

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสเคดสามตัวแปรในหม้อต้ม  
ความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบกระจายส่วน

IMPLEMENTING CASCADE THREE ELEMENTS DRUM BOILER LEVEL  
CONTROL FOR A POWER PLANT WITH DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM



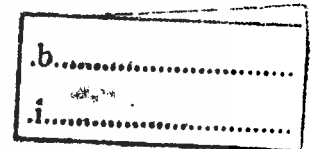
T138762



ภาณุพล ถังมณี  
PANUPON THANGMANEE

อก.  
ภา 432 ก  
2558

สารทมูล  
เลขทะเบียน 138762  
วันเดือนปี 16 ต.ค. 2558



12418403

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ KMITL-2015-EN-M-060-081 กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPLEMENTING CASCADE THREE ELEMENTS DRUM BOILER LEVEL  
CONTROL FOR A POWER PLANT WITH DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

KMITL-2015-EN-M-060-081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2015**

**FACULTY OF ENGINEERING**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปร  
ในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบ  
กระจายส่วน

นักศึกษา

นายภาณุพล ถังมณี

รหัสนักศึกษา

5411620

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการวัดคุม

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ. สักกรียา ชิตวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โดยกำหนดให้ส่วนป้อนไปข้างหน้าคือ อัตราการไหล และส่วนป้อนกลับคือ ระดับของน้ำ ค่าตัวแปรดังกล่าวประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำ และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ใช้วิธีการของซิกเลอร์-นิโคลส์สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งทำงานบนระบบควบคุมแบบกระจายส่วน พร้อมทั้งการออกแบบ และการเลือกใช้อุปกรณ์วัดต่างๆ ให้เหมาะสม ตลอดจนถึงความซ้ำซ้อนของอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ และความคงทน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมและการวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด และสามารถจัดการกับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบชั่วขณะได้เป็นอย่างดี อย่างเช่น การยุบตัวและการขยายตัวของน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ จากสาเหตุของความผันผวนของความดันภายในหม้อต้ม วิธีการดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงสำหรับการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำของโรงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Implementing Cascade Three Elements Drum Boiler Level Control for a Power Plant with Distributed Control System
<b>Student</b>	Mr. Panupon Thangmanee
<b>Student ID.</b>	5411620
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Sakreya Chitwong

### ABSTRACT

This thesis proposes implementation using a cascade three-element boiler drum level instrument and control with PID controllers for a combined cycle power plant. Feedforward part is flow rate and feedback part is water level. Such variables consist of steam outlet flow rate, water inlet flow rate and water level in boiler drum. Ziegler-Nichols is used for calculating parameters of the boiler drum level control operating on a distributed control system (DCS). Also a field instruments are designed and selected appropriately. A redundancy of a field instruments takes into account to accuracy, reliability, and robustness. The results show that the proposed system can efficiently control the water level because one can solve process instantaneously changing, for example, shrinkage and expansion of water in the boiler drum causing variation of pressure. The mentioned system can actually implement in the power plant for boiler drum level control.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ เพราะได้รับคำปรึกษาและความกรุณาจาก รศ. สักกรียา ชิตวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ให้คำชี้แนะในการทำงานวิจัยนี้ตลอดจนกระตุ้นเตือนและสอบถามถึงความคืบหน้าของงานวิจัยอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงในความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่องที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. พุศักรัตน์ ชิวสุวิทย์ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางรวมทั้งประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์อันเป็นคุณค่าอย่างสูง ในการทำวิจัยและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้เขียนด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณผู้บริหารและหัวหน้างาน บริษัท กัลฟ์ เจที เอ็นแอลแอล จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปถัมภ์สถานที่และ ข้อมูลที่ใช้ทำการวิจัยนี้ให้ลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทจนสำเร็จการศึกษา ณ. สถาบัน ฯ แห่งนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่เคารพรักอย่างสูง รวมทั้งภรรยา คู่ชีวิตและบุตรซึ่งเป็นที่รัก ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

ภาณุพล ถังมณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คำนำ.....	4
2.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม.....	4
2.3 สาเหตุและปัญหาของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	8
2.4 การวัดและการควบคุม.....	10
2.5 ตัวควบคุมพีไอดี.....	26
2.6 ระบบควบคุมพีไอดี.....	28
2.7 การจูนค่าพารามิเตอร์พีไอดี.....	31
2.8 เทคนิคการควบคุม.....	33
2.9 สรุป.....	34
บทที่ 3 ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรภายในหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	35
3.1 คำนำ.....	35
3.2 โครงสร้างของกระบวนการ.....	35
3.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปร.....	46
3.4 สรุป.....	50

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	51
------------------------------------	----

4.1 คำนำ.....	51
---------------	----

4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น	51
---	----

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 ระบบควบคุมระดับน้ำ.....	52
4.2.2 ระบบควบคุมน้ำป้อน.....	53
4.2.3 ระบบควบคุมไอน้ำ.....	54
4.3 วิธีการทดลอง.....	56
4.4 ผลตอบสนองของระบบ.....	57
4.4.1 กรณีอัตราการไหลออกไอน้ำคงที่ และระดับน้ำเป้าหมายเปลี่ยนแปลง.....	57
4.4.2 กรณีระดับน้ำเป้าหมายคงที่ และอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง.....	58
4.4.3 กรณีอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง ระดับน้ำเปลี่ยนแปลง.....	58
4.5 สรุปผลการทดลอง.....	62
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	63
5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัยและแนวทางในการแก้ไขปัญหา.....	63
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	67
ภาคผนวก ข. โปรแกรมระบบควบคุมกระจายส่วนรุ่น SPPA-T3000.....	74
ภาคผนวก ค. ตารางคุณสมบัติไอน้ำอิ่มตัวและความดัน (Saturated Steam – Pressure Table).....	81
ประวัติผู้เขียน.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงการใช้ค่า $\alpha$ และ $T$ สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม.....	32
2.2 ตารางแสดงผลตอบสนองความถี่ของ Ziegler-Nichols.....	33
3.1 ตารางการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำชนิดความดันแตกต่างกัน.....	40
3.2 ตารางการชดเชยความดัน.....	41
3.3 ตารางการชดเชยอุณหภูมิ.....	43
3.4 ตารางการชดเชยความดันและอุณหภูมิ.....	46
4.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากการทดลอง.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมแบบวัฏจักรผสม.....	5
2.2 แผนภาพกระบวนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม.....	5
2.3 วัฏจักรเบรย์ตันที่ใช้ในการผลิตกำลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ.....	6
2.4 เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบคู่ความร้อน.....	7
2.5 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกังหันไอน้ำ.....	7
2.6 วัฏจักรแรงดันที่ใช้ในการผลิตกำลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ.....	8
2.7 การวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดความดันแตกต่างกัน.....	11
2.8 วงจรการวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำด้วยการชดเชยความหนาแน่นของน้ำ และไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป.....	13
2.9 (a) รูปแบบความเร็วการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow Velocity Profile).....	16
(b) รูปแบบความเร็วการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow Velocity Profile).....	16
2.10 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำป้อน.....	18
2.11 รายการวัสดุที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำป้อน.....	18
2.12 ตัวอย่างแผ่นออริฟิสตามมาตรฐาน ISO 5167.....	19
2.13 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ.....	20
2.14 รายการวัสดุที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ.....	20
2.15 ตัวอย่างนอซเซิลตามมาตรฐาน ISO 5167.....	21
2.16 วิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	22
2.17 วิธีการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	22
2.18 การไหลภายในท่อ.....	23
2.19 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน.....	26
2.20 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล.....	27
2.21 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์.....	27
2.22 แผนภาพตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	28
2.23 แผนภาพระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ.....	29
2.24 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการด้วยวิธีการผลตอบสนองขั้นบันได ของ Ziegler-Nichols.....	32
2.25 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างการควบคุมแบบแคสแคด.....	33
3.1 โครงสร้างการวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	36
3.2 ระดับน้ำเป้าหมายของหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	37
3.3 โครงสร้างการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำ.....	42
3.4 โครงสร้างการวัดอัตราการไหลของไอน้ำ.....	44
3.5 แผนภาพตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปร.....	47
3.6 แบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของน้ำป้อน.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แบบจำลองการวิเคราะห์การควบคุมระดับน้ำ.....	49
4.1 โครงสร้างระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ.....	52
4.2 ระบบควบคุมระดับน้ำ.....	53
4.3 ระบบควบคุมน้ำป้อน.....	54
4.4 ระบบควบคุมไอน้ำ.....	55
4.5 ระบบควบคุมกระจายส่วน.....	56
4.6 ผลตอบสนองของระบบ กรณีอัตราการไหลออกไอน้ำคงที่ และระดับน้ำ เป้าหมายเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น.....	59
4.7 ผลตอบสนองของระบบ กรณีอัตราการไหลออกไอน้ำคงที่ และระดับน้ำ เป้าหมายเปลี่ยนแปลงลดลง.....	59
4.8 ผลตอบสนองของระบบ กรณีระดับน้ำเป้าหมายคงที่ และอัตราการไหล ออกไอน้ำเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น.....	60
4.9 ผลตอบสนองของระบบ กรณีระดับน้ำเป้าหมายคงที่ และอัตราการไหล ออกไอน้ำเปลี่ยนแปลงลดลง.....	60
4.10 ผลตอบสนองของระบบ กรณีอัตราการไหลออกไอน้ำเปลี่ยนแปลง และระดับน้ำเปลี่ยนแปลง.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบควบคุมอัตโนมัติเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันและสมัยใหม่ ซึ่งอาศัยพื้นฐานของการวัดและการควบคุมเป็นหลัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตให้ผลผลิตเป็นไปตามเป้าหมาย ได้ผลผลิตสูงสุดและคุณภาพดีที่สุด โดยใช้ต้นทุนต่ำที่สุด ลดจำนวนของอุปกรณ์แต่เพิ่มสมรรถนะและความปลอดภัยในการใช้งานให้สูงที่สุด ตลอดจนประหยัดพลังงาน และลดการใช้แรงงาน รวมทั้งประหยัดวัสดุ การนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้ในการกระบวนการผลิตทำให้สะดวกสบาย และมีความคล่องตัว ซึ่งในการออกแบบสร้างระบบควบคุมดังกล่าวในแต่ละยุคแต่ละสมัย ได้มีการนำเอาความก้าวหน้าทางวิศวกรรมเทคโนโลยีของเครื่องจักร อุปกรณ์ และระบบควบคุมที่มีวิวัฒนาการที่ดีขึ้นเป็นลำดับมาปรับปรุงเป็นกระบวนการอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนลดความผิดพลาดที่เกิดจากการทำงานของผู้ปฏิบัติงานอีกด้วย หลักการพื้นฐานของระบบควบคุมอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้การป้อนกลับจากค่าที่วัดได้จากกระบวนการเข้ามาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย เพื่อสร้างสัญญาณเอาต์พุตไปควบคุมอุปกรณ์สุดท้าย ที่เรียกว่า การควบคุมแบบป้อนกลับ และยังมีวิธีการคิดค้นออกแบบวิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้หลักการพื้นฐานดังกล่าว แต่เพิ่มในส่วนของการละเอียดโครงสร้างของส่วนประกอบในการควบคุม เพื่อให้ได้ผลดีที่สุดและเหมาะสมที่สุด

ปัจจุบันได้มีการนำเอาระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้งานในการควบคุมอย่างกว้างขวาง ทำให้ทฤษฎีและการออกแบบตัวควบคุมได้รับการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วโดยมีแนวคิดและวิธีการใหม่ๆ ที่เกิดขึ้นตามมาอีกมากมายเป็นลำดับ แต่สิ่งหนึ่งที่ยังคงเป็นปัญหาของการควบคุมก็คือ การสร้างตัวควบคุมเพื่อนำมาใช้กับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น และกระบวนการที่มีผลตอบสนองแบบชั่วคราวในทางตรงกันข้าม ซึ่งปัญหาของกระบวนการดังกล่าวในระบบเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ เช่น โครงสร้างของกระบวนการหรือลักษณะของตัวขับ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวก็คือ การดัดแปลงตัวควบคุมที่มีอยู่แล้วด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้สามารถใช้กับกระบวนการที่ต้องการได้ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติของบริษัท SIEMENS รุ่น SPPA-T3000 โดยการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมพีโอดีของระบบควบคุมเพื่อใช้ในการวัดและควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้คงที่ และแก้ไขผลกระทบจากกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบชั่วคราว เช่น การยุบตัว และการขยายตัวของน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งเกิดจากความผันผวนของความดันในหม้อต้ม โดยผลกระทบดังกล่าวมีผลตอบสนองแบบชั่วคราวในทางตรงกันข้าม ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานที่ผิดพลาดของตัวควบคุม ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงการควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสามารถควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ตามเป้าหมายที่กำหนด และสอดคล้องกับหลักการที่นำเสนอ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมค่าตัวแปรดังกล่าวประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำป้อน และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ใช้วิธีการของซิกเลอร์-นิโคลส์สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งทำงานบนระบบควบคุมแบบกระจายส่วนพร้อมทั้งการออกแบบ และการเลือกใช้อุปกรณ์วัดต่างๆ ให้เหมาะสม ตลอดจนคำนึงถึงความซ้ำซ้อนของอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ และความคงทนโดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้างของระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมชนิดคาสแคดสามตัวแปร และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและควบคุมกระบวนการ

1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบและโครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอดีชนิดคาสแคดสำหรับควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

1.2.3 ประมวลผลตัวควบคุมพีไอดีที่มีการเชื่อมโยงแบบคาสแคดสามตัวแปรด้วยโปรแกรมระบบควบคุมแบบกระจายส่วน รุ่น SP-PA-T3000 เพื่อทดสอบสมรรถนะของกระบวนการ และทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการตามหลักการของซิกเลอร์ นิโคลส์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

## 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

เป็นระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โดยการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดีกับรูปแบบการเชื่อมโยงแบบคาสแคดสามตัวแปร ซึ่งตัวแปรดังกล่าว ประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำ และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำเพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้คงที่ และแก้ไขปัญหาที่เกิดจากผลกระทบของการบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบชั่วขณะ เช่นการยุบตัว และการขยายตัวของน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำใน

## 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ทำการวิจัยโดยการศึกษา ออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมเพื่อควบคุมระดับน้ำ

ให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ภายใต้การดำเนินการที่ปลอดภัย และสอดคล้องกับกระบวนการเดินเครื่องผลิตไฟฟ้า

## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยและนำเสนอการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่มีลักษณะการเชื่อมโยงแบบคาสแคด พร้อมอุปกรณ์การวัดตัวแปรของกระบวนการ ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์วัดระดับน้ำ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลเข้าของน้ำ และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลออกของไอน้ำ สำหรับควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำให้คงที่และอยู่ในขอบเขตที่กำหนด วิทยานิพนธ์ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัยและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ และตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเชื่อมโยงแบบคาสแคดซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

บทที่ 3 นำพื้นฐานความรู้จากบทที่ 2 เพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่มีการเชื่อมแบบคาสแคดสำหรับควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

บทที่ 4 ทำการทดลองควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำโดยเขียนโปรแกรมควบคุมบนระบบควบคุมแบบกระจายส่วน เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย รวมทั้งข้อเสนอแนะ และวิจารณ์ในส่วนของปัญหา แนวทางการแก้ไขและแนวทางการพัฒนาต่อไป

และในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวกที่แสดงถึง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ และประวัติผู้เขียน

## บทที่ 2

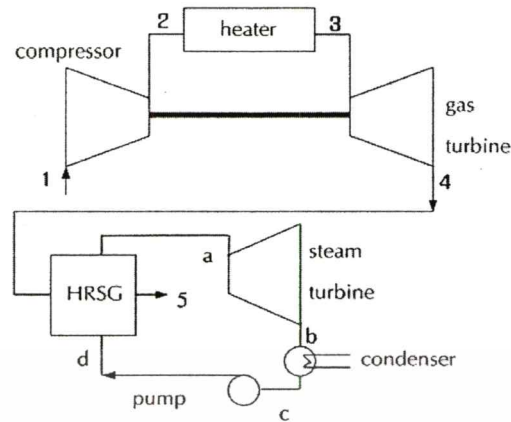
# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คำนำ

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมและการทำงานของหม้อต้มความดันไอน้ำ พื้นฐานการวัดและควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งในที่นี้จะใช้การควบคุมระดับน้ำที่มีรูปแบบการเชื่อมโยงแบบคาสแคดสามตัวแปรเพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ค่าตัวแปรดังกล่าวประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำ และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมระดับน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ตลอดจนพื้นฐานของตัวควบคุมพีไอดี รวมทั้งวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยความมุ่งหมายของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมคือ การนำเอาเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine Power Plant) และโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ (Steam Turbine Power Plant) มาใช้งานเป็นระบบร่วมกัน โดยการนำไอเสีย (Exhaust Gas) จากโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซซึ่งมีความร้อนสูงไปผ่านเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน (Heat Recovery Steam Generator : HRSG) และถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอเพื่อขับกังหันไอน้ำสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อไป วัตถุประสงค์ของการศึกษาการทำงานของกระบวนการเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบวิธีการวัดและตัวควบคุมที่จะใช้ควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

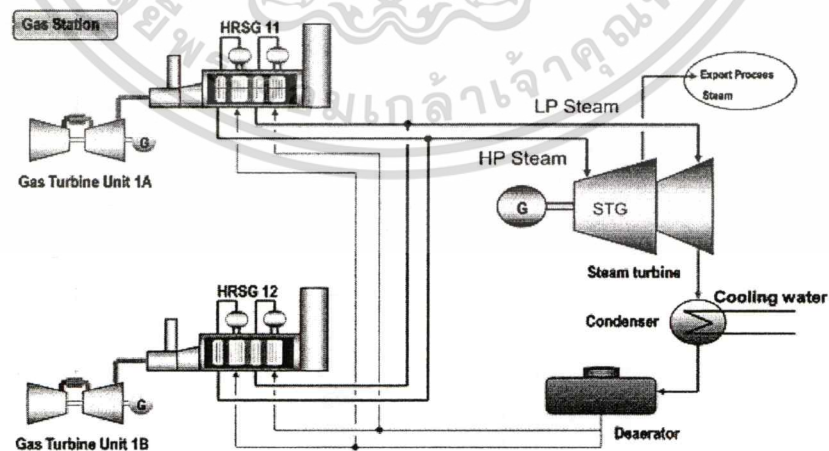
### 2.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีการทำงาน 2 ระบบร่วมกัน คือระบบโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซที่ผลิตกำลังงานโดยใช้วัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton Cycle) และกังหันไอน้ำที่ผลิตกำลังงานโดยใช้วัฏจักรแรงคิน (Rankine Cycle) เข้าเป็นระบบเดียวกันโดยการนำเอาก๊าซร้อนที่ออกจากเครื่องกังหันก๊าซป้อนเข้าสู่เตาของหม้อต้มความดันไอน้ำเพื่อต้มน้ำให้เกิดไอน้ำแล้วนำไอน้ำนั้นไปขับเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อให้เกิดการทำงานขึ้น ซึ่งการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมจะสอดคล้องกับวัฏจักรผสม โดยให้วัฏจักรเบรย์ตันทำงานในช่วงอุณหภูมิสูงและวัฏจักรแรงคินทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ ดังรูปที่ 2.1 ความร้อนที่ออกจากวัฏจักรเบรย์ตันจะใช้ในวัฏจักรแรงคินโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน



รูปที่ 2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมแบบวัฏจักรผสม

การทำงานดังนี่คือ เชื้อเพลิงก๊าซจะถูกส่งเข้าไปยังห้องเผาไหม้ โดยมีอากาศที่ถูกอัดด้วยความดันสูง 8-10 เท่าจากเครื่องอัดอากาศมาช่วยเผาไหม้ ทำให้เกิดการขยายตัวของก๊าซร้อนดันและอุณหภูมิสูงส่งเข้าไปขับเคลื่อนกังหันก๊าซ ขับเคลื่อนและจุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ที่ต่ออยู่บนเพลลาเดียวกัน ส่วนก๊าซร้อนที่ขับเคลื่อนกังหันก๊าซแล้วและถูกส่งออกไปยังเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อนเพื่อนำความร้อนนี้ไปต้มน้ำที่หม้อน้ำ น้ำที่ถูกต้มจะกลายเป็นไอน้ำความดันสูงไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ เพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นเดียวกัน และเมื่อไอน้ำความดันลดลงก็ถูกส่งเข้าไปยังเครื่องควบแน่น ซึ่งจะระบายความร้อนของไอน้ำด้วยน้ำ ไอน้ำจะถูกควบแน่นเป็นน้ำและปั๊มส่งไปยังถังพักน้ำเพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำต่อไป ซึ่งแผนภาพกระบวนการผลิตดังกล่าวแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.2 โดยหน่วยการผลิตหลักๆในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมมีดังนี้

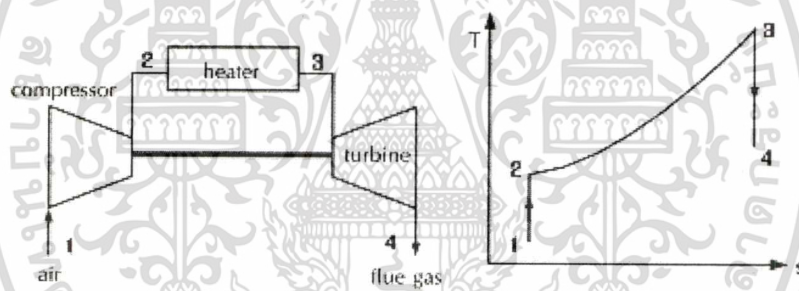


รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 หน่วยผลิตไฟฟ้ากังหันก๊าซ

อุปกรณ์หลักประกอบด้วยเครื่องกังหันก๊าซและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ทำงานโดยอาศัยก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นตัวขับเคลื่อนใบพัด (Blade) ของเครื่องให้หมุน ชิ้นส่วนหลักของเครื่องกังหันก๊าซประกอบด้วยเพลลา ซึ่งมีชุดใบพัดติดตั้งอยู่หลายชุดสำหรับอัดอากาศให้มีความหนาแน่นและความดันเพิ่มขึ้นประมาณ 5-15 เท่า ชุดใบพัดเหล่านี้เรียกว่าเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ก่อนที่จะเข้าเครื่องอัดอากาศนี้ อากาศจะถูกกรองด้วยเครื่องกรองอากาศ และเมื่อถูกอัดเพิ่มความดันแล้ว จะถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) ร่วมกับเชื้อเพลิงซึ่งเป็นก๊าซ และใช้หัวเทียนเป็นตัวจุดระเบิด เมื่อเชื้อเพลิงติดไฟจะเกิดการเผาไหม้กลายเป็นก๊าซร้อนที่มีการขยายตัวสูงส่งออกจากห้องเผาไหม้ไปขับเคลื่อนชุดใบพัดอีกชุดหนึ่งซึ่งเรียกว่าเครื่องกังหัน (Turbine Blade) ซึ่งติดตั้งบนเพลลาเดียวกันกับเครื่องอัดอากาศให้หมุน การถ่ายเทพลังงานจะเป็นกระบวนการต่อเนื่อง และสอดคล้องกับวัฏจักรเบรย์ตัน ดังรูปที่ 2.3

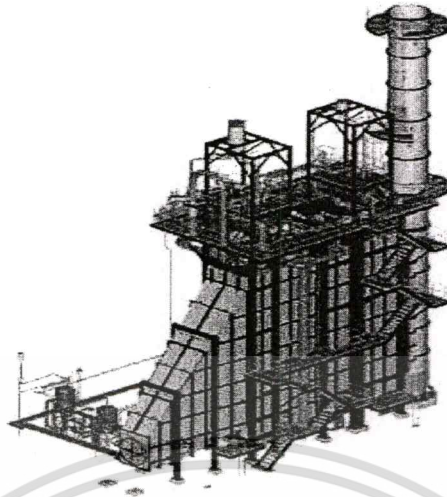


รูปที่ 2.3 วัฏจักรเบรย์ตันที่ใช้ในการผลิตกำลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ

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

หน่วยผลิตไอน้ำหรือ เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อนทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำเป็นไอน้ำโดยใช้ความร้อนจากก๊าซเสียที่ได้จากเครื่องกังหันก๊าซจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เวสต์ฮีทบอยเลอร์ (Waste Heat Boiler) เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบกู้ความร้อน ดังรูปที่ 2.4 โครงสร้างประกอบขึ้นจากโครงเหล็กที่แข็งแรง ภายในติดตั้งชุดท่อเหล็กทนความร้อนหลายๆชุด ซึ่งเป็นทางผ่านของก๊าซเสียจากเครื่องกังหันก๊าซที่ปล่อยเข้ามาในหม้อน้ำ น้ำและไอน้ำจะไหลเวียนเข้ามารับความร้อนภายในท่อ ภายนอกหม้อน้ำจะเชื่อมปิดหมดเพื่อไม่ให้ก๊าซร้อนรั่วออก ทิศทางการไหลของก๊าซร้อนในหม้อน้ำอาจจะบังคับด้วยพัดลมชนิดดูดหรือเป่า หรือปล่อยให้ไหลตามธรรมชาติลอยขึ้นเบื้องบน แล้วออกทางปล่องขึ้นกับการออกแบบ

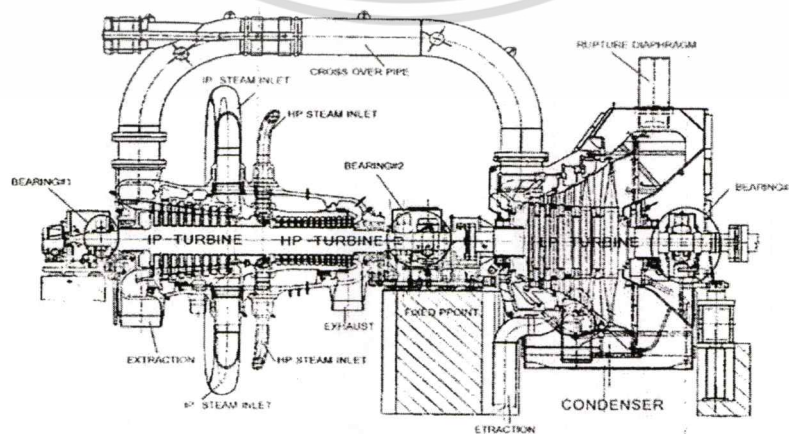
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



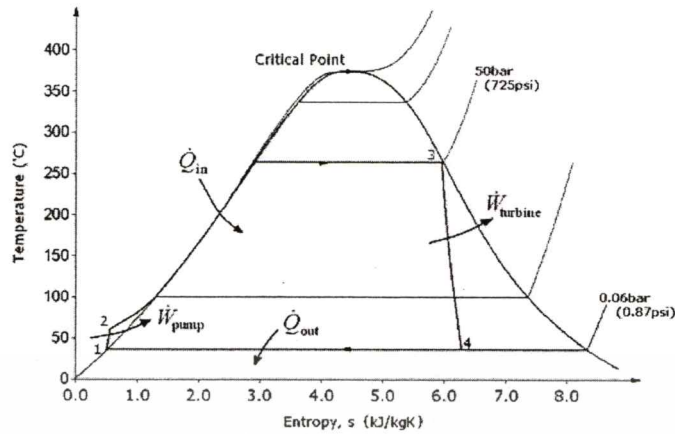
รูปที่ 2.4 เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบคู่ความร้อน

