo Regulator เมื่อจุดประสงค์ของตัวควบคุมคือการรักษาตัวแปรควบคุมไว้ที่ค่าเป้าหมายเมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในกระบวนการควบคุม ตัวควบคุมจะถูกเรียกว่าตัวปรับแต่งค่ากระบวนการ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของการปรับแต่งที่เหมาะสมที่สุดในการคิดแบบค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของค่าอินทิกรัลจะแตกต่างกันในแต่ละกรณี โดยตัวควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่ถือได้ว่าเป็นตัวปรับแต่งค่ากระบวนการ ยกเว้นแต่ตัวควบคุมรอง (slave controller) ในแผนการควบคุมแบบคาสแคด

เมื่อตัวควบคุมถูกปรับแต่งให้มีผลการตอบสนองอย่างเหมาะสมต่อสัญญาณรบกวนแล้ว ยังมีความจำเป็นต้องมีการตัดสินใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับฟังก์ชันการถ่ายโอนกระบวนการ (transfer function) ไปยังค่าสัญญาณรบกวนนั้นๆ สิ่งนี้เป็นอะไรที่ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้น คือการตอบสนองของคอนตัวควบคุมไม่สามารถทำให้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดทุกครั้งในการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรบกวน หากมีสัญญาณรบกวนหลักมากกว่าหนึ่งสัญญาณเข้าสู่กระบวนการควบคุม (loop control) เนื่องจากฟังก์ชันการถ่ายโอนกระบวนการนั้นจะมีความแตกต่างกันสำหรับตัวแปรรบกวนที่แตกต่างกัน และสำหรับสัญญาณเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ พารามิเตอร์การปรับแต่งที่เหมาะสมคือฟังก์ชันของความเร็วสัมพัทธ์ของการตอบสนองของตัวแปรควบคุมต่ออินพุตของสัญญาณรบกวน โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากระบบยังมีการตอบสนองต่ออินพุตสัญญาณรบกวนช้าลงเท่าใด ตัวควบคุมก็จะยิ่งปรับแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าค่าเกน (Gain) ของตัวควบคุมก็จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น ในอีกกรณีหนึ่ง หากตัวแปรที่ออกแบบให้ควบคุม มีการตอบสนองทันทีต่อสิ่งรบกวน การปรับตัวควบคุมก็จำเป็นต้องปรับให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะเทียบเท่ากับการปรับสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

โลเปซและคณะ (1967) ได้พัฒนาสูตรการปรับแต่งสำหรับเกณฑ์อินทิกรัลข้อผิดพลาดขั้นต่ำตามสมมติฐานที่ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนกระบวนการไปยังอินพุตสัญญาณรบกวนจะเหมือนกันกับฟังก์ชันถ่ายโอนไปยังสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม กล่าวอีกนัยหนึ่ง จากรูปที่ 2.24 มีการสันนิษฐานว่า  $G_2(S) = G_1(s)$  สูตรการปรับแต่งถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของการปรับแต่งตัวแปรอินทิกรัล โดยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตการรบกวน

Process Model:	$G(s) = \frac{Ke^{-bs}}{\tau s + 1}$			
Proportional (P) Controller:	$G_c(s) = K_c$			
Error Integral	ISE	IAE	ITAE	
$K_c = \frac{a}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^b$	$a = 1.411$ $b = -0.917$	0.902 -0.985	0.490 -1.084	
Proportional-Integral (PI) Controller:	$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s}\right)$			
Error Integral	ISE	IAE	ITAE	
$K_c = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_1}$	$a_1 = 1.305$ $b_1 = -0.959$	0.984 -0.986	0.859 0.977	
$\tau_I = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_2}$	$a_2 = 0.492$ $b_2 = 0.739$	0.608 0.707	0.674 0.680	
Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller:	$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s\right)$			
Error Integral	ISE	IAE	ITAE	
$K_c = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_1}$	$a_1 = 1.495$ $b_1 = 0.945$	1.435 -0.921	1.357 -0.947	
$\tau_I = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_2}$	$a_2 = 1.101$ $b_2 = 0.771$	0.878 0.749	0.842 0.738	
$\tau_D = \frac{a_3 \tau}{a_2} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_3}$	$a_3 = 0.560$ $b_3 = 1.006$	0.482 1.137	0.381 0.995	

สูตรเหล่านี้บ่งชี้ถึงแนวโน้มค่าเดียวกันกับสูตรอัตราส่วนการสลายตัวของไตรมาส (decay ratio formulas) ยกเว้นว่าเวลารวมของค่าอินทิกรัลจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของเวลาของกระบวนการ และน้อยกว่าค่าเวลาการไม่ตอบสนองของระบบ (dead time) โดยสูตรเหล่านี้เป็นสูตรที่มีความ

ชัดเจน และไม่ควรรอนานเกินกว่าช่วงของ  $t_0/T$  ที่เวลาอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 1.0 (นี่คือช่วงเวลาของค่าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลเปซใช้ในความสัมพันธ์ในสมการ) เช่นเดียวกับกรณีของสูตรการปรับอัตราส่วนการสลายตัวในไตรมาส สูตรเหล่านี้คาดการณ์ว่าทั้งการกระทำตามสัดส่วนและอินทิกรัลจะดำเนินไปอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เมื่อกระบวนการเข้าใกล้กระบวนการลำดับที่หนึ่งโดยไม่มีเวลาที่ไม่ตอบสนอง ลักษณะการทำงานนี้เป็นเรื่องปกติของสูตรการปรับแต่งสำหรับสัญญาณรบกวน

สูตรการปรับค่าเป้าหมายที่กำหนดในตารางที่ 2.4 นั้นได้รับการพัฒนาโดย Rovira (1981) ซึ่งเชื่อว่าเกณฑ์ ISE ขั้นต่ำไม่สามารถยอมรับได้เนื่องจากว่าลักษณะการแกว่งของสัญญาณสูง นอกจากนี้ยังมีการละเว้นความสัมพันธ์สำหรับการควบคุมตามสัดส่วนตัวควบคุมบนการสันนิษฐานว่าเกณฑ์อินทิกรัลข้อผิดพลาดขั้นต่ำไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเหล่านั้นซึ่งระบุตัวควบคุมตามสัดส่วนตัวอย่างเช่น ค่าเฉลี่ยการไหลโดยการควบคุมระดับตามสัดส่วน สูตรเหล่านี้ยังเป็นข้อมูลที่ชัดเจน และไม่ควรรอนุমানเกินกว่าช่วงของ  $t_0/T$  ระหว่าง 0.1 ถึง 1.0 โดยคาดการณ์ว่าสำหรับกระบวนการแบบเดียว (ลำดับที่หนึ่ง) โดยไม่มีเวลาการไม่ตอบสนอง เวลารวมจะเข้าใกล้ค่าคงที่ของเวลาของกระบวนการ ในขณะที่อัตราขยายตามสัดส่วนจะไปถึงอนันต์และเวลาอนุพันธ์จะเท่ากับศูนย์ ผลลัพธ์เหล่านี้เป็นเรื่องปกติของสูตรการปรับค่าเป้าหมายที่กำหนด

**ตารางที่ 2.4** ตารางแสดงค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของการปรับแต่งตัวแปรอินทิกรัล โดยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุต

Process Model: $G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1}$			
Proportional-Integral (PI) Controller:			
$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} \right)$			
Error Integral	IAE	ITAE	
$K_c = \frac{a_1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1}$	$a_1 = 0.758$ $b_1 = -0.861$	0.586 - 0.916	
$\tau_I = \frac{\tau}{a_2 + b_2(t_0/\tau)}$	$a_2 = 1.02$ $b_2 = -0.323$	1.03 - 0.165	
Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller:			
$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right)$			
Error Integral	IAE	ITAE	
$K_c = \frac{a_1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1}$	$a_1 = 1.086$ $b_1 = -0.869$	0.965 - 0.855	
$\tau_I = \frac{\tau}{a_2 + b_2(t_0/\tau)}$	$a_2 = 0.740$ $b_2 = -0.130$	0.746 0.147	
$\tau_D = a_3 \tau \frac{t_0}{\tau} - b_3$	$a_3 = 0.348$ $b_3 = 0.914$	0.308 0.9292	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม สาเหตุของปัญหาการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ การวัดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำชนิดสามตัวแปร ตัวควบคุมพีไอดี สมการทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ หลักการของการทำ Optimization โดยใช้หลักการการหาค่าอินทิกรัลผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาด (Integral of the Absolute Value of the Error (IAE) และยังได้กล่าวถึงเทคนิควิธีการควบคุมแบบคาสแคดที่จะช่วยให้การควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อเป็นความรู้เบื้องต้นสำหรับการออกแบบการควบคุมระดับน้ำชนิดสามตัวแปรด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่มีรูปแบบการเชื่อมโยงแบบคาสแคด ร่วมกับหลักการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม (Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling)



### บทที่ 3

## การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้การควบคุมพีไอดี แบบคาสแคดสามตัวแปร ร่วมกับวิธีการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี

ในบทนี้เป็นการนำความรู้พื้นฐานจากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปร ร่วมกับวิธีการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ซึ่งตัวแปรทั้งสามของกระบวนการคือระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ อัตราการไหลออกของไอน้ำ และอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้ม โดยตัวควบคุมพีไอดีของคาสแคดสามตัวแปรนั้น จะถูกแบ่งย่านการควบคุมออกเป็นพีไอดีสองชุดการควบคุม เพื่อที่จะแบ่งชุดการใช้งานในช่วงของโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation และตัวควบคุมพีไอดีอีกหนึ่งชุดนั้นจะใช้ในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยส่วนอินพุตซึ่งเป็นตัวแปรของกระบวนการคือ อัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้ม และอัตราการไหลออกของไอน้ำ ในขณะที่ตัวแปรด้านเอาต์พุตคือ ระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ หากมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวาล์วควบคุมการไหล จะส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าสู่หม้อต้มและตัวควบคุมอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มจะรับรู้และทำการปรับแก้ไขอย่างทันทีเพื่อรักษาระดับน้ำในหม้อต้มให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด

### 3.1 โครงสร้างของกระบวนการ

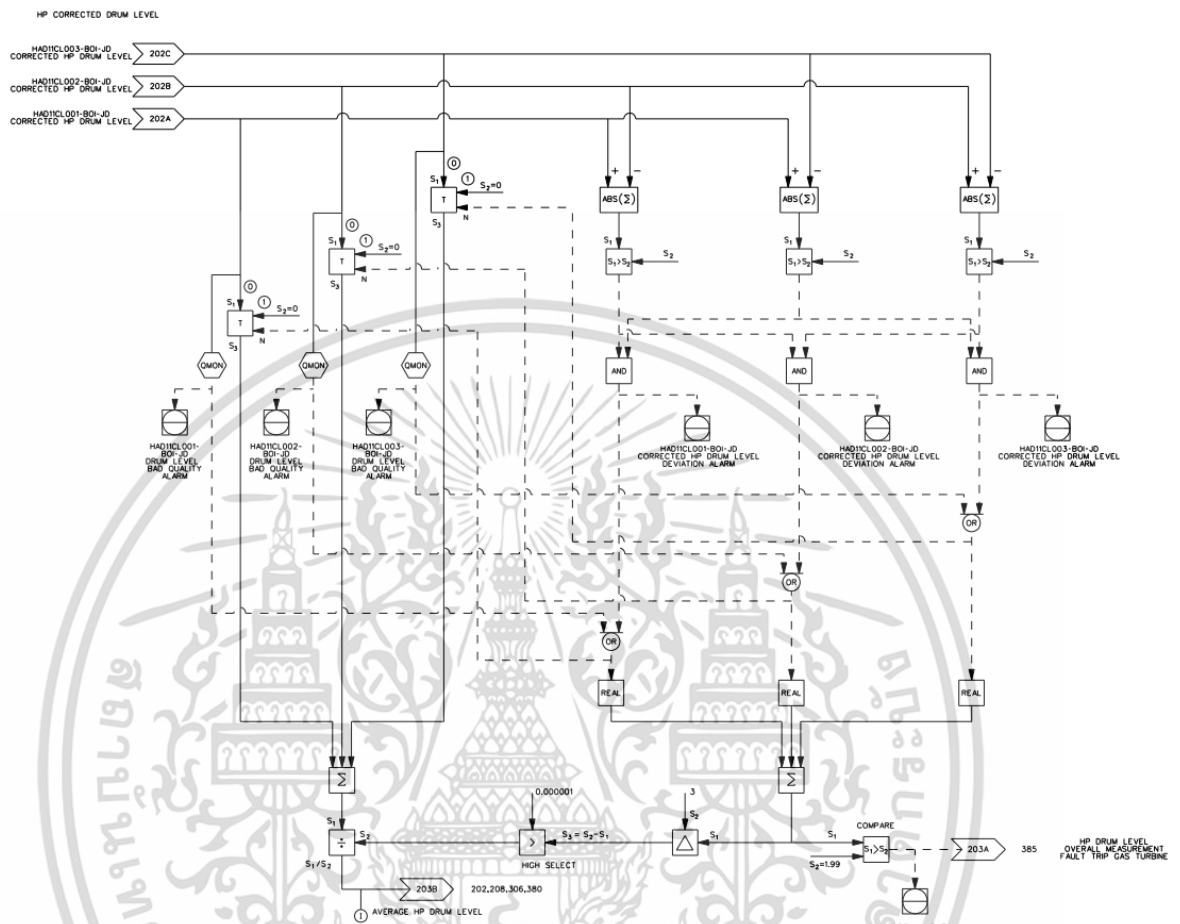
จากหัวข้อ 2.4 ที่ผ่านมามีการกล่าวถึงโครงสร้างหลักของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โดยใช้หลักการควบคุมแบบคาสแคดสามตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรของกระบวนการ คือ ระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ อัตราการไหลออกของไอน้ำ และอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้ม

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ การหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณปรับเทียบค่าความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำให้ถูกต้อง เพื่อความถูกต้องในการวัดและควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด

#### 3.1.1 โครงสร้างกระบวนการวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

หม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าถือเป็นหม้อต้มความดันไอน้ำชนิดความดันสูง ถูกออกแบบให้ผลิตไอน้ำที่ความดัน 50 barg และอุณหภูมิ 430 °C เพื่อป้อนไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกังหันไอน้ำสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการวัดระดับน้ำด้วยอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกัน จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวภายในหม้อต้ม เนื่องจากภายในหม้อต้มความดันไอน้ำจะประกอบไปด้วยของเหลวสองชนิดคือ น้ำและไอน้ำที่สภาวะอิ่มตัว ซึ่งมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

และแปรเปลี่ยนไปตามความดันภายในหม้อต้ม โดยโครงสร้างการวัดระดับน้ำภายในหม้อต้มจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างการวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

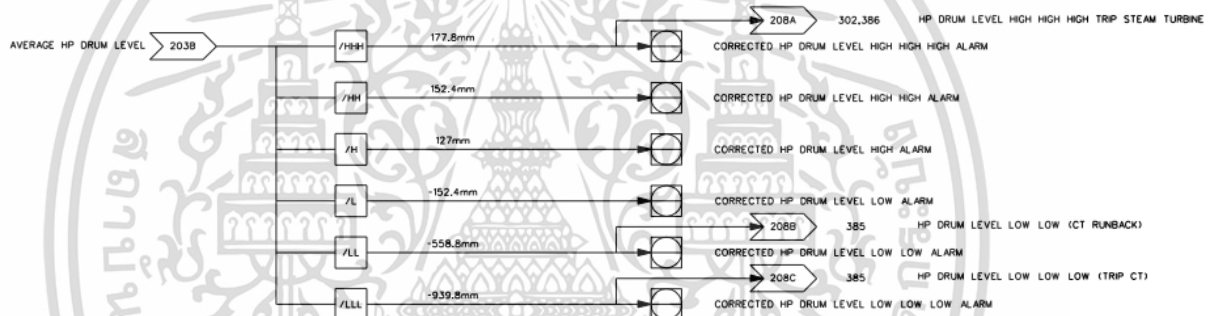
การวัดระดับน้ำตามรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

- เซนเซอร์วัดระดับน้ำของหม้อต้มชนิดความดันแตกต่างกัน (dp Transmitter) คือ
  - HP Drum Level Transmitter A
  - HP Drum Level Transmitter B
  - HP Drum Level Transmitter C
- เซนเซอร์วัดความดันของหม้อต้มสำหรับชดเชยความหนาแน่นของไอน้ำที่แปรเปลี่ยนไปตามความดันของหม้อต้ม คือ
  - HP Drum Pressure A
  - HP Drum Pressure B
  - HP Drum Pressure C
- ฟังก์ชันการควบคุมระดับน้ำ (Control Function)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับควบคุมระดับน้ำให้คงที่ด้วยโครงสร้างการวัดแบบ 2 ใน 3 (2 out of 3) ค่าระดับน้ำที่นำมาแสดงผลจะเป็นค่าที่มาจากการคำนวณหาค่ามัธยฐานของเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างกันทั้งสาม พร้อมดำเนินการโปรแกรมและสร้างสัญญาณเตือนเมื่อระดับน้ำของหม้อต้มไม่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ดังนี้

