

การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุม
แบบคาดเคลื่อนร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงาน
ผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วน

CONTROL OF SUPERHEATED STEAM TEMPERATURE IN STEAM GENERATION
SYSTEM USING CASCADE COMBINED WITH FEEDFORWARD CONTROLLER BY
BALANCING ENTHALPY VIA DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-060-020

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุม
แบบคาสเคดร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงาน
ผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วน

CONTROL OF SUPERHEATED STEAM TEMPERATURE IN STEAM GENERATION
SYSTEM USING CASCADE COMBINED WITH FEEDFORWARD CONTROLLER BY
BALANCING ENTHALPY VIA DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM



สาขา.....
เลขทะเบียน 148754
รับเดือน.ปี 23 119. 2560

b. 00 267101
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-060-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTROL OF SUPERHEATED STEAM TEMPERATURE IN STEAM GENERATION
SYSTEM USING CASCADE COMBINED WITH FEEDFORWARD CONTROLLER BY
BALANCING ENTHALPY VIA DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-M-060-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาสเคดร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วน

Thesis Title Control of Superheated Steam Temperature in Steam Generation System using Cascade Combined with Feedforward Controller by Balancing Enthalpy via Distributed Control System

นักศึกษา นายกานต์ภพ สายอ่อน

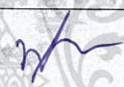
รหัสประจำตัว 55611706

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. สักกริยา ชิตวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-060-020

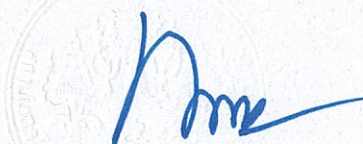
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร. พุศัคดี	ชีวิสุวิทย์	
รศ.ดร. วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
ผศ.ดร. พงษ์ชัย	นิลาศ	
รศ. วิริยะ	กองรัตน์	
รศ. สักกริยา	ชิตวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ คมบตี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาสแคดร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วน
นักศึกษา	นายกานต์ภพ สายอ่อน
รหัสประจำตัว	55611706
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. สักรียา ชิตวงศ์

บทคัดย่อ

การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นมีความสำคัญอย่างมากในระบบกำเนิดไอน้ำทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความปลอดภัย รวมถึงการยืดอายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดไอน้ำ ตัวควบคุมอุณหภูมิพีไอดีคาสแคดแบบเดิมนั้นเป็นที่รู้กันดีว่ามีประสิทธิภาพที่จะชดเชยการรบกวน อย่างไรก็ตาม การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบที่ใช้พลังงานความร้อนนั้นมีความซับซ้อนอย่างมาก เนื่องจากมีความไม่เป็นเชิงเส้น การรบกวนจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของโหลดและมีค่าห้วงของเวลาสูง ดังนั้นตัวควบคุมแบบคาสแคดร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานที่คำนวณด้วยโมเดลทางอุณหพลศาสตร์ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการชดเชยความซับซ้อนของโครงสร้างการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการควบคุม ผลการทดลองได้กระทำการทดลองทั้งในช่วงโหลดคงที่และช่วงโหลดเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำตัวสมดุลพลังงานมาใช้ทำให้ระบบควบคุมนั้นมีเสถียรภาพที่ดีทั้งสองช่วงดังกล่าว โดยแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองที่รวดเร็วในการชดเชยต่อการรบกวนของโหลดได้เป็นอย่างดี

Thesis Title	Control of Superheated Steam Temperature in Steam Generation System using Cascade Combined with Feedforward Controller by Balancing Enthalpy via Distributed Control System
Student	Mr. Kanpop Saion
Student ID	55611706
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Sakreya Chitwong

ABSTRACT

Control of superheated steam temperature in steam generation system is essential for the efficiency, safety and incremental age of the steam generators. Conventional cascade PID temperature controller in the superheater system is well known that efficiency is to compensate disturbance. However, the complexity of thermal power plant due to nonlinearity, load disturbance and high time delay of steam of the superheater system is a very complicating systems. The cascade loop with feedforward superheated steam temperature controller with energy balance compensator using thermodynamic model is used for compensating the complexity of the superheater system controlling structure in order to improve performance of superheated steam temperature control. The experimental results are implemented with both steady state and varied state of load. The cascade control, combined with feedforward of energy balance of superheated steam temperature, shows more stability for both steady state and varied state of load. The fast response to compensate the load disturbance is indicated well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ. สักกริยา ชิตวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนๆ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้การดำเนินงานวิจัยนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือที่ยังมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