### 2.2.3 หน่วยผลิตไฟฟ้าเครื่องกังหันไอน้ำ

เครื่องกังหันไอน้ำโดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่เป็นส่วนที่ไม่มีการหมุน ได้แก่ กรอบนอก (Casing) ซึ่งเป็นเปลือกนอกที่ห่อหุ้มชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องกังหัน และส่วนหมุนเป็นส่วนที่มีการหมุนโดยมีเพลาคือแกนกลางและมีใบพัดหลายชุดยึดติดอยู่บนเพลาลม เมื่อไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูงฉีดมาปะทะใบพัดก็ผลัดกันให้เกิดการหมุน ดังรูปที่ 2.5 เครื่องกังหันไอน้ำจะมีสอง 2 ส่วน คือความดันสูง (HP Turbine) และความดันต่ำ (LP Turbine) ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบวงจรผลิตและการไหลเวียนของไอน้ำที่ผลิตกำลังงานโดยใช้วัฏจักรแรงคิน ดังรูปที่ 2.6 ไอน้ำความดันสูงและความดันต่ำที่ออกจากเครื่องทวิความร้อนจะไหลเข้ากังหันความดันสูงและกังหันความดันต่ำตามระดับและรวมกันออกด้านล่างเข้าสู่เครื่องควบแน่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ส่วนตัวในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรแรงคินที่ใช้ในการผลิตกำลังงานในโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

โดยที่ระบบวงจแรงคินจะกล่าวถึงกระบวนการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งการเปลี่ยนแปลงจากน้ำเป็นไอน้ำนั้นจะแปรผันกับอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) และ ค่าเอนโทรปี ( $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) โดยที่ระดับแรงดันไอน้ำที่ได้จะแปรผันตามแผนภาพอุณหภูมิและเอนโทรปี (Temperature-entropy diagram : T-S Diagram)

### 2.3 สาเหตุและปัญหาของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าถือเป็นหัวใจสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยปกติระบบควบคุมหม้อต้มไอน้ำและเครื่องกังหันไอน้ำจำเป็นต้องทำการควบคุมให้สอดคล้องกับปริมาณของน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำ โดยจะต้องควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในช่วงที่ถูกออกแบบไว้เท่านั้น หากระดับน้ำสูงเกินกว่ากำหนดจะส่งผลให้มีความชื้นปะปนไปกับไอน้ำเข้าสู่เครื่องกังหันไอน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนของเครื่องกังหันไอน้ำ และหากระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะส่งผลกระทบต่อผนังของท่อลำเลียงน้ำเข้าสู่หม้อต้ม และอาจทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากได้รับความร้อนมากเกินไป ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตไฟฟ้าต้องหยุดลง เพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาซ่อมแซม และอาจทำให้บุคลากรได้รับบาดเจ็บหรือเสียชีวิตได้ โดยปกติขณะที่ระดับน้ำของหม้อต้มอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเกณฑ์หรือสูงกว่าเกณฑ์กำหนด ระบบควบคุมหม้อต้มความดันไอน้ำจะมีระบบป้องกัน (Protection System) ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่ออุปกรณ์และเครื่องจักรในระบบ ระบบป้องกันจะสั่งหยุดการทำงานของระบบการเผาไหม้และระบบการจ่ายน้ำเข้าสู่หม้อต้มตามลำดับ ในการควบคุมระดับน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำจะพบปัญหาของการควบคุมอยู่ 2 กรณี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 การขยายตัวของน้ำ

การขยายตัวของน้ำเป็นลักษณะของการที่ระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นในปริมาณที่มาก ปัญหานี้จะพบมากในขณะเริ่มต้นการทำงานของหม้อต้มความดันไอน้ำ (Start-up Boiler) หรือในกรณีที่มีการใช้ไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้แรงดันภายในหม้อต้มความดันไอน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้น้ำเดือดได้ง่ายขึ้น ในขณะที่แรงดันลดลง น้ำจะเดือดเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับของน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำเพิ่มขึ้นทั้งๆที่ไม่ได้เปิดน้ำเพิ่มขึ้นเลย และเมื่อระดับน้ำสูงเกินขอบเขตที่กำหนดระบบป้องกันหม้อต้มความดันไอน้ำก็จะส่งสัญญาณให้หน่วยผลิตไฟฟ้าเครื่องกักกันก๊าซหยุดการผลิตลง เพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบเสียหายและอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น

### 2.3.2 การยุบตัวของน้ำ

การยุบตัวของน้ำเป็นลักษณะอาการที่เกิดจะตรงกันข้ามกับน้ำบวม กล่าวคือเมื่อมีการหยุดใช้ไอน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้แรงดันในหม้อต้มความดันไอน้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นจะส่งผลต่อระดับน้ำในหม้อต้มให้ลดลงอย่างมาก ทำให้ตัวตรวจวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำตรวจจับได้ว่าระดับน้ำลดลงอย่างมาก เมื่อระดับน้ำต่ำเกินกว่าขอบเขตที่กำหนดระบบป้องกันหม้อต้มความดันไอน้ำก็จะส่งสัญญาณให้หน่วยผลิตไฟฟ้าเครื่องกักกันก๊าซหยุดการผลิตลง เพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบเสียหายและอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ถ้าขณะนั้นเกิดการใช้น้ำกลับเข้ามาอีกครั้งหรือความดันของหม้อต้มลดลงทันทีทันใด ก็จะทำให้ระดับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกว่า การขยายตัวของน้ำ อาจจะทำให้ระดับน้ำสูงมากจนอาจทำให้ระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำสูงเกินกว่ากำหนด (Drum Level High-High) จนทำให้หม้อต้มความดันไอน้ำต้องหยุดการทำงานลงแบบฉุกเฉิน (Boiler Trip) และเป็นสาเหตุที่ทำให้การผลิตต้องหยุดลง เพราะฉะนั้นในช่วงระหว่างเริ่มต้นการทำงานของหม้อต้มความดันไอน้ำจะต้องรักษาระดับน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำให้อยู่ในระดับที่ต่ำเพื่อแก้ปัญหาการขยายตัวของน้ำ

ปัญหาดังกล่าว จะส่งผลกระทบต่อการทำงานที่ผิดพลาดของตัวควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ และเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าต้องหยุดลง เพราะระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการอื่นๆ คือกระบวนการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มและกระบวนการควบคุมอัตราการไหลออกของไอน้ำ ดังนั้นการออกแบบ เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัด และตัวควบคุมในกระบวนการควบคุมระดับน้ำสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงอุปกรณ์และตัวควบคุมที่มีความสามารถสูง และมีความรู้สึกไวต่อการเปลี่ยนแปลง ตลอดจนถึงความซับซ้อนของอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ และความคงทน เพราะอัตราการไหลของไอน้ำจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อันเนื่องมาจากการใช้งานที่ไม่คงที่ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำและส่งผลกระทบต่อระบบป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มด้วย

## 2.4 การวัดและการควบคุม

หม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมจะแตกต่างกับหม้อต้มความดันไอน้ำโดยทั่วไป เนื่องจากเป็นหม้อต้มความดันไอน้ำชนิดความดันสูง และภายในหม้อต้มความดันไอน้ำจะประกอบไปด้วยของเหลว 2 ชนิดคือน้ำและไอน้ำที่สภาวะอิ่มตัว ซึ่งมีความหนาแน่นที่แตกต่างกันและแปรเปลี่ยนไปตามความดันของหม้อต้ม ดังนั้นการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการเช่น ระดับน้ำของหม้อต้ม อัตราการไหลออกของไอน้ำ และอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำ จำเป็นต้องมีการชดเชยความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อการวัดที่ถูกต้อง แม่นยำ ซึ่งสาเหตุดังกล่าวเป็นปัญหาสำคัญยิ่งสำหรับกระบวนการวัดเพื่อการควบคุม โดยเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบกระจายส่วน ค่าตัวแปรดังกล่าวประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำ และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ วิธีการวัดค่าตัวแปรดังกล่าวจะประยุกต์ใช้งานตัวตรวจวัดความดันแตกต่างเข้ามาช่วยในการวัดค่าตัวแปรของกระบวนการซึ่งมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง และในปัจจุบันอุปกรณ์สำหรับวัดความดันแตกต่างพร้อมทรานสมิตเตอร์ได้รับการออกแบบให้อยู่ในแคปซูลเดียวกันมีชื่อเรียกย่อว่า ดีพีทรานสมิตเตอร์ (dp Transmitter) ในส่วนที่เป็นตัววัดค่าความดันแตกต่าง อาศัยหลักการหลายอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance), สมดุลแรง (Force balance), เส้นลวดกังวาน (Resonant wire) เป็นต้น ในส่วนของทรานสมิตเตอร์ส่วนใหญ่จะเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นกระแสหรือในรูปของแรงดัน ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถส่งสัญญาณนี้ไปยังเครื่องบันทึก เครื่องควบคุม หรือซีบ็อกค่าได้หลายอย่างพร้อมกันในระยะทางที่ห่างออกไปจากจุดที่วัดได้มาก ดีพีทรานสมิตเตอร์ในปัจจุบันได้รับการออกแบบให้เหมาะสมและสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น เช่น ทนต่อสภาพแวดล้อมของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้นได้ดี ให้ผลการทำงานที่ดี มีความเที่ยงตรงสูง ช่วงไร้การตอบสนอง (Dead band) ต่ำ ลิเนียร์ลิตีดี การเปลี่ยนแปลงของความดันสถิต (Static Pressure) มีผลน้อยต่อการวัดความดันแตกต่างค่าเดียวกัน เอาต์พุตของทรานสมิตเตอร์จะถูกกำหนดให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกันโดยสมาคมผู้ผลิตดังนี้

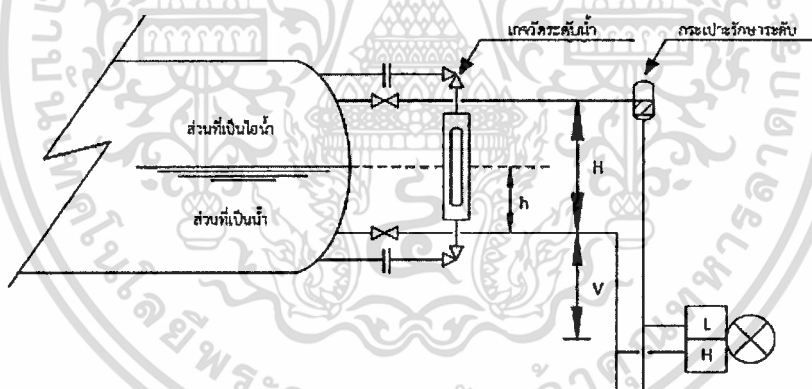
เอาต์พุต แบบนิวเมติกส์	3 – 15 PSI
เอาต์พุต แบบกระแส	4 – 20 mA
เอาต์พุต แบบแรงดัน	1 – 5 Volt.

ค่าเอาต์พุตที่อินพุตเป็น 0 % ที่ 3 PSI, 4 mA หรือ 1 โวลต์ เรียกว่าค่า Live Zero ผลดีของ Live Zero ก็คือ เป็นการตรวจสอบการทำงานของทรานสมิตเตอร์ ณ จุดที่อินพุต 0 % ค่าเอาต์พุตจะต้องมีค่าเท่ากับ Live Zero นี้ ถ้าไม่ตรงก็แสดงว่าการทำงานของทรานสมิตเตอร์ผิดพลาด และผลดีอีกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างก็ก็สามารถใช้ดีพีทรานสมิตเตอร์ของบริษัทใดก็ได้ที่มี  $\Delta P$  ย่านเดียวกัน โดยไม่ต้องเปลี่ยนเครื่องบันทึกค่า เครื่องควบคุมหรือตัวขับเคลื่อนค่าในระบบ

#### 2.4.1 การวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

การวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าจะแตกต่างกับหม้อต้มความดันไอน้ำโดยทั่วไปเนื่องจากเป็นหม้อต้มความดันไอน้ำชนิดความดันสูง ดังนั้นการวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำด้วยอุปกรณ์วัดระดับน้ำชนิดความดันแตกต่างจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวภายในหม้อต้ม เพราะภายในหม้อต้มความดันไอน้ำจะประกอบไปด้วยของเหลว 2 ชนิดคือ น้ำและไอน้ำที่สภาวะอิ่มตัว ซึ่งมีความหนาแน่นที่แตกต่างกันและแปรเปลี่ยนไปตามความดันภายในหม้อต้ม เพราะฉะนั้นการวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำจำเป็นต้องมีการวัดความดันเข้ามาเพื่อชดเชยความหนาแน่นของไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในหม้อต้มความดันไอน้ำและเพื่อให้การวัดระดับน้ำมีความถูกต้องเพิ่มขึ้น การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำแสดงให้เห็น ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดความดันแตกต่าง

อุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำหรือกระเปาะน้ำที่จุดต่อด้านความดันต่ำมีไว้เพื่อเป็นจุดเปรียบเทียบ ขณะใช้งานไอน้ำภายในกระเปาะจะกลั่นตัวทำให้น้ำในกระเปาะมีระดับคงที่ตลอดเวลา ค่าความดันแตกต่างที่วัดได้เกิดจากความแตกต่างของระดับน้ำในกระเปาะกับระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ และค่าความดันแตกต่างที่วัดได้จะมีค่ากลับกันกับระดับน้ำในหม้อต้ม คือค่าความแตกต่างจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อระดับน้ำลดลงต่ำสุด และค่าความแตกต่างจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสูงท่วมระดับจุดเชื่อมต่อบนหรือสูงเสมอระดับน้ำในกระเปาะ

พิจารณารูปที่ 2.7 ความดันที่ด้าน L ของตัววัดความดันแตกต่าง เกิดจากผลรวมของความดันสถิตภายในบวกกับความดันที่เกิดจากน้ำในท่อด้าน L

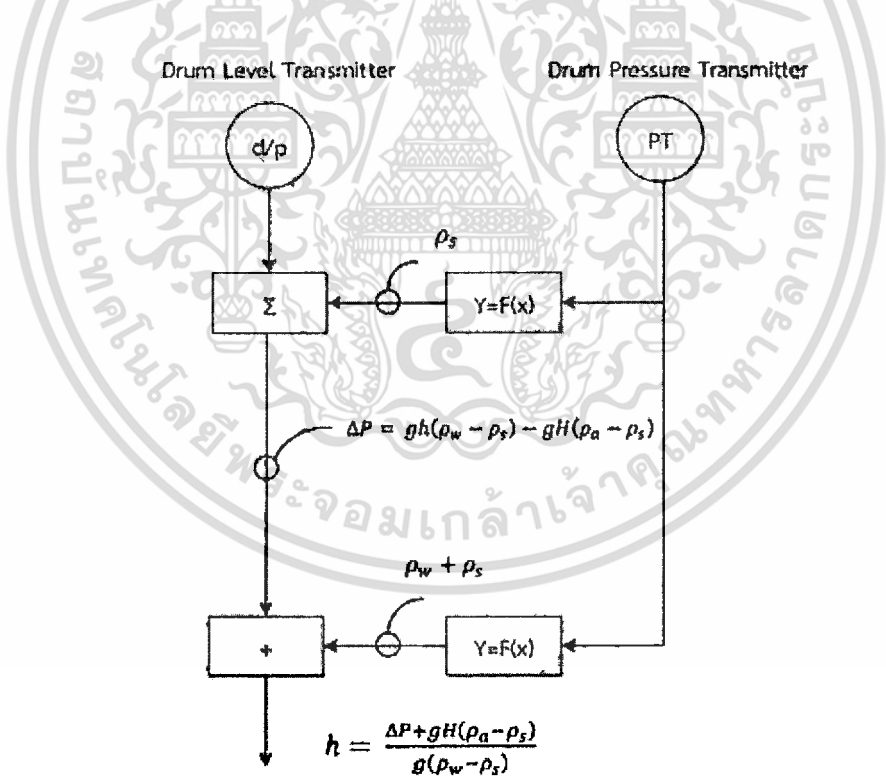
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับบริการเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกันจะทำให้หน้าที่ในการวัดความดันที่เกิดในกระบวนการแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ที่มีขนาด 4-20 mA เพื่อส่งไปยังตัวควบคุมซึ่งทำงานบนระบบควบคุมกระจายส่วนเพื่อแสดงค่าระดับน้ำที่แท้จริงของหม้อต้มความดันไอน้ำพร้อมทั้งคำนวณหาสัญญาณควบคุมเพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มให้คงที่

### 2.4.2 การชดเชยระดับน้ำ

ปัญหาความยุ่งยากของการวัดระดับน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำ คือภายในหม้อต้มความดันไอน้ำนั้นจะประกอบไปด้วยของเหลว 2 ชนิดคือน้ำและไอน้ำที่อุณหภูมิอิ่มตัวซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะจุดเดือดและจุดเดือดของน้ำจะเปลี่ยนไปตามค่าความดันภายในหม้อต้ม ขณะเดียวกันค่าความหนาแน่นของน้ำมีแนวโน้มลดลง แต่ค่าความหนาแน่นของไอน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจุดเดือดของน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการวัดระดับน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำด้วยอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกัน สำหรับโรงไฟฟ้าจำเป็นจะต้องมีวงจรที่คอยแก้ความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำให้ถูกต้องตลอดย่านการใช้งานด้วยการวัดความดันของหม้อต้มเข้ามาชดเชยความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรการวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำด้วยการชดเชยความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 2.8 วิธีการดังกล่าวเป็นรูปแบบของวงจรการวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำด้วยการวัดความดันเข้ามาชดเชยความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งวิธีการคำนวณชดเชยไม่วุ่นวายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นนั้นจะกระทำบนระบบควบคุมแบบกระจายส่วน เพื่อคำนวณและแสดงระดับน้ำที่แท้จริงของหม้อต้มความดันไอน้ำ ค่าความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำอิ่มตัวได้มาจากตารางคุณสมบัติไอน้ำอิ่มตัวและความดัน (Saturated Steam – Pressure Table) ที่ความดันของหม้อต้ม 0-150 บาร์ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค จากตารางคุณสมบัติไอน้ำอิ่มตัวและความดัน ในภาคผนวก ค พบว่าคุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ที่สนใจจะกล่าวถึงในที่นี้ ได้แก่ ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) และความดัน โดยที่ความหนาแน่นของของไหล หาได้โดยนำมวลหารด้วยปริมาตร ในขณะที่ปริมาตรจำเพาะ หาได้โดยนำปริมาตรหารด้วยมวล ดังนั้นความหนาแน่น และปริมาตรจำเพาะ จึงเป็นปฏิภาคกลับซึ่งกันและกัน

#### 2.4.2 การวัดอัตราการไหล

ตัวแปรที่สำคัญในระบบควบคุมอีกตัวหนึ่งคือ อัตราการไหล (Flow Rate) เพราะตัวแปรอื่น ๆ ที่ต้องการควบคุมจะถูกควบคุมโดยปริมาณของอัตราการไหลเกือบทั้งสิ้น โดยส่งผลไปที่วาล์วควบคุม (Control Valve) หรือ แดมเปอร์ (Damper) เมื่อของไหล (Fluid) ของระบบเป็นของเหลวหรือก๊าซ วิธีการและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลมีหลายชนิดแต่ละชนิดก็มีวิธีการที่แตกต่างกันออกไปส่วนใหญ่แล้วมิใช่เป็นการหาค่าอัตราการไหลโดยตรง แต่จะหาความเร็ว (Velocity) ของการไหลแล้วคำนวณออกมาเป็นอัตราการไหล เช่น วิธีการหาค่าความดันแตกต่างโดยใช้ออร์ฟิส แบบใช้หลักการแม่เหล็ก แบบใช้อัลตราโซนิก หรือใช้แบบวอร์เทกซ์ จะเห็นว่าวิทยาการหลายแขนงสามารถประยุกต์เข้ามาวัดอัตราการไหลได้ ซึ่งก็มีข้อดี ข้อเสีย ข้อจำกัดในการใช้งานแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดและของไหลที่ต้องการวัดนั้นๆ คุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของไหลแต่ละชนิดที่ควรทราบเพื่อใช้พิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์วัดที่เหมาะสมจะแสดงให้เห็นดังนี้

อุณหภูมิ (Temperature) ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ตัวแปรอื่นๆ อีกหลายตัว เช่น ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่น และปริมาตร เปลี่ยนแปลงค่าตามไปด้วยในการวัดของไหลที่เป็นของเหลว เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงของไหลผ่านตัววัดมีค่าความเปลี่ยนแปลงน้อย ดังนั้นจึงประมาณว่ามีค่าคงที่ แต่ในของไหลที่เป็นก๊าซหรือเป็นไอ อุณหภูมิจะต้องวัดและนำมาเป็นตัวแก้ไขค่าของการไหลด้วย เช่นการวัดค่าการไหลแบบปริมาตร (volumetric flow) ค่าอุณหภูมิพื้นฐาน (Temperature base) มีค่า 60 °F ค่าการวัดอัตราการไหลในระบบที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จะต้องเทียบมาที่อุณหภูมิพื้นฐานนี้ เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบและค่าที่บอกเป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไป

ความดัน (Pressure) การเปลี่ยนแปลงค่าความดันในของเหลวจะมีผลต่อตัวแปรอื่นๆ น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ค่าความดันพื้นฐาน (Pressure base) มีค่า 14.696 Psia สำหรับการวัดแบบกำหนดค่าเป็นปริมาตร เช่น ค่าอัตราการไหลของอากาศ (Air Flow) กำหนดไว้ 15 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (Standard Cubic Feet per Minute : SCFM) หมายความว่าอัตราการไหลของอากาศขณะนั้นมีค่าเท่ากับ 15 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 °F และความดันที่ 14.696 Psia แม้ว่าอุณหภูมิและความดันจะไม่เท่ากับ 60 °F และ 14.696 Psia ต้องเทียบค่าปริมาตรมาบอกที่ความดันพื้นฐานและอุณหภูมิพื้นฐานเพื่อให้สะดวกต่อความเข้าใจ โดยยึดการบอกค่าที่ความดันและอุณหภูมิเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืด (Viscosity) ความหนืดคือค่าบ่งชี้คุณสมบัติความต้านทานอัตราการไหลในตัวของไหล ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากการกระทำของความเค้นเฉือนหรือความเค้นภายนอก ความหนืดนี้อธิบายถึงความสามารถในการต้านทานอัตราการไหลภายในตัวของไหล และอาจจะถูกพิจารณาให้เป็นตัวชี้วัดความเสียดทานของไหลได้ ถ้าหากของไหลมีความหนืดต่ำมากเท่าไร ก็จะมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้มากเท่านั้น การบอกค่าความหนืดที่นิยมคือ แบบไคเนแมติก (Kinematic Viscosity) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

โดยที่

$\nu$  คือ ค่าความหนืดแบบไคเนแมติก

$\eta$  คือ ค่าความหนืดแบบสัมบูรณ์

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่น

การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดในของไหลที่เป็นของเหลวและก๊าซต่ออุณหภูมิจะมีทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือในของเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดจะต่ำลง แต่ในก๊าซถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นด้วย

เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ตั้งชื่อตามนักวิจัยยุคแรก คือ Osborne Reynolds ผู้ค้นพบปรากฏการณ์ของของไหล โดย Reynolds ค้นพบว่าตัวบ่งชี้สภาพอัตราการไหลขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และค่าความหนาแน่นของของไหล

กำหนดให้

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของของไหล

$v_{av}$  คือ ความเร็วในการไหลเฉลี่ย

$d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

$\eta$  คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล

$R_D$  คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

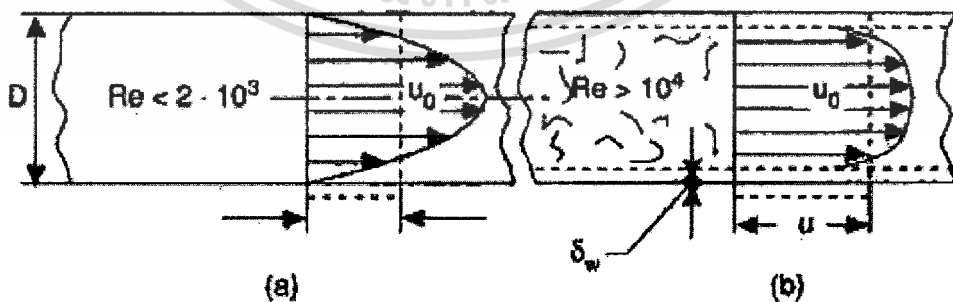
จะได้

$$R_D = \frac{v_{av} d \rho}{\eta}$$

$R_D$  เป็นค่าดัชนีไม่มีหน่วย (Dimensionless) การใช้งานดัชนี  $R_D$  นี้จะแบ่งรูปแบบของการไหลเป็น 2 แบบคือ

1. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ลักษณะการไหลจะเป็นไปอย่างราบเรียบ ชั้นของของไหลจะขนานกันไปตลอด การไหลในลักษณะนี้เกิดจากของไหลมีความหนืดสูงมาก เช่น ก๊าซฮีโรีน น้ำมันเตา อณูของสารเหล่านี้จับตัวกันแน่นหรืออัตราการไหลมีค่าต่ำมากๆ ในการวัดอัตราการไหล โดยทั่วไปจะไม่พบการไหลแบบราบเรียบนี้ ข้อดีของการไหลแบบราบเรียบนี้ก็คือ ให้ค่าความสามารถของย่านการวัด (Rangeability) ดีกว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) มาก สำหรับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบปั่นป่วน ค่าอัตราการไหลจะแปรผันกับความดันแตกต่างกำลังสอง ซึ่งจะให้ค่าความสามารถของย่านการวัดประมาณ 5:1 เป็นอย่างสูง แต่ในการไหลแบบราบเรียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลต่อความดันแตกต่างจะเป็นแบบเชิงเส้น (Linear) ทำให้ได้ค่าความสามารถของย่านการวัดได้ถึง 100:1 และทำการวัดได้ความถูกต้องดีตลอดย่าน ซึ่งแตกต่างกับการไหลแบบปั่นป่วนที่ให้ความถูกต้องดีเฉพาะอัตราการไหลย่านสูงๆ แต่ที่ย่านต่ำๆจะมีความผิดพลาดสูง

2. การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) การไหลส่วนใหญ่จะเป็นแบบนี้แทบทั้งสิ้น ลักษณะการไหลจะเป็นไปอย่างไม่มีระเบียบ ไม่มีชั้นที่แน่นอน การไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นในท่อที่ไม่สามารถเห็นได้ จึงต้องพิจารณาจากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ถ้าค่า  $R_D$  มากกว่า 4000 ขึ้นไป การไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน



รูปที่ 2.9 (a) รูปแบบความเร็วการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow Velocity Profile)

(b) รูปแบบความเร็วการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow Velocity Profile)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งย่านการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วน พิจารณาที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ถ้าค่า  $R_D$  จาก 0 ถึง 2000 เป็นย่านการไหลแบบราบเรียบ แต่ในช่วง  $R_D$  จาก 2000 ถึง 4000 จะเป็นย่านวิกฤติ (Critical zone) ซึ่งมีการไหลทั้งสองแบบผสมกัน ในงานวิศวกรรมระบบท่อ วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาอย่างเหมาะสมในแง่เศรษฐศาสตร์ระหว่างมูลค่าการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง หากเลือกระบบท่อที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ การลงทุนจะสูงเพราะระบบท่อจะใหญ่ แต่ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องจะต่ำเพราะค่าพลังงานสูญเสียในระบบท่อต่ำ หากเลือกค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงจะมีผลตรงกันข้าม

ความหนาแน่น (Density) ความหนาแน่น คือ คำนวณของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร น้ำที่ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศจะมีความหนาแน่น  $999.845 \text{ kg/m}^3$  และความหนาแน่นของของเหลวจะเปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ แต่เกือบจะไม่มีผลเมื่อความดันเปลี่ยนไป (ยกเว้นในช่วงความดันสูงมากๆ) โดยปกติจะเรียกของเหลวว่าเป็นสารประเภทอัดตัวไม่ลง (Incompressible) ในสารที่เป็นไอและก๊าซ ความหนาแน่นจะเปลี่ยนตามทั้งค่าอุณหภูมิและความดัน ค่าอัตราการไหล ซึ่งปกติจะวัดเป็นค่าปริมาตร (Volumetric Flow) ดังนั้นถ้าต้องการทราบมวลการไหล (Mass Flow) จะต้องทำการหาค่าความหนาแน่นก่อนจึงจะทราบค่ามวลการไหลได้