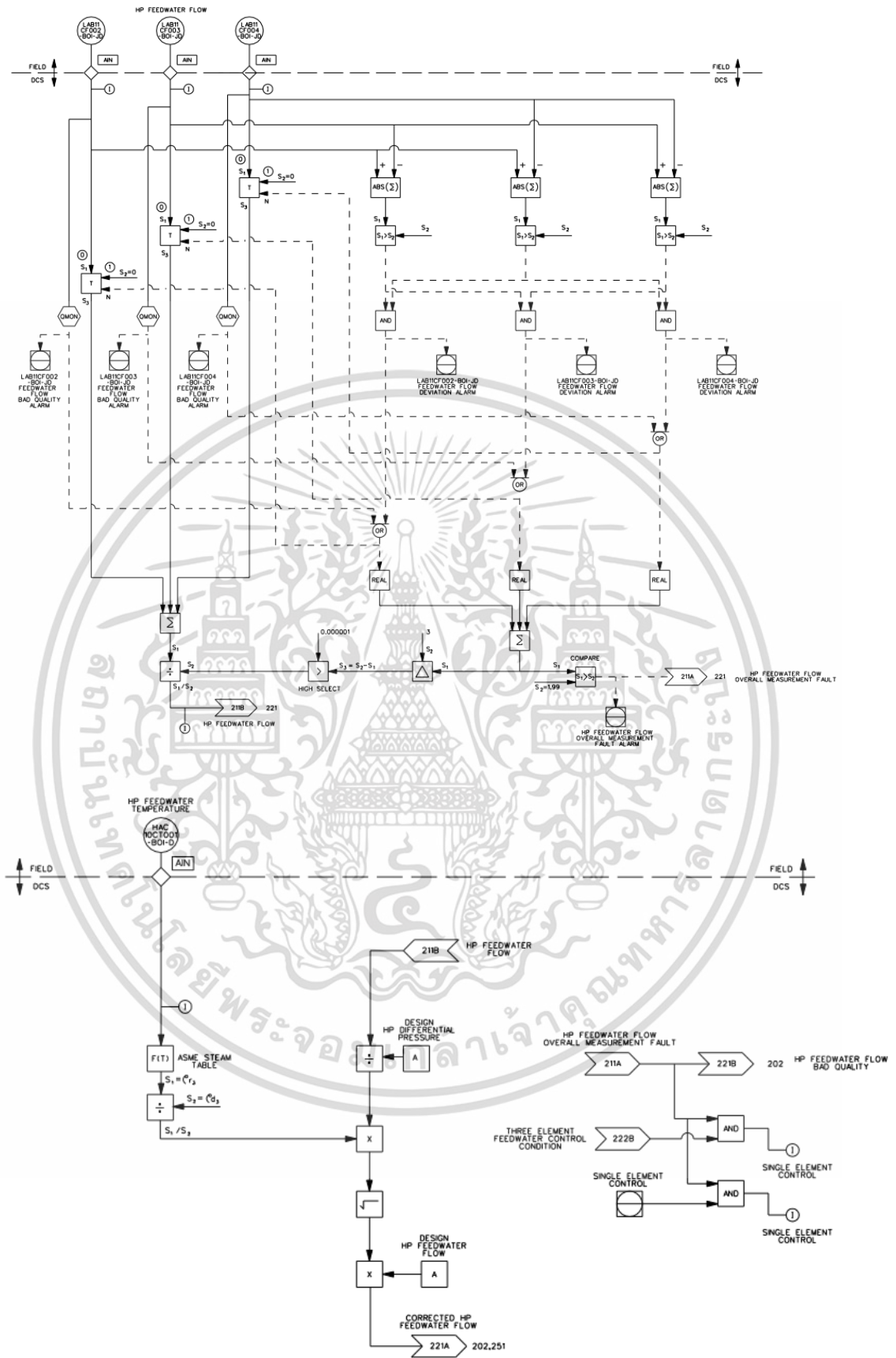
Normal Water Level (NWL)	: 0 mm
Active tripped	: HH Water Level Set +177.8 mm
Active tripped	: LL Water Level Set -939.8 mm
Active Alarm	: H Water Level Set +152.4 mm
Active Alarm	: L Water Level Set -558.8 mm
Active Warning	: H Water Level Set +127 mm
Active Warning	: L Water Level Set -152.4 mm



รูปที่ 3.2 โครงสร้างโปรแกรมและสร้างสัญญาณเตือนเมื่อระดับน้ำของหม้อต้มไม่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด

### 3.1.2 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง

โครงสร้างการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

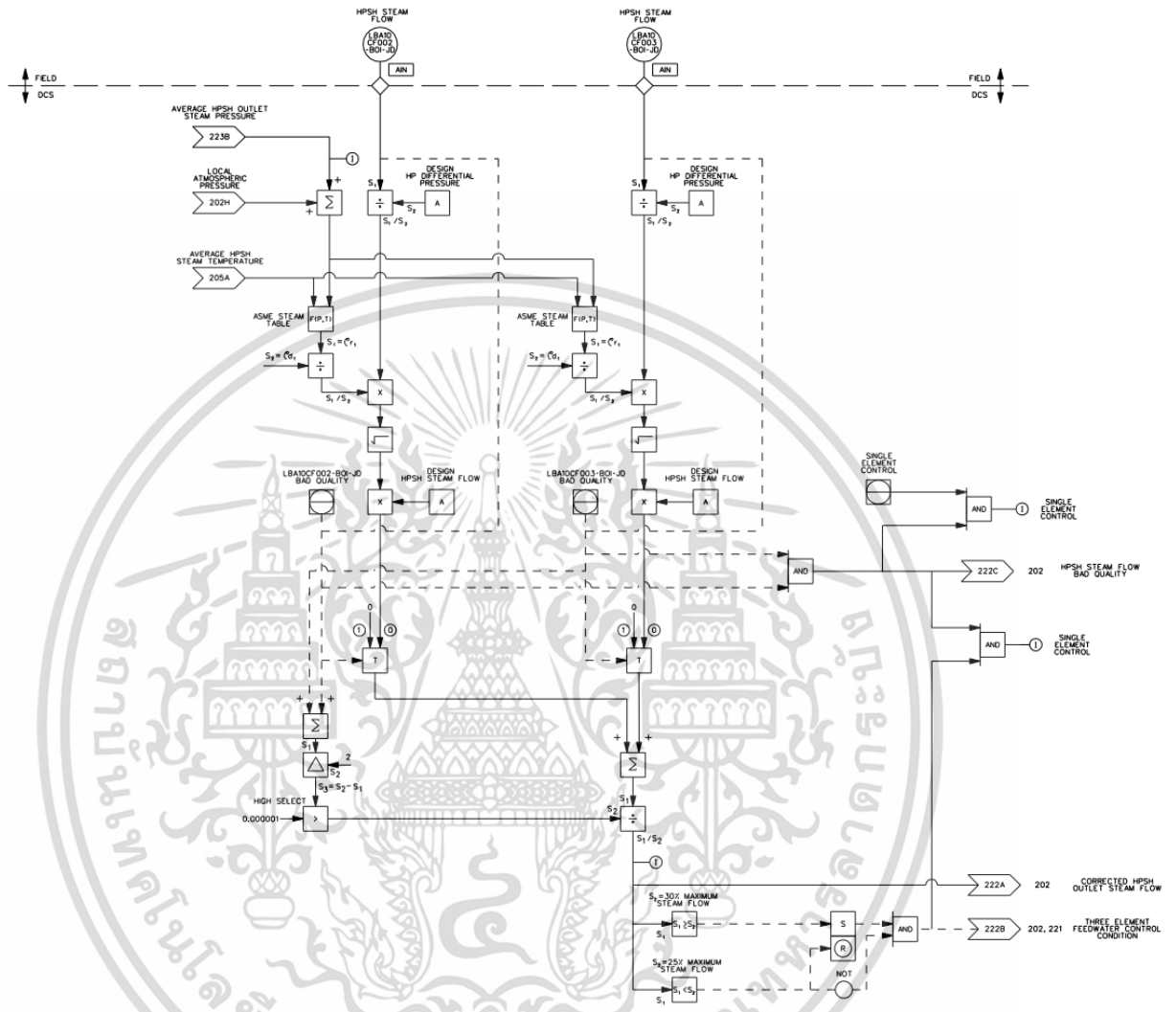


รูปที่ 3.3 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำ

โครงสร้างการวัดอัตราการไหลของไอน้ำที่ออกจากหม้อต้มไอน้ำความดันสูง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

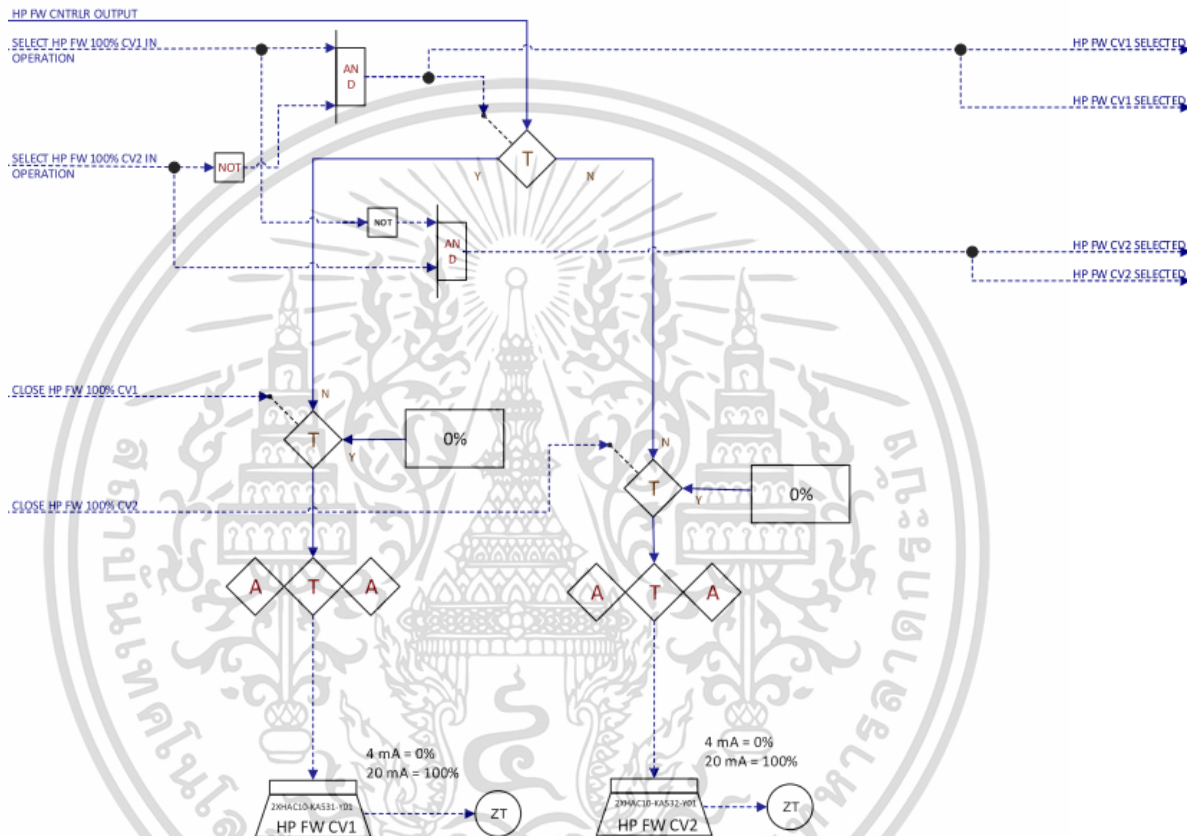


รูปที่ 3.4 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 โครงสร้างการควบคุมคำสั่งการวาล์วควบคุมระดับน้ำป้อน

การควบคุมคำสั่งวาล์วสำหรับควบคุมปริมาณน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูงของโรงไฟฟ้าบางปะอินโครงการ 1 นั้น มีการออกแบบการใช้งานด้วยกันทั้งหมด 2 วาล์วควบคุม โดยวาล์วควบคุมทั้ง 2 ตัวนั้นมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน โดยมีการทำงานแบบ 2\*100 คือ มีการทำงาน (Duty) 1 ตัว และวาล์วควบคุมอีกตัวที่เหลือนั้นมีหน้าที่ทำงานสำรอง (Hot Standby) เพื่อเมื่อมีไว้สับเปลี่ยนเวลาที่วาล์วมีปัญหา จะได้สามารถทำการ Hot Maintenance ได้ ดังแสดงตามรูปที่ 3.5

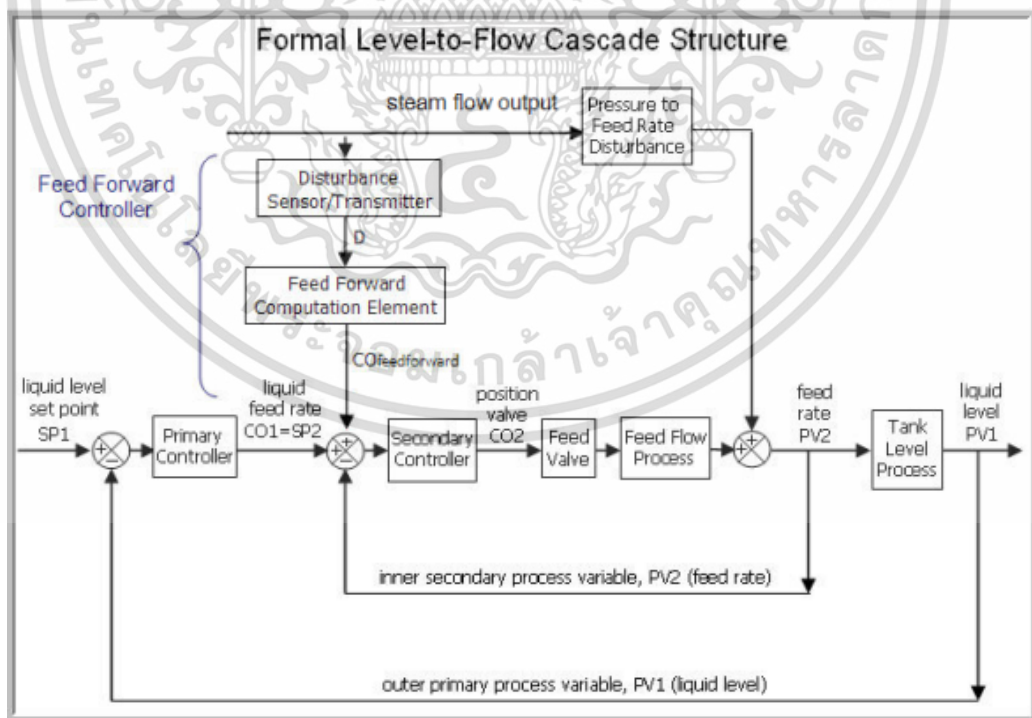


รูปที่ 3.5 SAMA Diagram ที่แสดงถึงโครงสร้างการทำงานวาล์วควบคุมทั้ง 2 ตัว ของวาล์วควบคุมปริมาณน้ำป้อนของหม้อต้มไอน้ำความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปร

สำหรับแผนภาพการควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรดังรูปที่ 3.6 ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมสองตัวและมีการเชื่อมโยงกันแบบคาสแคดคือ ตัวควบคุมอัตราการไหลน้ำป้อน (Feed water controller) หรือตัวควบคุมชั้นใน เรียกว่า ตัวควบคุมลำดับที่สอง ในขณะที่ตัวควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ (Drum level controller) หรือตัวควบคุมชั้นนอก เรียกว่า ตัวควบคุมลำดับที่หนึ่ง โครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวควบคุมชั้นในจะให้ผลตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลง เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนก่อนที่จะมีผลกระทบต่อตัวควบคุมชั้นนอก ในขณะที่ตัวควบคุมชั้นนอกจะถูกปรับแต่งให้มีผลตอบสนองที่ช้าต่อการเปลี่ยนแปลง เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่และแก้ปัญหาปรากฏการณ์การยุบตัว (Shrink Effect in Boiler Drum) และการขยายตัว (Swell Effect in Boiler Drum) ของน้ำภายในหม้อต้มในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่วนอินพุตซึ่งเป็นตัวแปรของกระบวนการคือ อัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้ม (Feed water flow transmitter) และอัตราการไหลออกของไอน้ำ (Steam flow transmitter) ในขณะที่ตัวแปรด้านเอาต์พุตคือ ระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ (Drum Level Transmitter) หากมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวาล์วควบคุมการไหล (Feed water control valve) จะส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าสู่หม้อต้ม และตัวควบคุมอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มจะรับรู้และทำการปรับแก้ไขอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 3.6 การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบคาสแคด (Cascade Control) ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) ที่ใช้งานใน

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สมมติฐานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม

จากทฤษฎีบทของการควบคุมแบบวิธี optimization ในบทที่ 2 นั้น ได้ทำการตั้งสมมติฐานของการแบ่งการควบคุมพีไอดีให้เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขของการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมแบบ On-Peak Mode Operation และ Off-Peak Mode Operation โดยมีรายละเอียดดังนี้

โรงไฟฟ้าบางปะอินโครงการ 1 ถูกสั่งการเดินเครื่องในการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าแห่งชาติ (National Control Center –NCC ) โดยถูกสั่งการให้จ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งโรงไฟฟ้าบางปะอินโครงการ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย Gas Turbine 2 unit และ Steam Turbine 1 unit เท่ากับ 90 MW ที่ช่วงเวลาต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On Peak Mode Operation และจ่ายกำลังไฟฟ้า 55 MW ที่ช่วงเวลาต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ หรือ Off Peak Mode Operation ซึ่งความแตกต่างระหว่าง On Peak Mode Operation และ Off Peak Mode Operation นั้นคือจำนวนการจ่ายโหลดของ Gas Turbine กล่าวคือ ที่เงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On Peak Mode Operation นั้น Gas Turbine ทั้งสองตัวจะจ่ายโหลดอยู่ที่ประมาณตัวละ 45 MW และเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off Peak Mode Operation นั้น Gas Turbine ทั้งสองตัวจะจ่ายโหลดอยู่ที่ประมาณตัวละ 25 MW

ซึ่งการเดินโหลดของ Gas Turbine ที่โหลด 45 MW และ 25 MW สิ่งที่แตกต่างกันนอกจากค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกเข้าไปในระบบแล้วก็ยังมีค่าปริมาณ Exhaust Gas Flow ที่ไหลเข้าไปยังหม้อต้มไอน้ำแบบกู้ความร้อน (HRSG) ที่เงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On Peak Mode Operation นั้นจะมีปริมาณ Exhaust Gas Flow ที่มากกว่าการเดินเครื่องแบบ Off Peak Mode Operation ดังนั้นปริมาณของ Exhaust Gas Flow ที่ไหลเข้ามายัง HRSG ในปริมาณอัตราการไหลที่แตกต่างกันทำให้การควบคุมระดับน้ำใน HRSG มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันตามไปด้วย

โดยปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงไฟฟ้าบางปะอินโครงการ 1 นี้คือการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum) แบบคาสแคดร่วมสามตัวแปร นั้นสามารถควบคุมค่าระดับน้ำให้อยู่ในค่ากำหนดได้เพียงเงื่อนไขเดียวในช่วงของ Off Peak Mode Operation เท่านั้น ตามรูปที่ 3.7 ส่วนการเดินเครื่องในเงื่อนไขของ On Peak Mode Operation นั้นไม่สามารถควบคุมค่าระดับน้ำให้อยู่ในค่ากำหนดได้ ดังรูปที่ 3.8

### 3.3.1 ตัวแปรควบคุมของการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation

รายละเอียด	หน่วยการวัด	ค่ากระบวนการ
กำลังการผลิตของเครื่องกังหันก๊าซ Gas Turbine Load	MW	25
ค่าเป้าหมายของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง Set Point Of HP Drum Level	mm	-50
ค่าการวัดของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง Process Variable Of HP Drum Level	mm	-53 ถึง -47 (Error $\pm$ 3 mm)
ค่าการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Steam Flow	t/h	39 ถึง 40
ค่าการวัดอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Feed Water Flow	t/h	39 ถึง 40
เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วของวาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Feed Water Flow Control Valve	%	49 ถึง 51



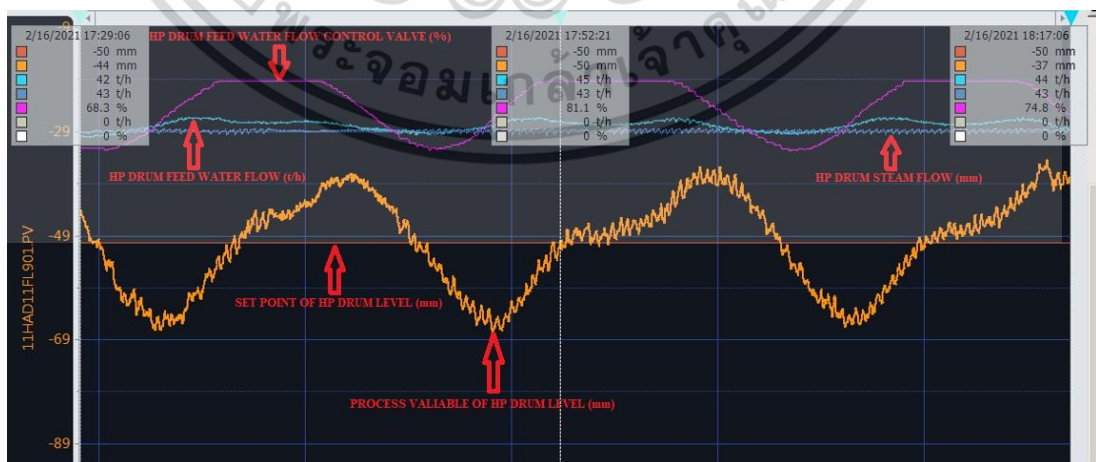
รูปที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ตัวแปรควบคุมของการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On-Peak Mode Operation

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On Peak Mode Operation

รายละเอียด	หน่วยการวัด	ค่ากระบวนการ
กำลังการผลิตของเครื่องกังหันก๊าซ Gas Turbine Load	MW	43 ถึง 47
ค่าเป้าหมายของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง Set Point Of HP Drum Level	mm	-50
ค่าการวัดของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง Process Variable Of HP Drum Level	mm	-70 ถึง -20 (Error $\pm$ 20 mm)
ค่าการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Steam Flow	t/h	43 ถึง 47
ค่าการวัดอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Feed Water Flow	t/h	43 ถึง 47
เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วของวาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Feed Water Flow Control Valve	%	65 ถึง 80



รูปที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On-Peak Mode Operation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการปรับแต่งแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดี (Optimization-based PID Controller Tuning with Gain Scheduling) เพื่อใช้งานบนระบบแบบกระจายส่วนของ Yokokawa Centrum VP Version 5.02.00

#### 3.4.1 การปรับแต่งค่าตัวควบคุมพีไอดี

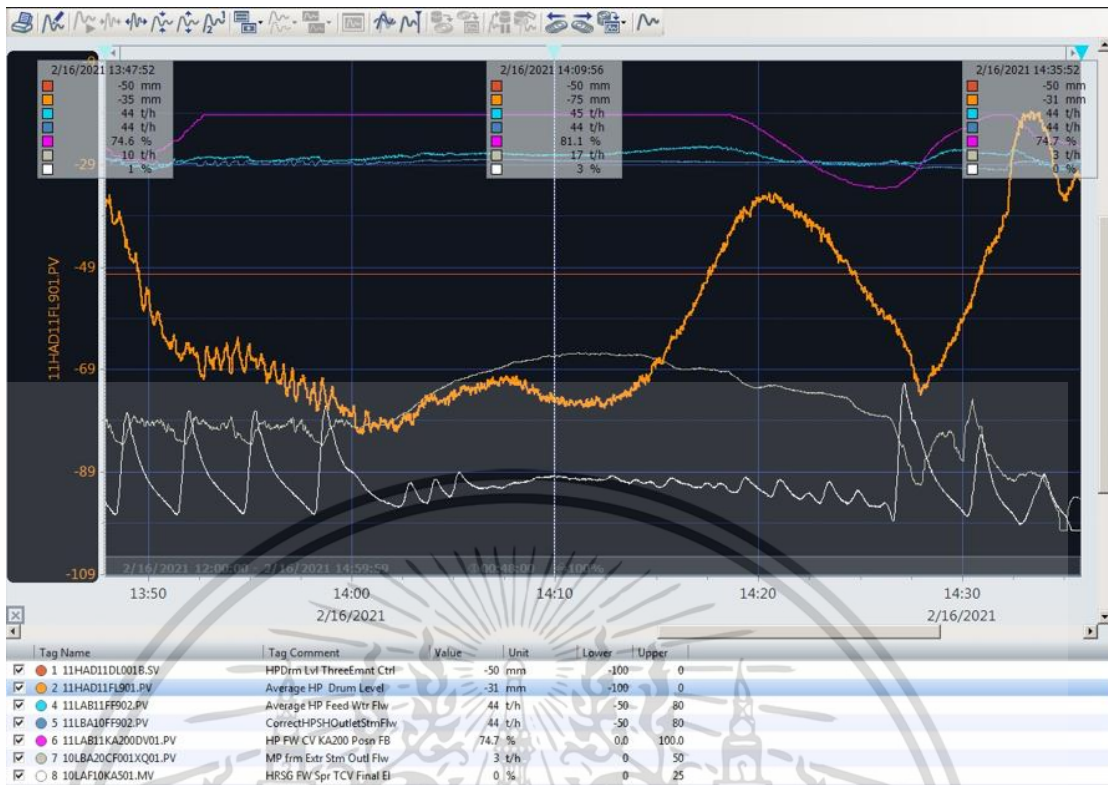
จากปัญหาข้างต้นที่โรงไฟฟ้าบางปะอิน ไม่สามารถใช้งานฟังก์ชันการควบคุมแบบ 3-Element เพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ ในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation ได้ ดังนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงมีความจำเป็นต้องมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์พีไอดีของตัวควบคุม 3-Element โดยใช้วิธีการ Trial and Error เพื่อทดสอบหาค่าพีไอดีที่เหมาะสม และมีการใช้หลักการของการประเมินประสิทธิภาพของตัวควบคุมบนพื้นฐานของการพิจารณาค่า Integral Absolute Error (Controller Performance base on IAE) เพื่อให้การควบคุมค่าตัวแปรกระบวนการนั้นอยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

โดยก่อนที่จะเริ่มทำการปรับแต่งค่าควบคุมพีไอดีของตัวควบคุม 3-Element ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทดลองนำตัวควบคุมพีไอดีของ 3-Element ที่มีใช้งานอยู่เดิมแล้วดังแสดงในตารางที่ 3.3 เข้าใช้งานจริง เพื่อดูผลตอบสนองของระบบ ซึ่งผลปรากฏว่าระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมค่าตัวแปรกระบวนการให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีของ 3-Element ที่มีใช้งานอยู่เดิม

PID Parameter		
Primary Loop	KP	1/35
	KI	1/50
	KD	0
Secondary Loop	KP	1/400
	KI	1/15
	KD	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ระบบควบคุมพีไอดี แบบ 3-Element ไม่สามารถควบคุมค่าตัวแปรกระบวนการให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ ในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation

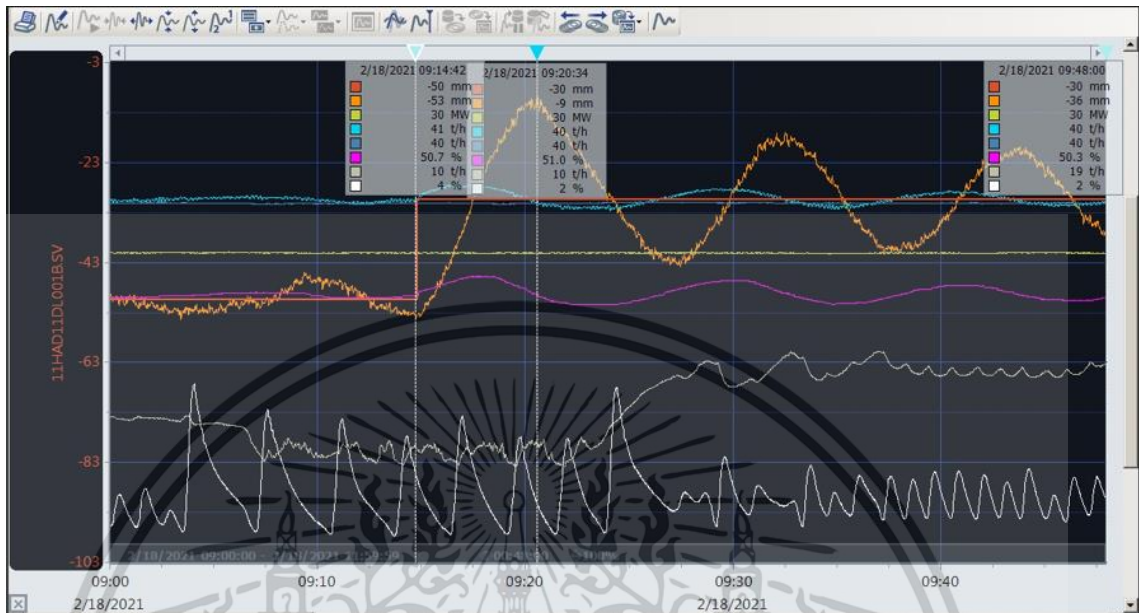
### 3.4.1.1 ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์พีไอดีครั้งที่ 1

จากนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์โดยเริ่มปรับแต่งค่าพีไอดีจากค่าที่ถูกใช้งานอยู่ข้างต้น มาเป็นพีไอดีค่าใหม่ ที่ใช้วิธีการ Trial & Error ซึ่งถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 3.4 เพื่อหาผลตอบสนองของระบบ ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงถึงค่าพีไอดีที่มีการปรับแต่งในครั้งที่ 1

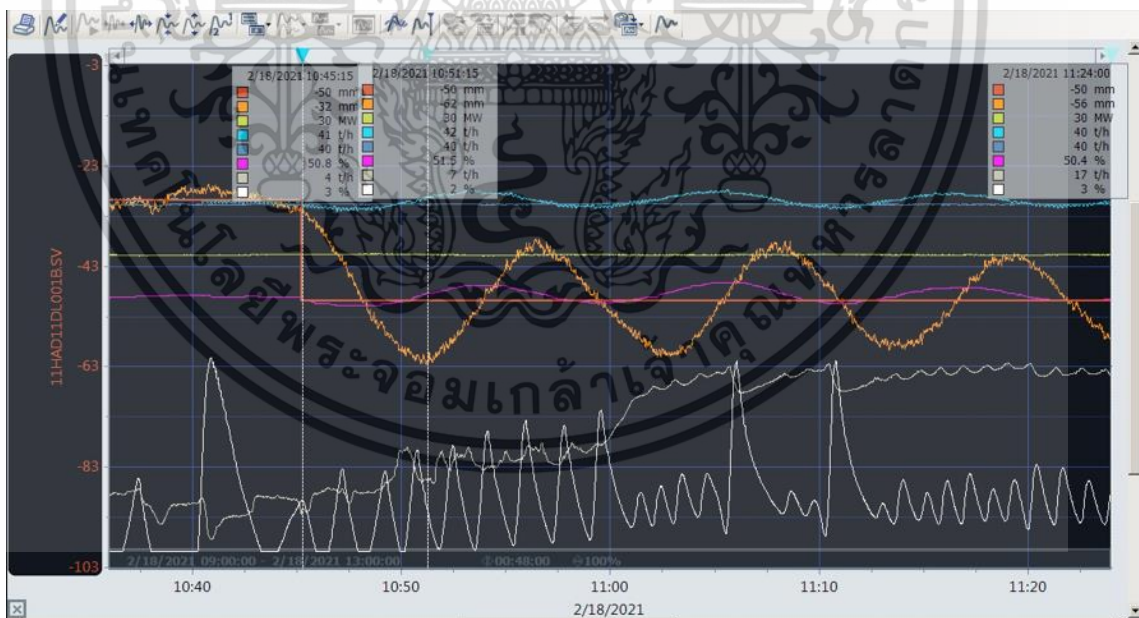
PID Parameter		Default PID	First Tuning
Primary Loop	KP	1/35	1/35
	KI	1/50	1/50
	KD	0	0
Secondary Loop	KP	1/400	1/300
	KI	1/15	1/15
	KD	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำที่ถูกกำหนดไว้อยู่ที่ -50 มิลลิเมตร โดยทำการเปลี่ยนจาก -50 เป็น -30 และ -30 เป็น -50 มิลลิเมตร เพื่อหาผลตอบสนองของระบบ ดังแสดงได้ตามรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 1 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมจาก -50 เป็น -30 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 1 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมจาก -30 เป็น -50 มิลลิเมตร

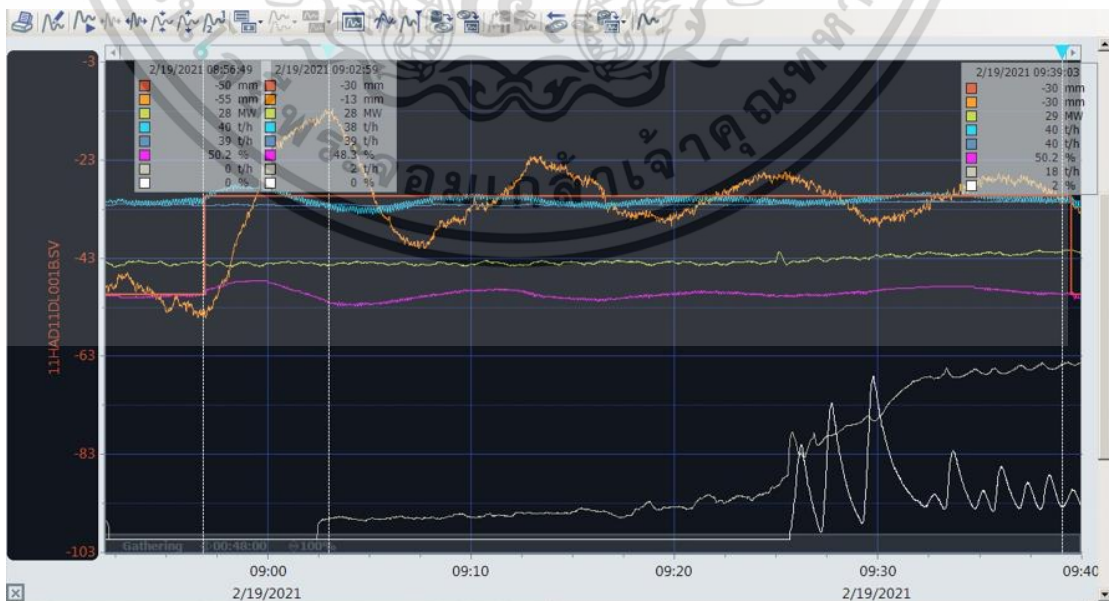
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.2 ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์พีไอดีครั้งที่ 2

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทำการปรับแต่งค่าควบคุมพีไอดี จากการทดลองครั้งที่ 1 เพื่อลองทดสอบสมรรถนะของระบบการควบคุม โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีตามตารางที่ 3.5 ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงถึงค่าพีไอดีที่มีการปรับแต่งในครั้งที่ 2

PID Parameter		First Tuning	Second Tuning
Primary Loop	KP	1/35	1/35
	KI	1/50	1/45
	KD	0	0
Secondary Loop	KP	1/300	1/150
	KI	1/15	1/15
	KD	0	0