กานต์ภพ สายอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 รายเอียดของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 คำนำ.....	6
2.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	6
2.2.1 หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	6
2.2.2 เครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	7
2.3 ระบบควบคุม.....	9
2.3.1 ตัวควบคุมพีไอดี (PID control).....	10
2.3.1.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional).....	11
2.3.1.2 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral).....	13
2.3.1.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative).....	15
2.3.2 การปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม.....	17
2.3.2.1 วิธีวงเปิด.....	17
2.3.2.2 วิธีวงปิด.....	19
2.3.3 เทคนิคการควบคุม.....	22
2.3.3.1 การควบคุมแบบคาสแคด.....	22
2.3.3.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 อุณหพลศาสตร์.....	25
2.4.1 สารบริสุทธิ์.....	25
2.4.2 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์.....	25
2.4.3 สมบัติอิสระของสารบริสุทธิ์.....	33
2.4.4 ตารางสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์.....	33
2.4.5 พื้นผิวเทอร์โมไดนามิกส์.....	35
2.4.6 พฤติกรรมระหว่างความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊สที่มีความหนาแน่นปานกลางถึงต่ำ.....	35
2.4.7 แฟกเตอร์สภาพอัดได้.....	36
2.4.8 สมการภาวะ.....	39
2.4.9 งานและความร้อน.....	40
2.4.9.1 นิยามของงาน.....	41
2.4.9.2 งานที่กระทำจากขอบเขตเคลื่อนที่ของสารอัดตัวได้เชิงเดียว.....	41
2.4.9.3 นิยามของความร้อน.....	44
2.4.9.4 การถ่ายเทความร้อน.....	45
2.4.10 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์.....	46
2.4.10.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับมวลควบคุมภายใต้วัฏจักร.....	46
2.5 The International Association for the Properties of Water and Steam	48
2.5.1 คุณสมบัติลักษณะของ IAPWS-IF97.....	48
2.5.2 โครงสร้างของ IAPWS-IF97.....	48
2.5.3 สมการพื้นฐานของ IAPWS-IF97.....	49
2.5.3.1 สมการช่วยสำหรับย่านของแรงดันและอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงของเส้นแบ่งระหว่างภูมิภาคส่วนที่ 2 และ 3 (B23-Equation)	50
2.5.3.2 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 1.....	50
2.5.3.3 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 2.....	53
2.5.3.4 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 3.....	57
2.5.3.5 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 4.....	60
2.5.3.5 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 5.....	61
2.6 สรุป.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ระบบควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง.....	65
3.1 คำนำ.....	65
3.2 ส่วนประกอบของระบบควบคุม.....	65
3.2.1 เครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	65
3.2.2 แอทเท็มเพอเรเตอร์.....	68
3.2.3 เครื่องมือวัด.....	69
3.2.3.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ.....	69
3.2.3.2 เครื่องมือวัดความดัน.....	70
3.2.3.3 เครื่องมือวัดอัตราการไหล.....	71
3.2.4 วาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำสเปรย์.....	76
3.2.5 ระบบควบคุม.....	77
3.2.5.1 ตัวควบคุม.....	77
3.2.5.2 อินพุตและเอาต์พุตโมดูล.....	78
3.2.5.3 เซิร์ฟเวอร์และสถานีควบคุม.....	80
3.3 โครงสร้างและกระบวนการ.....	81
3.3.1 กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง.....	81
3.3.2 ออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง.....	82
3.3.2.1 ตัวควบคุมอัตราการไหล.....	83
3.3.2.2 ตัวควบคุมอุณหภูมิ.....	84
3.3.2.3 ตัวสมดุลงาน.....	84
3.3.2.3.1 การสมดุลงานของน้ำสเปรย์และไอน้ำยวดยิ่ง.....	84
3.3.2.3.2 การคำนวณหาค่าเอนทัลปีของน้ำและไอน้ำ.....	86
3.3.3 โมเดลควบคุมสำหรับตัวควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง.....	88
3.3.4 การนำโมเดลควบคุมไปเขียนลงในระบบควบคุมกระจายส่วน.....	89
3.3.5 ปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุม.....	91
3.4 สรุป.....	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	92
4.1 คำนำ.....	92
4.2 วิธีการทดลอง.....	92
4.3 ผลตอบสนองของระบบ.....	92
4.3.1 ผลทดสอบการควบคุมขณะที่หม้อไอน้ำมีโหลดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย.....	94
4.3.2 ผลทดสอบการควบคุมขณะที่หม้อไอน้ำมีโหลดเปลี่ยนแปลงฉับพลัน.....	94
4.4 สรุปผลการทดลอง.....	98
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	99
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	99
เอกสารอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก.....	104
ภาคผนวก ข.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของตารางสำหรับน้ำภาวะอิมตัว (Borgnakke and Sonntag, 2009: 702).....	34
2.2 ตัวอย่างของตารางสำหรับน้ำภาวะไอร้อนยวดยิ่ง (Borgnakke and Sonntag, 2009: 710).....	34
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ $P_{B23}(T)$ และ $T_{B23}(P)$	50
2.4 สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการพื้นฐาน $g_1(p,T)$ ของสมการที่ 2.33.....	51
2.5 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสมการค่าพลังงานของจิบป์ γ	52
2.6 สมการค่าพลังงานของจิบป์ γ อนุพันธ์ของสมการเมื่อใช้สมการที่ 2.23.....	53
2.7 ค่าสัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของส่วนที่เป็นก๊าซอุดมคติ γ^0 ของสมการที่ 2.35.....	54
2.8 สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการในส่วนที่เหลือ γ^r สมการที่ 2.36.....	55
2.9 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสมการ ค่าพลังงานของจิบป์ γ สำหรับสมการที่ 2.35 และ 2.36.....	55
2.10 อนุพันธ์ของสมการ γ^0 (ส่วนของก๊าซอุดมคติ).....	56
2.11 อนุพันธ์ของสมการ γ^r (ส่วนที่เหลือ).....	57
2.12 สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการพื้นฐาน $f_3(p, T)$ ในสมการที่ 2.37.....	57
2.13 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสมการ ค่าพลังงานของเอ็มโฮลท์ \emptyset	58
2.14 อนุพันธ์ของสมการค่าพลังงานของเอ็มโฮลท์ที่ใช้ในสมการที่ 2.37.....	59
2.15 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพื้นฐานในภูมิภาคส่วนที่ 4 ของสมการที่ 2.38 ถึง 2.40.....	61
2.16 ค่าสัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของส่วนที่เป็นก๊าซอุดมคติ γ^0 ของสมการที่ 2.44.....	62
2.17 สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการในส่วนที่เหลือ γ^r สมการที่ 2.45.....	62
2.18 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสมการ ค่าพลังงานของจิบป์ γ สำหรับสมการที่ 2.47.....	63
2.19 อนุพันธ์ของสมการ γ^0 (ส่วนของก๊าซอุดมคติ).....	63
2.20 อนุพันธ์ของสมการ γ^r (ส่วนที่เหลือ).....	64
3.1 สมรรถนะของหม้อไอน้ำที่โหลดต่างๆ.....	67
3.2 คุณสมบัติจำเพาะเทอร์โมคัปเปิล.....	70
3.3 คุณสมบัติจำเพาะของเครื่องมือวัดความดัน.....	71
3.4 คุณสมบัติจำเพาะของเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่ง.....	72
3.5 คุณสมบัติจำเพาะของทรานสมิตเตอร์วัดอัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่ง.....	73
3.6 คุณสมบัติจำเพาะของเครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำสเปรย์.....	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
3.7 คุณสมบัติจำเพาะของทรานสมิตเตอร์อัตราการใช้พลังงาน.....	75
3.8 คุณสมบัติจำเพาะของวาล์วควบคุมอัตราการใช้พลังงาน.....	76
3.9 รายละเอียดตัวควบคุม.....	77
3.10 คุณสมบัติจำเพาะของเครื่องเซิร์ฟเวอร์และสถานีควบคุม.....	81
3.11 พารามิเตอร์ในตัวควบคุมพีไอดีของตัวควบคุมภาคแควด.....	91