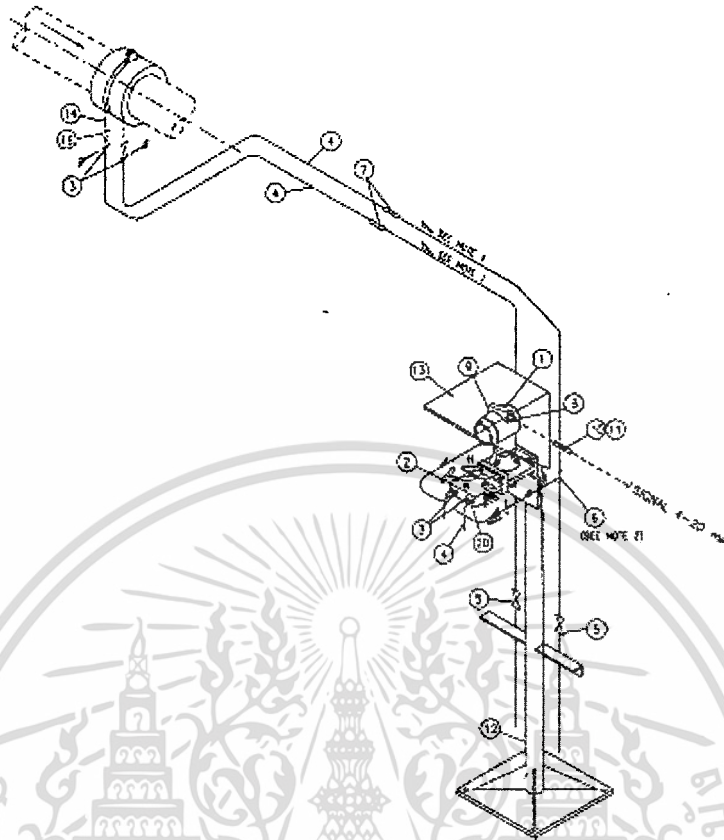
การอัดตัว (Compressibility) ของเหลวเมื่อเพิ่มความดัน ปริมาตรของของเหลวเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการคำนวณจึงถือเป็นค่าคงที่ (ยกเว้นย่านที่ค่าความดันสูงๆ) แต่ในกรณีของไหลเป็นก๊าซหรือไอ ค่าการอัดตัวเป็นตัวประกอบที่มีความสำคัญมาก ค่าตัวประกอบของการอัดตัว (Compressibility Factor) จะถูกนำมาคำนวณด้วยเสมอ มิฉะนั้นค่าที่ได้จะผิดพลาดมาก และความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรสำหรับก๊าซจะเป็นไปตามกฎของก๊าซ (Gas Law)

### 2.4.3 การวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนและไอน้ำสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำ

ระบบป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำ (Feed water system) เป็นระบบป้อนน้ำให้เครื่องกำเนิดไอน้ำ โดยการป้อนน้ำที่ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized Water) จากปั๊มน้ำแรงดันสูง (Boiler Feed water Pump) ที่มีความเร็วคงที่ผ่านแผงท่อที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำ (Economizer) จากนั้นจะส่งน้ำป้อนไปยังหม้อต้มความดันไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ ไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อต้มความดันไอน้ำนั้นจะถูกนำไปทำให้เป็นไอน้ำ (Superheat Steam) ผ่านแผงท่อให้ความร้อน (Super Heater) เพื่อกำจัดความชื้นที่ปะปนอยู่กับไอน้ำให้หมดไปและนำไอน้ำนั้นไปขับเคลื่อนเครื่องกังหันไอน้ำต่อไป

การควบคุมน้ำป้อน (Feed water Control) เข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำจะต้องควบคุมอัตราการป้อนน้ำให้เหมาะสมและสอดคล้องกับกระบวนการผลิตไอน้ำหรืออัตราการไหลออกของไอน้ำ เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไอน้ำจะมีผลโดยตรงต่อระบบการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำ ดังนั้นเพื่อรักษาระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้คงที่ อัตราการไหลออกของไอน้ำและน้ำป้อนจะต้องมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งอยู่บนพื้นฐานคือ อัตราการไหลเข้าเท่ากับอัตราการไหลออก การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำป้อนสำหรับหม้อต้มความดัน

เอกสารนี้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.10 การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



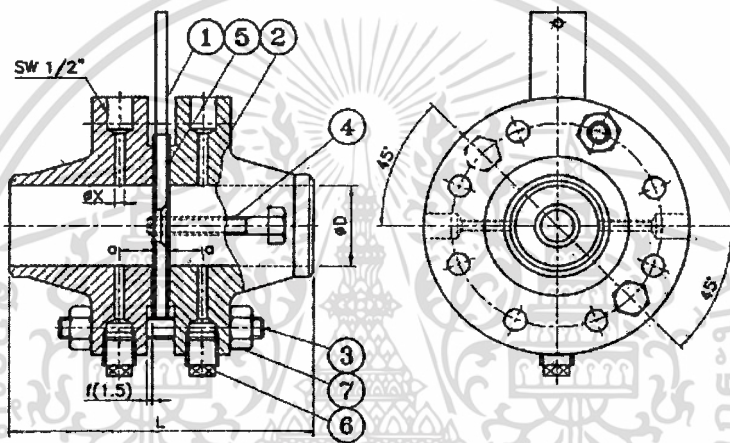
รูปที่ 2.10 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำป้อน

ITEM NO.	DESCRIPTION	Q'TY	MATERIAL
1	DIFF. PRESSURE TRANSMITTER 1/2" NPT(F)	1	-
2	5 WAY MANIFOLD VALVE 1/2" NPT(F)	1	SUS316
3	MALE CONNECTOR 1/2" NPT(M) X 1/2" O.D	6	SUS316
4	IMPLUSE TUBE 1/2" O.D X 0.065 THCKNESS	2	SUS316
5	NEDDLE VALVE 1/2" O.D (TUBE FITING END)	2	SUS316
6	UNION TEE 1/2" O.D	2	SUS316
7	TUBE UNION 1/2" O.D	2	SUS316
8	CABLE GLAND 1/2" NPT(M) WITH PVC SHROUD	1	BRASS
9	PLUG THREAD 1/2" NPT(M)	1	BRASS
10	CABLE TAG NAMEPLATE	1	PLASTIC
11	UV RESISTANT CABLE TIE	2	PLASTIC
12	STANCHION A106 GR. B 2" SCH 40 X 1500 MM WITH HOT DPIP. GALVANIZED	1	HOT DIP. GALV.
13	SUNSHADE	1	FIBER GLASS
14	SMLS PIPE NIPPLE 1/22" O.D X 4" LG TOE	2	ASTM A312-TP304L
15	GATE VALVE NPS 1/2" 150# SW/NPT CONNECTOR	2	BODY = A182-F316 TRIN = A276 TYE.316
16	MALE CONNECTOR 1/4" NPT(M) X 1/2" O.D	2	SUS316

รูปที่ 2.11 รายการวัสดุที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำป้อน

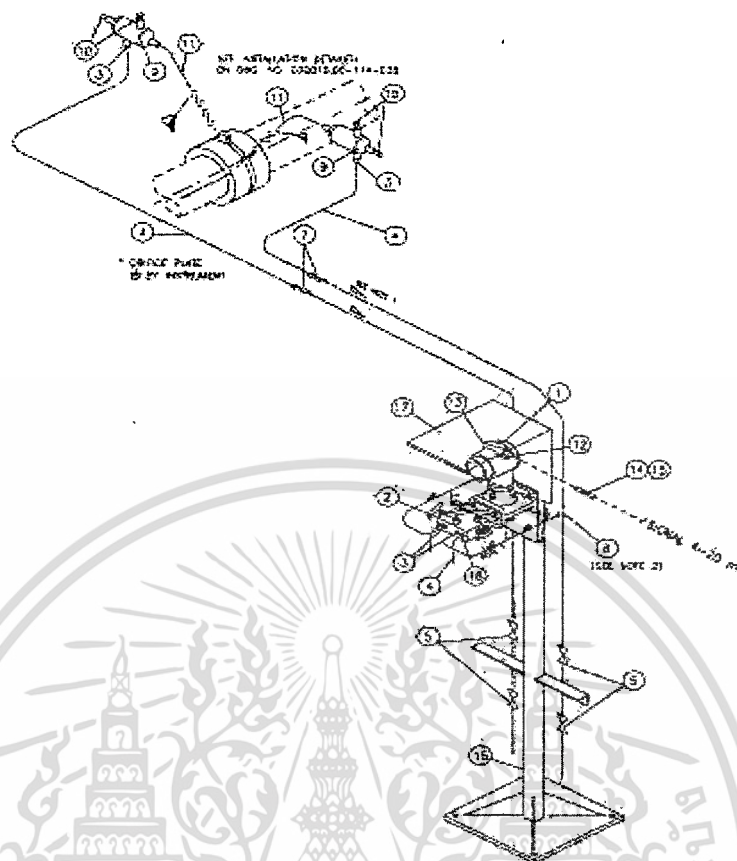
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนจะใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลด้วยแผ่นออริฟิส (Orifice Plate) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง (Difference Pressure Transmitter) เพื่อใช้ในการแปลงความดันแตกต่างจากหน้าแปลนของแผ่นออริฟิสเป็นสัญญาณมาตรฐานทางไฟฟ้า เพื่อส่งต่อไปยังระบบควบคุมหรือระบบแสดงผล แผ่นออริฟิสมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะที่มีรูไว้สำหรับให้ของไหลๆ ผ่าน ในการติดตั้งจะถูกติดตั้งอยู่ระหว่างหน้าแปลนของท่อในลักษณะตั้งฉากกับกระแสการไหล เนื่องจากมีการจัดทำได้ง่าย และมีราคาถูก จึงทำให้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายและยังมีความน่าเชื่อถือในการวัดอัตราการไหลได้เป็นอย่างดี แผ่นออริฟิสสามารถทำขึ้นจากวัสดุได้หลายชนิด เช่น 316 Stainless steel, Monel, หรือ Inconel ลักษณะของออริฟิสตามมาตรฐาน ISO 5167 แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างแผ่นออริสตามมาตรฐาน ISO 5167

การวัดอัตราการไหลของไอน้ำที่ออกจากหม้อต้มความดันไอน้ำเพื่อไปขับกังหันไอน้ำ ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลด้วยนอชเชิล (Flow Nozzle) นอชเชิลเป็นอุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจากแผ่นออริฟิส และท่อเวนจูรี (Venturi tube) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวัดการไหลจากการวัดด้วยแผ่นออริฟิสที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นที่หน้าตัดอย่างเฉียบพลัน โดยค่อยๆลดพื้นที่หน้าตัดลงตามลักษณะของเวนจูรี ซึ่งการวัดอัตราการไหลด้วยนอชเชิลให้ค่าการวัดที่มีความเที่ยงตรง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) มากกว่าการวัดด้วยออริฟิส แต่มีราคาที่สูงกว่า โดยทิศทางการไหลสามารถวัดได้เพียงทิศทางเดียวเช่นเดียวกับแผ่นออริฟิส นอชเชิลเหมาะสำหรับการวัดอัตราการไหลที่มีความเร็วสูงและไม่มีสารแขวนลอยปะปน การใช้งานนอชเชิลจะติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง เพื่อใช้ในการแปลงความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างนอชเชิลเป็นสัญญาณมาตรฐานทางไฟฟ้า รูปแบบการติดตั้งนอชเชิลร่วมกับอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.13 และลักษณะของนอชเชิลตามมาตรฐาน ISO 5167 แสดงดังรูปที่ 2.15 ตามลำดับ

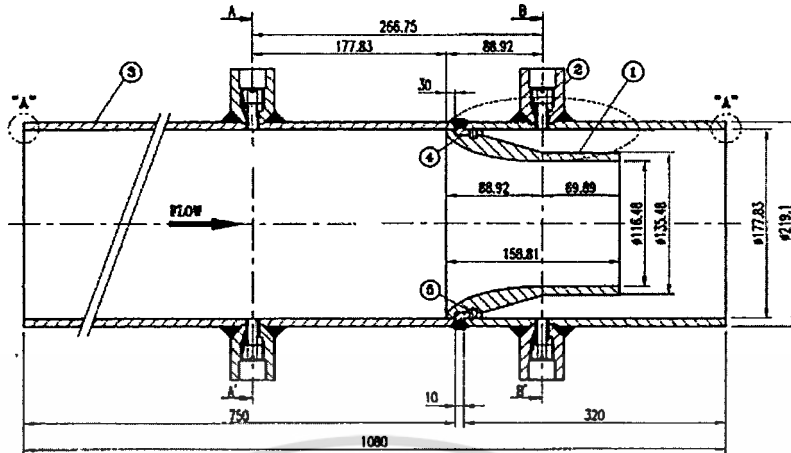


รูปที่ 2.13 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ

ITEM NO.	DESCRIPTION	Q'TY	MATERIAL
1	DIFF. PRESSURE TRANSMITTER 1/2" NPT(F)	1	-
2	5 WAY MANIFOLD VALVE 1/2" NPT(F)	1	SUS316
3	MALE CONNECTOR 1/2" NPT(M) X 1/2" O.D	4	SUS316
4	IMPLUSE TUBE 1/2" O.D X 0.065 THCKNESS	2	SUS316
5	NEEDLE VALVE 1/2" O.D (TUBE FITING END)	4	SUS316
6	UNION TEE 1/2" O.D	2	SUS316
7	TUBE UNION 1/2" O.D	2	SUS316
9	PLUG THREAD 1/2" NPT(M)	2	A335 P22
10	VENT PLUG 1/2" NPT	4	A335 P22
11	SEAMLESS PIPE 1/2"	2	A335 P22
12	CABLE GLAND THREAD 1/2" NPT(M) WITH PVC SHROUD	1	BRASS
13	PLUG THREAD 1/2" NPT(M)	1	PLASTIC
14	CABLE TAG NAMEPLATE	1	PLASTIC
15	STANCHION A106 GR. B 2" SCH 40 X 15000 MM WITH HOT DIP. GALVAIZED	1	HOT DIP. GALV.
17	SUNSHADE	1	FIBER GLASS
18	MALE CONNECTOR 1/4" NPT(m) X 1/2" O.D	2	SUS316

รูปที่ 2.14 รายการวัสดุที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



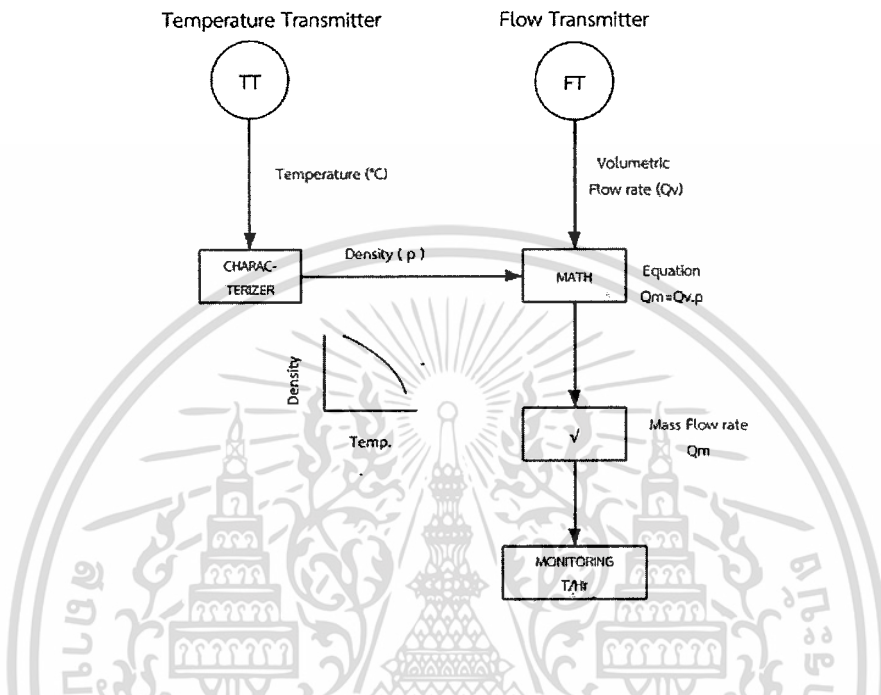
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างนอชเชิลตามมาตรฐาน ISO 5167

การวัดอัตราการไหลด้วยแผ่นออริฟิสและนอชเชิล จะต้องมีการติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างด้วยเสมอ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนสัญญาณความดันแตกต่างจากหน้าแปลนของแผ่นออริฟิสและนอชเชิลเป็นสัญญาณมาตรฐานทางไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์หรือสัญญาณมาตรฐาน 3-15 Psi ซึ่งปัจจุบันสัญญาณมมีการใช้งานกันน้อยมาก สัญญาณมาตรฐานที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังระบบควบคุมหรือระบบแสดงผลต่อไป

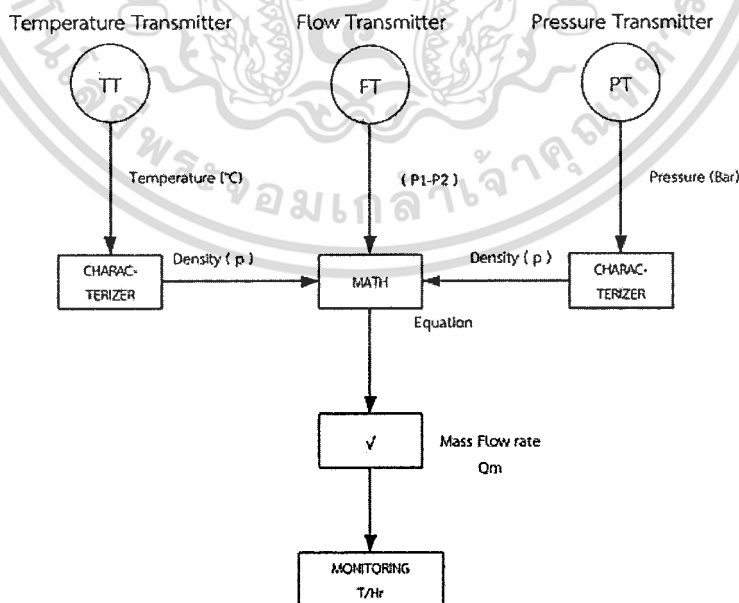
#### 2.4.4 การชดเชยการไหล

การไหลหรืออัตราการไหลเป็นตัวแปรที่สำคัญในระบบควบคุมเพราะตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องการจะควบคุมจะถูกควบคุมโดยปริมาณของการไหลเกือบทั้งสิ้น เช่นเดียวกันกับกระบวนการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำและการไหลออกของไอน้ำเพื่อใช้ในการผลิตกังหันไอน้ำ ปัญหาความยุ่งยากของการวัดการไหลสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำคือ คุณสมบัติทางกายภาพของไหลจะแปรเปลี่ยนไปตามความดันและอุณหภูมิในกระบวนการ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการวัดที่ผิดพลาด ดังนั้นในการใช้งานเครื่องมือเกี่ยวกับการไหลจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของของไหลที่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความดันภายในกระบวนการด้วย และเนื่องด้วยอุปกรณ์วัดส่วนใหญ่ที่ใช้ในกระบวนการวัดอัตราการไหลจะวัดอัตราการไหลของของไหลในรูปแบบของอัตราการไหลแบบปริมาตรในหนึ่งช่วงเวลา หรือการวัดอัตราการไหลแบบปริมาตร. (Volumetric Flow Rate) เกือบทั้งสิ้น โดยการวัดความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด เช่น การวัดอัตราการไหลด้วยแผ่นออริฟิส และการวัดอัตราการไหลชนิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flow meter) เป็นต้น แต่ในกระบวนการอุตสาหกรรมที่แท้จริง ส่วนใหญ่ต้องการค่าอัตราการไหลในรูปแบบอัตราการไหลโดยมวล (Mass Flow Rate) แต่ข้อจำกัดการของการเลือกใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลโดยมวลคือราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นบ่อยครั้งในอุตสาหกรรมได้มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบปริมาตรร่วมกับเครื่องคำนวณการไหล (Flow Computer) หรือวงจรที่คอยแก้ไขค่าความความหนาแน่นของ

ของไหลให้ถูกต้องตลอดการใช้งาน และใช้ในการปรับเทียบค่านวนอัตราการไหลโดยมวล โดยรูปแบบวิธีการคำนวณอัตราการไหลโดยมวลของน้ำป้อนสู่หม้อต้ม และอัตราการไหลโดยมวลของไอน้ำ จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 วิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำ



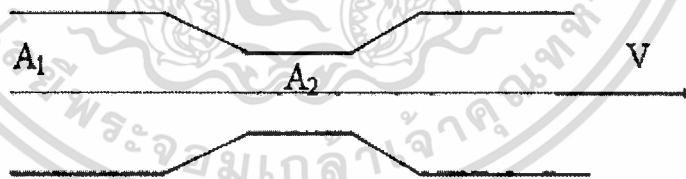
รูปที่ 2.17 วิธีการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำสำหรับหม้อต้มความดันไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นเข้าเว็บไซต์ระบบสารสนเทศการคำนวณ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งอุปกรณ์วัดการไหลของน้ำและไอน้ำหลายแห่งในปัจจุบัน ค่าความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำไม่ได้ถูกวัดค่าจากกระบวนการผลิตจริง แต่ใช้การเปรียบเทียบในระบบควบคุม ซึ่งค่าความหนาแน่นถูกใช้ในการคำนวณหาการไหลมวลน้ำและไอน้ำ ความผิดพลาดที่มีสาเหตุมาจากการเปรียบเทียบนี้จะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของความดันและอุณหภูมิไอน้ำที่วัด แต่จะมีความผิดพลาดได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์หรืออาจมากกว่า ถ้าไม่มีการชดเชยด้วยค่าความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำในการคำนวณหาการไหลมวลไอน้ำ ด้วยเหตุนี้อุปกรณ์วัดการไหลไอน้ำสำหรับไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) จะใช้การวัดความดันและอุณหภูมิในการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นไอน้ำ อุปกรณ์วัดที่การติดตั้งระบบหุ้มฉนวนไม่ดีและมีการติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิใกล้กับบริเวณผิวท่อ อาจมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดอย่างมาก เนื่องจากความไม่ตรงกันระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิไอน้ำ อย่างไรก็ตามในเกือบทุกกรณี ค่าความถูกต้องของการไหลมวลมีค่าประมาณ 1 หรือ 2 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีการวัดไอน้ำอิ่มตัวด้วยการวัดความดันและอุณหภูมิไอน้ำ

#### 2.4.5 ทฤษฎีการวัดการไหลแบบวัดความดันแตกต่าง

สำหรับการไหลของของไหลนั้นหากพิจารณาว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆ ดังนั้นตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้ว่า ผลรวมของพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ในของไหลจะต้องคงที่ และถ้าหากว่าการไหลนั้นเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ สามารถเขียนสมการพลังงานให้อยู่ในรูปของสมการเบอร์นูลลีได้ เมื่อพิจารณาที่จุดสองจุดใดๆ ในสมการการไหล ดังรูปที่ 2.18 พบว่าผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ภายในท่อที่มีของไหลผ่าน มีค่าคงตัวเสมอ



รูปที่ 2.18 การไหลภายในท่อ

กำหนดให้

$V_1$  คือ ความเร็วของของไหลที่จุดที่ 1

$V_2$  คือ ความเร็วของของไหลที่จุดที่ 2

$P_1$  คือ ความดันแบบสแตติกที่จุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_2$  คือ ความดันแบบสแตติกที่จุดที่ 2

$Z_1$  คือ ระดับความสูง ณ จุดศูนย์กลางของท่อที่จุดที่ 1

$Z_2$  คือ ระดับความสูง ณ จุดศูนย์กลางของท่อที่จุดที่ 2

$g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$r$  คือ ค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหล

จากสมการของ Bernoulli เปรียบเทียบที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ตามลำดับ

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{r_1} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{r_2} + Z_2 \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) เนื่องจากระดับ  $Z_1 = Z_2$  และ  $r_1 = r_2$  ดังนั้น

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{r} \quad (2.7)$$

เนื่องจากสภาพการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuity Flow) ดังนั้น  $P$  คือ ปริมาณการไหลของของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด ณ จุดใดๆ ของท่อจะต้องมีค่าคงที่เสมอ นั่นคือ ปริมาณการไหล ณ จุด 1 และจุด 2 จะต้องมามีค่าเท่ากัน ถ้าให้  $A_1$  และ  $A_2$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ตามลำดับ จะได้

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2.8)$$

จัดรูปแบบสมการที่ (2.8)

$$V_1 = \frac{A_2}{A_1} V_2 \quad (2.9)$$

$$V_2^2 \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] = 2g \frac{(P_1 - P_2)}{r} \quad (2.10)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{r \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (2.11)$$

โดยที่  $V_2$  คือ ความเร็วของของไหลผ่านแผ่นออริฟิส และมีปริมาณการไหลเท่ากับ  $Q = A_2 V_2$  และแทนค่าในสมการที่ (2.11) จะได้สมการที่ (2.12)

$$A_2 V_2 = A_2 \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{r \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (2.12)$$

กำหนดให้  $P_1 - P_2 = \Delta P$  และอัตราส่วน  $\frac{A_2}{A_1} = \beta$  จะได้

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2g(\Delta P)}{r} / (1 - \beta^2)} \quad (2.13)$$

ผลที่ได้จากสมการที่ (2.13) เป็นค่า  $Q$  ที่ได้จากทฤษฎีเท่านั้น ในทางปฏิบัติจริงแล้ว ค่า  $Q$  ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าทฤษฎี ดังนั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์อีกตัวหนึ่งมาคูณเพื่อให้ได้ค่า  $Q$  ที่แท้จริง สัมประสิทธิ์ตัวนี้ได้จากการทดลองเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (Coefficient of Discharge :  $C_d$ ) โดยปกติค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของแผ่นออริฟิส นอซเซิล และ เวนจูรี จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.6, 0.75 จนถึง 0.98

ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) จะได้

$$Q = A_2 C_d \sqrt{\frac{2g\Delta P}{r} / (1 - \beta^2)} \quad (2.14)$$

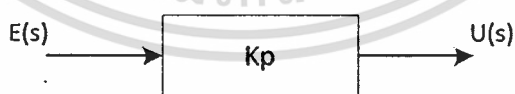
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ตัวควบคุมไฟโอดี

รูปแบบโครงสร้างของตัวควบคุมที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับควบคุมกระบวนการคือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อินทิกรัล-อนุพันธ์ (PID controller) เรียกสั้นๆว่า ตัวควบคุมพีโอดี เนื่องจากง่ายต่อการทำความเข้าใจ มีเสถียรภาพ และทนทาน ค่าที่จะนำไปคำนวณเป็นค่าความผิดพลาด ซึ่งได้จากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการจะควบคุม โดยตัวควบคุมจะพยายามลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ สำหรับการประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจจะใช้เพียงหนึ่งหรือสองรูปแบบขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ ตัวควบคุมพีโอดีบางครั้งถูกเรียกว่า ตัวควบคุมพีไอ (PI) พีดี (PD) พี (P) หรือ I ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน สมรรถนะของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนั้นวิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุม เพื่อให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะสูงสุด เรียกว่า การจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอดี (PID control tuning) จึงเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่ง วิธีการจูนพื้นฐานที่นิยมใช้ อย่างเช่น Ziegler-Nichols เป็นต้น