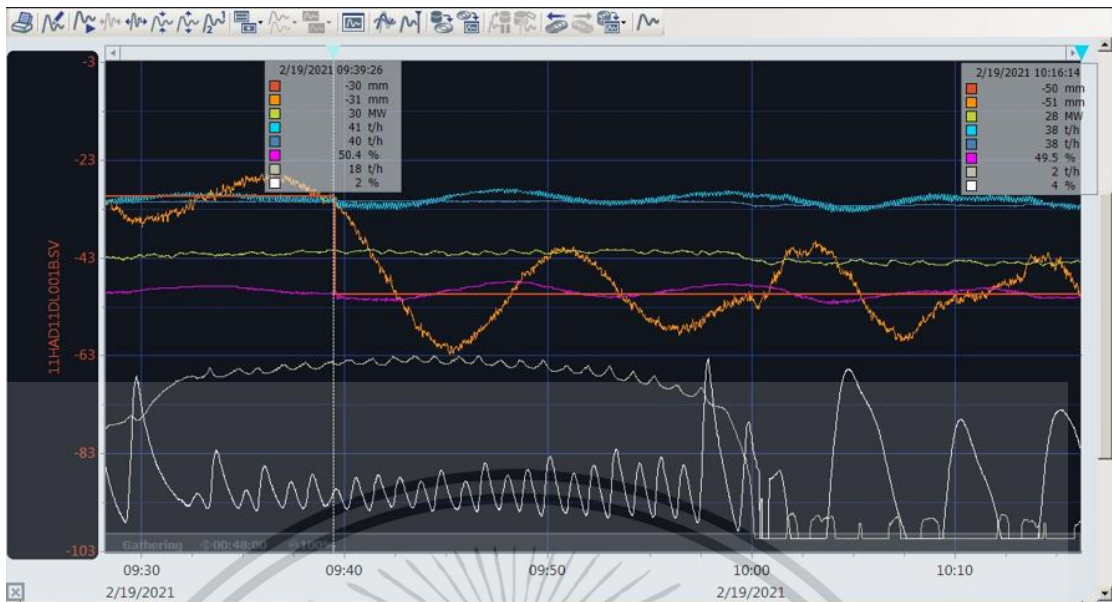
จากนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำที่ถูกกำหนดไว้อยู่ที่ -50 มิลลิเมตร โดยทำการเปลี่ยนจาก -50 เป็น -30 และ -30 เป็น -50 มิลลิเมตร เพื่อหาผลตอบสนองของระบบ ดังแสดงได้ตามรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 2 โดยการเปลี่ยนค่า

เป้าหมายในการควบคุมจาก -50 เป็น -30 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 1 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมจาก -30 เป็น -50 มิลลิเมตร

#### 3.4.1.3 ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์พีไอดีครั้งที่ 3

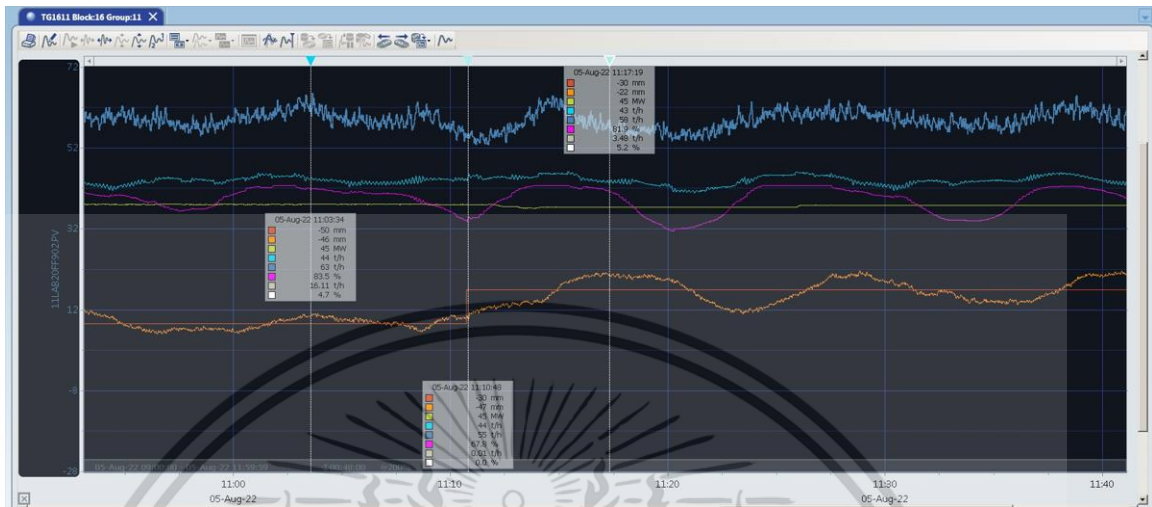
ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทำการปรับแต่งค่าควบคุมพีไอดีอีกครั้งจากการทดลองครั้งที่ 2 เพื่อลองทดสอบสมรรถนะของระบบการควบคุม โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงถึงค่าพีไอดีที่มีการปรับแต่งในครั้งที่ 3

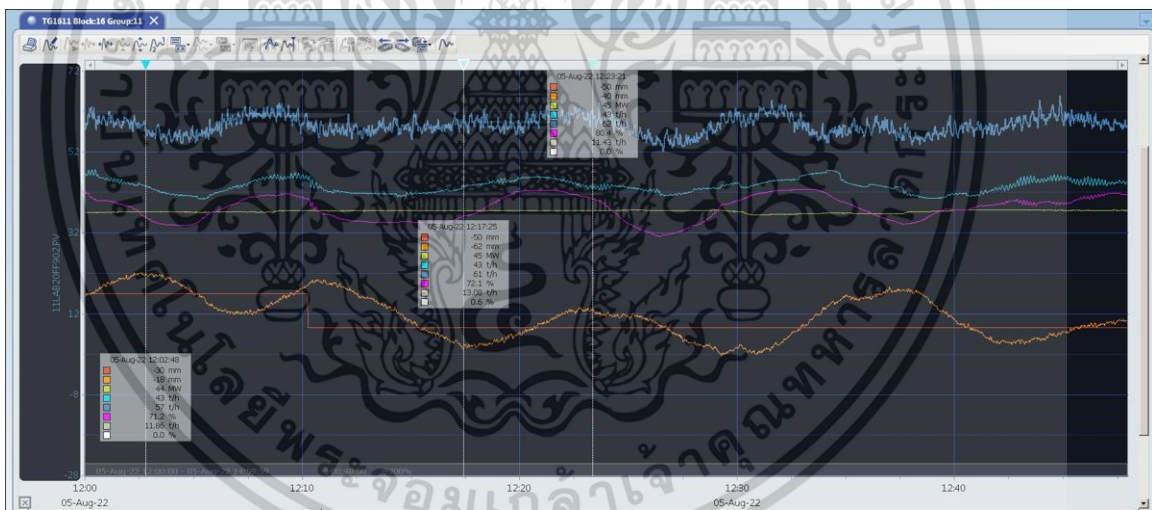
PID Parameter		Second Tuning	Third Tuning
Primary Loop	KP	1/35	1/35
	KI	1/45	1/40
	KD	0	0
Secondary Loop	KP	1/150	1/130
	KI	1/15	1/15
	KD	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำที่ถูกกำหนดไว้อยู่ที่ -50 มิลลิเมตร โดยทำการเปลี่ยนจาก -50 เป็น -30 และ -30 เป็น -50 มิลลิเมตร เพื่อหาผลตอบสนองของระบบ ดังแสดงได้ตามรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15 ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 2 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมจาก -50 เป็น -30 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.15 แสดงผลการตอบสนองของระบบจากการปรับแต่งค่าพีไอดี ครั้งที่ 2 โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายในการควบคุมจาก -30 เป็น -50 มิลลิเมตร

จากการทดลองที่ได้เปลี่ยนค่าควบคุมพีไอดีทั้งสามครั้งที่ผ่านมานั้นสามารถสรุปตารางการเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ตามตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงการปรับแต่งค่าควบคุมพีไอดี ทั้ง 3 ครั้ง

PID Details			Default Parameter	First Fine Tuning	Second Fine Tuning	Third Fine Tuning
PID Controller's Parameter	Primary Loop (Level Control)	KP	1/35	1/35	1/35	1/35
		KI	1/50	1/50	1/45	1/40
		KD	0	0	0	0
	Secondary Loop (Flow Control)	KP	1/400	1/300	1/150	1/130
		KI	1/15	1/15	1/15	1/15
		KD	0	0	0	0

3.4.2 การประเมินประสิทธิภาพของตัวควบคุมบนพื้นฐานของการพิจารณาค่าอินทิกรัล Integral Absolute Error (Controller Performance base on IAE)

อ้างอิงทฤษฎีในการคิดค่าความผิดพลาดของกระบวนการในหัวข้อที่ 2.8 ที่ผ่านมานั้น โดยทฤษฎีที่กล่าวถึงคือ การปรับแต่งค่าตัวควบคุมโดยใช้หลักการค่าความผิดพลาดน้อยสุดของการอินทิเกรต (IAE) จากนั้นผู้จัดทำได้นำผลของการทดลองเปลี่ยนค่าควบคุมพีไอดีดังกล่าวทั้ง 3 ครั้งนั้น มาทำการหาค่า IAE เพื่อเป็นการพิสูจน์ทราบว่า ค่าตัวแปรควบคุมตัวใดมีค่าประสิทธิภาพการควบคุม สูงที่สุด นั้นก็แสดงถึงค่าดังกล่าวมีความ Optimization สำหรับกระบวนการมากที่สุดเช่นกัน

ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลรายวินาทีในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ทั้ง 3 ครั้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่า IAE

11HAD11D001B.SV HPDrm Lvl ThreeEmnt Ctrl	11HAD11F1901.PV Average HP Drum Level	11MB10AG001XG01.PV Generator Active Power	11LAB11FF902.PV Average HP Feed Wtr Flw	11LBA10FF902.PV Correctd-PSHOutletStmFlw	11LAB11KA200D0V1.PV HP FW CV KA200 Posn FB	10LBA20CF001XG01.PV MP frm Extr Stm Outl Flw
-100	0	0	50	0	0	0
0	0	0	50	0	100	50
0	0	0	0	0	1	0
mm	mm	MW	t/h	t/h	%	t/h
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -31.5911	2/18/2021 10:45 29.5935	2/18/2021 10:45 40.20318	2/18/2021 10:45 39.86911	2/18/2021 10:45 50.70827	2/18/2021 10:45 5.0
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -31.8248	2/18/2021 10:45 29.60366	2/18/2021 10:45 40.20485	2/18/2021 10:45 39.89871	2/18/2021 10:45 50.70808	2/18/2021 10:45 4.9
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -32.01	2/18/2021 10:45 29.61281	2/18/2021 10:45 40.33049	2/18/2021 10:45 39.80651	2/18/2021 10:45 50.70802	2/18/2021 10:45 4
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -31.7648	2/18/2021 10:45 29.61738	2/18/2021 10:45 40.66664	2/18/2021 10:45 39.89478	2/18/2021 10:45 50.71259	2/18/2021 10:45 4.8
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -31.8573	2/18/2021 10:45 29.61967	2/18/2021 10:45 40.89794	2/18/2021 10:45 39.90972	2/18/2021 10:45 50.73662	2/18/2021 10:45 4.8
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -31.8237	2/18/2021 10:45 29.64523	2/18/2021 10:45 40.98397	2/18/2021 10:45 39.89053	2/18/2021 10:45 50.7472	2/18/2021 10:45 4.7
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -32.0494	2/18/2021 10:45 29.65766	2/18/2021 10:45 40.95839	2/18/2021 10:45 39.87473	2/18/2021 10:45 50.74007	2/18/2021 10:45 4
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -31.5204	2/18/2021 10:45 29.63388	2/18/2021 10:45 40.93968	2/18/2021 10:45 39.87517	2/18/2021 10:45 50.77569	2/18/2021 10:45 4.4
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -31.9956	2/18/2021 10:45 29.64827	2/18/2021 10:45 40.99578	2/18/2021 10:45 39.87632	2/18/2021 10:45 50.7524	2/18/2021 10:45 4.0
2/18/2021 10:45 -30	2/18/2021 10:45 -32.1443	2/18/2021 10:45 29.64325	2/18/2021 10:45 40.89823	2/18/2021 10:45 39.87227	2/18/2021 10:45 50.78319	2/18/2021 10:45 3.9
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -32.0939	2/18/2021 10:45 29.62833	2/18/2021 10:45 40.61697	2/18/2021 10:45 39.90319	2/18/2021 10:45 50.78631	2/18/2021 10:45 3.9
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -31.7322	2/18/2021 10:45 29.65374	2/18/2021 10:45 40.51677	2/18/2021 10:45 39.88982	2/18/2021 10:45 50.78252	2/18/2021 10:45 3.8
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -31.6773	2/18/2021 10:45 29.67041	2/18/2021 10:45 40.50199	2/18/2021 10:45 39.88793	2/18/2021 10:45 50.7541	2/18/2021 10:45 4.1
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -31.9513	2/18/2021 10:45 29.62176	2/18/2021 10:45 40.52119	2/18/2021 10:45 39.91234	2/18/2021 10:45 50.77446	2/18/2021 10:45 4.2
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -32.6547	2/18/2021 10:45 29.62186	2/18/2021 10:45 40.30814	2/18/2021 10:45 39.88924	2/18/2021 10:45 50.77497	2/18/2021 10:45 4
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -32.5185	2/18/2021 10:45 29.61784	2/18/2021 10:45 39.87892	2/18/2021 10:45 39.89452	2/18/2021 10:45 50.47756	2/18/2021 10:45 4.2
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -32.1218	2/18/2021 10:45 29.59647	2/18/2021 10:45 39.46278	2/18/2021 10:45 39.90877	2/18/2021 10:45 50.25214	2/18/2021 10:45 4.1
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -31.9931	2/18/2021 10:45 29.60872	2/18/2021 10:45 39.27021	2/18/2021 10:45 39.93027	2/18/2021 10:45 50.15916	2/18/2021 10:45 4.1
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -32.3472	2/18/2021 10:45 29.61534	2/18/2021 10:45 39.35377	2/18/2021 10:45 39.94217	2/18/2021 10:45 50.13134	2/18/2021 10:45 4.2
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -32.5699	2/18/2021 10:45 29.61458	2/18/2021 10:45 39.81646	2/18/2021 10:45 39.90627	2/18/2021 10:45 50.12439	2/18/2021 10:45 4.2
2/18/2021 10:45 -50	2/18/2021 10:45 -32.4607	2/18/2021 10:45 29.62234	2/18/2021 10:45 39.953	2/18/2021 10:45 39.93522	2/18/2021 10:45 50.12265	2/18/2021 10:45 4.1

โดยทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้นำผลการทดลองที่มีการเก็บค่าจากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ควบคุมทั้ง 3 ครั้งนั้นมาทำการคำนวณหาค่าโดยวิธีการ ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ 17 ในบทที่ 2 ว่าด้วยสมการหาประสิทธิภาพของตัวควบคุมบนพื้นฐานของการพิจารณาค่าผิดพลาดของอินทิกรัลที่มีค่าน้อยที่สุด  $IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|dt$  ดังนั้นทำการหาค่า (IAE) จากการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดี ทั้ง 3 ครั้ง ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่า IAE เริ่มต้น จากการที่ใช้ค่าตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้งานอยู่เดิมควบคุมค่าตัวแปรกระบวนการประมาณ 30 นาที จะเห็นว่าค่า IAE นั้นมีค่ารวมเท่ากับประมาณ 27,486.83 ดังที่ได้แสดงการคำนวณหาค่าดังกล่าว ได้ตามตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ตารางแสดงการคำนวณหาค่า IAE ของค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่ใช้งานแต่ต้น

11HAD11FL901.PV		11HAD11DL001B.SV				
Average HP Drum Level		HPDrm Lvl ThreeEmnt Ctrl				
	-100		-100			
	0		0			
	0		0			
mm		mm		SV - PV	Absolute	Sum Error
2/9/2021 16:59	-51.804	2/9/2021 16:59	-50	1.80399	1.80399	
2/9/2021 17:00	-51.8794	2/9/2021 17:00	-50	1.87936	1.87936	
2/9/2021 17:00	-52.3806	2/9/2021 17:00	-50	2.38062	2.38062	
2/9/2021 17:00	-52.1695	2/9/2021 17:00	-50	2.16948	2.16948	
2/9/2021 17:00	-52.1861	2/9/2021 17:00	-50	2.18609	2.18609	
2/9/2021 17:00	-52.5454	2/9/2021 17:00	-50	2.5454	2.5454	
2/9/2021 17:00	-52.019	2/9/2021 17:00	-50	2.01901	2.01901	
2/9/2021 17:00	-51.365	2/9/2021 17:00	-50	1.36502	1.36502	
2/9/2021 17:00	-51.8128	2/9/2021 17:00	-50	1.81277	1.81277	
2/9/2021 17:00	-52.36	2/9/2021 17:00	-50	2.36002	2.36002	
2/9/2021 17:00	-52.9566	2/9/2021 17:00	-50	2.95659	2.95659	
2/9/2021 17:00	-53.633	2/9/2021 17:00	-50	3.63303	3.63303	
2/9/2021 17:00	-53.7072	2/9/2021 17:00	-50	3.7072	3.7072	
2/9/2021 17:00	-53.6569	2/9/2021 17:00	-50	3.65686	3.65686	
2/9/2021 17:30	-48.9379	2/9/2021 17:30	-50	-1.06215	1.06215	
2/9/2021 17:31	-49.0219	2/9/2021 17:31	-50	-0.97814	0.97814	
						27486.83

3.4.2.1 ทำการหาค่าประสิทธิภาพของตัวควบคุมบนพื้นฐานของการพิจารณาค่าผิดพลาดของอินทิกรัลที่มีค่าน้อยที่สุด (IAE) ครั้งที่ 1

ตารางที่ 3.10 ตารางแสดงการคำนวณหาค่า IAE ของค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่ทำการปรับเปลี่ยน ครั้งที่ 1

11HAD11DL001B.SV		11HAD11FL901.PV				
HPDrm Lvl ThreeEmnt Ctrl		Average HP Drum Level				
	-100		-100			
	0		0			
	0		0			
mm		mm		SV - PV	Absolute	Sum Error
2/18/2021 10:45	-30	2/18/2021 10:45	-32.1443	2.14432	2.14432	
2/18/2021 10:45	-50	2/18/2021 10:45	-32.0939	-17.9061	17.90609	
2/18/2021 10:45	-50	2/18/2021 10:45	-31.7322	-18.2678	18.26776	
2/18/2021 10:48	-50	2/18/2021 10:48	-50.0157	0.01574	0.01574	
2/18/2021 10:48	-50	2/18/2021 10:48	-50.3445	0.34445	0.34445	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-50.2551	0.25508	0.25508	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-50.4409	0.44089	0.44089	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-50.523	0.52299	0.52299	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-50.3471	0.34705	0.34705	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-50.3015	0.30145	0.30145	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-49.7653	-0.23468	0.23468	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-49.5373	-0.46268	0.46268	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-49.3624	-0.63759	0.63759	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-49.2503	-0.74971	0.74971	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-49.383	-0.61698	0.61698	
2/18/2021 11:16	-50	2/18/2021 11:16	-49.8394	-0.16063	0.16063	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ 13025.78661