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	2
1.2 กระบวนการของเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	3
2.1 กระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	7
2.2 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	8
2.3 กระบวนการของเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	9
2.4 ระบบควบคุมแบบเปิด.....	9
2.5 ระบบควบคุมแบบปิด.....	10
2.6 ตัวควบคุมพีไอดี.....	10
2.7 ลักษณะสมบัติของตัวควบคุมแบบสัดส่วน.....	12
2.8 ระบบควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้ไอน้ำ.....	12
2.9 แผนภาพการอบแสดงลักษณะตัวควบคุมแบบพีไอ.....	14
2.10 แผนภาพการอบแสดงลักษณะตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	16
2.11 ผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการที่มีเดทไทม์และการล่าหลัง.....	18
2.12 การแกว่งด้วยค่าแอมพลิจูดคงที่ของสัญญาณออกสำหรับวิธีวงปิด.....	19
2.13 การหาค่าอัตราขยายที่ทำให้ระบบเริ่มแกว่ง.....	20
2.14 ลักษณะผลตอบสนองขึ้นอยู่กับการปรับจูนค่า %PB.....	21
2.15 การควบคุมคาสแคด.....	22
2.16 การควบคุมคาสแคดควบคุมอุณหภูมิ.....	22
2.17 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....	24
2.18 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าร่วมกับการควบคุมแบบคาสแคด.....	25
2.19 น้ำภายในกระบอกสูบที่เปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นไอภายใต้กระบวนการไอโซบาริก.....	26
2.20 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรแสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นไอ.....	27
2.21 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรแสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นไอที่ความดันคงที่ค่าต่างๆ.....	28
2.22 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิ่มตัวและอุณหภูมิอิ่มตัว.....	28
2.23 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรแสดงเส้นของเหลวอิ่มตัว เส้นไออิ่มตัวและจุดวิกฤต.....	29
2.24 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรแสดงเส้นโค้งระฆังคว่ำที่แบ่งพื้นที่ออกเป็นภาวะต่างๆ ของสาร.....	30
2.25 แผนภาพสถานะที่แสดงถึงเส้นระเหยและบริเวณที่เป็นสถานะของเหลวและไอ.....	32
2.26 แผนภาพสถานะที่แสดงถึงเส้นละลาย เส้นระเหย เส้นระเหิด และจุดร่วมสาม.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