### 2.5.1 ตัวควบคุมพี (P-controller)

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมพีหรือตัวควบคุมแบบสัดส่วนนั้น สัญญาณควบคุม ( $u$ ) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด ( $e$ ) ที่ได้จากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิง (ค่าที่ต้องการควบคุม) กับสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ต้องการควบคุม แผนภาพของตัวควบคุมแบบสัดส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 และเขียนเป็นสมการที่ (2.15) ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนคือลดค่าความผิดพลาดของระบบ โดยสามารถตอบสนองกับค่าความผิดพลาดอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 2.19 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อ  $K_p$  คืออัตราขยายของตัวควบคุม ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีรูปแบบสมการคือ  $u(t) = K_I \int e(t) dt$  เมื่อ  $K_I$  คือค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล เขียนในเทอมของลาปลาซ  $U(s) = (K_I/S)E(s)$  แผนภาพของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลแสดงดังรูปที่ 2.20

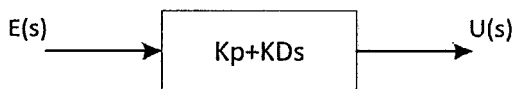


รูปที่ 2.20 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

จากรูปแบบการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้ จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม  $u(t)$  จะมีค่ามาก เมื่อสัญญาณความผิดพลาด  $e(t)$  มีค่าเป็นศูนย์ ภายหลังจากเมื่อเวลาผ่านไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัญญาณการควบคุมในกรณีของการควบคุมแบบอินทิกรัลขึ้นอยู่กับค่าในอดีต ซึ่งแตกต่างกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลก็เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกันค่าความมีเสถียรภาพของระบบก็ลดน้อยลงด้วย การควบคุมแบบอินทิกรัลนี้ จะเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบ

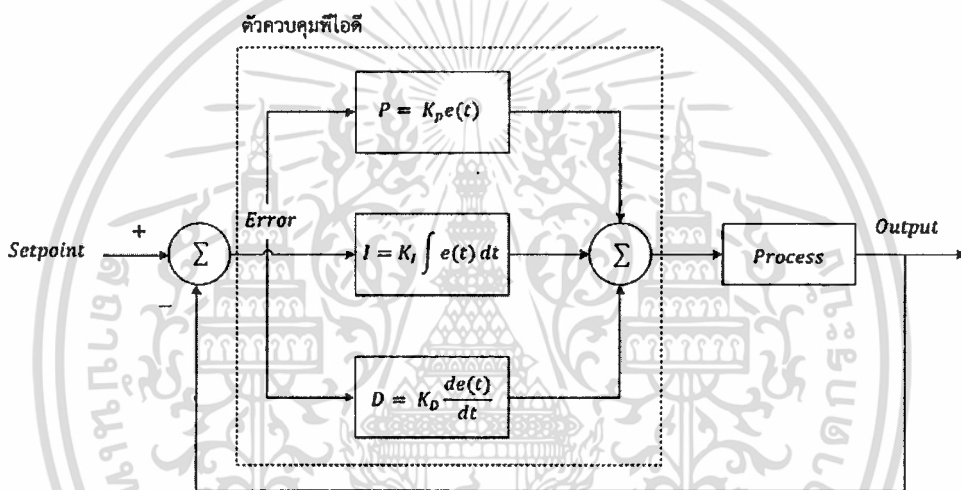
### 2.5.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์มีสมการคือ  $u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt}$  เมื่อ  $K_D$  คือค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ส่วนมากแล้วจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบอื่น เช่น ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน ซึ่งเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอนุพันธ์หรือตัวควบคุมพีดี ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลก็จะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลหรือตัวควบคุมพีไอ และถ้าใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ เรียกว่าตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 2.21 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วง (damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม นั่นคือจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณความผิดพลาด ดังนั้นถ้าสัญญาณความผิดพลาดนี้มีสัญญาณรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (Fluctuate) ค่อนข้างมาก (เนื่องจากค่าความชันของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก) ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้น ตัวควบคุมแบบพีไอดี จึงได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสาม และในการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมพีไอดี อาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ แผนภาพของตัวควบคุมพีไอดี แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.22



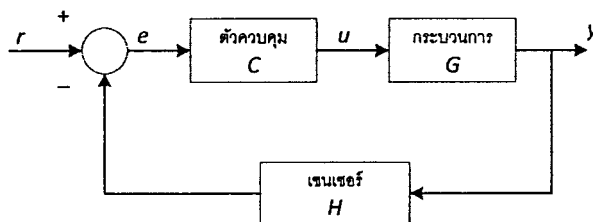
รูปที่ 2.22 แผนภาพตัวควบคุมแบบพีไอดี

## 2.6 ระบบควบคุมพีไอดี

### 2.6.1 การควบคุมพีไอดีแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 2.23 เป็นแผนภาพระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ โดยที่  $G$  คือ กระบวนการใดๆ ทำการวัดค่าตัวแปรของกระบวนการ  $y$  ด้วยเซนเซอร์  $H$  และกระบวนการดังกล่าวถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม  $C$  ส่วน  $r, e$  และ  $u$  คือสัญญาณอ้างอิง (Reference signal) หรือค่าที่ต้องการ (Desired value) ค่าความผิดพลาด (Error signal) และสัญญาณควบคุม (Control signal) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แผนภาพระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ

ถ้าสมมุติ  $H = 1$  เขียนสมการตัวควบคุมพีไอดีแบบต่อเนื่อง

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.16)$$

โดยที่

$K$  คือ อัตราขยายสัดส่วน (Proportional gain) ของตัวควบคุมพี

$T_i$  คือ ค่าทางเวลาของอินทิเกรต (Integration time) ของตัวควบคุมไอ

$T_d$  คือ ค่าทางเวลาของอนุพันธ์ (Derivative time) ของตัวควบคุมดี

เขียนสมการที่ (2.17)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.17)$$

โดยที่

$K_p = K$  คือ อัตราขยายสัดส่วน

$K_i = \frac{K}{T_i}$  คือ อัตราขยายอินทิกรัล

$K_d = K T_d$  คือ อัตราขยายอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (2.17)

$$U_s = K_p E(s) + \frac{K_i E(s)}{s} + K_d s E(s) = U_p(s) + U_i(s) + U_d(s) \quad (2.18)$$

$$U_p(s) = K_p E(s) = K E(s) \quad (2.19)$$

$$U_i(s) = \frac{K_i E(s)}{s} = \frac{K E(s)}{T_i s} = \frac{K_p E(s)}{T_i s} \quad (2.20)$$

$$U_d(s) = K_d s E(s) = K T_d s E(s) \approx \frac{K T_d s}{1 + \frac{s T_d}{N}} E(s) = \frac{K_d s}{1 + \frac{K_d s}{K_p N}} E(s) \quad (2.21)$$

โดยที่

$\frac{T_d}{N}$  คือ ค่าตัวกรองความถี่ (Filtering time-constant)

$N$  คือ จำนวนเต็ม โดยทั่วไปเลือกค่าในช่วง 3 และ 20

### 2.6.2 การควบคุมพีไอดีแบบดิสครีต

สำหรับการควบคุมแบบดิจิตอล (Digital control) วิธีการของตัวควบคุมพีไอดีจะเขียนสมการด้วยรูปแบบดิสครีตทางเวลา (Discrete-time PID controller) โดยใช้วิธีการผลต่างย้อนกลับ (Backward difference method) เพื่อประมาณค่าของส่วนอินทิกรัลและอนุพันธ์ตั้งสมการ

$$u(kh) = u_p(kh) + u_i(kh) + u_d(kh) \quad (2.22)$$

$$u_p(kh) = K_p e(kh) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_i(kh) = u_i(kh - h) + K_i h e(kh) = u_i(kh - h) + \frac{K_p h}{T_i} e(kh) \quad (2.24)$$

$$u_d(kh) = \frac{K_d}{K_d + K_p N h} u_d(kh - h) + \frac{K_p K_d N}{K_d + K_p N h} [e(kh) - e(kh - h)] \quad (2.25)$$

โดยที่

$h$  คือ เวลาการสุ่มตัวอย่าง (Sampling time)

$k$  คือ ลำดับทางเวลา (Time-step)

สำหรับส่วนอนุพันธ์  $u_d(kh)$  กรณีใช้วิธีการผลต่างไปหน้า (Forward difference method)

$$u_d(kh) = K_p T_d \frac{[e(kh-h) - e(kh)]}{h} \quad (2.26)$$

ซึ่งปกติไม่ใช้งานเนื่องจากสมการที่ (2.26) ขยายความผิดพลาดสุ่มตัวอย่าง

## 2.7 การจูนค่าพารามิเตอร์พีไอดี

ในส่วนนี้กล่าวถึงพื้นฐานวิธีการจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งอาศัยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ได้จากการทดลอง

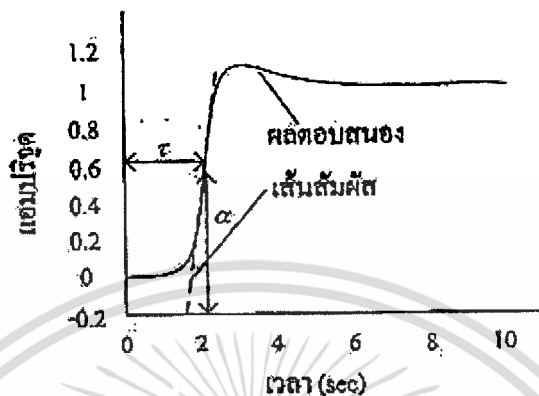
### 2.7.1 วิธีการ Ziegler-Nichols

วิธีการผลตอบสนองความถี่และผลตอบสนองขั้นบันไดของ Ziegler-Nichols เป็นวิธีการจูนตัวควบคุมพีไอดีแบบเดิม ที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นพื้นฐานของการจูนตัวควบคุม วิธีการผลตอบสนองขั้นบันไดอาศัยหลักการทดลองผลตอบสนอง

ลูปเปิดของกระบวนการ ซึ่งต้องการให้กระบวนการมีเสถียรภาพ พฤติกรรมของผลตอบสนองขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของกระบวนการระบุได้ด้วยพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $\tau$  พารามิเตอร์ทั้งสองคำนวณได้ด้วยการเขียนเส้นสัมผัสที่จุดไม่โค้งงอ นั่นก็คือ จุดที่ความชันของผลตอบสนองของขั้นบันไดมีค่าสูงสุด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดตัดของเส้นสัมผัสบนแกนพิกัดทางเวลา จะได้พารามิเตอร์ของกระบวนการดังรูปที่ 2.24 จากนั้นใช้ค่า  $\alpha$  และ  $\tau$  สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.24 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการด้วยวิธีการตอบสนองขั้นบันไดของ 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	$\frac{1.2}{\alpha}$	$2\tau$	$\frac{\tau}{2}$

วิธีการตอบสนองความถี่ยังคงอาศัยหลักการอธิบายกระบวนการด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า นั่นคือ อัตราขยายสุดท้าย  $K_u$  (Ultimate gain) และคาบเวลาสุดท้าย  $T_u$  (Ultimate period) สำหรับวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ใช้ตัวควบคุมพีทำการควบคุมกระบวนการ จากนั้นเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมพีจนกระทั่งระบบเกิดการออสซิลเลตอย่างวิกฤต อัตราขยายที่ได้จากเสถียรภาพเกณฑ์ต่ำ (Marginal stability) ก็คือ อัตราขยายสุดท้าย และคาบเวลาสุดท้าย ก็คือ คาบเวลาของการออสซิลเลตที่อัตราขยายดังกล่าว พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีได้จากวิธีการตอบสนองความถี่ของ Ziegler-Nichols ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

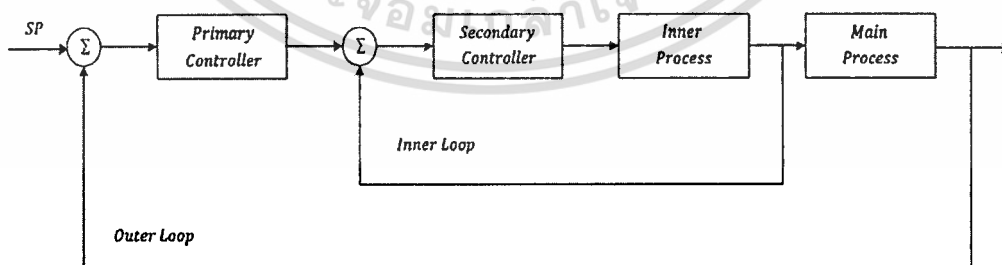
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงผลตอบสนองความถี่ของ Ziegler-Nichols

ตัวควบคุม	$K_p$	$T_i$	$T_d$
พี	$0.5K_u$		
พีไอ	$0.4K_u$	$0.8T_u$	
พีไอดี	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

## 2.8 เทคนิคการควบคุม

### 2.8.1 การควบคุมแบบคาสแคด

การควบคุมแบบคาสแคดเป็นเทคนิคการควบคุมหนึ่งที่พบแพร่หลายในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งมีจะพบในลักษณะการควบคุมที่มีระบบสองระบบอนุกรมกัน โดยปัจจัยของตัวแปรกระบวนการที่มีการตอบสนองสัญญาณรบกวนได้ช้า นั้นหมายความว่าตัวแปรกระบวนการ (Process Variable :  $PV$ ) มีโอกาสเบี่ยงเบนจากสมดุลนานขึ้น โครงสร้างของการควบคุมแบบคาสแคดก็จะประกอบด้วยลูการควบคุม 2 ลูปซ้อนเรียงกัน โดยลูปที่เพิ่มขึ้นจากปกติจะเรียกลูปนี้ว่า ลูปรองหรือลูปทุติยภูมิ (Secondary loop ) แสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างการควบคุมแบบแคสแคด

โดยลักษณะนี้ จะเห็นสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมหลัก (Primary controller) จะส่งเป็นสัญญาณ  $SP$  ให้กับตัวควบคุมรอง (Secondary controller) ซึ่งตัวควบคุมรองนี้จะควบคุมตัวแปรของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการภายใน (Internal Process) โดยโครงสร้างตัวควบคุมแบบนี้ถ้ามีตัวแปรรบกวนเข้ามาในกระบวนการภายใน ตัวควบคุมรองจะทำหน้าที่จัดการผลกระทบที่เกิดขึ้น เพื่อรักษาตัวแปร  $PV$  ของลูปในให้มีค่าคงที่ ซึ่งหากลูปในแก้ไขผลกระทบของตัวแปรรบกวนได้เร็ว ผลกระทบต่อ  $PV$  ของลูปนอกก็จะน้อย แต่หากตัวแปรรบกวนเข้ามาที่กระบวนการหลัก ตัวควบคุมหลักจะตอบสนองและลดผลของตัวแปรรบกวนที่เกิดขึ้น ซึ่งในลักษณะโครงสร้างการควบคุมเช่นนี้ กระบวนการหลักมักมีผลตอบสนองทางเวลาที่ช้ากว่ากระบวนการรอง

## 2.9 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม สาเหตุปัญหาของการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ การวัดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำชนิดสามตัวแปร และตัวควบคุมพีไอดี ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบดิสครีต พร้อมทั้งแนะนำวิธีการจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols รวมทั้งได้กล่าวถึงเทคนิคการควบคุมแบบคาสแคดที่จะช่วยให้การควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อเป็นความรู้เบื้องต้นสำหรับการออกแบบการควบคุมระดับน้ำชนิดสามตัวแปรด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่มีรูปแบบการเชื่อมโยงแบบคาสแคด ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

## บทที่ 3

# ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรภายในหม้อต้ม ความดันไอน้ำ

### 3.1 คำนำ

ในบทนี้เป็นการนำความรู้พื้นฐานจากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรทั้งสามของกระบวนการคือ อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำ และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ตัวควบคุมของระบบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตัวควบคุมพีไอดีชั้นใน และตัวควบคุมพีไอดีชั้นนอก ซึ่งเชื่อมต่อกันแบบคาสแคด ส่วนอินพุตซึ่งเป็นตัวแปรของกระบวนการคือ อัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้ม และอัตราการไหลออกของไอน้ำ ในขณะที่ตัวแปรด้านเอาต์พุตคือระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ หากมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวาล์วควบคุมการไหล จะส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าสู่หม้อต้มและตัวควบคุมอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มจะรับรู้และทำการปรับแก้ไขอย่างทันทีเพื่อรักษาระดับน้ำในหม้อต้มให้คงที่

### 3.2 โครงสร้างของกระบวนการ

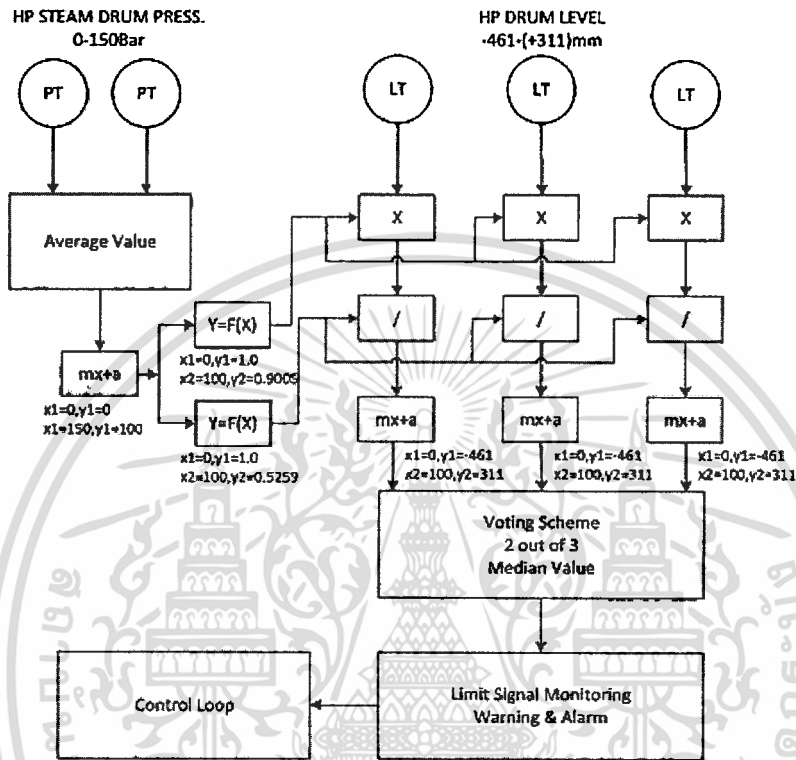
จากหัวข้อ 2.4. ได้กล่าวถึงโครงสร้างหลักการวัดและควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรของกระบวนการ คือ ระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ อัตราการไหลออกของไอน้ำ และอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้ม จะเห็นได้ว่าไม่มีขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณปรับเทียบชดเชยค่าความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อความดันและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ การหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณปรับเทียบค่าความหนาแน่นของน้ำและไอน้ำให้ถูกต้องตลอดย่านการใช้งาน การสอบเทียบย่านการวัดระดับน้ำ

#### 3.2.1 โครงสร้างกระบวนการวัดระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

หม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าถือเป็นหม้อต้มความดันไอน้ำชนิดความดันสูง ถูกออกแบบให้ผลิตไอน้ำที่ความดัน 82 barg และอุณหภูมิ 527 °C เพื่อป้อนไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกังหันไอน้ำสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการวัดระดับน้ำด้วยอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกัน จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวภายในหม้อต้ม เนื่องจากภายในหม้อต้มความดันไอน้ำจะไม่ว่างเปล่าๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบไปด้วยของเหลวสองชนิดคือ น้ำ และไอน้ำที่สภาวะอิ่มตัว 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

- เซนเซอร์วัดความดันของหม้อต้มสำหรับชุดเซชความหนาแน่นของไอน้ำที่แปรเปลี่ยนไปตามความดันของหม้อต้ม คือ

HP Drum Pressure A

HP Drum Pressure B

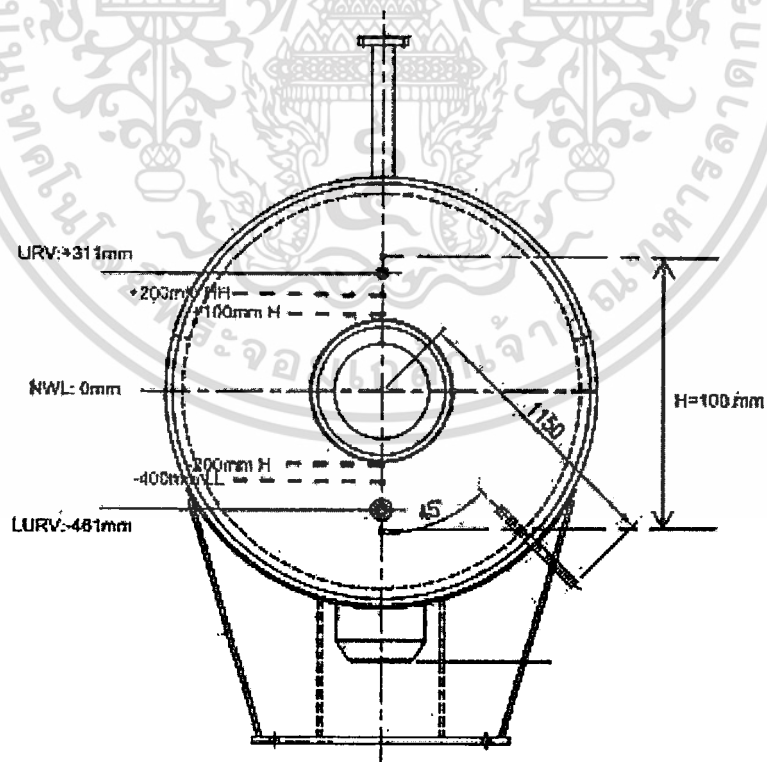
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฟังก์ชันการควบคุมระดับน้ำ (Control Function)

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

Normal Water Level (NWL)	: 0 mm
Active tripped	: HH Water Level Set +200 mm
Active tripped	: LL Water Level Set -400 mm
Active Alarm	: H Water Level Set +100 mm
Active Alarm	: L Water Level Set -200 mm

ค่าเป้าหมาย (Set point) สำหรับการวัดและควบคุมหม้อต้มความดันไอน้ำจะถูกออกแบบหรือกำหนดด้วยผู้ผลิตหม้อต้ม ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการวัดและควบคุม โดยจะแสดงตัวอย่างดังนี้



รูปที่ 3.2 ระดับน้ำเป้าหมายของหม้อต้มความดันไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 กำหนดให้หม้อต้มความดันไอน้ำมีความสามารถผลิตไอน้ำที่สภาพการใช้งานปกติ (Normal Operation) 82 barg อุณหภูมิไอน้ำ 527 °C และควบคุมระดับน้ำให้อยู่กึ่งกลางหม้อต้มที่ 0 mm ค่าระดับน้ำสูงสุด คือ +311 mm และระดับน้ำต่ำสุด คือ -461 mm

การคำนวณย่านการสอบเทียบเครื่องมือ (Calibration Range)

จากเอกสารที่ 2.4. ในบทที่ 2 จะได้

$$\Delta P = gh(\rho_w - \rho_s) - gH(\rho_a - \rho_s) \quad (3.1)$$

$$\Delta P = h(\rho_w g - \rho_s g) - gH(\rho_a g - \rho_s g) \quad (3.2)$$

จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและปริมาตรจำเพาะ เขียนสมการใหม่ได้คือ

$$\Delta P = h(r_w - r_s) - H(r_a - r_s) \quad (3.3)$$

ความดันสูงสุดที่เกิดที่เซนเซอร์วัดความดันแตกต่างกัน เมื่อระดับน้ำต่ำสุด คือ

$$\Delta P(100\%) = PH - PL \quad (3.4)$$

จากความสัมพันธ์ของ  $\Delta P = PH - PL$  แทนสมการที่ 3.3 ลงใน 3.4

$$\Delta P(100\%) = h(r_w - r_s) - H(r_a - r_s) \quad (3.5)$$

โดยที่

$r_s$  คือ ค่าน้ำหนักจำเพาะของไอน้ำอิ่มตัวภายในหม้อต้มไอน้ำ

$r_w$  คือ ค่าน้ำหนักจำเพาะของน้ำอิ่มตัวภายในหม้อต้มความดันไอน้ำ

$r_a$  คือ ค่าน้ำหนักจำเพาะของน้ำที่ควบแน่นในอุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางคุณสมบัติไอน้ำอิ่มตัว (Thermodynamic Properties of Saturated Steam-Water)  
ที่ ความดัน 80 Barg จะได้

$$r_w = 7085.7302 \text{ N/m}^3, r_s = 416.9493 \text{ N/m}^3, r_a = 9581.0971 \text{ N/m}^3$$

ดังนั้นแทนค่าดังกล่าวในสมการ 3.5 จะได้

$$\Delta P(100\%) = 0(7085.7302 - 416.9493) - 1(9581.0971 - 416.9493)$$

$$\Delta P(100\%) = -9164.1478 \text{ Pa}$$

เมื่อ  $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$  และ  $1 \text{ Pa} = 0.10197136 \text{ mmH}_2\text{O}$  จะได้

$$\Delta P(100\%) = -934.481 \text{ mmH}_2\text{O}$$

ความดันที่เกิดขึ้นที่เซนเซอร์วัดความดันแตกต่างกัน เมื่อระดับน้ำสูงสุด

$$\Delta P(0\%) = 1(7085.7302 - 416.9493) - 1(9581.0971 - 416.9493)$$

$$\Delta P(0\%) = -2495.3669 \text{ Pa}$$

$$\Delta P(0\%) = -254.4556 \text{ mmH}_2\text{O}$$

ดังนั้น ดำเนินการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างกันให้สอดคล้องกับตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางสอบเทียบเซนเซอร์วัดระดับน้ำชนิดความดันแตกต่าง

Drum Level ( % )	Drum Level ( mm )	Diff. Pressure ( mmH <sub>2</sub> O )	Transmitter Current ( mA )
100	+311	-254.4556	20
0	-461	-934.481	4

#### การชดเชยความดัน

จากรูปที่ 3.1 ทำการวัดความดันในหม้อต้มความดันไอน้ำด้วยโครงสร้างการวัดแบบ 2 ใน 2 (2 out of 2) ค่าความดันที่นำมาแสดงผลจะเป็นค่าที่มาจากค่าเฉลี่ยของเซนเซอร์วัดความดันทั้งสอง เพื่อนำค่าความดันมาชดเชยค่าความถ่วงจำเพาะหรือค่าน้ำหนักจำเพาะของน้ำและไอน้ำที่แปรเปลี่ยนไปตามความดันภายในหม้อต้ม พร้อมกำหนดการทำงานของฟังก์ชันช่วงการประมาณค่า (Interpolation) สำหรับ Fx (4) และ Fx (5) ดังตาราง ที่ 3.2 บนระบบควบคุมกระจายส่วน

เขียนฟังก์ชัน Fx (4) และ Fx (5) ได้ดังต่อไปนี้

$$Fx (4) = \frac{\text{Actual Condition } (\rho_a - \rho_s)}{\text{Design Condition } (\rho_a - \rho_s)}$$

$$Fx (5) = \frac{\text{Actual Condition } (\rho_w - \rho_s)}{\text{Design Condition } (\rho_w - \rho_s)}$$

และให้สอดคล้องกับผู้ผลิตหม้อต้มความดันไอน้ำ กำหนดให้ค่าความหนาแน่นของน้ำในอุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำ ( $\rho_a$ ) จะกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดย่านการใช้งานคือ  $977 \text{ kg/m}^3$  บนพื้นฐานเงื่อนไขดังนี้

(1) กรณีหม้อต้มความดันไอน้ำเดินเครื่องที่สภาวะปกติ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำในอุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำคือ  $988 \text{ kg/m}^3$  ที่ความดัน  $30 \text{ kg/cm}^2$  และอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ควบแน่นต่ำกว่า  $50^\circ \text{C}$