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.2 ทำการหาค่าประสิทธิภาพของตัวควบคุมบนพื้นฐานของการพิจารณาค่าผิดพลาดของอินทริกัลที่มีค่าน้อยที่สุด (IAE) ครั้งที่ 2

ตารางที่ 3.11 ตารางแสดงการคำนวณหาค่า IAE ของค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่ทำการปรับเปลี่ยนครั้งที่ 2

11HAD11DL001B.SV		11HAD11FL901.PV				
HPDrm Lvl ThreeEmnt Ctrl		Average HP Drum Level				
	-100		-100			
	0		0			
	0		0			
mm		mm		SV - PV	Absolute	Sum Error
2/19/2021 9:39	-30	2/19/2021 9:39	-30.7875	0.7875	0.7875	
2/19/2021 9:39	-50	2/19/2021 9:39	-31.0797	-18.9203	18.92027	
2/19/2021 9:39	-50	2/19/2021 9:39	-31.212	-18.788	18.78801	
2/19/2021 9:39	-50	2/19/2021 9:39	-30.9905	-19.0095	19.00951	
2/19/2021 9:39	-50	2/19/2021 9:39	-31.4751	-18.5249	18.52493	
2/19/2021 9:39	-50	2/19/2021 9:39	-31.9743	-18.0257	18.02566	
2/19/2021 9:40	-50	2/19/2021 9:40	-35.5131	-14.4869	14.48694	
2/19/2021 9:40	-50	2/19/2021 9:40	-35.1135	-14.8866	14.88655	
2/19/2021 10:11	-50	2/19/2021 10:11	-50.5841	0.58405	0.58405	
2/19/2021 10:11	-50	2/19/2021 10:11	-50.1443	0.14427	0.14427	
2/19/2021 10:11	-50	2/19/2021 10:11	-50.547	0.54699	0.54699	
2/19/2021 10:11	-50	2/19/2021 10:11	-50.8103	0.81033	0.81033	
2/19/2021 10:11	-50	2/19/2021 10:11	-49.165	-0.83501	0.83501	
2/19/2021 10:11	-50	2/19/2021 10:11	-49.5964	-0.40363	0.40363	
2/19/2021 10:11	-50	2/19/2021 10:11	-49.6217	-0.37831	0.37831	
2/19/2021 10:11	-50	2/19/2021 10:11	-49.3295	-0.67047	0.67047	
						10953.39

3.4.2.3 ทำการหาค่าประสิทธิภาพของตัวควบคุมบนพื้นฐานของการพิจารณาค่าผิดพลาดของอินทริกัลที่มีค่าน้อยที่สุด (IAE) ครั้งที่ 3

ตารางที่ 3.12 ตารางแสดงการคำนวณหาค่า IAE ของค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีที่ทำการปรับเปลี่ยนครั้งที่ 3

11HAD11DL001B.SV		11HAD11FL901.PV				
HPDrm Lvl ThreeEmnt Ctrl		Average HP Drum Level				
	-100		-100			
	0		0			
	0		0			
mm		mm		SV - PV	Absolute	Sum Error
2/19/2021 15:14	-50	2/19/2021 15:14	-45.4421	-4.55791	4.55791	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-52.9825	2.98247	2.98247	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-52.7479	2.74792	2.74792	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-53.0509	3.05087	3.05087	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-52.0011	2.00113	2.00113	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-51.4236	1.42358	1.42358	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-51.9376	1.93761	1.93761	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-52.1956	2.19556	2.19556	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-52.2619	2.26194	2.26194	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-52.0865	2.08645	2.08645	
2/19/2021 15:16	-50	2/19/2021 15:16	-51.5766	1.57659	1.57659	
2/19/2021 15:20	-50	2/19/2021 15:20	-52.8345	2.83449	2.83449	
2/19/2021 15:46	-50	2/19/2021 15:46	-49.5619	-0.43808	0.43808	
2/19/2021 15:46	-50	2/19/2021 15:46	-49.6223	-0.37772	0.37772	
2/19/2021 15:47	-50	2/19/2021 15:47	-49.0411	-0.95895	0.95895	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของตัวควบคุมบนพื้นฐานของการพิจารณาค่าผิดพลาดของอินทิกรัลที่มีค่าน้อยที่สุด (IAE) ดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่าการปรับแต่งเปลี่ยนค่าพีไอดีครั้งที่ 3 ส่งผลให้ค่า IAE ของระบบมีค่าน้อยที่สุด นั้นแสดงว่าค่าพีไอดีครั้งที่ 3 นั้นมีการ Optimization สูงที่สุดสำหรับกระบวนการควบคุมนี้ โดยเปรียบเทียบกับการที่ได้เปลี่ยนค่าพีไอดีมาทั้งหมดกับ 2 ครั้งข้างต้น ดังนั้นผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอสรุปผลการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์พีไอดีของ 3-Element สำหรับการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ควบคุมในขณะที่โรงไฟฟ้าบางปะอินมีการเดินเครื่องในเงื่อนไขของความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง หรือ On-Peak Mode Operation นั้น ค่าพีไอดีจากการปรับแต่งครั้งที่ 3 มีความเหมาะสม และสมควรนำเข้าไปใช้งานเพื่อควบคุมตัวแปรกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายตามเงื่อนไขที่กำหนด

### 3.4.3 ออกแบบการแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดี

จากสมมติฐานดังกล่าวข้างต้น ปัญหาที่เกิดขึ้นในการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum) ที่ค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี (PID parameter) ค่าเดียวนั้นไม่สามารถควบคุมค่าระดับน้ำให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นั้นได้มีการปรับแต่งค่าตัวแปรของพีไอดี ออกเป็นสองชุดการควบคุม ตามตารางที่ 3.13 คือ เงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off Peak Mode Operation ก็ใช้ค่าตัวแปรพีไอดีชุดที่หนึ่ง และเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Peak Mode Operation ก็ใช้ค่าตัวแปรพีไอดีชุดที่สอง โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรของค่าพีไอดีนี้ไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ใดๆเพิ่มเติม เพียงแต่มีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมขึ้นมาในระบบควบคุมแบบกระจายส่วนของ YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00 เท่านั้น ตามรูปที่ 3.9 เพื่อให้การควบคุมค่าระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงอยู่ในค่าที่กำหนดทั้ง 2 เงื่อนไขการเดินเครื่องดังกล่าว

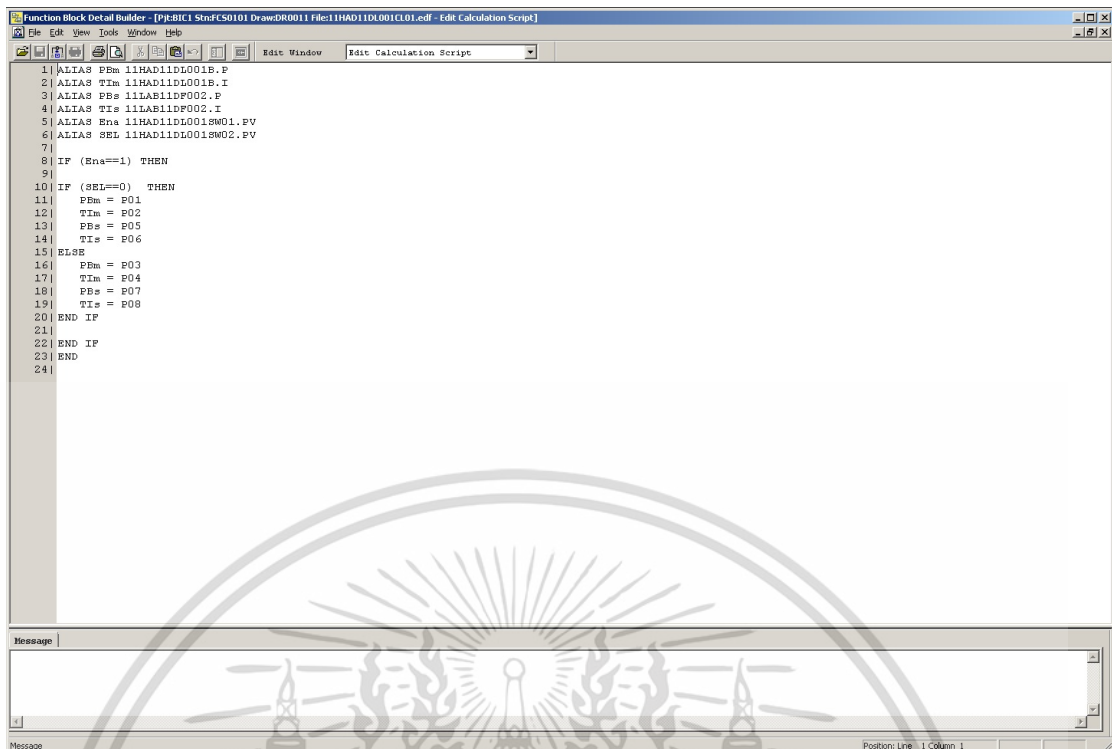
**ตารางที่ 3.13** ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของค่าพีไอดีทั้ง 2 ชุด ในการใช้งานควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak และ On Peak Mode Operation

PID Parameter		พีไอดีชุดที่ 1 สำหรับ Off Peak Mode Operation	พีไอดีชุดที่ 2 สำหรับ On Peak Mode Operation
Primary Loop	KP	1/35	1/35
	KI	1/50	1/40
	KD	0	0
Secondary Loop	KP	1/400	1/130
	KI	1/15	1/15
	KD	0	0

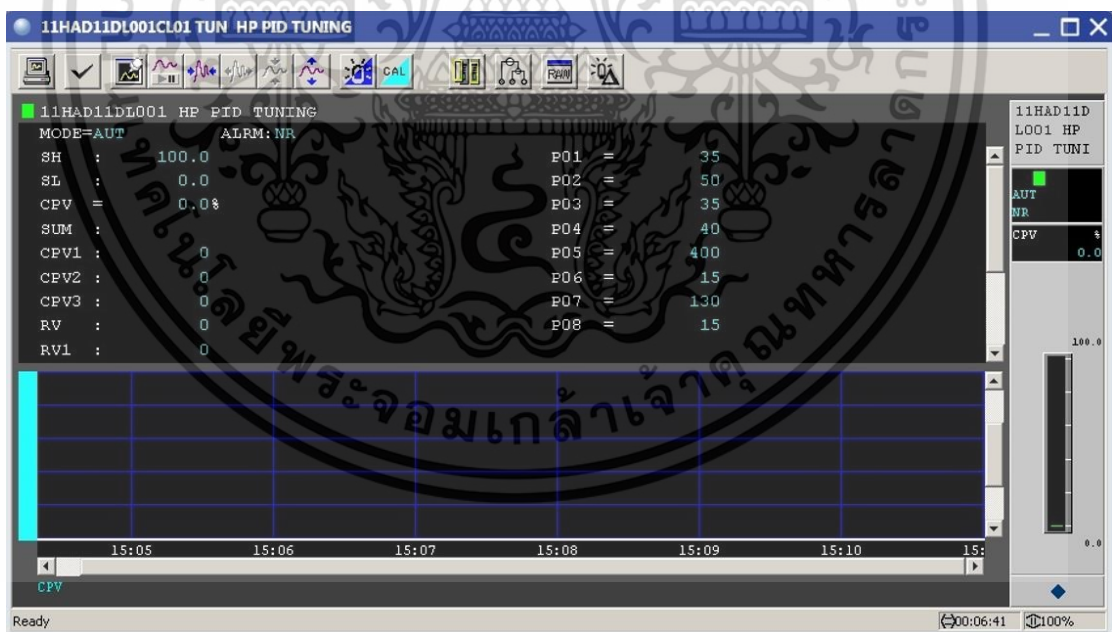
3.4.4 การเขียนฟังก์ชันการควบคุมเพื่อใช้งานการแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดี (Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling) เพื่อใช้งานบนระบบแบบกระจายส่วนของ Yokokawa Centrum VP Version 5.02.00

จากในหัวข้อที่ 3.4.1 ได้มีการหาค่าควบคุมพีไอดี ทั้งสองชุดการควบคุมมาแล้วนั้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาค่าพารามิเตอร์พีไอดีนั้นมาเขียนฟังก์ชันการควบคุมพีไอดีเพื่อเลือกใช้งานพีไอดีทั้ง 2 ชุด ให้เหมาะสมใช้งานสำหรับเงื่อนไขการเดินเครื่องทั้งแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation และความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง หรือ On-Peak Mode Operation ตามเงื่อนไขและข้อกำหนดในการเลือกใช้งานจากข้อกำหนดที่ทางผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้กำหนดขึ้น ในระบบควบคุมแบบกระจายส่วนของยี่ห้อ Yokokawa Centrum VP Version 5.02.00 โดยมีวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

3.4.2.1 เขียนฟังก์ชันการเลือกค่าใช้งานของพารามิเตอร์พีไอดีทั้ง 2 ชุด ใน Function Block Detail Builder ของระบบควบคุมแบบกระจายส่วนยี่ห้อ Yokokawa Centrum VP Version 5.02.00 ตามรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเขียนฟังก์ชันเงื่อนไขเพื่อให้เลือกใช้งานค่าตัวแปรพีไอดีที่เหมาะสมในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation และ On-Peak Mode Operation



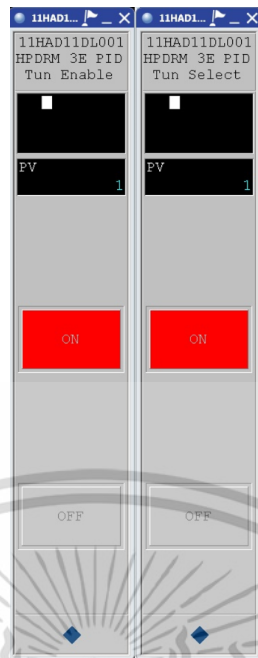
รูปที่ 3.17 แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ชุด ที่ถูกดาวน์โหลดเข้าไปในตัวควบคุมพีไอดีของหม้อต้มไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum)

3.4.2 เขียนฟังก์ชันการเลือกใช้งานค่าควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ชุด ให้ตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดของการเดินเครื่องทั้งแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง หรือ On-Peak Mode Operation โดยหากว่า ณ ขณะนั้น โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่อง On-Peak Mode Operation จะส่งผลให้ค่ากำลังงานเอาต์พุตของเครื่อง กังหันก๊าซ (Gas Turbine Load) มีค่ามากกว่า 40 เมกะวัตต์ และปริมาณอัตราการไหลออกของไอน้ำ (High Pressure Steam Flow Outlet) มีค่ามากกว่า 42 ตัน/ชั่วโมง ก็จะส่งสัญญาณดิจิทัลเอาต์พุต 1 มาเลือกใช้งานค่าควบคุมพีไอดีชุดที่ 2 เพื่อให้เหมาะสมกับการเดินเครื่องในเงื่อนไขของความ ต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง หรือ On-Peak Mode Operation ในทางตรงกันข้าม หากสัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตที่ส่งมาเป็น 0 ก็จะมาเลือกใช้งานค่าควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 เพื่อให้เหมาะสมกับการเดินเครื่องในเงื่อนไขของความ ต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation ดัง แสดงได้ในรูปที่ 3.18

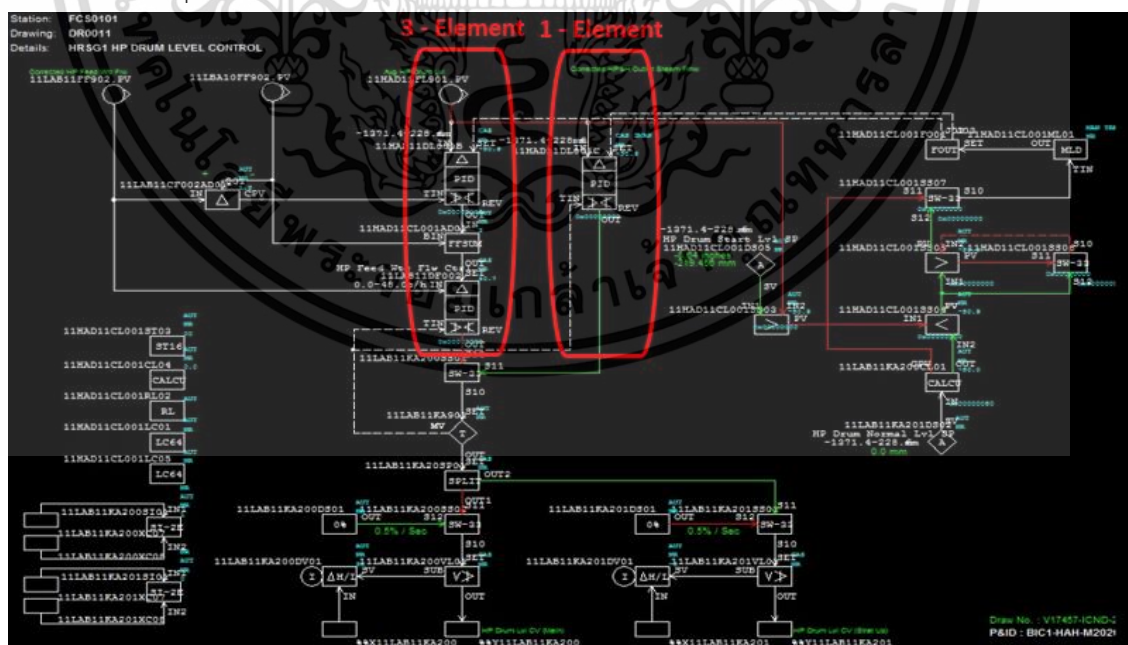


รูปที่ 3.18 แสดงฟังก์ชันการเลือกใช้งานค่าควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ชุด ให้ตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดของการเดินเครื่องทั้งแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation และความ ต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศสูง หรือ On-Peak Mode Operation