2.27	พื้นผิวความดัน-ปริมาตร-อุณหภูมิ (Borgnakke and Sonntag, 2009: 59).....	35
2.28	แผนภูมิแฟกเตอร์สภาพอัดได้ทั่วไป (Borgnakke and Sonntag, 2009: 755).....	39
2.29	งานขอบเขตเคลื่อนที่ของสารอัดตัวได้เชิงเดียวภายใต้กระบวนการกึ่งสมดุล.....	41
2.30	กราฟงานขอบเขตเคลื่อนที่ของสารอัดตัวได้เชิงเดียวภายใต้กระบวนการกึ่งสมดุล.....	42
2.31	งานจากกระบวนการที่มีภาวะตั้งต้นและภาวะสุดท้ายเดียวกันแต่วิธีที่ต่างกัน.....	43
2.32	วิธีการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ.....	46
2.33	มวลควบคุมภายใต้วัฏจักรที่มีงานและความร้อนถ่ายเทผ่านขอบเขตระบบ.....	47
2.34	ภูมิภาคส่วนต่างๆของน้ำและไอน้ำและสมการต่างๆของ IAPWS-IF97.....	49
3.1	ภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำและส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	66
3.2	ตำแหน่งและกระบวนการของแอทเท็มเพอเรเจอร์.....	68
3.3	แอทเท็มเพอเรเจอร์แบบตั้งฉากกับทิศทางการไหล.....	69
3.4	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ.....	70
3.5	เครื่องมือวัดความดัน.....	70
3.6	เครื่องมือวัดอัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่ง.....	72
3.7	ทรานสมิตเตอร์วัดอัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่ง.....	73
3.8	เครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำสเปรย์.....	74
3.9	ทรานสมิตเตอร์วัดอัตราการไหลน้ำสเปรย์.....	75
3.10	วาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำสเปรย์.....	76
3.11	วงจรของโมดูลอนาล็อกอินพุต.....	79
3.12	วงจรของโมดูลอนาล็อกที่มีไม่มีฮาร์ด.....	80
3.13	กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง.....	82
3.14	โมเดลตัวควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง.....	83
3.15	กระบวนการของไอน้ำยวดยิ่ง.....	85
3.16	โมเดลควบคุมของระบบควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง.....	89
3.17	ฟังก์ชันบล็อกไดอะแกรมบนระบบควบคุมกระจายส่วน.....	90
4.1	ผลการทดสอบในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย.....	93
4.2	ผลการทดสอบในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงฉับพลันจาก 100% - 85%.....	96
4.3	ผลการทดสอบในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงฉับพลันจาก 85% - 100%.....	97