(2) กรณีหม้อต้มความดันไอน้ำเดินเครื่องที่สภาวะปกติ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำในอุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำคือ  $983 \text{ kg/m}^3$  ที่ความดัน  $50 \text{ kg/cm}^2$  และอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ควบแน่นต่ำกว่า  $60^\circ \text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) กรณีหม้อต้มความดันไอน้ำเดินเครื่องที่สภาวะปกติ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำในอุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำคือ  $977 \text{ kg/m}^3$  ที่ความดัน  $70 \text{ kg/cm}^2$  และอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ควบแน่นต่ำกว่า  $70^\circ \text{C}$

ตารางที่ 3.2 ตารางการชดเชยความดัน

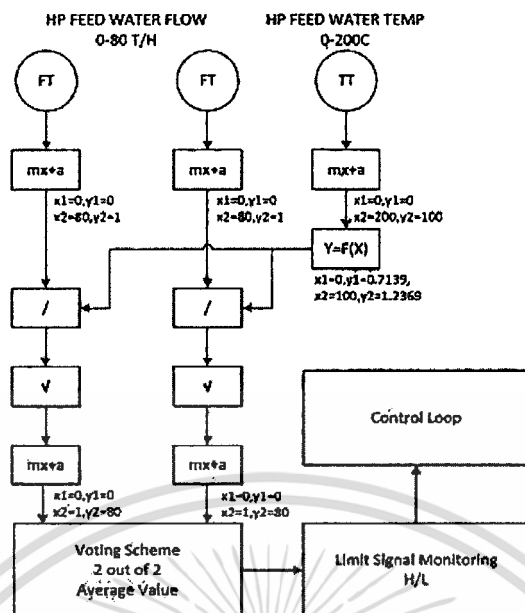
Pressure (Bar <sub>g</sub> )	$\rho_w$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_a$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_a - \rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_w - \rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Fx (4)		Fx (5)	
						X(%)	Y	X(%)	Y
0	958.121	0.598	977	976.402	957.523	0	1.0000	0	1.0000
15	863.044	8.091	977	968.909	854.953	10	0.9923	10	0.8929
30	819.612	15.517	977	961.483	804.094	20	0.9847	20	0.8398
45	785.848	23.241	977	953.759	762.607	30	0.9768	30	0.7964
60	756.441	31.393	977	945.607	725.048	40	0.9685	40	0.7572
75	729.363	40.088	977	936.912	689.275	50	0.9596	50	0.7199
90	703.581	49.443	977	927.557	654.138	60	0.9500	60	0.6832
105	678.375	59.611	977	917.389	618.765	70	0.9396	70	0.6462
120	653.275	70.806	977	906.194	582.478	80	0.9281	80	0.6083
135	627.774	83.123	977	892.877	547.651	90	0.9149	90	0.5693
150	601.334	97.739	977	879.261	503.594	100	0.9005	100	0.5259
Drum Level Transmitter			URV = -247.77 mmH <sub>2</sub> O			H [mm] : 1000			
			LRV = -939.059 mmH <sub>2</sub> O						

### 3.2.2 โครงสร้างกระบวนการวัดน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำ

โครงสร้างการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำ แสดงดังรูปที่

#### 3.3 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 โครงสร้างการวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำ

- เซนเซอร์วัดการไหลชนิดความดันแตกต่าง (dp Transmitter) คือ  
 HP Feed water Flow Transmitter A  
 HP Feed Water Flow Transmitter B
- เซนเซอร์วัดอุณหภูมิน้ำป้อนสำหรับชดเชยความหนาแน่นของไอน้ำที่แปรเปลี่ยนไป  
 อุณหภูมิของหม้อต้มความดันไอน้ำ คือ  
 HP Feed Water Temperature Transmitter
- ฟังก์ชันอัตราการไหล (Flow Control Function)

วัดอัตราการไหลของน้ำป้อนด้วยโครงสร้างการวัดแบบ 2 ใน 2 (2 out of 2) ค่าระดับน้ำที่นำมาแสดงผลจะเป็นค่าที่มาจากค่านวนหาค่าเฉลี่ยของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลทั้งสอง พร้อมดำเนินการโปรแกรมและสร้างสัญญาณเตือนอัตราการไหลของน้ำป้อนบนระบบควบคุมกระจาย ส่วน ดังนี้

Active Alarm	: HH Feed Water Flow Set 70 T/H
Active Alarm	: LL Feed Water Flow 5 T/H
Active Warning	: H Feed Water Flow 65 T/H
Active Warning	: L Feed Water Flow 10 T/H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การชดเชยอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3.3 ทำการวัดอุณหภูมิน้ำป้อน เพื่อนำค่าอุณหภูมิมาชดเชยค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป พร้อมกำหนดการทำงานของฟังก์ชันช่วงการประมาณค่า (Interpolation) สำหรับการทำงานของฟังก์ชัน Fx (6) ดังตาราง ที่ 3.3 บนระบบควบคุมกระจายส่วน

ตารางที่ 3.3 ตารางการชดเชยอุณหภูมิ

Feed Water Temp.	Fx (6)	
Temp.	X (%)	Y
0	0	0.7139
20	10	0.7662
40	20	0.8185
60	30	0.8708
80	40	0.9231
100	50	0.9574
120	60	1.0277
140	70	1.0800
160	80	1.1323
180	90	1.1846
200	100	1.2369

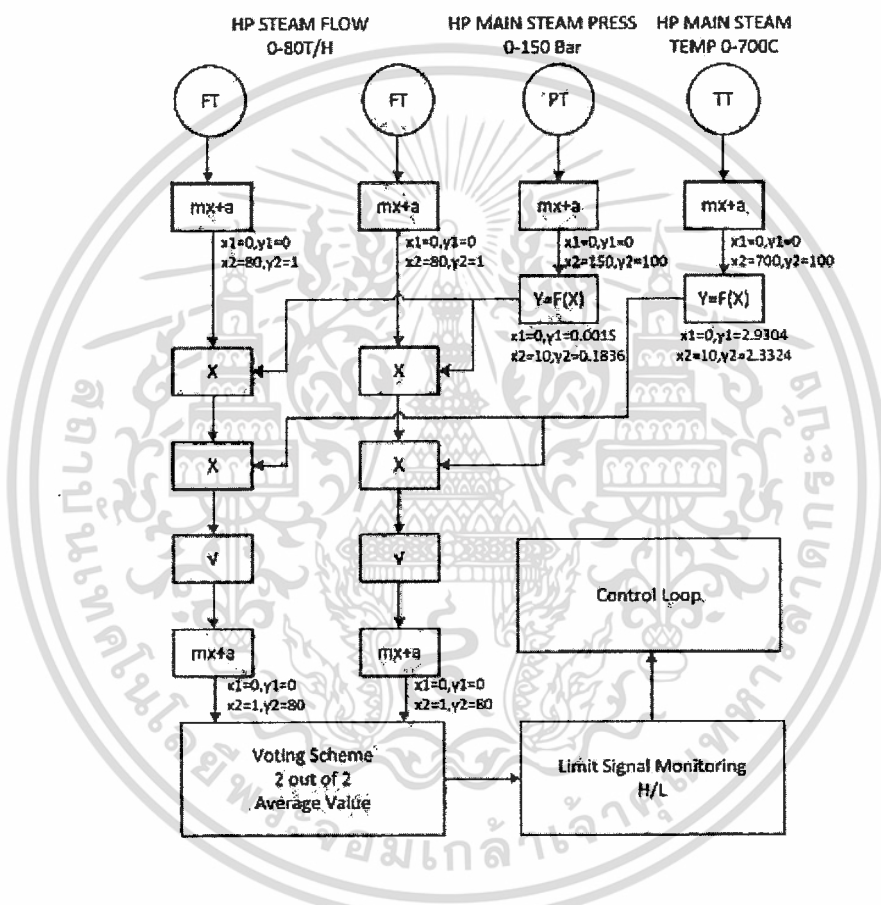
โดยที่ฟังก์ชัน Fx (6) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $Fx(6) = \frac{(273 + \text{Operation Temp.})}{(273 + \text{Design Temp.})}$  ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และให้สอดคล้องกับผู้ผลิตหม้อต้มความดันไอน้ำกำหนด ค่าอุณหภูมิของน้ำป้อนที่ถูกออกแบบไว้ คือ 109.4 °C

### 3.2.3 โครงสร้างกระบวนการวัดอัตราการไหลของไอน้ำ

โครงสร้างการวัดอัตราการไหลของไอน้ำที่ออกจากหม้อต้มความดันไอน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้



รูปที่ 3.4 โครงสร้างการวัดอัตราการไหลของไอน้ำ

• เซนเซอร์วัดการไหล Nozzle      ต่อร่วมกับทรานส์มิสเตอร์ความดันแตกต่าง (dp Transmitter) คือ

HP Steam Flow Transmitter A

HP Steam Flow Transmitter B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เซนเซอร์วัดอุณหภูมิไอน้ำสำหรับขดเคียวความหนาแน่นหรือน้ำหนักจำเพาะของไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป คือ

HP Main Steam Temperature Transmitter

- เซนเซอร์วัดความดันไอน้ำสำหรับขดเคียวความหนาแน่นไอน้ำหรือน้ำหนักจำเพาะของไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป คือ

HP Main Steam Pressure Transmitter

- ฟังก์ชันอัตราการไหล (Flow Control Function)

วัดอัตราการไหลของไอน้ำด้วยโครงสร้างการวัดแบบ 2 ใน 2 (2 out of 2) ค่าอัตราการไหลที่นำมาแสดงผลจะเป็นค่าที่มาจากค่าเฉลี่ยของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลทั้งสอง ดำเนินการขดเคียวความดันและอุณหภูมิของไอน้ำ ตลอดจนโปรแกรมและสร้างสัญญาณเตือนอัตราการไหลของไอน้ำในระบบควบคุมกระจายส่วน ดังนี้

Active Alarm : HH Main Steam Flow Set 70 T/H

Active Alarm : LL Main Steam Flow Set 5 T/H

Active Warning : H Main Steam Flow Set 65 T/H

Active Warning : L Main Steam Flow Set 10 T/H

และให้สอดคล้องกับผู้ผลิตหม้อต้มความดันไอน้ำ กำหนดให้หม้อต้มความดันไอน้ำเดินเครื่องที่สภาวะปกติที่ความดัน 82 barg, อุณหภูมิ 527 °C และค่าความถ่วงจำเพาะของไอน้ำคือ 23.88 kg/m<sup>3</sup>

ตารางที่ 3.4 ตารางชดเชยความดันและอุณหภูมิ

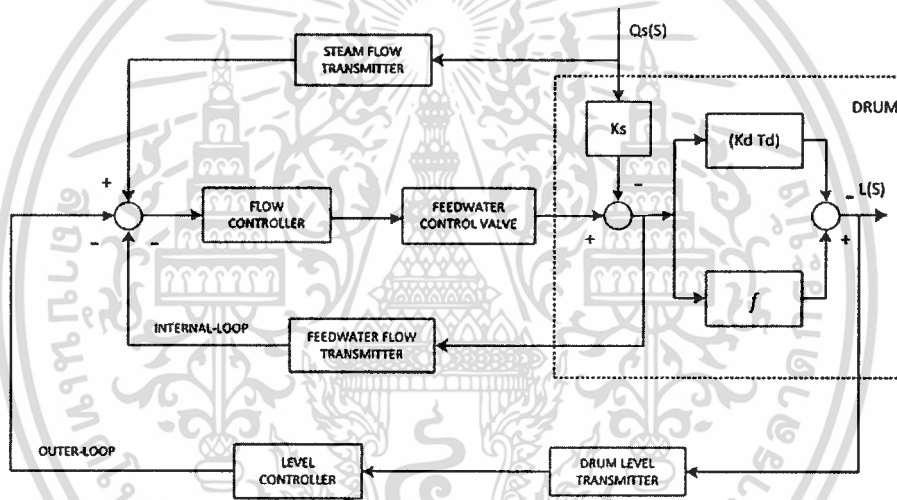
Pressure Ratio (Temp : Constant)					Temp. Ratio (Press : Constant)				
527 °C	Press. (Bar.g)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Fx (9)		82 Bar.g	Temp. °C	Density Kg/m <sup>3</sup>	Fx (10)	
			X (%)	Y				X (%)	Y
	0	0.274	0	0.0115		0	-	0	2.9304
	15	4.385	10	0.1836		70	-	10	2.3324
	30	8.580	20	0.3594		140	-	20	1.9370
	45	12.875	30	0.5392		210	-	30	1.6563
	60	17.260	40	0.7229		280	-	40	1.4467
	75	21.445	50	0.8982		350	34.979	50	1.4650
	90	26.340	60	1.1031		420	29.049	60	1.2166
	105	31.029	70	1.2996		490	25.374	70	1.0627
	120	35.854	80	1.5016		560	22.712	80	0.9512
	135	40.803	90	1.7089		630	20.640	90	0.8645
	150	45.882	100	1.9216		700	18.942	100	0.7933

### 3.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปร

สำหรับแผนภาพการควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วย ตัวควบคุมสองตัวและมีการเชื่อมโยงกันแบบคาสแคดคือ ตัวควบคุมอัตราการไหลน้ำป้อน (Feed water controller) หรือตัวควบคุมชั้นใน เรียกว่า ตัวควบคุมลำดับที่สอง ในขณะที่ตัวควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ (Drum level controller) หรือตัวควบคุมชั้นนอก เรียกว่า ตัวควบคุม

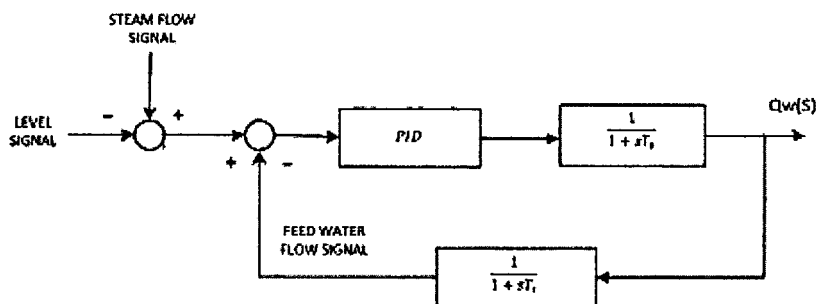
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่หนึ่ง โครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวควบคุมชั้นในจะให้ผลตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลง เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนก่อนที่จะมีผลกระทบต่อลูฟควบคุมชั้นนอก ในขณะที่ตัวควบคุมชั้นนอกจะถูกปรับแต่งให้มีผลตอบสนองที่ช้าต่อการเปลี่ยนแปลง เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่ และแก้ปัญหาปรากฏการณ์ การยุบตัว และการขยายตัวของน้ำภายในหม้อต้มในขณะโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่วนอินพุตซึ่งเป็นตัวแปรของกระบวนการคือ อัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้ม (Feed water flow transmitter) และอัตราการไหลออกของไอน้ำ (Steam flow transmitter) ในขณะที่ตัวแปรด้านเอาต์พุตคือ ระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ (Drum Level Transmitter) หากมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวาล์วควบคุมการไหล (Feed water control valve) จะส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าสู่หม้อต้ม และตัวควบคุมอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มจะรับรู้และทำการปรับแก้ไขอย่างทันที



รูปที่ 3.5 แผนภาพตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสเคดสามตัวแปร

แบบจำลองการวิเคราะห์การควบคุมการไหลของน้ำป้อน แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของน้ำป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมชั้นใน ดังแสดงให้เห็นในสมการข้างล่าง โดยโครงสร้างของกระบวนการควบคุมชั้นในจะถูกปรับแต่งให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลง หรือสัญญาณรบกวน

$$\frac{QW(s)}{QS(s)-L(s)} = \frac{1+PID\frac{1}{(1+sT_v)}}{1+PID\frac{1}{(1+sT_v)}\frac{1}{(1+sT_t)}} \quad (3.6)$$

โดยที่สมการของตัวควบคุม PID มีรูปแบบตามมาตรฐานการควบคุมแบบป้อนกลับ

$$PID = G\left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right) \quad (3.7)$$

โดยที่  $T_d = 0$   
สมการคุณลักษณะของกระบวนการควบคุมชั้นในคือ

$$1 + G\left(1 + \frac{1}{sT_i}\right)\frac{1}{(1+sT_v)}\frac{1}{(1+sT_t)} = 0 \quad (3.8)$$

ขณะที่  $T_v$  และ  $T_t$  คือค่าคงที่ทางเวลาของวาล์วควบคุม และค่าคงที่ทางเวลาสำหรับอุปกรณ์การวัด อัตราการไหลและการส่งสัญญาณ  $G$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  คือ อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมพี ค่าทางเวลาของอินทิกรัลของตัวควบคุมไอ และค่าทางเวลาของอนุพันธ์ของตัวควบคุมดี ตามลำดับ และเพื่อให้สอดคล้องกับสมการของตัวควบคุมกระบวนการ จากสมการ (3.7) ดำเนินการทางพีชคณิต

$$s^3 + s^2\left(\frac{1}{T_v} + \frac{1}{T_i}\right) + s\frac{1+G}{T_v+T_t} + \frac{G}{T_vT_tT_i} = 0 \quad (3.9)$$

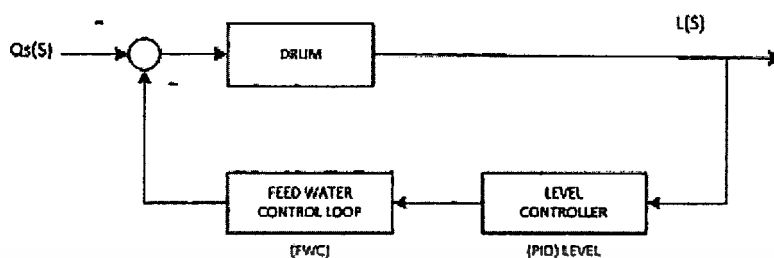
$$\omega = \frac{1}{a}\left(\frac{1}{T_v} + \frac{1}{T_i}\right) \quad (3.10)$$

$$G = b\omega^2T_vT_t - 1 \quad (3.11)$$

$$T_i = \frac{G}{\omega^3T_vT_t} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองการวิเคราะห์การควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองการวิเคราะห์การควบคุมระดับน้ำ

ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันส่งผ่านของกระบวนการควบคุมชั้นนอก แสดงให้เห็น ดังสมการด้านล่างและสอดคล้องกับตัวควบคุมกระบวนการชั้นนอก โดยจะต้องปรับแต่งให้มีผลตอบสนองที่ช้ากว่าตัวควบคุมชั้นใน เพื่อต้องการให้ตัวควบคุมชั้นในกำจัดหรือ ปรับแต่งกระบวนการการก่อนที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการชั้นนอก

$$\frac{L(s)}{Qs(s)} = \frac{1 + Drum}{1 + Drum \times FWC \times PID_{Level}} \quad (3.13)$$

ฟังก์ชันส่งผ่านสำหรับรูปการควบคุมระดับน้ำและรูปการควบคุมอัตราการไหลของน้ำป้อน

$$Drum = \frac{1}{sT(1+sT_d)} \quad (3.14)$$

โดยที่  $K_d T = T_d$

และ  $FWC = 1$

สมการคุณลักษณะของกระบวนการควบคุมชั้นนอกคือ

$$1 + G \left( \frac{1+sT_i}{sT_i} \right) \frac{1}{(1+sT_d)} \frac{1}{(sT)} = 0 \quad (3.15)$$

โดยที่  $T_d$  และ  $T$  คือ ค่าคงที่ทางเวลาของหม้อต้มความดันไอน้ำ กับค่าคงที่ของกระบวนการเนื่องด้วยตัวควบคุมชั้นในหรือตัวควบคุมอัตราการไหลถูกปรับแต่งให้ไวต่อการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นให้

$PID_{Flow} = 1$  และจัดรูปแบบให้สอดคล้องกับตัวควบคุมชั้นนอกจะได้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega = \frac{1}{aT_d} \quad (3.2.16)$$

$$G = b\omega^2 T T_d \quad (3.2.17)$$

$$T_i = \frac{G}{\omega^3 T T_d} \quad (3.2.18)$$

### 3.4 สรุป

ระบบการวัดและควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย การวัดระดับ การวัดอัตราการไหลของน้ำป้อน และการวัดอัตราการไหลออกของไอน้ำ รวมทั้งตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคด จะถูกนำไปใช้เป็นตัวควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า ส่วนการประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมดังกล่าว โปรแกรม DCS รุ่น SPPA-T3000 จะถูกนำมาใช้สำหรับเขียนโปรแกรมประมวลผลบนระบบคอมพิวเตอร์ โดยเชื่อมต่อกับระบบหม้อต้มความดันไอน้ำผ่านอุปกรณ์อินพุต เอาต์พุต เพื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล และดิจิตอลเป็นแอนะล็อก ซึ่งรายละเอียดต่างๆของระบบหม้อต้มความดันไอน้ำและผลการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 คำนำ

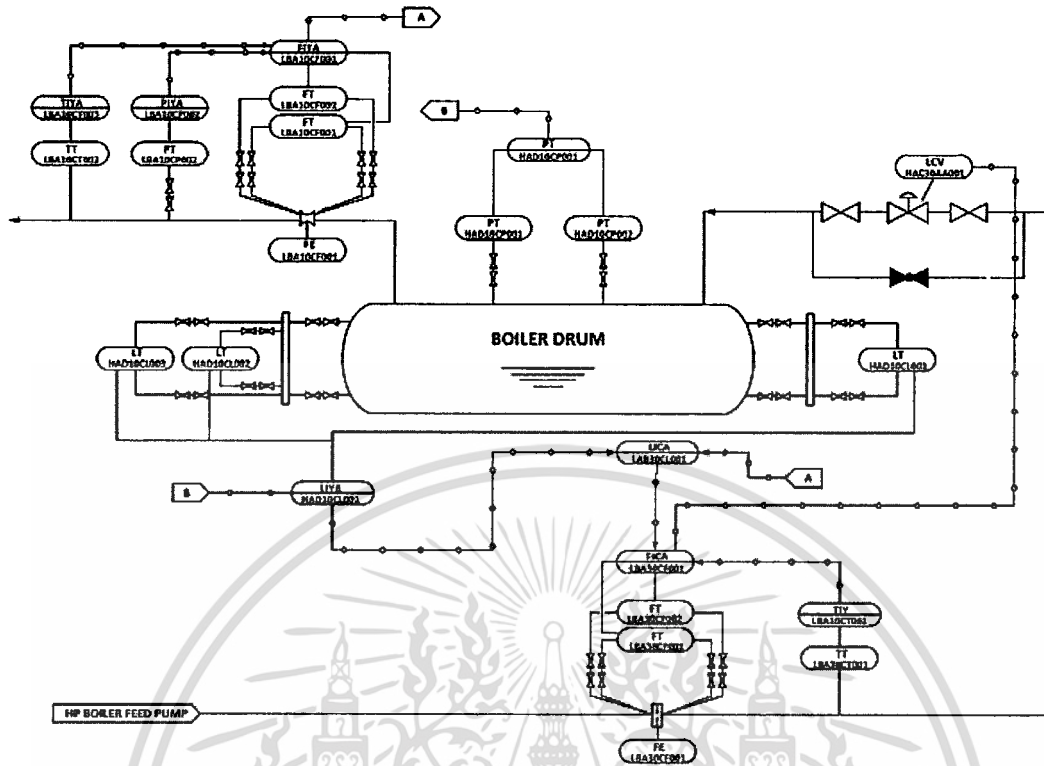
ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงโครงสร้างการวัดค่าตัวแปรต่างๆของกระบวนการวัดและควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ตัวควบคุมพีไอดีชนิดคาสแคดสามตัวแปร พร้อมทั้งการชดเชยความดันและอุณหภูมิในการวัดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ ตลอดจนการคำนวณหาค่าย่านการสอบเทียบเครื่องมือวัด เพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคดสามตัวแปรสำหรับควบคุมกระบวนการ การควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม เพื่อแก้ไขผลกระทบจากปรากฏการณ์ การยุบ และการขยายตัวของน้ำในหม้อต้ม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด

ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุม และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบกระจายส่วน เพื่อทดสอบความสามารถและสมรรถนะของระบบ ทั้งนี้จะเริ่มตั้งแต่การแนะนำระบบหรือกระบวนการจริงที่เป็นอุปกรณ์ต่างๆ พร้อมทั้งอธิบายโครงสร้างและการทำงาน จากนั้นจะกล่าวถึงวิธีการทดลอง โดยจะเริ่มจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ปรับแต่งในการทำงานของกระบวนการ เพื่อนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบคาสแคด ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม ควบคุมกระจายส่วน เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ จากนั้นทำการสรุปผลการทดสอบสมรรถนะของระบบว่ามีผลอย่างไร

#### 4.2 โครงสร้างของระบบควบคุม

โครงสร้างของระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ดังนี้

- (1) ระบบหม้อต้มความดันไอน้ำ
- (2) ระบบควบคุมกระจายส่วนของบริษัท SIEMENS รุ่น SPPT-3000



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ

ส่วนที่หนึ่ง ระบบหม้อต้มความดันไอน้ำ ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดดังที่ได้กล่าวไว้ ในบทที่ 3 โดยในบทนี้จะทำการอธิบายการทำงานของระบบควบคุมหม้อต้มความดันไอน้ำ ดังต่อไปนี้

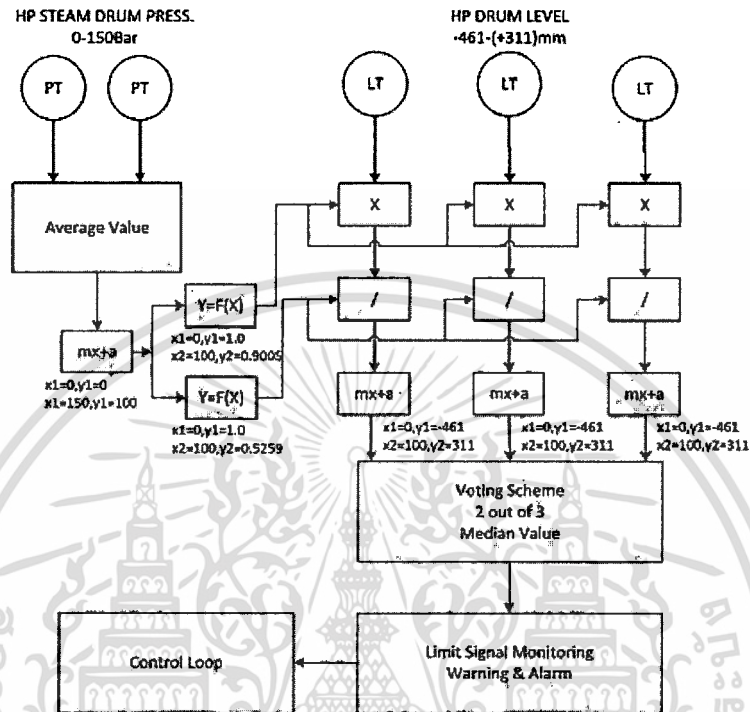
#### 4.2.1 ระบบควบคุมระดับน้ำ

วิธีการดังกล่าวประกอบด้วย (1) เซนเซอร์วัดความดันสำหรับวัดความดันภายในหม้อต้มความดันไอน้ำจำนวน 2 ตัว มีย่านการวัดความดันที่ 0–150 barg สัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตของเซนเซอร์มีขนาด 4–20mA. เชื่อมต่อกับตัวควบคุมผ่านโมดูลแอนะล็อกอินพุต (SM311-7KF02-0AB0) ดำเนินการโปรแกรมและปรับขานของสัญญาณความดัน 0–150 barg ให้สอดคล้องกับ 0–100% เพื่อใช้ในการคำนวณการชดเชยความหนาแน่นของไอน้ำ สำหรับการทำงานของฟังก์ชันช่วงการประมาณค่า  $F(x)$  ของการวัดระดับน้ำในระบบควบคุมกระจายส่วน ค่าความดันที่นำไปใช้งานคือค่าความดันเฉลี่ยของเซนเซอร์วัดความดันทั้งสอง (2) เซนเซอร์วัดความดันแตกต่างสำหรับวัดระดับน้ำในหม้อต้มจำนวน 3 ตัว มีย่านการวัดที่ -946 ถึง -311  $mmH_2O$  สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ทั้งสามจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันแตกต่างในหม้อต้มลดลง และเชื่อมต่อกับตัวควบคุมผ่านโมดูลแอนะล็อกอินพุต (SM311-7KF02-0AB0) มีขนาดสัญญาณเอาต์พุต 4–20mA. ดำเนินการโปรแกรมคำนวณระดับน้ำที่แท้จริงของหม้อต้มให้สอดคล้องกับรูปที่ 4.2 ผ่านระบบควบคุมกระจายส่วน ค่าระดับน้ำที่นำมาแสดงผลจะเป็นค่าที่มาจากคำนวณหาค่ามัธยฐานของเซนเซอร์วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นชื่อประโยชน์ขานคืนการค้า