รูปที่ 3.19 แสดงถึง Faceplate ในการเลือกเพื่อที่จะอนุญาต ให้มีการใช้งานของฟังก์ชันการแบ่งค่า การควบคุมพีไอดี

ในการเขียนฟังก์ชันการควบคุมเพิ่มเติมในการเลือกใช้งานการแบ่งชุดการควบคุมพีไอดี นั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อใดใดกับลอจิกการควบคุมที่มีใช้งานอยู่เดิม ดังจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.20 เพราะว่าฟังก์ชันที่ได้มีการเขียนขึ้นมาเพิ่มเติมนั้น จะเป็นฟังก์ชันที่ใช้งานเพื่อโหลดค่าพีไอดีทั้ง 2 ชุด เข้าไปที่ตัวควบคุมพีไอดี แบบ 3-Element เท่านั้น



รูปที่ 3.20 แสดงให้เห็นถึงลอจิกการควบคุมที่เลือกใช้งานระหว่าง 1-Element และ 3-Element ของ การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum) ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ลอจิกการควบคุมแต่อย่างใด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สรุป

ระบบการวัดและควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย การวัดระดับ, การวัดอัตราการไหลของน้ำป้อน และการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำ รวมทั้งตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคด ที่มีการแบ่งค่าตัวควบคุมชุดพีไอดีเพื่อใช้สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องที่แตกต่างกันในโหมดความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง (on peak mode operation) และโหมดความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ (off peak mode operation) โดยได้มีการปรับแต่งค่าควบคุมพีไอดีขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้ในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำขณะที่โรงไฟฟ้ามีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง โดยการปรับแต่งค่าควบคุมพีไอดีที่ได้มานั้น เป็นการใช้วิธีการ Trail & Error แล้วดูผลตอบสนองของระบบ เพื่อให้ค่ากระบวนการมีการควบคุมได้ตรงกับค่าเป้าหมายที่กำหนด จากนั้นจึงนำค่าพีไอดีที่ได้มาพิสูจน์เพื่อยืนยันว่าค่าพีไอดีที่จะนำมาใช้งานในการควบคุมนั้นมีการ Optimization ในการควบคุมกระบวนการมากที่สุด (โดยเปรียบเทียบกับค่าพีไอดีค่าอื่นที่ได้ลองปรับแต่ง) โดยใช้หลักการของการหาค่าอินทิกรัลผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาด (Integral of the Absolute Value of the Error (IAE) เพื่อมาใช้ในการพิสูจน์ว่าค่าพีไอดีที่มีการปรับแต่งนั้นมีความ Optimization สูงที่สุดเพื่อใช้ในการควบคุมตัวแปรกระบวนการเพื่อให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนด โดยค่าพีไอดีที่ถูกปรับแต่งนั้นจะถูกนำไปใช้เป็นตัวควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า ส่วนการประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมดังกล่าว ถูกเขียนควบคุมด้วยโปรแกรมการควบคุมแบบกระจายส่วน (DCS) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00 จะถูกนำมาใช้สำหรับเขียนโปรแกรมประมวลผลบนระบบคอมพิวเตอร์ โดยเชื่อมต่อกับระบบหม้อต้มความดันไอน้ำผ่านอุปกรณ์อินพุต เอาต์พุต เพื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล และดิจิตอลเป็น แอนะล็อก ซึ่งรายละเอียดต่างๆของระบบหม้อต้มไอน้ำความดันสูง และผลการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงโครงสร้างการวัดค่าตัวแปรต่างๆของกระบวนการวัดและควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง ตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคดสามตัวแปร การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบแบ่งการควบคุมโดยอาศัยหลักการ Optimization เพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม เพื่อแก้ไขปัญหาที่ไม่สามารถควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ ขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องในเงื่อนไขของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On Peak Mode Operation

ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ที่มีการแบ่งชุดการใช้งานตัวควบคุมแบบพีไอดีออกเป็น 2 ชุดการควบคุม สำหรับพีไอดีชุดแรกจะใช้ในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation และตัวควบคุมพีไอดีชุดที่สองนั้นจะถูกใช้งานในช่วงของโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยอาศัยหลักการของ Optimization เพื่อแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดีให้เหมาะสมในการเลือกใช้งาน เพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด ในขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องทั้งแบบ On Peak และ Off Peak Mode Operation

โดยได้มีการอธิบายถึงวิธีการทดลอง ซึ่งอธิบายถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของ การแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดีให้เหมาะสม โดยอาศัยหลักการ Optimization เพื่อทดสอบความสามารถและสมรรถนะของระบบ โดยจะเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับแต่งการทำงานของกระบวนการ เพื่อนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคด โดยมีการแบ่งค่าพีไอดีออกเป็น 2 ชุด ซึ่งมีการทำงานเป็นแบบระบบอัตโนมัติในการเลือกใช้งานชุดตัวแปรควบคุมพีไอดีดังกล่าว และทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมการควบคุมแบบกระจายส่วนของบริษัท YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00 เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูง ในเงื่อนไขของโรงไฟฟ้าที่มีการเดินเครื่องทั้งในโหมดของ On Peak และ Off Peak Mode Operation จากนั้นทำการสรุปผลการทดสอบสมรรถนะของระบบว่ามีผลลัพธ์อย่างไร

#### 4.1 ตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปร

โรงไฟฟ้าบางปะอินโคเจนเนอเรชั่น จำกัด มีฟังก์ชันการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงอยู่ด้วยกัน 2 ฟังก์ชัน คือ

1. ฟังก์ชัน 1'Element Control กล่าวคือ เป็นฟังก์ชันการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงที่มีการควบคุมพีไอดีแบบลูปเดี่ยว (Single loop PID control) ซึ่งค่าเป้าหมายคือ

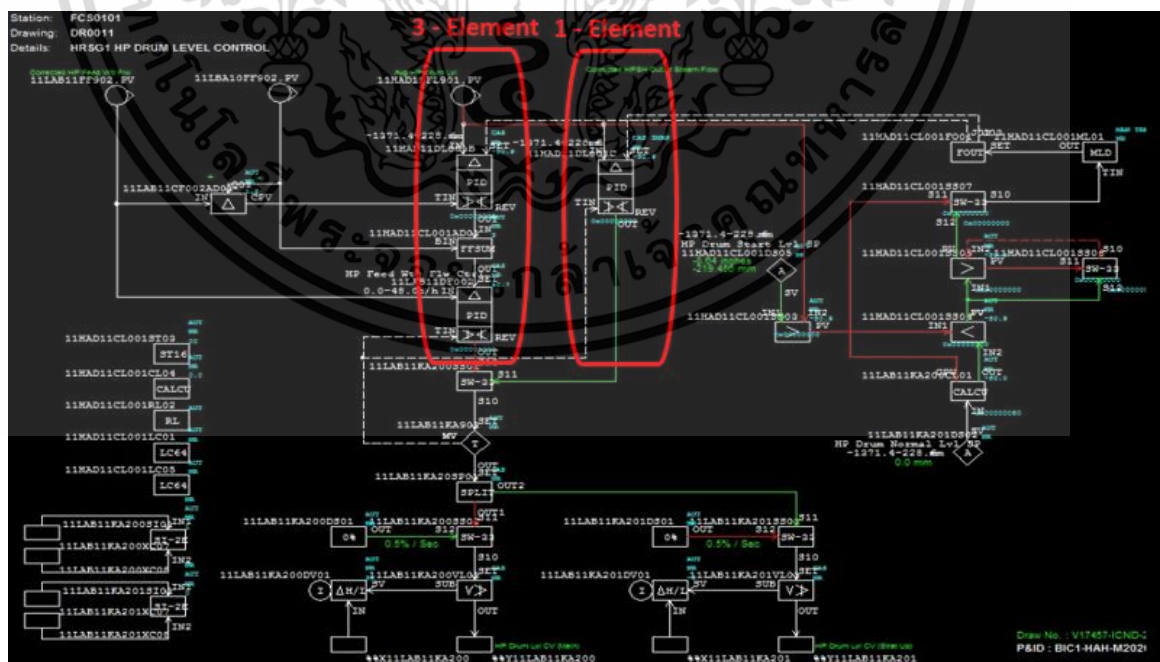
ต้องการควบคุมค่าระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าที่กำหนด และตัวแปรของ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการคือ ระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูง โดยฟังก์ชัน 1'Element Control นั้นจะนิยมใช้ในการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขการ Start-up และ Shutdown ของ Gas Turbine ที่มีปริมาณอัตราการไหลของไอน้ำ หรือ Steam flow outlet ในปริมาณที่ยังน้อยอยู่

2. ฟังก์ชัน 3'Element Control กล่าวคือ ในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงนั้น จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปร ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ, อัตราการไหลเข้าของน้ำป้อน และระดับน้ำภายในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง เพื่อความไวในการตอบสนองของระบบที่เปลี่ยนแปลง และเพื่อลดความผิดพลาดในการควบคุมค่ากระบวนการให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด โดยฟังก์ชัน 3'Element Control นี้จะนิยมใช้ในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของการเดินเครื่อง Gas Turbine ในโหมดปกติ ที่มีการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิต ส่งผลให้ปริมาณอัตราการไหลของไอน้ำ หรือ Steam flow outlet มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงการควบคุมแบบคาสแคดร่วมสามตัวแปรเท่านั้น เพราะโดยปกติแล้วโรงไฟฟ้าจะใช้งานฟังก์ชัน 3'Element Control ในภาวะการเดินเครื่องปกติของโรงไฟฟ้า (Plant normal operation) โดยที่การใช้งานฟังก์ชัน 1'Element Control จะใช้ในช่วงของการสตาร์ทอัพหรือชัตดาวน์โรงไฟฟ้าเท่านั้น (Plant start-up & shutdown operation) ซึ่งการทำงานการควบคุมทั้ง 1'Element Control และ 3'Element Control นั้นสามารถแสดงได้ดังโลจิกการควบคุมแบบกระจายส่วนของบริษัท YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00 ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โลจิกการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงของโรงไฟฟ้าบางปะอินแบบกระจาย ส่วนของบริษัท YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

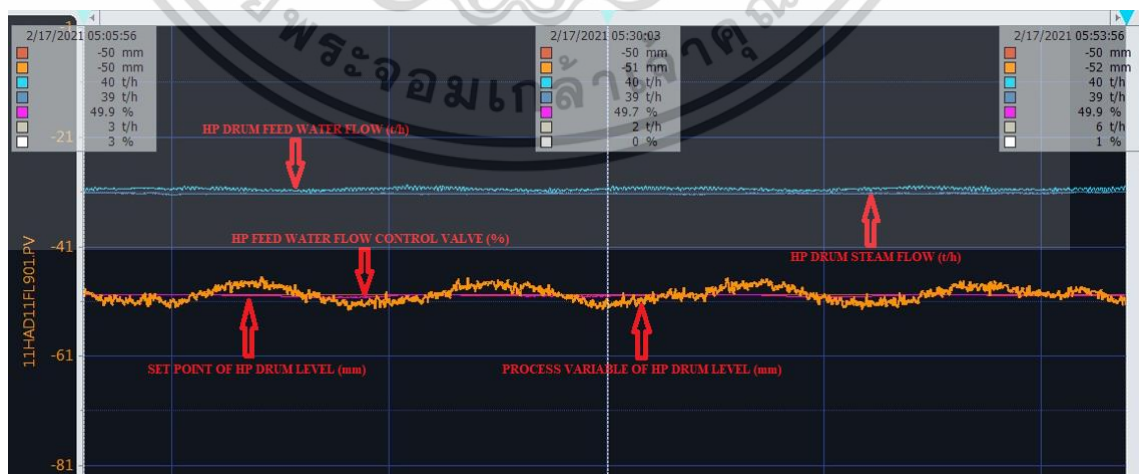
## 4.2 วิธีการทดลอง

### 4.2.1 หาค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ ความดันสูง ขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบ Off Peak Mode Operation

ในสภาวะการเดินเครื่องปกติของโรงไฟฟ้าบางปะอิน โคอเจนเนอเรชั่น โครงการ 1 นั้นมี พารามิเตอร์ควบคุมอยู่ดังแสดงได้ในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation

รายละเอียด	หน่วยการวัด	ค่ากระบวนการ
กำลังการผลิตของเครื่องกังหันก๊าซ Gas Turbine Load	MW	25
ค่าเป้าหมายของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง Set Point Of HP Drum Level	mm	-50
ค่าการวัดของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง Process Variable Of HP Drum Level	mm	-53 ถึง -47 (Error $\pm$ 3 mm)
ค่าการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Steam Flow	t/h	39 ถึง 40
ค่าการวัดอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Feed Water Flow	t/h	39 ถึง 40
เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Feed Water Flow Control Valve	%	49 ถึง 51



**รูปที่ 4.2** ค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak Mode Operation

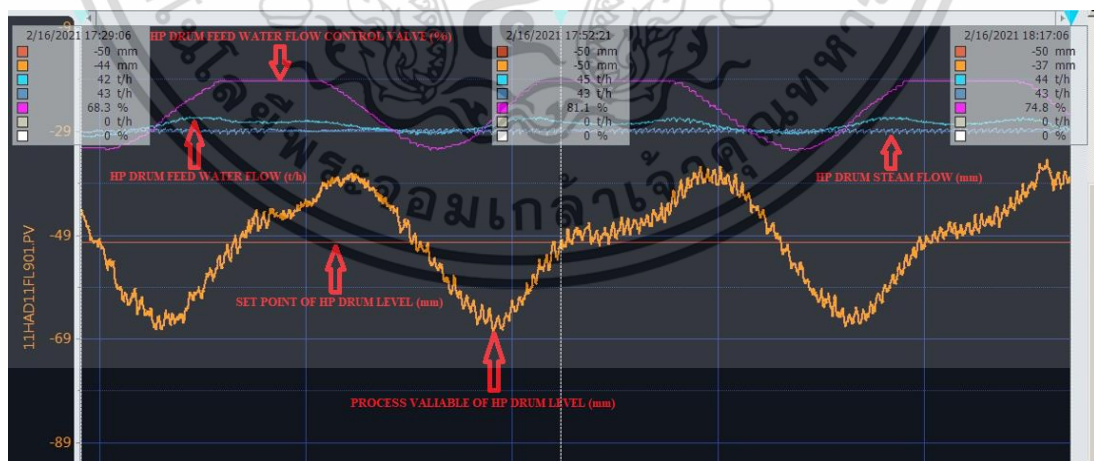
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ทำการหาค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง ขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบ On Peak Mode Operation

ในสภาวะการเดินเครื่องปกติของโรงไฟฟ้าบางปะอิน โคนเจนเนอเรชั่น โครงการ 1 นั้นมีพารามิเตอร์ควบคุมอยู่ดังแสดงได้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On Peak Mode Operation

รายละเอียด	หน่วยการวัด	ค่ากระบวนการ
กำลังการผลิตของเครื่องกังหันก๊าซ Gas Turbine Load	MW	43 ถึง 47
ค่าเป้าหมายของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง Set Point Of HP Drum Level	mm	-50
ค่าการวัดของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง Process Variable Of HP Drum Level	mm	-70 ถึง -20 (Error $\pm$ 20 mm)
ค่าการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Steam Flow	t/h	43 ถึง 47
ค่าการวัดอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Feed Water Flow	t/h	43 ถึง 47
เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำความดันสูง HP Drum Feed Water Flow Control Valve	%	65 ถึง 80

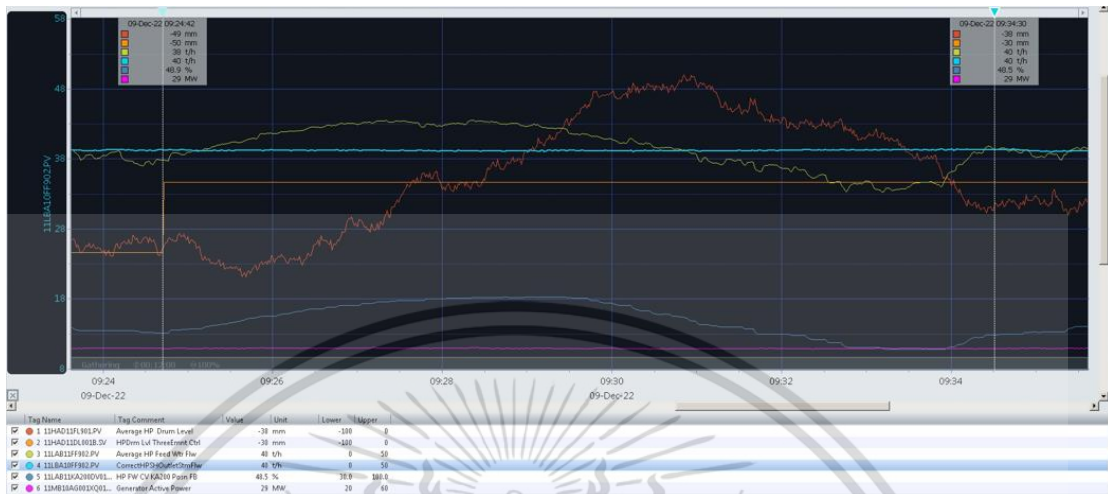


รูปที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ On-Peak Mode Operation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

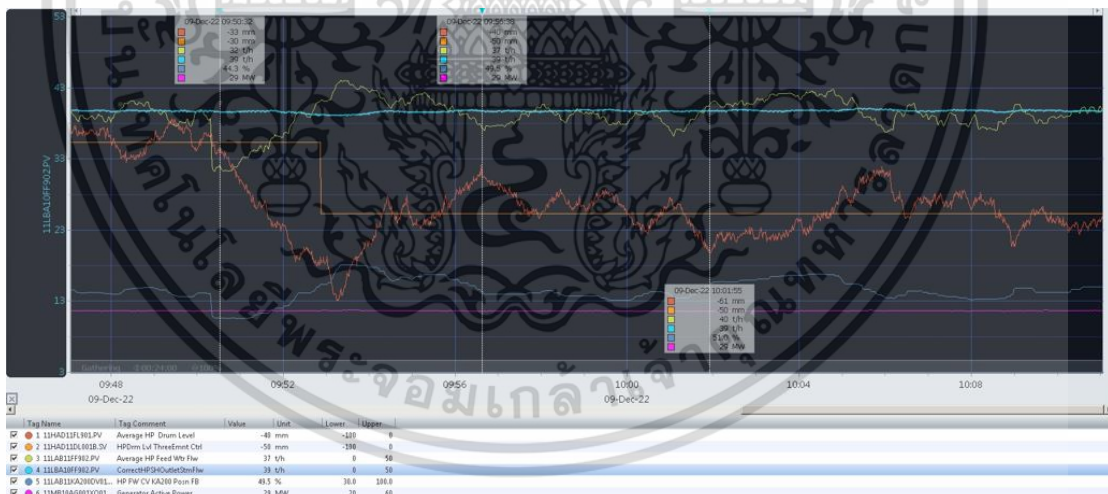
#### 4.2.3 ทำการตรวจสอบตัวแปรควบคุมในเงื่อนไขของโรงไฟฟ้าขณะมีการเดินเครื่องแบบ ความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation

1. ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -30 มม.



รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -30 มม.

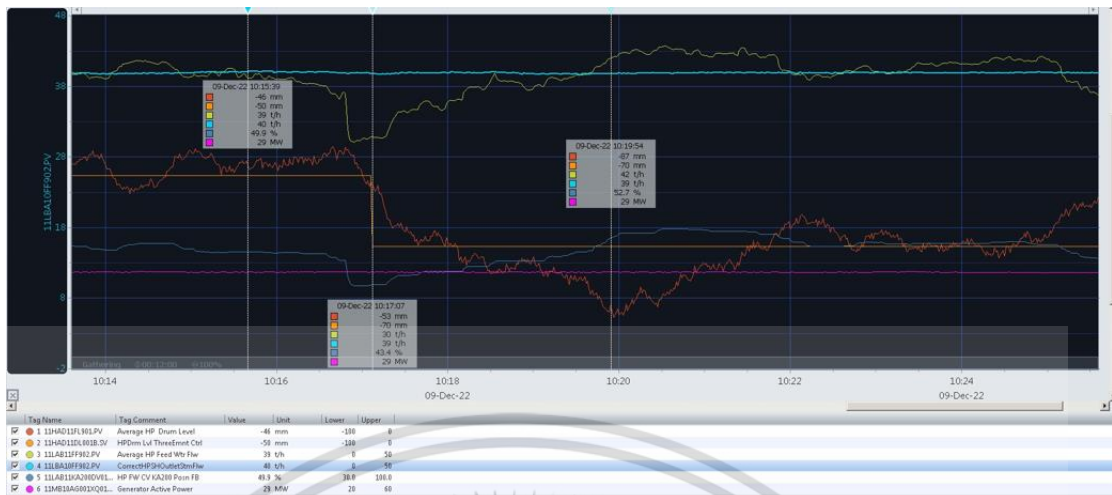
2. ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -30 มม. เป็น -50 มม.



รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -30 มม. เป็น -50 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -70 มม.



รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -70 มม.

### 4. ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -70 มม. เป็น -50 มม.

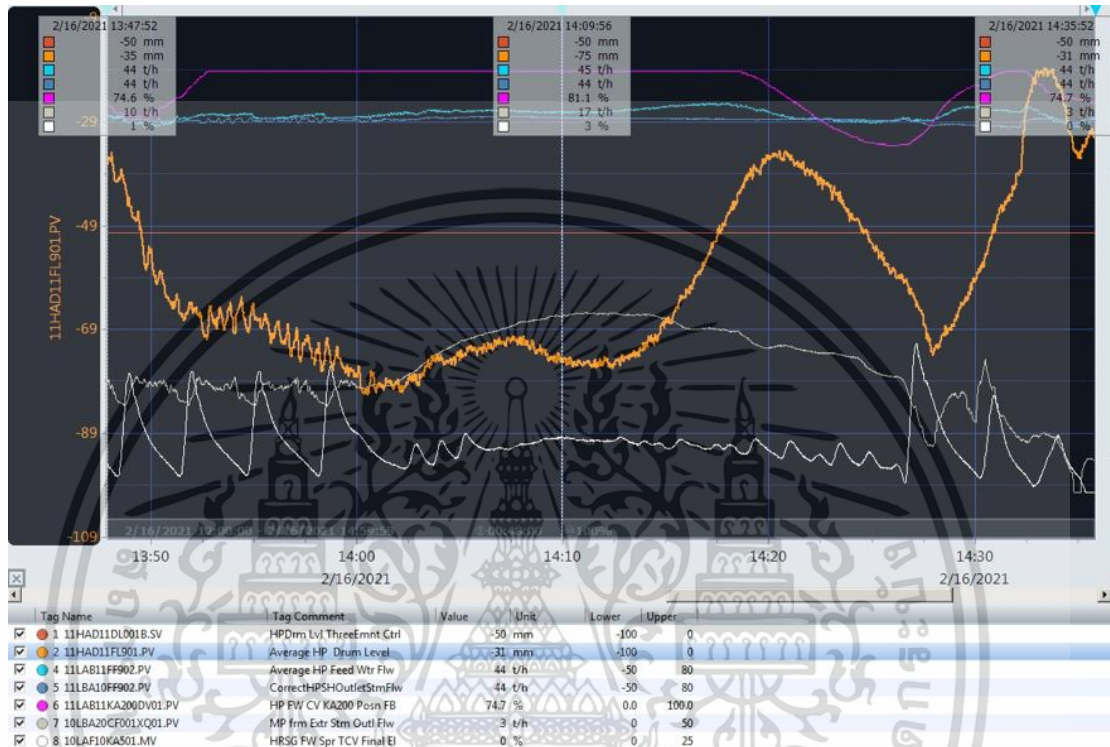


รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -70 มม. เป็น -50 มม.

#### 4.2.4 ทำการตรวจสอบตัวแปรควบคุมในเงื่อนไขของโรงไฟฟ้าขณะมีการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation

เมื่อทำการเลือกใช้งานฟังก์ชันควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง แบบ 3-Element Control จะเห็นว่าค่าตัวแปรกระบวนการไม่สามารถควบคุมให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ดังนั้นแล้ว ผู้ทำการทดลองไม่สามารถลองเปลี่ยนค่าเป้าหมาย (Set point) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อดูพฤติกรรม หรือผลการตอบสนองได้ เนื่องจากว่าโรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่อง และขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่ ซึ่งหากผู้ทำการทดลองได้ทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย (Set point) อาจส่งผลให้ค่าตัวแปรกระบวนการของระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง เกิดการเปลี่ยนแปลงมาก แล้วส่งผลให้ระบบ Protection ของโรงไฟฟ้าทำงานได้



รูปที่ 4.8 แสดงผลของค่าตัวแปรกระบวนการไม่สามารถควบคุมให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ ที่โรงไฟฟ้ามีการเลือกใช้งาน 3-Element Control ในช่วงของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง On Peak Mode Operation

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูง ที่มีการควบคุมแบบ 3-Element นั้นสามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้เฉพาะในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation เท่านั้น ในทางกลับกันแล้วจะเห็นว่าเมื่อโรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation ระบบควบคุมพีไอตินั้นไม่สามารถที่จะใช้งานเพื่อควบคุมค่าระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 วิธีการแบ่งค่าตัวควบคุมพีไอดีเพื่อใช้ในเงื่อนไขโรงไฟฟ้าขณะมีการเดินเครื่องแบบความ ต้องการใช้ไฟฟ้า หรือ On-Peak Mode Operation

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum) ที่ค่าตัวแปรควบคุมพีไอดี (PID parameter) ค่าเดียวนั้นไม่สามารถควบคุมค่าระดับน้ำให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นั้นได้มีการออกแบบค่าตัวแปรของพีไอดี ออกเป็นสองชุดการควบคุมตามตารางที่ 4.1 คือ เงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off Peak Mode Operation ก็ใช้ค่าตัวแปรพีไอดีชุดที่หนึ่ง และเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Peak Mode Operation ก็ใช้ค่าตัวแปรพีไอดีชุดที่สอง โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรของค่าพีไอดีนี้ไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ เพิ่มเติม เพียงแต่มีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมขึ้นมาในระบบควบคุมแบบกระจายส่วนของ YOKOGAWA รุ่น CENTUM VP Version 5.02.00 เท่านั้น ตามรูปที่ 4.2 เพื่อให้การควบคุมค่าระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงอยู่ในค่าที่กำหนดทั้ง 2 เงื่อนไขการเดินเครื่องดังกล่าว

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของค่าพีไอดีทั้ง 2 ชุด ในการใช้งานควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงในเงื่อนไขของ Off Peak และ On Peak Mode Operation

PID Parameter		พีไอดีชุดที่ 1 สำหรับ Off Peak Mode Operation	พีไอดีชุดที่ 2 สำหรับ On Peak Mode Operation
Primary Loop	KP	1/35	1/35
	KI	1/50	1/40
	KD	0	0
Secondary Loop	KP	1/400	1/130
	KI	1/15	1/15
	KD	0	0

##### 4.3.1 ทำการปรับแก้ตัวแปรควบคุม และลองทดสอบระบบในเงื่อนไขของโรงไฟฟ้าขณะ มีการเดินเครื่องแบบความ ต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.3 ได้มีการนำเอาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองชุดข้างต้นนั้น มาเขียนฟังก์ชันการเลือกใช้งานค่าพารามิเตอร์พีไอดีทั้ง 2 ชุด ใน Function Block Detail Builder ของระบบควบคุมแบบกระจายส่วนย่อย Yokokawa Centrum VP Version 5.02.00 ตามรูปที่ 4.9 โดยเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation ก็ใช้ค่าตัวแปรพีไอดีชุดที่หนึ่ง และเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation ก็ใช้ค่าตัวแปรพีไอดีชุดที่สอง

```

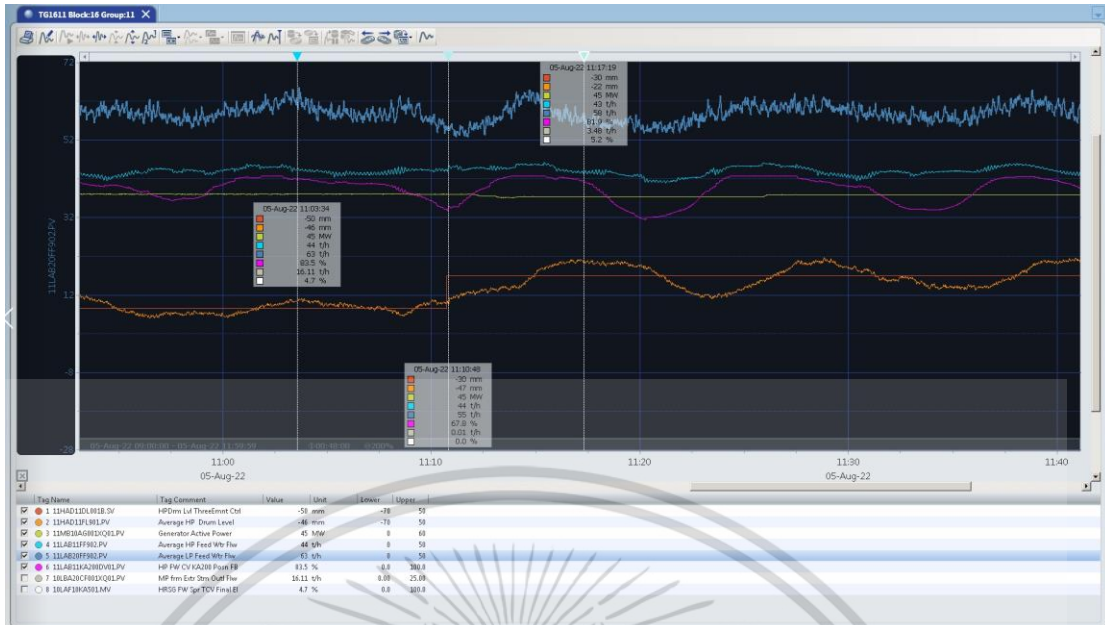
1 | ALIAS PIm 11HAD11DL001S.P
2 | ALIAS TIm 11HAD11DL001S.I
3 | ALIAS PIs 11LAB11DP002.P
4 | ALIAS TIs 11LAB11DP002.I
5 | ALIAS Ena 11HAD11DL001SW01.PV
6 | ALIAS SEL 11HAD11DL001SW02.PV
7 |
8 | IF (Ena==1) THEN
9 |
10 | IF (SEL==0) THEN
11 |   PIm = P01
12 |   TIm = P02
13 |   PIs = P05
14 |   TIs = P06
15 | ELSE
16 |   PIm = P03
17 |   TIm = P04
18 |   PIs = P07
19 |   TIs = P08
20 | END IF
21 |
22 | END IF
23 | END
24 |

```

รูปที่ 4.9 การเขียนฟังก์ชันเงื่อนไขเพื่อให้เลือกใช้งานค่าตัวแปรพีไอดีให้เหมาะสมในเงื่อนไขของการเดินเครื่องแบบ Off-Peak Mode Operation และ On-Peak Mode Operation

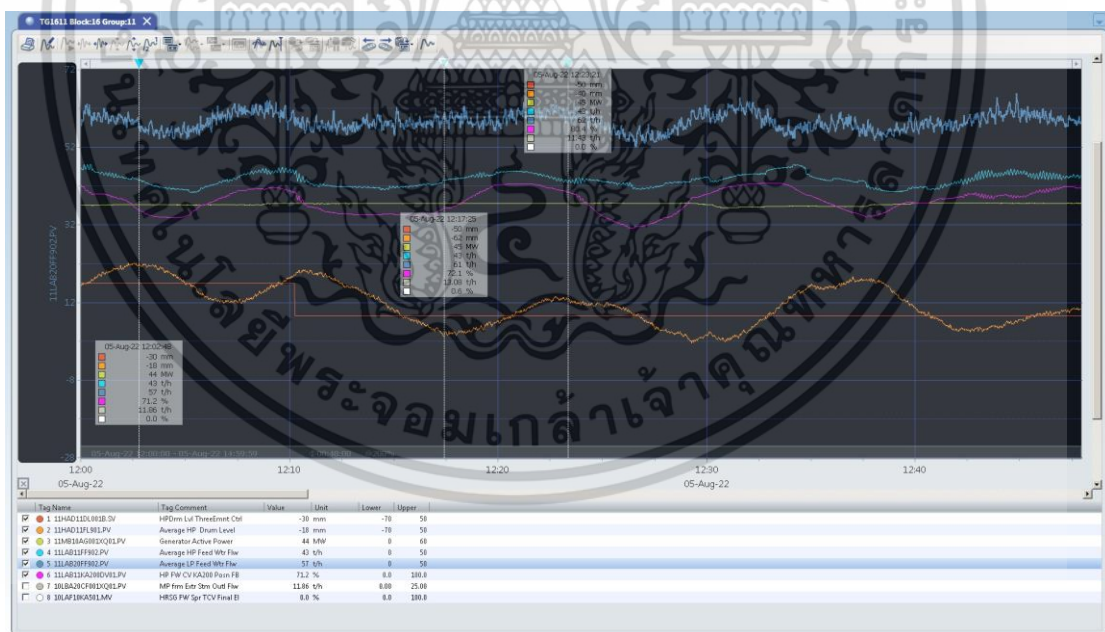
จากนั้นทำการทดสอบระบบขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation ที่มีการใช้งานค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 2 โดยวิธีการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมาย (step set point change test) ดังนี้

1. ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -30 มม.



รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 2 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -30 มม.

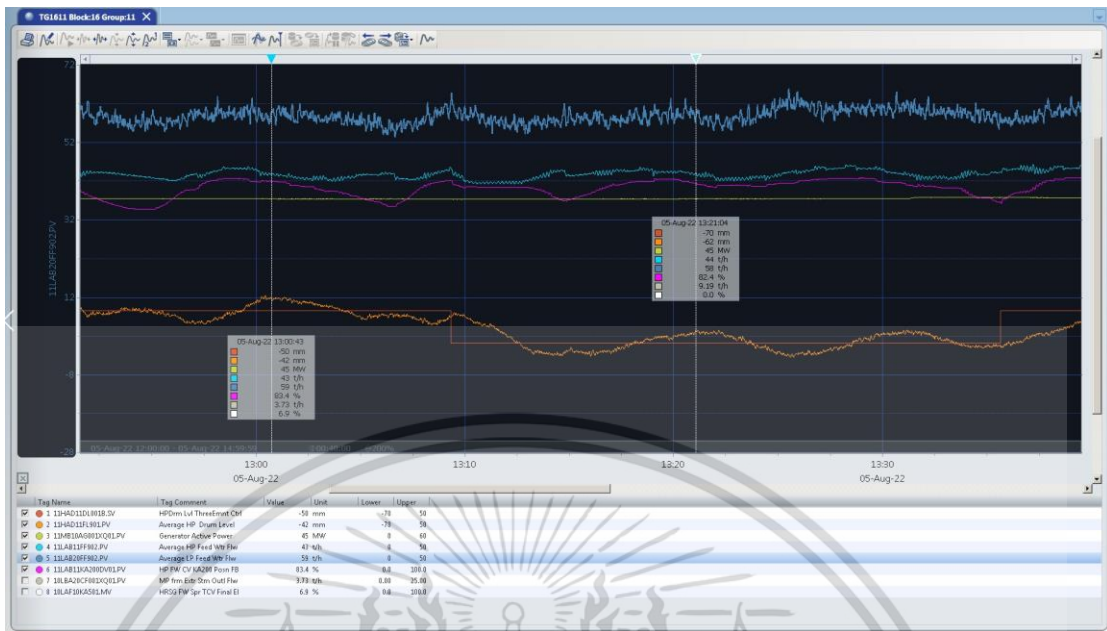
2. ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -30 มม. เป็น -50 มม.



รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 2 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -30 มม. เป็น -50 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

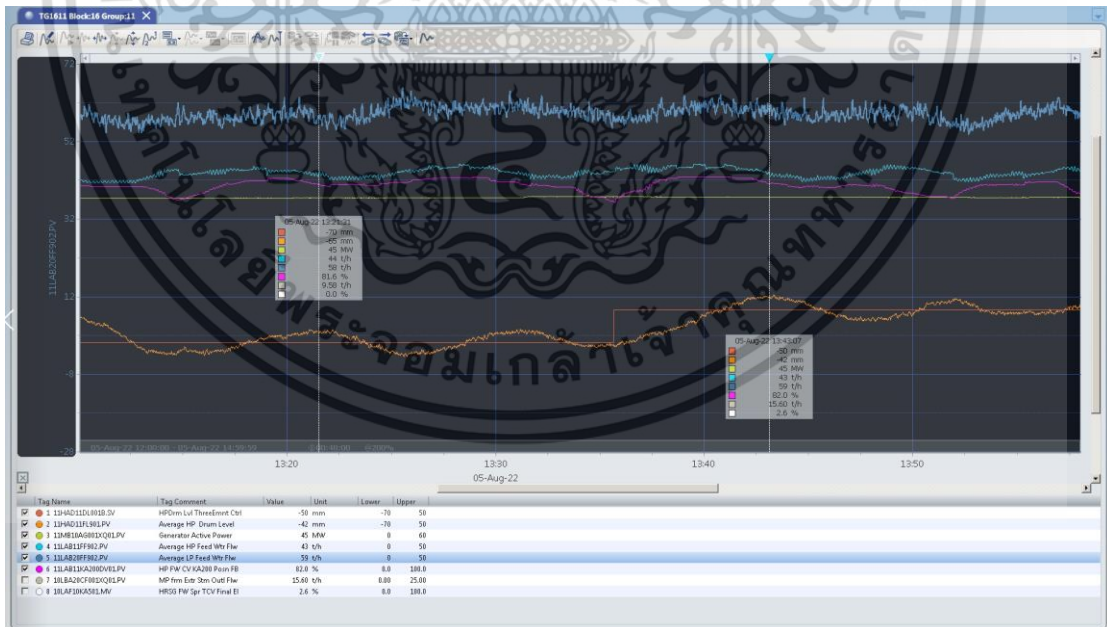
3. ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม. เป็น -70 มม.



รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 2 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -50 มม.

เป็น -70 มม.

4. ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -70 มม. เป็น -50 มม.



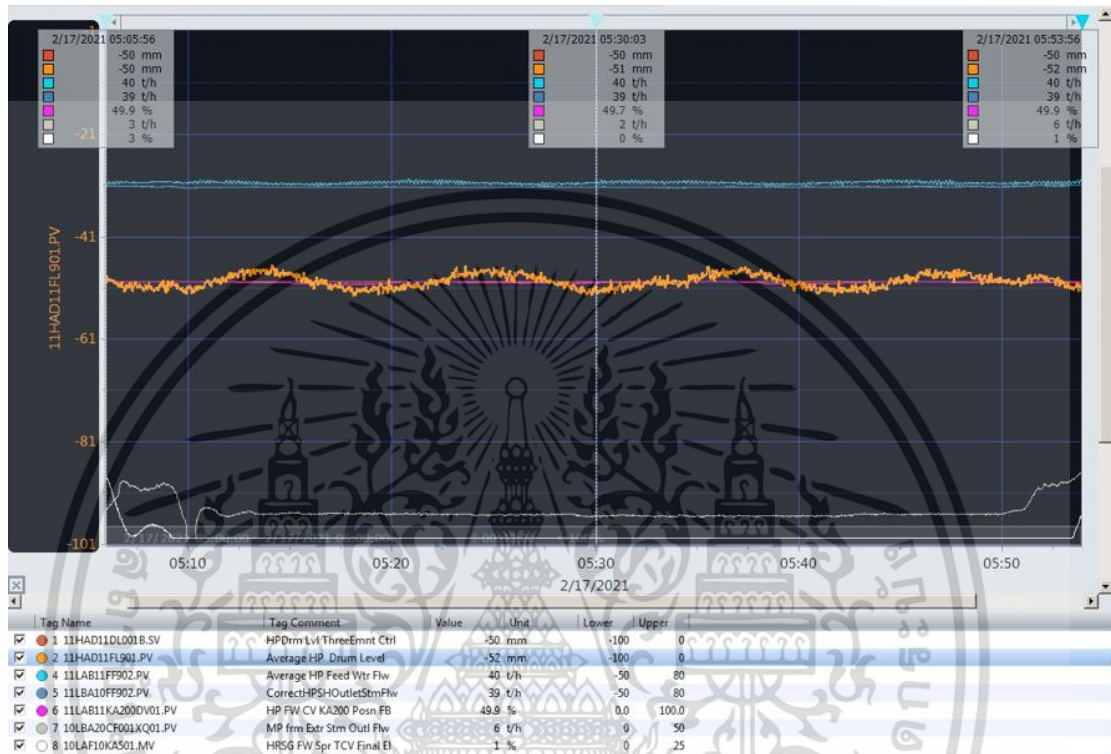
รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบระบบการใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 2 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ On-Peak Mode Operation โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก -70 มม.

เป็น -50 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

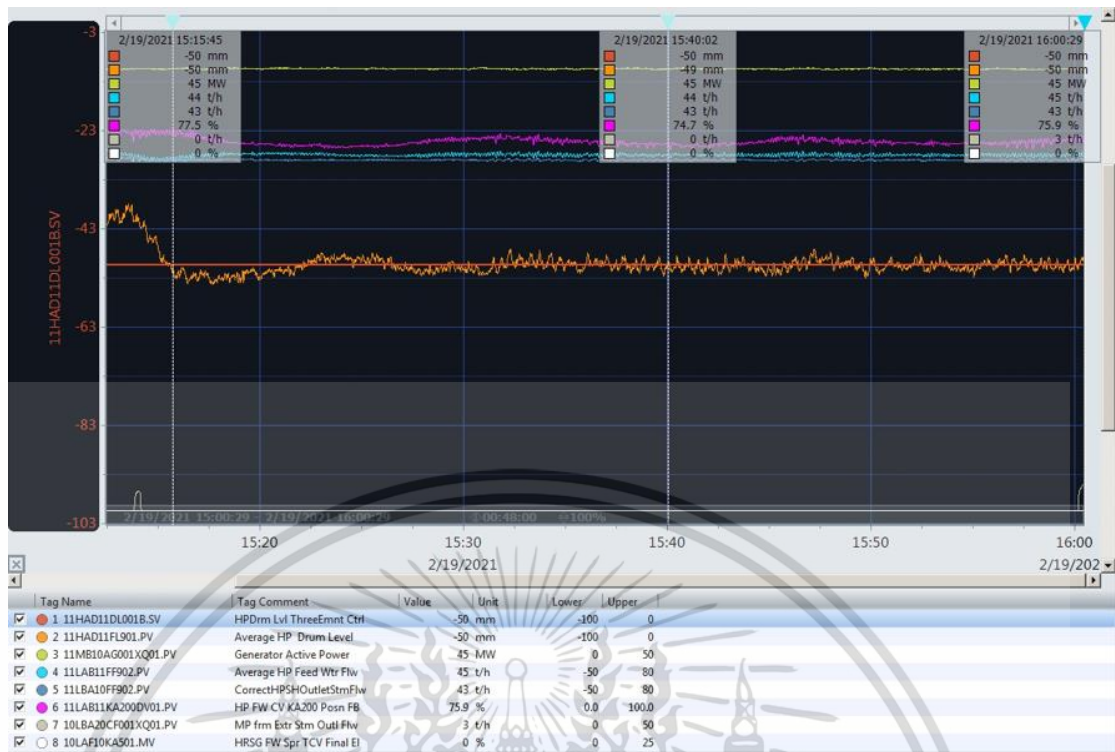
#### 4.4 ผลตอบสนองของระบบ

จากวิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 4.2.3 ในเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Off Peak Mode Operation นั้นไม่ได้มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์พีไอดีแต่อย่างใด เพราะค่าพีไอดีค่าเดิมที่มีใช้งานอยู่ (ค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 1) นั้นสามารถควบคุมค่าระดับน้ำให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ ตามค่าเป้าหมายที่กำหนด ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.14 แสดงการใช้งานตัวควบคุมพีไอดี ชุดที่ 1 สำหรับใช้ในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำ ความดันสูงขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation

ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบ Peak Mode Operation นั้นได้มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์พีไอดีเพื่อให้สามารถควบคุมค่าระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูง (High Pressure Drum) ได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์พีไอดี พร้อมกับกำหนดฟังก์ชันเพิ่มเติมขึ้นมาเพื่อเลือกใช้งานค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดที่ 2 เพื่อให้สามารถควบคุมระดับน้ำได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนด ในขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.15 แสดงการใช้งานตัวควบคุมพีไอดี ชุดที่ 2 สำหรับใช้ในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงขณะที่โรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation

#### 4.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นว่าฟังก์ชันการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงที่มีตัวแปรควบคุมพีไอดีชุดเดียวนั้น ไม่สามารถควบคุมค่าระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ในทั้งสองเงื่อนไขการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้า กล่าวคือ ชุดตัวแปรควบคุมพีไอดีเดี่ยวที่ใช้งานอยู่นั้น สามารถควบคุมค่าระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ในเฉพาะกรณีที่โรงไฟฟ้ามีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation เท่านั้น แต่ถ้าหากว่าโรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องในเงื่อนไขของการต้องการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation นั้นจะทำให้โรงไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมค่าระดับน้ำของหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออย่างมากในการเดินเครื่องเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์

ดังนั้นจากการทดลองจึงได้มีการแบ่งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีออกเป็นสองช่วงการควบคุม โดยอาศัยหลักการการ Optimization เพื่อที่จะใช้งานตัวแปรควบคุมพีไอดีแยกการใช้งานกันให้เหมาะสมในทั้งสองเงื่อนไขการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าบางปะอิน กล่าวคือ ในกรณีที่โรงไฟฟ้ามีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบความต้องการการใช้ไฟฟ้าต่ำ หรือ Off-Peak Mode Operation ก็มีการเลือกใช้งานฟังก์ชันการควบคุมพีไอดีชุดที่ 1 และหากโรงไฟฟ้ามีเงื่อนไขการเดินเครื่องแบบความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูง หรือ On-Peak Mode Operation ก็มีการเลือกใช้งานฟังก์ชันการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีไอดีชุดที่ 2 เพื่อให้สามารถควบคุมค่าระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ทั้งสองเงื่อนไขการเดินเครื่อง

โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในการเขียนฟังก์ชันชุดการควบคุมพีไอดีสำหรับเลือกใช้งานในทั้งสองเงื่อนไขการเดินเครื่องนั้นสามารถควบคุมค่าระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าบางปะอินโครงการ 1 อาทิเช่น เพื่อลดความผิดพลาดในการเดินเครื่อง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโรงไฟฟ้า ที่ต้องมีการหยุดการจ่ายไฟฟ้าแบบฉับพลัน โดยเป็นผลมาจากปัญหาที่ไม่สามารถควบคุมค่าระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ และยังช่วยลดผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่อาจจะเสียหายได้จากการที่ไม่สามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำความดันสูงสำหรับโรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบกระจายส่วน โดยกำหนดให้ส่วนป้อนไปข้างหน้าคือ อัตราการไหล และส่วนป้อนกลับคือ ระดับของน้ำ ค่าตัวแปรดังกล่าวประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำป้อน และระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูง ใช้วิธีการของซิกเลอร์-นิโคลส์สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งทำงานบนระบบควบคุมแบบกระจายส่วน พร้อมทั้งออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์วัดต่างๆ ให้เหมาะสม ตลอดจนคำนึงถึงความซับซ้อนของอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ และความคงทน

วิธีการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบกระจายส่วน สามารถควบคุมระดับน้ำเป้าหมายให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และสามารถจัดการกับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบชั่วขณะได้ดี อย่างเช่น กรณีการยุบตัวและการขยายตัวของน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ จากสาเหตุของความผันผวนของความดันภายในหม้อต้ม ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงสำหรับการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำของโรงไฟฟ้า

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในการเขียนฟังก์ชันชุดการควบคุมพีไอดีสำหรับเลือกใช้งานในทั้งสองเงื่อนไขการเดินเครื่องนั้นสามารถควบคุมคาร์ระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าบางปะอินโครงการ 1 อาทิเช่น เพื่อลดความผิดพลาดในการเดินเครื่อง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโรงไฟฟ้า ที่ต้องมีการหยุดการจ่ายไฟฟ้าแบบฉับพลัน โดยเป็นผลมาจากปัญหาที่ไม่สามารถควบคุมคาร์ระดับน้ำในหม้อต้มไอน้ำความดันสูงให้อยู่ในค่าที่กำหนดได้ และยังช่วยลดผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่อาจจะเสียหายได้จากการที่ไม่สามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด เป็นต้น

#### 5.1 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

5.1.1 การวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำซึ่งภายในหม้อต้มความดันไอน้ำประกอบไปด้วยน้ำและไอน้ำที่สภาวะอิ่มตัวและมีการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มตลอดเวลาทำให้เกิดการกระเพื่อมของน้ำภายในหม้อต้มซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของระดับน้ำที่ผิดพลาด วิธีแก้ไขปัญหาคือเพิ่มอุปกรณ์วัดระดับน้ำติดทั้งสองฝั่งของหม้อต้ม และโปรแกรมเลือกใช้ค่ามัธยฐานของระดับน้ำทั้งสามเพื่อใช้ในการควบคุม

5.1.2 ในกระบวนการเดินเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีกระบวนการควบคุมต่างๆ มากมายซึ่งมีความสัมพันธ์และส่งผลกระทบต่อซึ่งกันและกัน ดังนั้นในการปรับปรุงตัวควบคุมของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตโดยรวมและจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ของผู้ปรับจูนค่อนข้างสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้ทำการวิจัยได้ดำเนินการทดลองภายใต้การควบคุมดูแลและคำชี้แนะของหัวหน้าแผนกวิศวกรรมควบคุมและเครื่องมือวัดของโรงไฟฟ้าบางปะอิน

## 5.2 แนวทางการพัฒนา

จากผลงานวิจัยนี้มีการทดลองกับหม้อต้มไอน้ำความดันสูงของโรงไฟฟ้าบางปะอิน โครงการ 1 เท่านั้น ซึ่งโดยกระบวนการคิดแล้ว สามารถนำหลักการและวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้งานกับระบบควบคุมระบบอื่น ๆ ได้อีกเช่นเดียวกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบควบคุมนั้นๆ ให้มีความสามารถและเสถียรภาพมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Electricity Generating Authority of Thailand, 2019, capacity in the power system, retrieved from <https://www.egat.co.th/index>
- [2] Boyce. M. Gas Turbine Engineering Handbook (2nd edition), Texas: Gulf., 2002.
- [3] Rajkumar, T., Ramaa Priyaa, V.M. and Gobi, K. Boiler Drum Level Control by Using Wide Open Control with Three Element Control System. International Monthly Refereed of Research In Management & Technology, 2, 2013, 85-96.
- [4] Panupon Thangmanee, Sakreya Chitwong. Implementing cascade three elements drum boiler level control for a power plant with distributed control system. The 4th TIChE International Conference, Chiangmai, Thailand, 2014.
- [5] Shiji S.R, Anish .S, Swapna .M Boiler Drum Level Control In Thermal Power Plant. IARJSET, August 2016.
- [6] Eslami M, Shayesteh MR, Pourahmadi M. Optimal design of PID-based lowpass filter for gas turbine using intelligent method. IEEE Access, 2018; 15335-45.
- [7] V. Kongratana, W. Tawangkan, N. Wongvanich, Optimization based dynamics setpoint control to improve cycle power efficiency of the LM6000PF+ aero gas turbine., Bangkok, Thailand, 2020
- [8] N. Wongvanich et al. Simplified modelling and backstepping control of the long arm agricultural rover, Adv. Diff. Eqn. 701 (2020).
- [9] Principle and practice of automatic process control (second edition), Carlos A. Smith and Armando B. Corripio.

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

งานวิจัยที่ได้ดำเนินงานตามวิทยานิพนธ์นี้ ได้มีการเผยแพร่ในระดับวารสารและที่ประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ และสิทธิบัตร ดังต่อไปนี้

- [1] Viriya Kongratana, Badin Suthat and Napasool Wongvanich, “**Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling for the Drum Boiler Level Control of the Industrial Combine Cycle Plant**” Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2021



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายบดินทร์ สุทัศน์  
 วัน เดือน ปีเกิด 10 มิถุนายน 2535 ที่จังหวัดพิจิตร  
 รหัสนักศึกษา 60601006  
 ที่อยู่ หมู่บ้านนราไพรเวท 494/116 ซ.9 ม.4 ต.คานหาม อ.อุทัย  
 จ. พระนครศรีอยุธยา 13210 โทร 0817509643

### ประวัติการศึกษา

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนหัวดวงรัฐชนูปถัมภ์

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนหัวดวงรัฐชนูปถัมภ์

ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา

การวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการทำงาน มิ.ย 2558 – มิ.ย 2563 Control & Instrument Engineer ที่  
 บริษัท GULF JP UT Ltd.

มิ.ย 2563 – ก.พ 2565 Supervisor Control & Instrument  
 Engineer ที่บริษัท Bang Pa-In  
 Cogeneration Ltd.

มี.ค 2565 – พ.ค 2566 Senior Service & Commissioning  
 Engineer ที่บริษัท EMERSON  
 Thailand Ltd.

มิ.ย 2566 – ปัจจุบัน Service & Commissioning  
 Engineer ที่บริษัท SIEMENS Energy  
 Thailand Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้