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันแตกต่างกันทั้งสาม พร้อมดำเนินการโปรแกรมและสร้างสัญญาณเตือนเมื่อระดับน้ำของหม้อต้ม ไม่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดเพื่อป้องกันความเสียหาย ผ่านระบบควบคุมกระจายส่วน



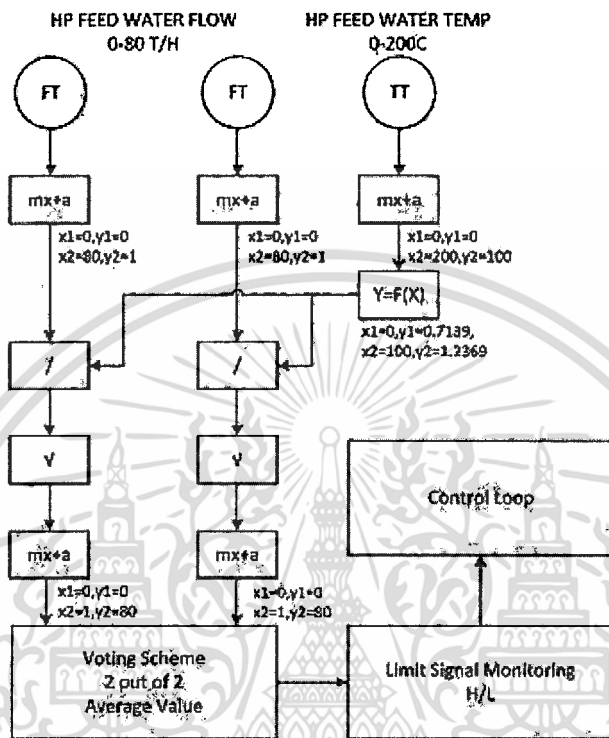
รูปที่ 4.2 ระบบควบคุมระดับน้ำ

#### 4.2.2 ระบบควบคุมน้ำป้อน

การวัดอัตราการไหลของน้ำป้อนจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของของไหลที่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความดันภายในกระบวนการ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิหรือความดันเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของของไหลเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ดังนั้นบ่อยครั้งในอุตสาหกรรมได้มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดการไหลแบบปริมาตรร่วมกับคอมพิวเตอร์คำนวณค่าการไหล (Flow Computer) หรือการคำนวณที่ติดตามแก้ไขค่าความหนาแน่นของของไหลให้ถูกต้องตลอดย่านการใช้งาน เพื่อปรับเทียบคำนวณอัตราการไหลโดยมวล ซึ่งวิธีการดังกล่าวประกอบด้วย (1) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ น้ำ มีย่านการวัดที่ 0-200°C (2) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดออร์ทิสร่วมกับอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง สัญญาณแอนาล็อกเอาต์พุตของเซนเซอร์ทั้งหมดมีขนาด 4-20mA เชื่อมต่อกับตัวควบคุมผ่านโมดูลชนิดเดียวกันกับการวัดระดับน้ำ ดำเนินการโปรแกรมปรับขนาดของสัญญาณตลอดจนโปรแกรมคำนวณการทำงานของฟังก์ชันช่วงการประมาณค่า  $F(x)$  สำหรับการชดเชยความหนาแน่นของน้ำให้สอดคล้องกับ รูปที่ 4.3 ผ่านระบบควบคุมกระจายส่วน ค่าอัตราการไหลที่นำมาแสดงผลจะเป็นค่าอัตราการไหลโดยมวลที่มาจากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปเผยแพร่บนสื่อสาธารณะ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดความดันแตกต่างกันทั้งสอง ค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมระดับน้ำจะใช้เป็นค่าเป้าหมายให้กับตัวควบคุมการไหล

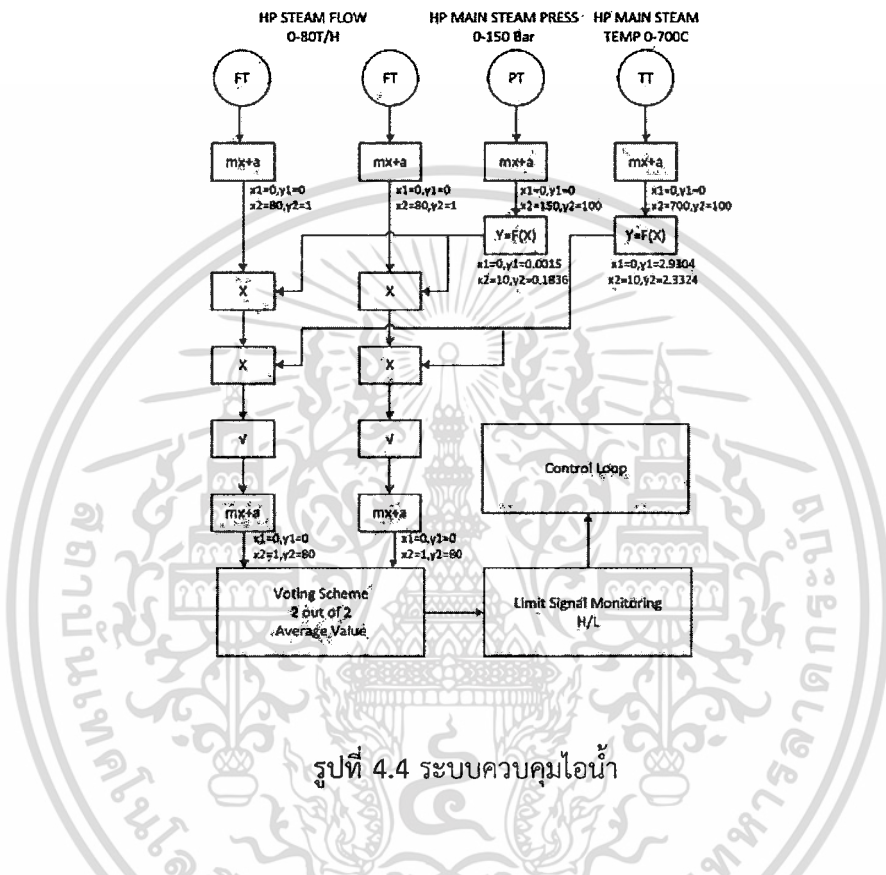


รูปที่ 4.3 ระบบควบคุมน้ำป้อน

#### 4.2.3 ระบบควบคุมไอน้ำ

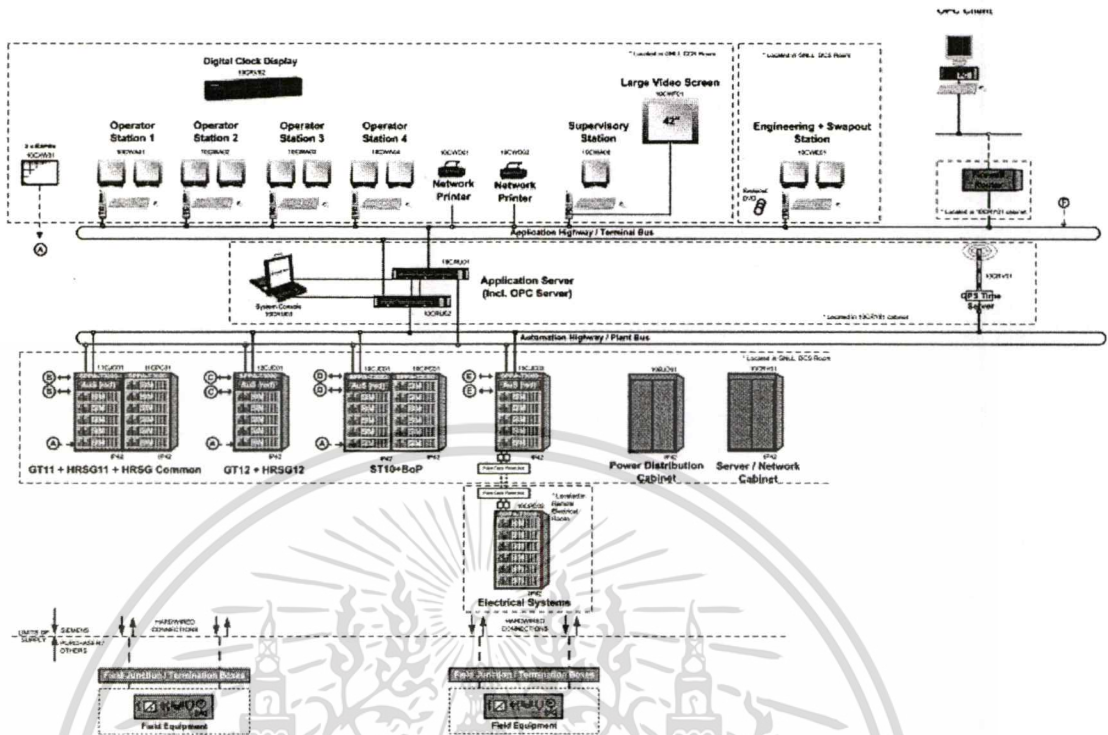
การวัดอัตราการไหลไอน้ำจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของของไหลที่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความดันภายในกระบวนการ เช่นเดียวกับกับการวัดอัตราน้ำป้อนของหม้อต้มความดันไอน้ำ และเนื่องด้วยไอน้ำเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการวัดความดันและอุณหภูมิเข้ามาใช้ในการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นไอน้ำหรือการคำนวณที่ติดตามแก้ไขค่าความหนาแน่นของของไหลให้ถูกต้องตลอดย่านการใช้งาน ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4 วิธีการดังกล่าวประกอบด้วย (1) เซนเซอร์วัดความดัน มีย่านการวัดที่ 0-150 barg (2) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ย่านการวัดคือ 0-700 °C (3) ใช้นอซเซิล (Nozzle) วัดอัตราการไหลไอน้ำ 1 ตัว ร่วมกับอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกันเพื่อแปลงความดันแตกต่างกันที่เกิดขึ้นที่เซนเซอร์ไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและอัตราการไหลจำนวน 2 ตัว มีย่านการวัดที่ 0-80 T/H (ต้นต่อชั่วโมง) สัญญาณแอนาล็อกเอาต์พุตของเซนเซอร์ทั้งสามมีขนาด 4-20 mA เชื่อมต่อกับตัวควบคุมผ่านโมดูลชนิดเดียวกันกับระบบควบคุมระดับน้ำ ดำเนินการปรับขนาดของสัญญาณและคำนวณค่าฟังก์ชันช่วงการประมาณค่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F(x) เพื่อชดเชยความหนาแน่นไอน้ำให้สอดคล้องกับรูปที่ 4.4 ในระบบควบคุมกระจายส่วน ค่าอัตราการไหลที่นำมาแสดงผลจะเป็นค่าอัตราการไหลโดยมวลที่มาจาก การคำนวณค่าเฉลี่ยของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลทั้งสอง ค่าสัญญาณเอาต์พุตหรือสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมการไหลจะส่งออกไปยังวาล์วควบคุม (Control Valve) เพื่อควบคุมการไหลให้เหมาะสมกับค่าเป้าหมาย



รูปที่ 4.4 ระบบควบคุมไอน้ำ

ส่วนที่สอง ระบบควบคุมกระจายส่วน ดังรูปที่ 4.5 ทำหน้าที่ประมวลผลของข้อมูล ด้วยโปรแกรม DCS-SPPA-T3000 รับส่งข้อมูลผ่านโมดูลแปลงสัญญาณแอนาล็อกอินพุตและแอนาล็อกเอาต์พุต รุ่น SM331-7KF02-0AB0 และ SM332-7KF02-0AB0 ตามลำดับ ตัวควบคุมสื่อสารกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตผ่านระบบโปรฟิบบัสดีพี (Profibus DP) แสดงค่าตัวแปรต่างๆผ่านระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งทำงานบนระบบ Windows Xp



รูปที่ 4.5 ระบบควบคุมกระจายส่วน

### 4.3 วิธีการทดลอง

การทดสอบการทำงานของระบบแยกออกได้ 4 ส่วนดังนี้

- (1) ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์การวัดและควบคุมระบบหม้อต้มความดันไอน้ำให้สอดคล้องกับรูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ
- (2) ดำเนินการโปรแกรมควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าให้สอดคล้องกับบทที่ 3 บนระบบควบคุมกระจายส่วน ซึ่งจะแสดงให้เห็นในภาคผนวก ข
- (3) ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอดีแบบคาสแคดให้สอดคล้องกับการควบคุมกระบวนการตามหลักการผลตอบสนองเชิงความถี่ของ Ziegler-Nichols โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชั้นในหรือตัวควบคุมการไหลจะใช้ตัวควบคุมพีโอเท่านั้น ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชั้นนอกหรือตัวควบคุมระดับน้ำจะใช้ตัวควบคุมพีโอดี ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งสองที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากการทดลอง

Controller	P	I	D
FIC	0.11	0.5	0.0
LIC	5.7	250.0	1.0

(4) ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรบนระบบควบคุมกระจายส่วน รุ่น SPPA-T3000 ของบริษัท SIEMENS

#### 4.4 ผลตอบสนองของระบบ

ผลตอบสนองของระบบ ได้ดำเนินการประเมินวิธีการควบคุมระดับน้ำด้วยการโปรแกรมระบบควบคุมแบบกระจายส่วนรุ่น SPPA-T3000 (SIEMENS POWER PLANT AUTOMATION – T3000) สำหรับทำการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า เพื่อทดสอบสมรรถนะในการทำงานของระบบ 3 กรณีคือ

กรณีที่ 1 อัตราการไหลไอน้ำคงที่ ระดับน้ำเป้าหมายเปลี่ยนแปลง

กรณีที่ 2 ระดับน้ำเป้าหมายคงที่ อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง

กรณีที่ 3 อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง ระดับน้ำเปลี่ยนแปลง

โดยออกแบบให้ตัวควบคุมที่ใช้ในกระบวนการมีการเชื่อมต่อบนคาสแคดสามตัวแปรและสอดคล้องกับบทที่ 3.หลังจากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบสรุปว่า ผลตอบสนองทุกกรณีนั้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างไรร

##### 4.4.1 ผลตอบสนองของระบบ กรณีอัตราการไหลออกไอน้ำคงที่ ระดับน้ำเป้าหมายเปลี่ยนแปลง

ทำการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองของระบบ สำหรับกรณีอัตราการไหลออกไอน้ำคงที่ และระดับน้ำเป้าหมายเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ โดยกำหนดให้อัตราการไหลออกไอน้ำคงที่เท่ากับ 60 ตันต่อชั่วโมง ป้อนระดับน้ำเป้าหมายที่ต้องการให้เปลี่ยนแปลงจากค่า -10 มิลลิเมตร ไปยังค่า + 10 มิลลิเมตร ที่เวลา 8.34 นาที จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.6 และป้อนระดับน้ำเป้าหมายที่ต้องการให้เปลี่ยนแปลงจากค่า+10 มิลลิเมตร ไปยัง -20 มิลลิเมตร ที่เวลา 8.39 นาที จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.7 ตามลำดับ ผลจากการทดลองทั้งสองจะเห็นว่า เมื่อระดับน้ำเป้าหมายเพิ่มขึ้น ตัวควบคุมน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำจะส่งสัญญาณควบคุมไปยังวาล์วควบคุมเพื่อเปิดเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใดขณะเดียวกันอัตราการไหลของน้ำป้อนก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน เพื่อที่จะควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับน้ำให้เท่ากับระดับน้ำเป้าหมาย ในที่สุดค่าระดับน้ำเป้าหมายและค่าตัวแปรระดับน้ำที่ต้องการควบคุมเข้าก็เข้าสู่ค่าที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และในทางกลับกันเมื่อระดับน้ำเป้าหมายลดลง ตัวควบคุมน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำจะส่งสัญญาณควบคุมไปยังวาล์วควบคุมเพื่อหลิ่ววาล์วควบคุมแบบทันทีทันใด ขณะเดียวกันอัตราการไหลของน้ำป้อนก็จะลดลงเช่นกัน เพื่อที่จะควบคุมระดับน้ำให้เท่ากับระดับน้ำเป้าหมาย ในที่สุดค่าระดับน้ำเป้าหมายและค่าตัวแปรระดับน้ำที่ต้องการควบคุมเข้าก็เข้าสู่ค่าที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ

#### 4.4.2 ผลตอบสนองของระบบ กรณีระดับน้ำเป้าหมายคงที่ อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง

ทำการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองของระบบ สำหรับกรณีอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลง โดยระดับน้ำเป้าหมายคงที่ จากความสัมพันธ์ของกระบวนการพบว่า ปริมาณการเพิ่มไหลของเครื่องกังหันก๊าซธรรมชาติ (Generator active power : MW) มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลไอน้ำในแบบทิศทางเดียวกัน ดังนั้น กำหนดให้ปริมาณการเพิ่มขึ้นของไหลเพิ่มขึ้นจาก 28 MW ไปยัง 35 MW พบว่าอัตราการไหลออกไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 50 ต้นต่อชั่วโมง ไปเป็น 58 ต้นต่อชั่วโมง และระดับน้ำเป้าหมายอยู่ที่  $\pm 0$  มิลลิเมตร ที่เวลา 14.10 นาที จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.8 พบว่าจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลไอน้ำนั้น เช่นกันตัวควบคุมอัตราการไหลน้ำป้อนส่งสัญญาณควบคุมไปยังวาล์วควบคุมเพื่อเปิดเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใด ขณะเดียวกันพบว่าอัตราการไหลน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 47 ต้นต่อชั่วโมง ไปเป็น 56 ต้นต่อชั่วโมง เพื่อชดเชยระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป ตลอดระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของไหลเครื่องกังหันธรรมชาติหรืออัตราการเพิ่มขึ้นของไอน้ำพบว่าค่าระดับน้ำที่ต้องการจะควบคุมสามารถคงอยู่ในค่าเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ

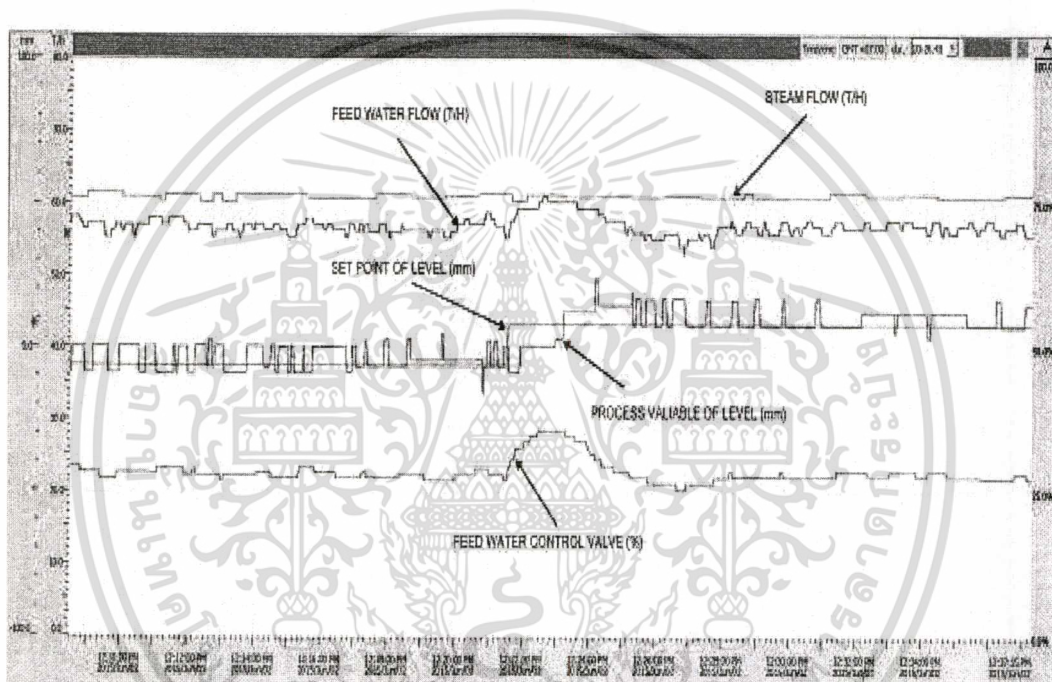
ในทางกลับกัน กำหนดให้ปริมาณการลดลงของไหลเครื่องกังหันไอน้ำจาก 35 MW ไปยัง 28 MW พบว่าอัตราการไหลออกไอน้ำลดลงจาก 58 ต้นต่อชั่วโมง ไปเป็น 50 ต้นต่อชั่วโมง และระดับน้ำเป้าหมายอยู่ที่  $\pm 0$  มิลลิเมตร ที่เวลา 13.52 นาที จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.9 พบว่า ขณะดำเนินการลดไหลของเครื่องกังหันไอน้ำลงจะส่งผลต่ออัตราการไหลออกไอน้ำนั้นลดลงจาก 58 ต้นต่อชั่วโมง ไปเป็น 50 ต้นต่อชั่วโมง อันเนื่องมาจากตัวควบคุมอัตราการไหลน้ำป้อนเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำจะส่งสัญญาณควบคุมไปยังวาล์วควบคุมเพื่อหลิ่ววาล์วควบคุมแบบทันทีทันใด เพื่อที่จะรักษาระดับให้เท่ากับค่าเป้าหมาย ตลอดระยะเวลาการลดลงของไหลเครื่องกังหันธรรมชาติหรืออัตราการไหลออกไอน้ำพบว่าค่าระดับน้ำที่ต้องการจะควบคุมสามารถคงอยู่ในค่าเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ

#### 4.4.3 ผลตอบสนองของระบบ กรณีอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง ระดับน้ำเปลี่ยนแปลง

ทำการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองของระบบ สำหรับกรณีอัตราการไหลออกไอน้ำเปลี่ยนแปลง และระดับน้ำควบคุมเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากการหยุดการใช้ไอน้ำทันทีทันใด จาก

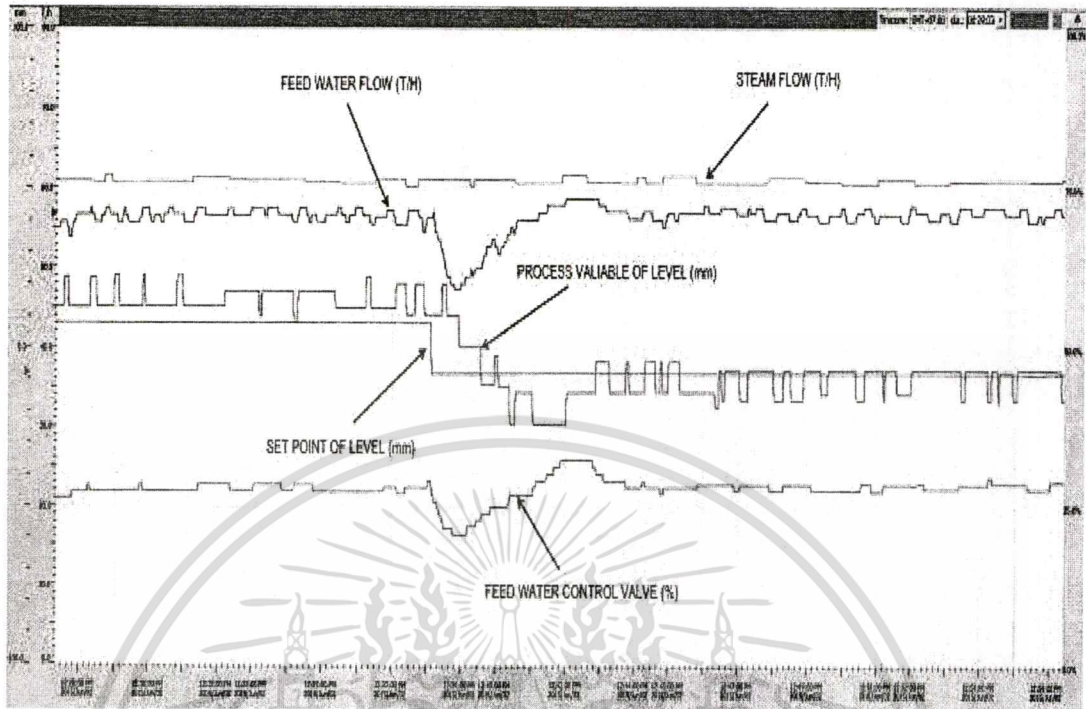
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์อันดีของการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่มีการแก้ไข หรือการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจำเป็นต้องลดกำลังการผลิตลงครึ่งหนึ่งอย่างทันทีทันใด กำหนดให้โหลดของเครื่องกังหันไอน้ำ ลดลงจาก 35 MW ไปยัง 17 MW อย่างทันทีทันใดภายใน 2 วินาที จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.10 จากการทดลองจะเห็นว่า ที่เวลา 2 วินาที ผลตอบสนองในสถานะชั่วคราว อัตราการไหลออกไอน้ำมีค่า ลดลงอย่างทันทีเนื่องมาจากการลดการใช้ไอน้ำทันทีทันใด ขณะเดียวกันที่เวลา 30 วินาที ค่าระดับน้ำ ควบคุมมีการยุบตัวหรือลดลงอย่างทันทีทันใดจาก  $\pm 0$  มิลลิเมตรไปยัง  $-30$  มิลลิเมตร และขยายตัว หรือเพิ่มขึ้นสูงสุดที่เวลา 4 นาที จาก  $-30$  มิลลิเมตร ไปยัง  $+20$  มิลลิเมตร หลังจากนั้นระดับน้ำก็กลับ เข้าสู่ค่าเป้าหมาย  $\pm 0$  มิลลิเมตร ที่เวลา 9.5 นาที โดยอัตราการไหลออกไอน้ำและอัตราการป้อนน้ำก็ เข้าสู่สภาวะคงตัวเช่นกัน

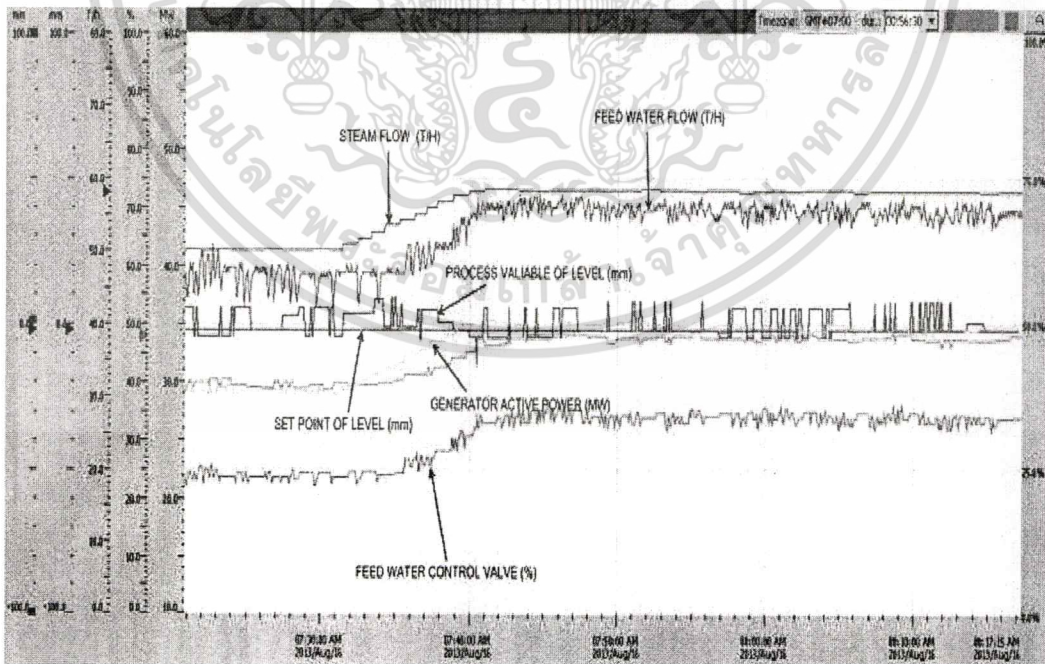


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของระบบ กรณีอัตราการไหลออกไอน้ำคงที่ และระดับน้ำเป้าหมาย เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

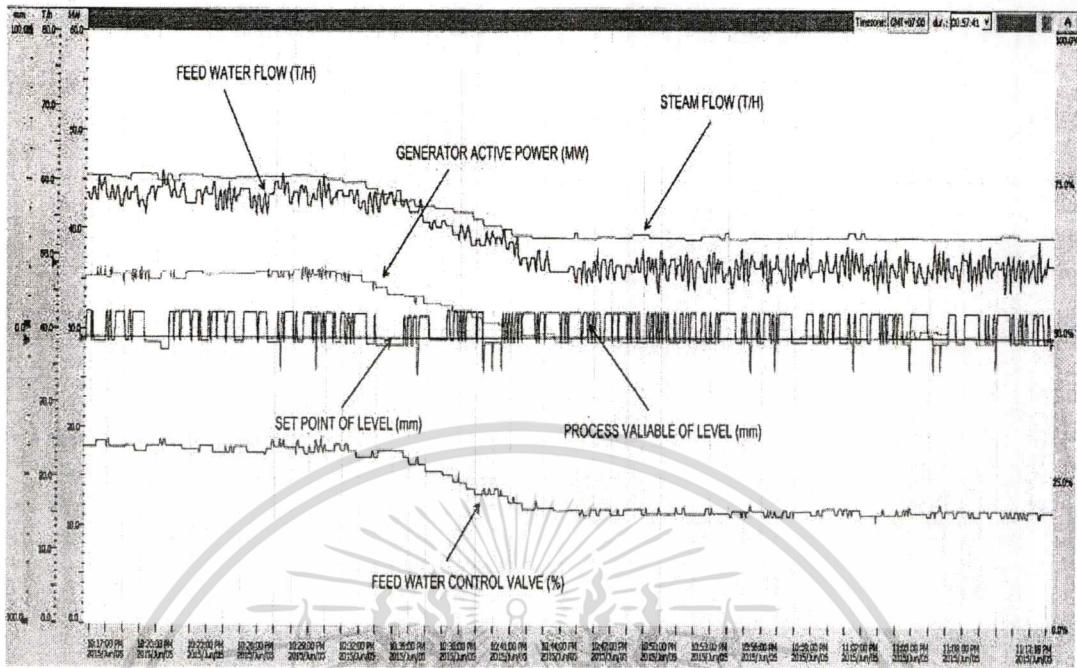


รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระบบ กรณีอัตราการไหลออกไอน้ำคงที่ และระดับน้ำเป้าหมายเปลี่ยนแปลงลดลง

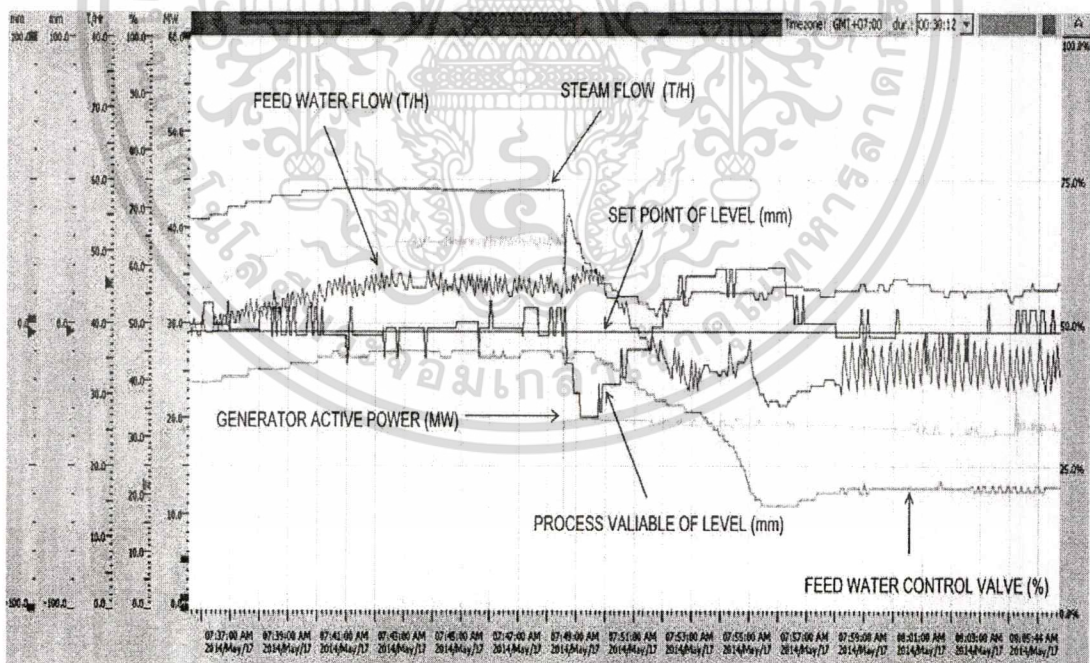


รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของระบบ กรณีระดับน้ำเป้าหมายคงที่ อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองของระบบ กรณีระดับน้ำเป้าหมายคงที่ อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงลดลง



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองของระบบ กรณีอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง ระดับน้ำเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 สรุปผลการทดลอง

กรณีที่ 1 อัตราการไหลคงที่และระดับน้ำเป้าหมายเปลี่ยนแปลง พบว่าที่สภาวะชั่วคราวเมื่อระดับน้ำเป้าหมายเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมการไหลน้ำป้อนจะตอบสนองอย่างรวดเร็วเพื่อปรับอัตราการป้อนน้ำให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายใหม่ โดยผลตอบสนองของระดับน้ำมีการเกิดการโอเวอร์ชูต และแกว่งเล็กน้อยก่อนที่จะเข้าสู่ค่ากำหนด ส่วนผลตอบสนองในสภาวะคงตัวพบว่ามีความแม่นยำมากพอสำหรับการควบคุมระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ

กรณีที่ 2 ระดับน้ำเป้าหมายคงที่ และอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง พบว่าในระหว่างการเพิ่มขึ้นหรือลดปริมาณการใช้ไอน้ำนั้น ตัวควบคุมอัตราการไหลน้ำป้อนสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลออกไอน้ำได้อย่างทันทีทันใด ก่อนที่จะส่งผลกระทบต่อระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งผลตอบสนองของระบบพบว่าระดับน้ำควบคุมสามารถควบคุมให้อยู่ในค่าเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ ทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วคราว

กรณีที่ 3 อัตราการไหลออกไอน้ำเปลี่ยนแปลง และระดับน้ำเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากการหยุดการใช้ปริมาณไอน้ำอย่างทันทีทันใด พบว่า อัตราการไหลออกไอน้ำลดลงอย่างทันทีทันใด ขณะเดียวกัน ตัวควบคุมอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มก็ตอบสนองต่อการลดปริมาณการใช้ไอน้ำด้วยการหลีกาล์วควบคุมลงเพื่อรักษาระดับน้ำเป้าหมาย แต่เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นแบบเฉียบพลัน ทำให้เกิดปรากฏการยุบตัวและขยายตัวของน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำ จึงทำให้เกิดสภาวะโอเวอร์ชูต และการแกว่งของระดับน้ำควบคุมขึ้นในสภาวะชั่วคราว แต่เมื่อเวลาผ่านไปประระดับน้ำควบคุมก็สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ

## สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปร ในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบกระจายส่วน โดยกำหนดให้ส่วนป้อนไปข้างหน้าคือ อัตราการไหล และส่วนป้อนกลับคือ ระดับของน้ำ ค่าตัวแปรดังกล่าวประกอบด้วย อัตราการไหลออกของไอน้ำ อัตราการไหลเข้าของน้ำ และระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ใช้วิธีการของซิกเลอร์-นิโคลส์สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ ซึ่งทำงานบนระบบควบคุมแบบกระจายส่วน พร้อมทั้งออกแบบ และเลือกใช้อุปกรณ์วัดต่างๆ ให้เหมาะสม ตลอดจนคำนึงถึงความซับซ้อนของอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ และความคงทน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วิธีการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบกระจายส่วน สามารถควบคุมระดับน้ำเป้าหมายให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และสามารถจัดการกับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบชั่วขณะได้ดี อย่างเช่น กรณีการยุบตัวและการขยายตัวของน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำ จากสาเหตุของความผันผวนของความดันภายในหม้อต้ม ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงสำหรับการควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำของโรงไฟฟ้า

### 5.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

5.2.1 การวัดระดับน้ำของหม้อต้มความดันไอน้ำซึ่งภายในหม้อต้มความดันไอน้ำประกอบไปด้วยน้ำและไอน้ำที่สภาวะอิ่มตัวและมีการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มตลอดเวลาทำให้เกิดการกระเพื่อมของน้ำภายในหม้อต้มซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของระดับน้ำที่ผิดพลาด วิธีแก้ไขปัญหาคือเพิ่มอุปกรณ์วัดระดับน้ำติดทั้งสองฝั่งของหม้อต้ม และโปรแกรมเลือกใช้ค่ามัธยฐานของระดับน้ำทั้งสามเพื่อใช้ในการควบคุม

5.2.2 ปรากฏการณ์ การยุบ และ ขยายตัวของน้ำภายในหม้อต้มความดันไอน้ำจะส่งผลกระทบต่อการทำงานที่ผิดพลาดและทำให้ระบบป้องกันหม้อต้มความดันไอน้ำทำงานและเป็นปัญหาหลักที่ทำให้กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าต้องหยุดลงอย่างทันทีทันใด ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ถ้าสามารถคำนวณระดับน้ำเป้าหมายที่ถูกต้องเหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนระดับน้ำเป้าหมายที่ต้องการควบคุมในระหว่างช่วงการเดินเครื่องปกติให้ต่ำกว่าระดับถึงกลางของหม้อต้ม

ความดันไอน้ำเล็กน้อย ซึ่งค่าที่เหมาะสมนั้นได้จากการทดสอบการทำงานของระบบ (Function and commissioning Test)

5.2.3 ในกระบวนการเดินเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีกระบวนการควบคุมต่างๆมากมาย ซึ่งมีความสัมพันธ์และส่งผลกระทบต่อซึ่งกันและกัน ดังนั้นในการปรับจูนตัวควบคุมของกระบวนการ จำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตโดยรวมและจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ของผู้ปรับจูนค่อนข้างสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้ทำการวิจัยได้ดำเนินการทดลองภายใต้การควบคุมดูแลและคำสั่งแนะของ Commissioning Team

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบคาสแคดสามตัวแปรในหม้อต้มความดันไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบกระจายส่วน เพื่อควบคุมระดับน้ำในหม้อต้มความดันไอน้ำให้คงที่ ซึ่งระบบป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้ม (Feed Water System) จะใช้ปั๊มความดันสูง (Boiler Feed Water Pump) ซึ่งทำงานเต็มกำลังหรือเต็มประสิทธิภาพตลอดเวลา ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานที่มากเกินไป ดังนั้นแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคตคือ ใช้ตัวควบคุมชนิดปรับความถี่ได้ (Variable Frequency Drive) ควบคุมความเร็วปั๊มความดันสูงหรือมอเตอร์ ซึ่งทำให้ระบบป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มความดันไอน้ำนั้นมีเสถียรภาพมากขึ้นและยังช่วยทั้งลดพลังงานหรือกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์และลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Huang, Y., Li, N., Shi, Y. and Yi, Y. **Genetic Adaptive Control for Drum Level of a Power Plant. Boiler.** IMACS Multiconference on Computational Engineering in System Applications (CESA), Beijing, China, 2006, pp.1965-1968.
- [2] 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
- [3] Krishnaswany, K and PonniBala, M. **Power Plant Instrumentation**, PHI Learning Private Limited, 2011, pp. 28-33.
- [4] Begum1, K.G., Mercy, D., Vedi, H.K. and Ramathilagam, M. **An Intelligent Model Based Level Control of Boiler Drum**, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3(1), 2013, 516-521.
- [5] Bequette, B.W., **Process, Control Modeling Design & Simulation**, Pearson Education Inc, 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก**  
**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

1. P.Thangmanee and S. Chitwong, "Implementing Cascade Three Element Drum Boiler Level Control for a Power Plant with Distributed Control System,"The 4<sup>th</sup> TIChE International Conference 2014, "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living," Chiang Mai, Thailand, December 18-19, 2014



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**School of  
Chemical Engineering**

King Mongkut's  
Institute of Technology  
Ladkrabang



**TIChE**

The Thai Institute of  
Chemical Engineering  
and Applied Chemistry



**EIT**

The Engineering  
Institute of Thailand  
Under H.M. The King's  
Patronage

**The 4<sup>th</sup> TIChE  
International Conference  
2014**

**"CHANGES:  
Cleaner Energy,  
Leaner Processes,  
Better Living"**

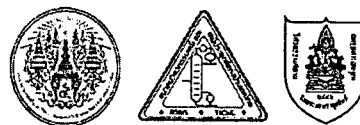
<b>DATE:</b> December 18-19, 2014	<b>VENUE:</b> Furama Hotel Chiangmai, Thailand
---	--

**SPONSORS:**



**SCG  
CHEMICALS**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# Implementing Cascade Three Element Drum Boiler Level Control for a Power Plant with Distributed Control System

Panupon Thangmanee<sup>1</sup>, and SakreyaChitwong<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

\*Corresponding author: E-mail kcsakrey@kmitl.ac.th

**Abstract**—This paper proposes implementation using a cascade three-element boiler drum level instrument and control with PID controllers for a combined cycle power plant. Feedforward part is flow rate and feedback part is water level. Such variables consist of steam outlet flow rate, water inlet flow rate and water level in boiler drum. Ziegler-Nichols is used for calculating parameters of the boiler drum level control operating on a distributed control system (DCS). Also a field instruments are designed and selected appropriately. A redundancy of a field instruments takes into account to accuracy, reliability, and robustness. The results show that the proposed system can efficiently control the water level because one can solve process instantaneously changing, for example, shrinkage and expansion of water in the boiler drum causing variation of pressure. The mentioned system can actually implement in the power plant for boiler drum level control.

**Keywords:** Boiler drum level, Cascade three-element control, Feed water flow, Heat recovery steam generator (HRSG), PID control, Steam flow.

## I. INTRODUCTION

A boiler drum level control for a combined cycle power plant is the heart of electricity generating process. Normally, a boiler drum and steam turbine control system must be controlled to correspond with a water quantity in boiler drum. A water level must be controlled in a designed range only. If one is higher, turbine will consume steam with moisture principally causing to damage part of turbine. Also, if the water level is low, pipe wall feeding water to drum will then be affected and may be cracked because of over-heat [1]. The mentioned problems will effect of electricity generating process, that is, stopped plant, higher maintenance cost and injury or death. For problem with higher and lower water level in drum, boiler drum control

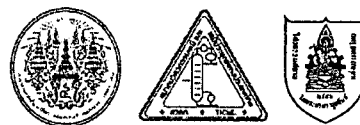
system having protection system is implemented to protect equipment by which burner and water feeding system will be shut-down, respectively.

This article proposes implementation using a cascade three element boiler drum level instrument and control for a combined cycle power plant consisting of water level instrument and control, water feeding control to drum with control valve, control system, and alarm. All control system is developed and implemented on distributed control system, namely SPPA-T3000 from SIEMENS, calculating water level in drum for generating signal to protect boiler drum in case of signal as low, low low, high, high high.

## II. STRUCTURE OF INSTRUMENTATION AND CONTROL

### 1. Instrumentation

Water level measurement in boiler drum for power plant is different from one for general case because of being high pressure boiler. Differential pressure instrument for water level measurement is used by taking into account of physical liquid property in drum because liquids in boiler drum consisting of two kinds are water and saturated steam by which not only density of them is different but also vary with pressure. For water level measurement in boiler drum, pressure must then be measured to compensate a varied steam density in order to increase accuracy. Condensate pot device is installed above water level at low pressure side tap point of drum. Water level in condensate pot is fully maintained always. If water level in pressure sensor pipe changes, accuracy for measuring water level in boiler drum is affected [2]. Figure 1 shows method for installing correctly differential pressure water level instrument. Value of low side differential pressure comes from pressure in drum plus one of liquid in pressure pipe at ambient temperature having boundary between pressure measuring points in boiler drum. Value of high side differential pressure comes from pressure in drum plus one of saturated steam



having boundary from high side pressure measuring point until water level surface of drum. Water pressure in pipe receives pressure at saturated temperature having length from water surface in drum until low side pressure measuring point. Equations for differential pressure and water level in drum show in equation (1) and (2), respectively.

$$\Delta P = gh(\rho_w - \rho_s) - gH(\rho_a - \rho_s) \quad (1)$$

$$h = \frac{\Delta P + gH(\rho_a - \rho_s)}{g(\rho_w - \rho_s)} \quad (2)$$

where

H is length between sensor points (mm),

V.L is length of water level displaying monitor of drum (mm),

h is actual water level of drum (mm),

$\rho_a$  is water density in condensate pot ( $\text{kg/m}^3$ ),

$\rho_w$  is water density in boiler drum ( $\text{kg/m}^3$ ),

$\rho_s$  is saturated steam density in boiler drum ( $\text{kg/m}^3$ ).

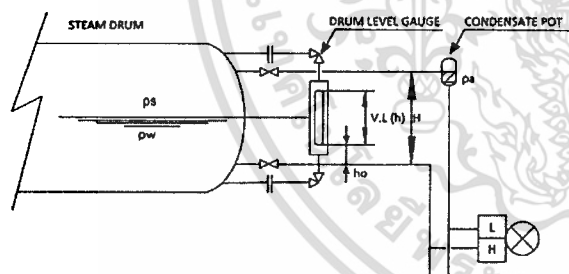


Fig. 1. Water level Measurement in boiler drum.

In addition to installation with engineering principle, in order to measure water level correctly, accurately and efficiently for instrumentation and process control (C&I), this article shows design, selection and implementation of instrument in a cascade three element level control as following.

#### Water Level Measurement

For water level measurement in boiler drum, pressure must be measured to compensate a varied density because of the different density between water and steam. Figure 2 shows diagram for water level measurement. The mentioned method consists of (1) two pressure sensors for measuring pressure in boiler drum ranging of 0-150 Bars corresponding with 4-20 mA connecting to analog input module, SM311-7KF02-0AB0 by which the current output signal is

converted corresponding with 0-100% for calculating compensation of steam density for function F(x) measuring water level in distributed control system and the operated pressure value is averaged pressure of two pressure sensors; (2) three differential pressure sensors for measuring water level in drum ranging of -946 to -311 mmH<sub>2</sub>O corresponding with 4-20 mA connecting to analog input module, SM311-7KF02-0AB0 by which current output signal of sensors is increased when differential pressure in drum is decreased. The operated water level value is median value with 2 out of 3 voting scheme of three differential pressure sensors and compensated with the operated pressure value. Alarm signals are generated when water level in drum is out of limited boundary to prevent damage via distributed control system. Figure 2 shows pressure compensated water level measurement.

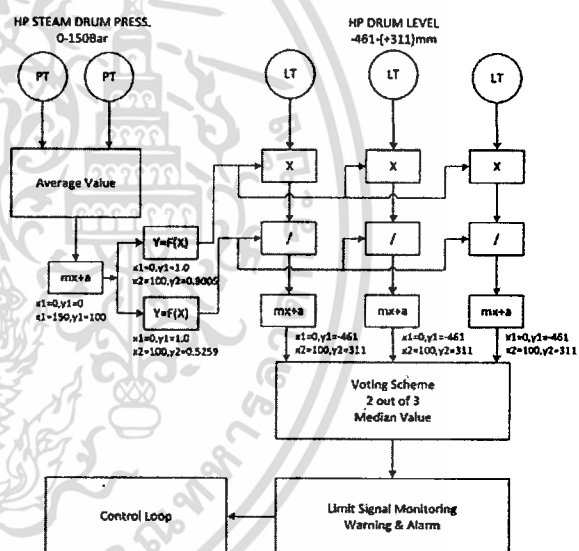
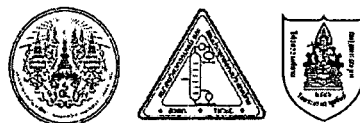


Fig. 2. Water level measurement.

#### Water Flowrate Measurement

High pressure boiler feed pump with a constant speed is used to feed water into boiler drum. Also water pressure is still constant. Temperature measurement is then only used for compensation of varied water density to measure water flow rate correctly and accurately. Orifice plate and differential pressure sensor with transmitter is used to measure water flow rate. The mentioned flow rate method consists of (1) temperature sensor ranging 0-200 °C, (2) two orifice plates with differential pressure sensor with transmitter, generating analog signal corresponding with 4-20 mA connecting to analog module as water level measurement. Function F(x) is used for computing temperature value to compensate water density via distributed control system. Figure 3 shows diagram of measuring water flow rate. Operated value of water flow rate is average value with 2 out of 2 voting scheme of two differential pressure sensors.

และการศึกษา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### III. WATER LEVEL CONTROL IN BOILER DRUM

In electricity generation process, a water level control in boiler drum within desired range is main function of a water boiling process to generate steam. A cascade three element boiler drum level control is a popular method to control water level of boiler drum for a combined cycle power plant because one can solve process instantaneously changing for example shrinkage and expansion of water in boiler drum causing variation of pressure [3]. For a cascade three element control, let feed forward part be water flow rate into drum and feedback part be water level in drum and forward part be steam flow rate. All variables of process are programmed in distributed control system. A manipulated value from controller corresponding with 4-20 mA, a cascade PID controller, is designed for control valve to control water into drum. The current output signal is driven from analog output module, SM332-5HF00-0AB0. Procedure to control water level is first measuring water level as process variable to compare with a desired value or set point. Error value is then generated for water level controller to modify a manipulated value as output signal or control signal. The manipulated value from water level controller is used as a desired value for controller to control water feeding into drum together with measuring steam flow rate by which water feeding controller tries to adjust water flow rate as actuator with control valve appropriate with steam outlet to maintain water level constantly. The suddenly changing steam flow rate affects to water feeding controller to adjust water feeding rate into drum and maintain constant water level based on that inlet flow rate is outlet flow rate.

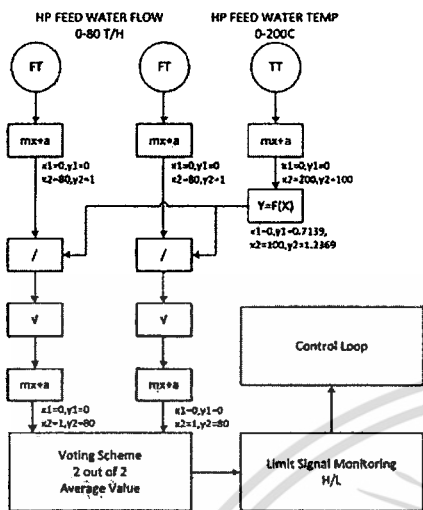


Fig. 3. Water flow rate measurement.

#### Steam Flowrate Measurement

Steam generated from boiler drum into turbine is dry steam. For steam flow rate measurement shown in Figure 4, pressure and temperature must be measured to compensate a varied steam density. The mentioned method consists of (1) pressure sensor ranging 0-150 Bars (2) temperature sensor ranging 0-700 °C (3) nozzle of one to measure steam flow rate together with two differential pressure sensors with transmitter ranging 0-80 T/H all generating analog signal corresponding with 4-20 mA connecting to analog module as water level measurement. Function  $F(x)$  is used for computing pressure and temperature value to compensate steam density via distributed control system. Figure 4 shows diagram of measuring steam flow rate. Operated value of steam flow rate is average value with 2 out of 2 voting scheme of two differential pressure sensors.

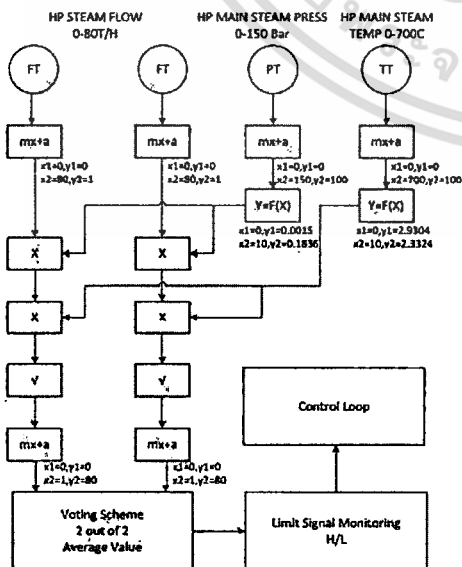


Fig. 4. Steam flow rate measurement.

#### 1. A Cascade PID Controller

The widely used popular structure of controller for controlling a process is a proportional-integral-derivative controller because of simple understanding, stability, and robustness. The input of PID controller is an error value calculated from differential values between a process variable and a desired variable. The error value should be reduced as low as possible by controller to adjust a process variable.

Applying PID control may be used as one or two figures depending on significant process [4]. In this article, PID controller is implemented together with PI controller to control a process because of avoiding characteristic of D parameter which is sensitive to noise. Process may oscillate until a desired variable cannot control.

To improve efficiency of water level control in boiler drum for a combined cycle power plant, a cascade three element boiler drum level control shown in Figure 5 consists of two controller. The first controller is the outer controller  $C_1(s)$ . The second controller is the inner controller  $C_2(s)$ . Structure relation of the inner controller is fast respond to variation in order to attenuate noise before it is affected to an outer controller. An outer controller is adjusted to slow respond to variation [5]. To maintain constantly water level and solve problem of shrinkage and expansion of water in boiler drum when load is rapidly variable. Inputs being process variables are water feeding rate to boiler drum  $H_2(s)$  and steam flow rate  $H_1(s)$ . Output variable is the water level in boiler drum  $H_1(s)$ . When position of flow rate control valve is varied  $G_2(s)$ , water flow rate into boiler drum is

variable; water flow rate controller can be detected and corrected suddenly.

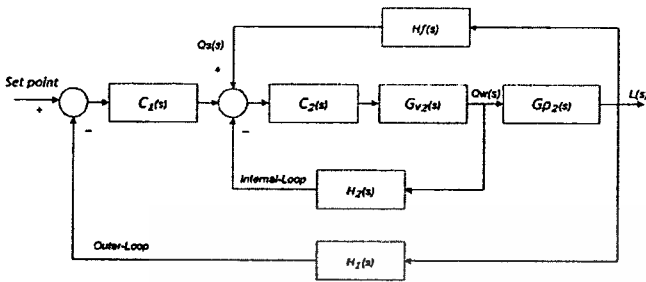


Fig. 5. Structure of a cascade three element boiler drum level control.

To correspond with [4], relation of the inner controller transfer function is shown in equations below. Structure of the inner process control is adjusted to respond rapidly to variation or noise [5].

$$\frac{Q_w(s)}{Q_s(s) - L(s)} = \frac{1 + C_2(s)G_v(s)}{1 + C_2(s)G_v(s)H_2(s)} \quad (3)$$

where equation of controller of both two forms is a feedback control equation as standard form.

$$C_1(s) = G \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (4)$$

$$C_2(s) = G \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (5)$$

Characteristic equation of inner control process (PI) is

$$1 + G \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) \cdot \frac{1}{(1+sT_v)} \cdot \frac{1}{(1+sT_t)} = 0 \quad (6)$$

Where  $T_v$  and  $T_t$  are time constant of valve and flow rate instrument, respectively.  $G$ ,  $T_i$ , and  $T_d$  are proportional gain of P control, integrating time constant of I control and derivative time constant of D control, respectively.

To correspond with characteristic of process controller, new equation from equation 4 is as following

$$s^3 + s^2 \left( \frac{1}{T_v} + \frac{1}{T_t} \right) + s \frac{1+G}{T_v+T_t} + \frac{G}{T_vT_tT_i} = 0 \quad (7)$$

$$\omega = \frac{1}{a} \left( \frac{1}{T_v} + \frac{1}{T_t} \right) \quad (8)$$

$$G = b\omega^2 T_v T_t - 1 \quad (9)$$

$$T_i = \frac{G}{\omega^3 T_v T_t} \quad (10)$$

Relation of transfer function of outer control process shows in equation (11) corresponding with equation (4). Outer process controller is adjusted to respond lower than inner process controller in order to that inner process controller rejects or adjusts process before it is effect to outer process.

$$\frac{L(s)}{Q_s(s)} = \frac{1 + G_{p2}(s)}{1 + G_{p2}(s)C_2(s)C_1(s)} \quad (11)$$

Characteristic equation of outer control process is

$$1 + G \left( \frac{1+sT_i}{sT_i} \right) \frac{1}{(1+sT_d)} \cdot \frac{1}{(sT)} = 0 \quad (12)$$

Where  $T_d$  and  $T$  are time constant of boiler drum and process, respectively. Because inner controller or flow rate controller is adjusted to sensitive for changing, then let  $C_2(s) = 1$  and reforms to corresponding with outer controller as follows

$$\omega = \frac{1}{aT_d} \quad (13)$$

$$G = b\omega^2 T T_d \quad (14)$$

$$T_i = \frac{G}{\omega^3 T T_d} \quad (15)$$

## 2. Tuning Parameter with Ziegler-Nichols

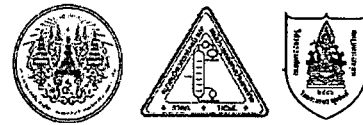
Method for selecting parameters of controller to get the highest performance is tuning parameter of controller. The popular used method is Ziegler-Nichols introducing principle for tuning a PID controller based on basic characteristic of frequency respond from such method. P control is used to control process, increasing gain of P control until system critically oscillates. Gain from minimum criteria stability is a final gain  $K_u$ . A final period  $T_u$  is a period of oscillation at such gain. Parameters  $K_p$ ,  $T_i$ , and  $T_d$  of PID controller show in Table 1.

Table 1 Ziegler-Nichols parameter

PID	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	0.5 $K_u$		
PI	0.45 $K_u$	1.2 $K_p/T_u$	
PID	0.6 $K_u$	2 $K_p/T_u$	$K_p T_u/8$

## IV. EXPERIMENT AND RESULTS

To evaluate result of experiment, a program of distributed control system SPPA-T3000 is developed to control water level of boiler drum for a combined cycle power plant. PI controller is designed with a cascade three element. Controller structure is shown in Figure 5 corresponding with the controller equation (4), (5) together with tuning method as Ziegler-Nichols to improve performance of controller. Figures 6 and 7 show experimental results seeing that capability of both controller can together control a target of process efficiently. When water level target changes, water level controller  $C_1(s)$  change a control signal to the flow rate controller  $C_2(s)$  in order to adjust the water flow rate into boiler drum to corresponding with target value immediately.



V. CONCLUSIONS

For power plant, water level control of boiler drum is very important for production process and safety. This article shows a cascade three-element boiler drum level instrument and control with PID controllers together with tuning parameter by programming on distributed control system SPPA-T3000. By experiment, results show performance of control system at that water level can be controlled in a desired range efficiently. Also a suddenly variation of process can be rejected.

References

- [1] Huang, Y., Li, N., Shi, Y. and Yi, Y. Genetic Adaptive Control for Drum Level of a Power Plant Boiler. IMACS Multiconference on Computational Engineering in System Applications (CESA), Beijing, China, 2006, pp.1965-1968.
- [2] 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.
- [3] Krishnaswany, K and PonniBala, M. Power Plant Instrumentation, PHI Learning Private Limited, 2011, pp. 28-33.
- [4] Begum1, K.G., Mercy, D., Vedi, H.K. and Ramathilagam, M. An Intelligent Model Based Level Control of Boiler Drum, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3(1), 2013, 516-521.
- [5] Bequette, B.W., Process Control Modeling Design & Simulation, Pearson Education Inc 2003.

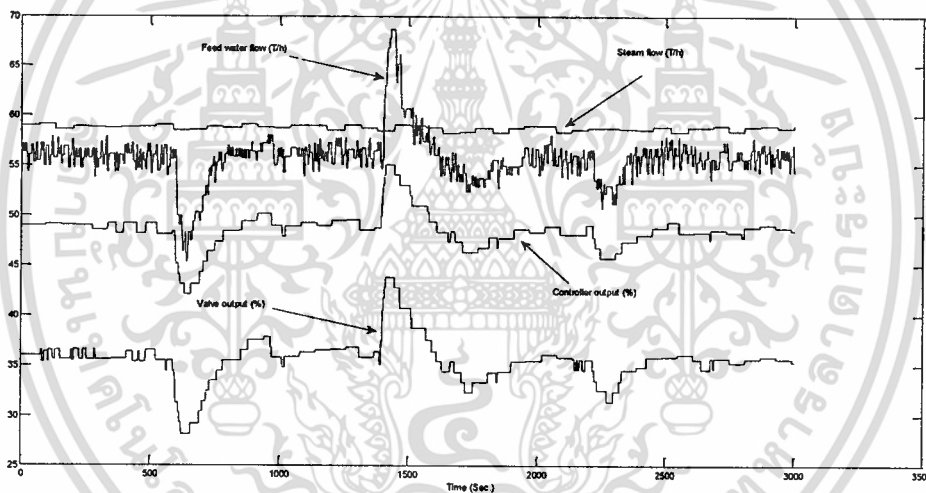


Fig. 6 Inner controller respond.

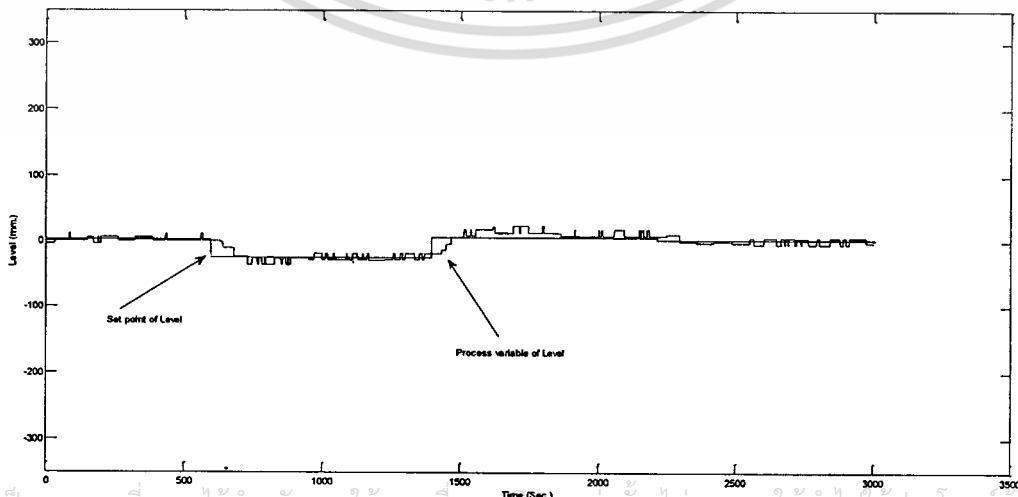


Fig. 7 Outer controller respond.

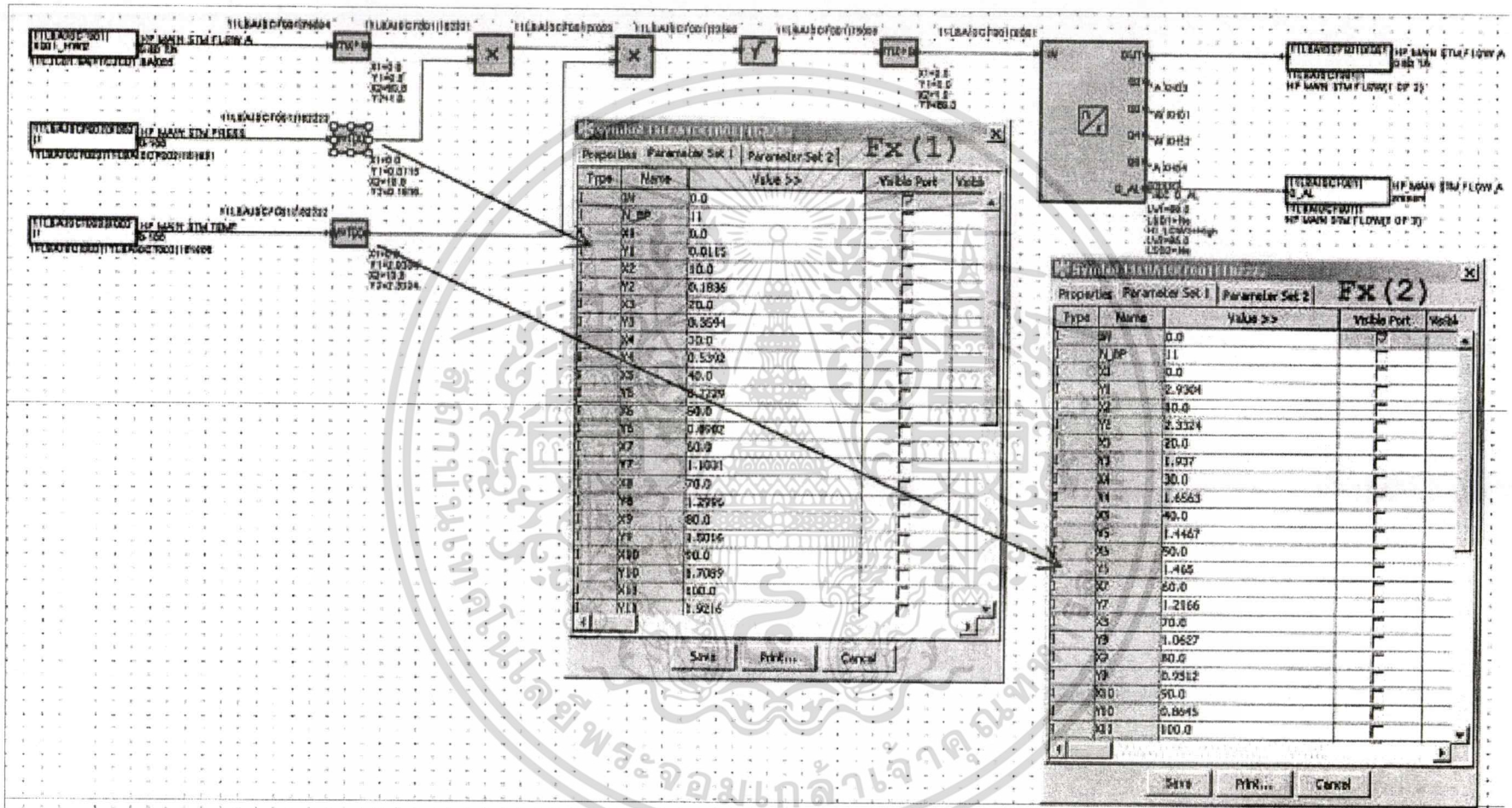
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการรื้อศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
โปรแกรมระบบควบคุมกระจายส่วนรุ่ม SPPA-T3000

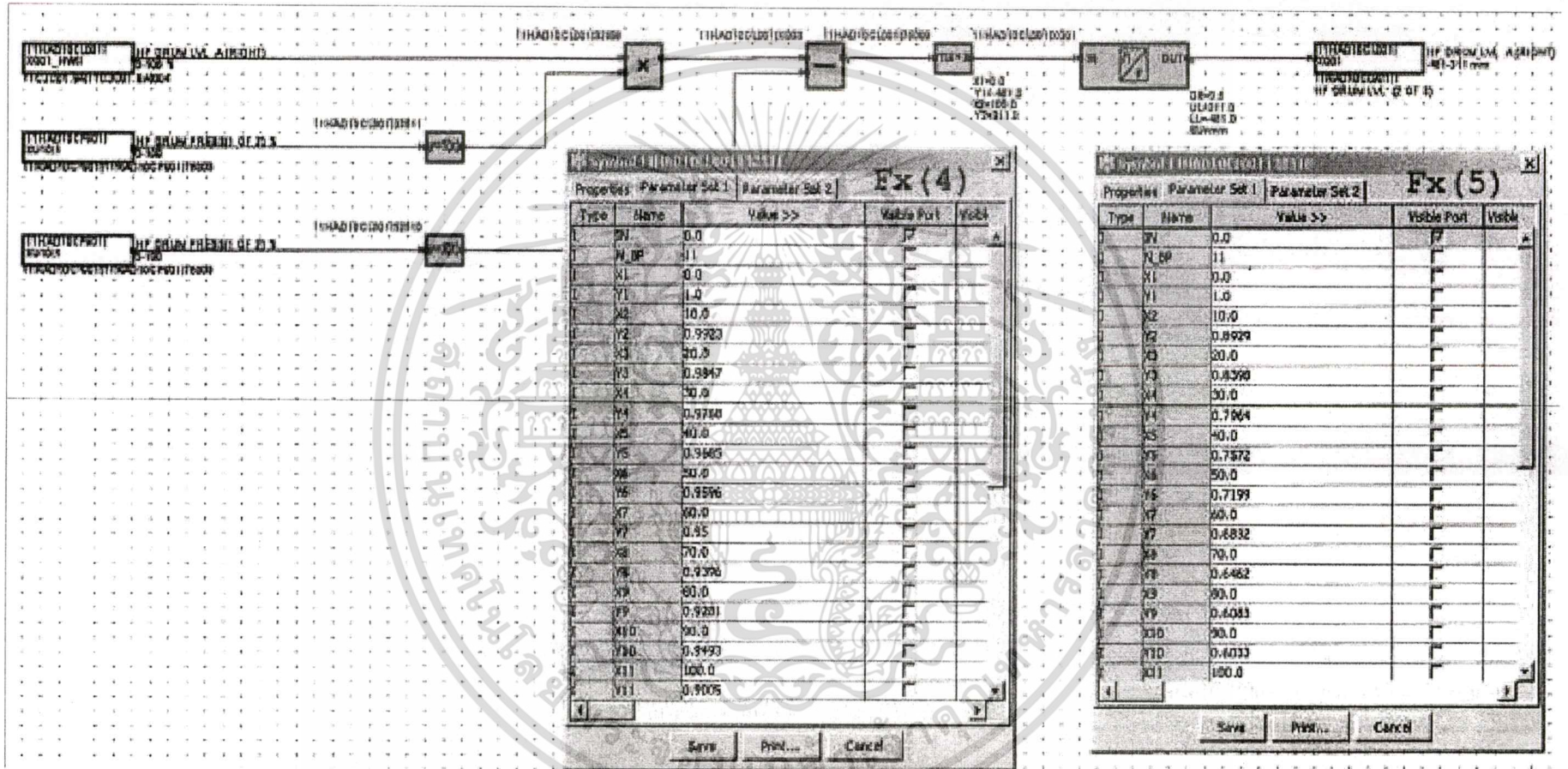


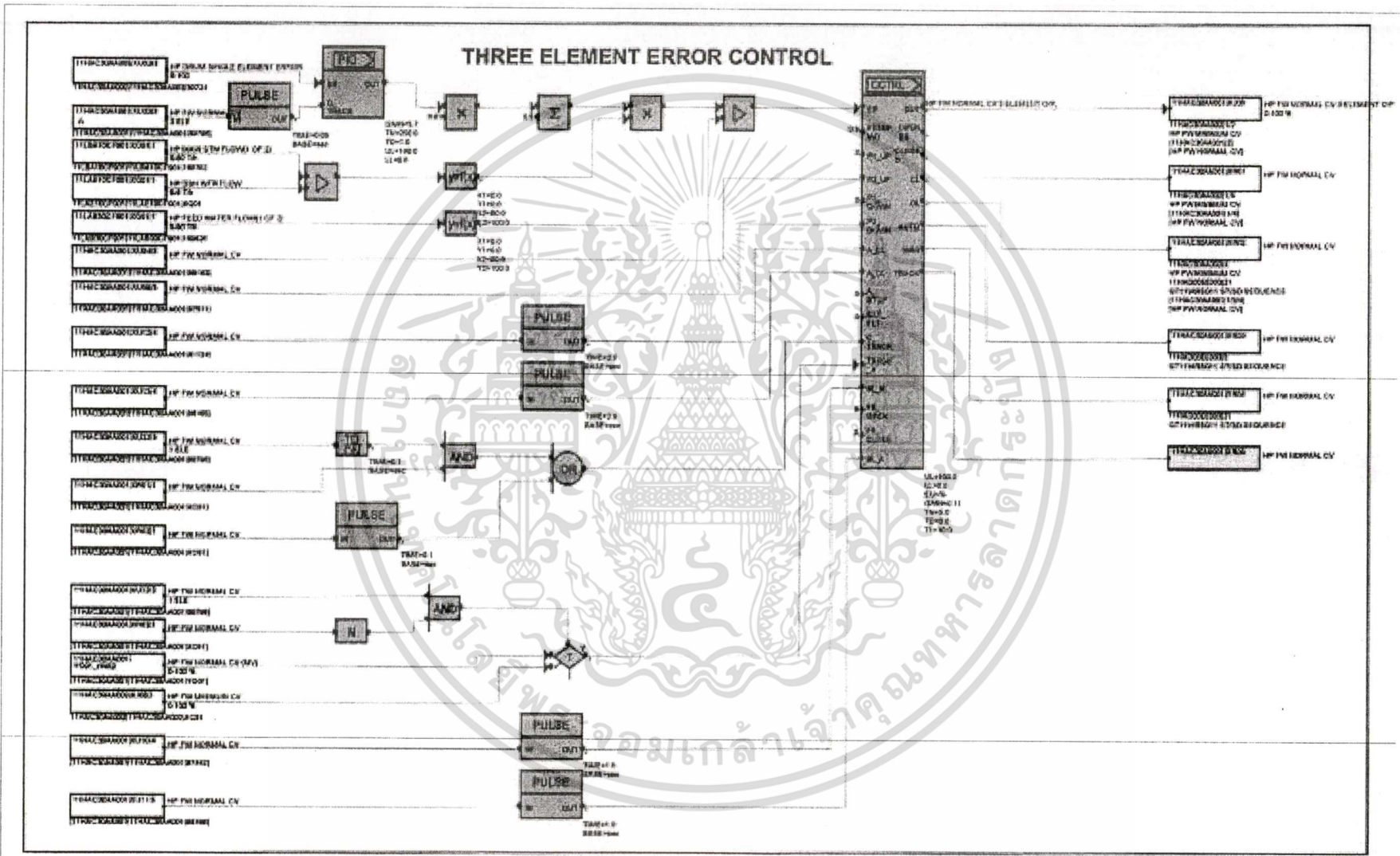
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

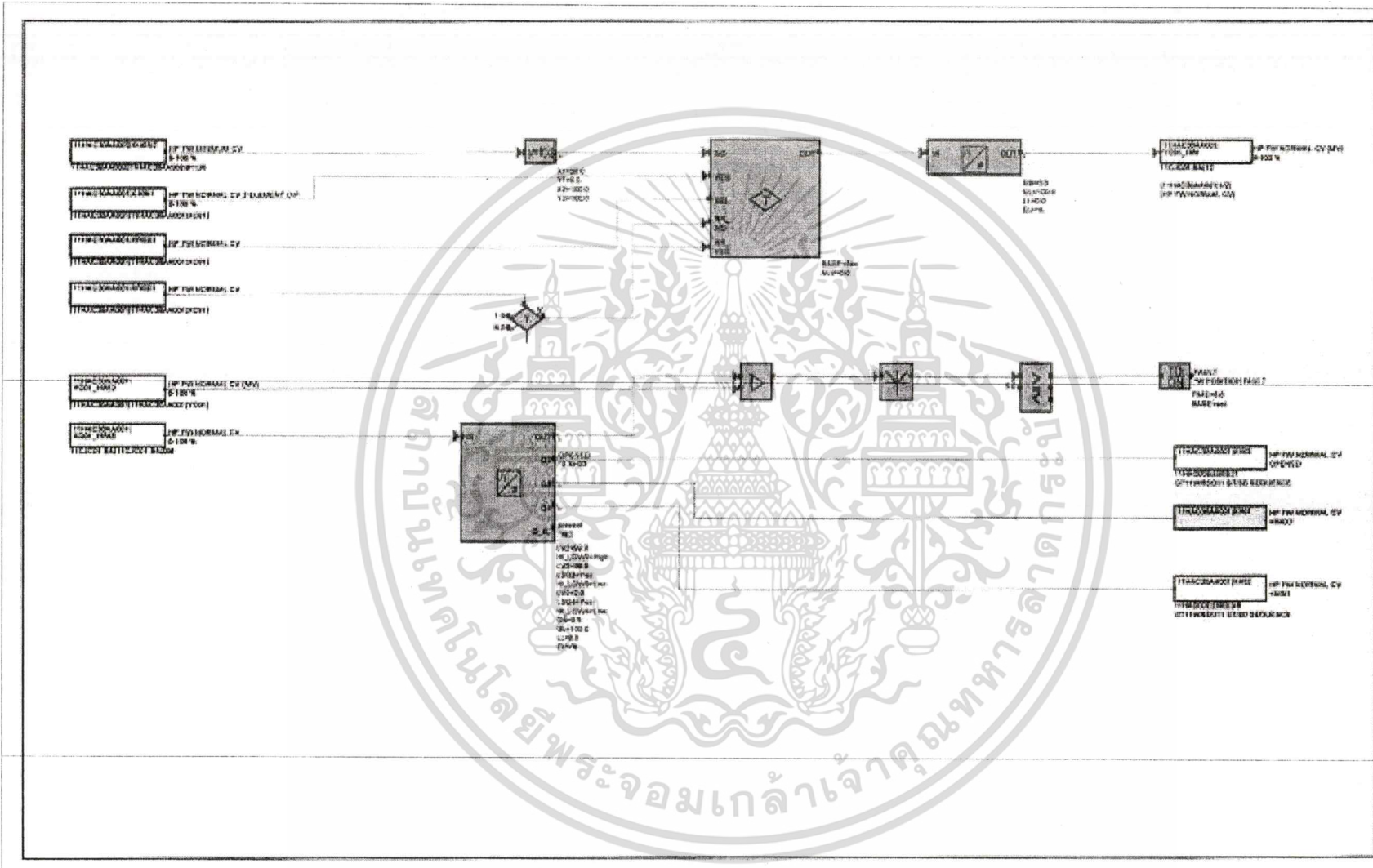












ภาคผนวก ค  
ตารางคุณสมบัติไอน้ำอิมตัวและความดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SATURATED STEAM - PRESSURE TABLE

P bar	T °C	Spec. vol. m <sup>3</sup> /kg		Int. Ener. kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ/(kg°K)	
		Sat. liq. v <sub>f</sub> X1000	Sat. vap. v <sub>g</sub>	Sat. liq. u <sub>f</sub>	Sat. vap. u <sub>g</sub>	Sat. liq. h <sub>f</sub>	Sat. vap. h <sub>g</sub>	Sat. liq. s <sub>f</sub>	Sat. vap. s <sub>g</sub>
0.04	28.96	1.004	34.80	121.4	2415	121.4	2554	0.423	8.475
0.06	36.15	1.006	23.75	151.5	2426	151.5	2567	0.521	8.531
0.08	41.5	1.008	18.11	173.8	2432	173.8	2577	0.593	8.229
0.1	45.8	1.010	14.68	191.8	2438	191.8	2585	0.648	8.150
0.2	60.07	1.017	7.849	251.4	2457	251.4	2610	0.832	7.908
0.3	69.11	1.023	5.229	289.2	2468	289.2	2625	0.944	7.769
0.4	75.87	1.026	3.894	317.5	2477	317.6	2637	1.026	7.670
0.5	81.33	1.030	3.240	340.4	2484	340.5	2646	1.091	7.594
0.6	85.94	1.033	2.732	359.8	2490	359.9	2653	1.145	7.532
0.7	89.95	1.036	2.385	378.6	2494	378.7	2660	1.192	7.480
0.8	93.5	1.039	2.087	391.6	2499	391.7	2666	1.233	7.435
0.9	96.71	1.041	1.870	405.1	2503	405.1	2671	1.270	7.396
1	99.62	1.043	1.694	417.3	2506	417.4	2675	1.303	7.359
1.5	111.4	1.053	1.159	466.8	2520	467.1	2694	1.434	7.223
2	120.2	1.061	0.886	504.5	2530	504.7	2707	1.530	7.127
3	133.6	1.073	0.606	561.1	2544	561.5	2725	1.672	6.902
4	143.6	1.084	0.483	604.3	2554	604.8	2739	1.777	6.896
5	151.9	1.093	0.375	639.7	2561	640.2	2749	1.861	6.821
6	158.8	1.101	0.316	669.9	2567	670.6	2757	1.931	6.760
7	165.0	1.108	0.273	696.4	2573	697.7	2764	1.992	6.708
8	170.4	1.116	0.240	720.2	2577	721.1	2769	2.046	6.663
9	175.4	1.121	0.215	741.8	2580	742.8	2774	2.096	6.623
10	179.9	1.127	0.194	761.7	2584	762.8	2778	2.139	6.586
20	212.4	1.177	0.100	906.4	2600	909.8	2800	2.447	6.341
30	233.9	1.217	0.087	1005	2604	1000	2804	2.646	6.187
40	250.4	1.252	0.050	1082	2602	1087	2801	2.796	6.070
50	264.0	1.286	0.039	1148	2597	1154	2794	2.920	5.973
60	275.6	1.319	0.032	1205	2590	1213	2784	3.027	5.889
70	285.9	1.352	0.027	1250	2580	1267	2772	3.121	5.813
80	295.1	1.384	0.024	1306	2570	1317	2758	3.207	5.743
90	303.4	1.418	0.021	1359	2558	1363	2742	3.286	5.677
100	311.1	1.453	0.018	1393	2545	1408	2725	3.360	5.614
110	318.2	1.489	0.016	1434	2530	1450	2708	3.429	5.553
120	324.8	1.527	0.014	1473	2513	1481	2685	3.496	5.492
130	331.0	1.567	0.013	1511	2496	1532	2662	3.561	5.432
140	338.0	1.611	0.012	1549	2477	1571	2639	3.623	5.372
150	342.3	1.658	0.010	1588	2456	1611	2611	3.685	5.310
160	347.4	1.711	0.009	1623	2432	1650	2581	3.746	5.246
170	352.4	1.770	0.008	1660	2406	1690	2547	3.808	5.178
190	357.0	1.839	0.008	1699	2375	1732	2510	3.871	5.106
190	361.5	1.824	0.007	1740	2338	1778	2465	3.938	5.024
200	365.8	2.036	0.006	1786	2296	1826	2411	4.013	4.937
220.9	374.1	3.155	0.003	2030	2029	2099	2099	4.430	4.430

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายภาณุพล ถังมณี
วัน-เดือน-ปีเกิด	วันที่ 4 มกราคม 2530
ที่อยู่	64/3 ม.5 ต.ซิงโค อ.สิงหนคร จ.สงขลา 90280 โทร. 085-892-6545
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบเครื่องมือวัด จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2552 และในปีการศึกษา 2554 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้