บทที่ 1

บทนำ

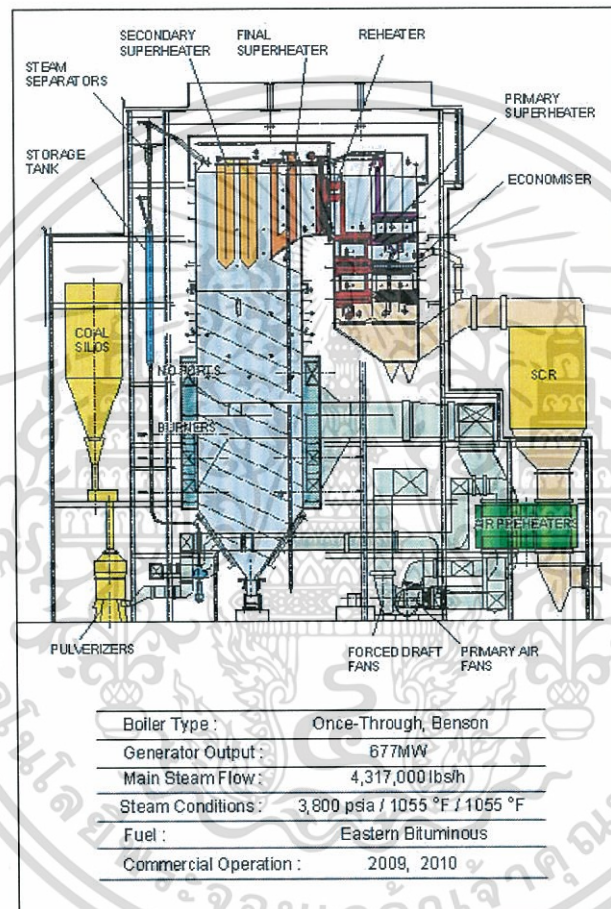
1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการใช้ชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะการใช้ไฟฟ้าในสถานที่พักอาศัย มีการใช้ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดแสงสว่าง ทำอาหาร ที่วี พัดลม เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น คอมพิวเตอร์ ฯลฯ ใช้ในการขนส่งโดยเฉพาะการสื่อสารต่างๆ แม้กระทั่งการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมทุกประเภทและการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ก็ล้วนใช้ไฟฟ้าเป็นตัวประกอบ ที่สำคัญยิ่งเช่นเดียวกัน โดยไฟฟ้าที่ใช้ในชีวิตประจำวันนั้นสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท เช่น ด้านคมนาคม ด้านการสื่อสาร ด้านการแพทย์ ด้านเกษตรกรรม ด้านอุตสาหกรรม และด้านคุณภาพชีวิต

การผลิตไฟฟ้ามีความสำคัญเป็นอย่างมากในการพัฒนาประเทศ เพราะปริมาณการใช้ไฟฟ้าในประเทศนั้นมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะฉะนั้นโรงไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งปัจจัยหนึ่งของประเทศ ในการผลิตไฟฟ้านั้นจะต้องใช้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โรงไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นมีหลายหลายชนิดเช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำโรงไฟฟ้าพลังความร้อนโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมโรงไฟฟ้าดีเซลและโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนต่างๆ จากข้อมูลรายงานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยโรงไฟฟ้าในประเทศไทยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตนั้นส่วนมากจะมาจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนและโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนนั้นส่วนใหญ่ได้มาจากก๊าซธรรมชาติและถ่านหินเป็นต้น

โรงไฟฟ้าพลังความร้อน(Thermal power plant) คือโรงไฟฟ้าที่ใช้พลังความร้อนจากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านหิน น้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติ และนิวเคลียร์ มาต้มน้ำให้เป็นไอความดันสูงไปขับเคลื่อนกังหันให้หมุนเป็นพลังงานกล และต่อเพลาเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีแรงดันและความถี่ตามที่กำหนดไว้ หรือใช้ความร้อนจากการสันดาปภายในของน้ำมันดีเซลของเครื่องยนต์ดีเซลไปจุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้กำเนิดไฟฟ้าได้เช่นกัน ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนกังหันไอน้ำได้แก่เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆให้เป็นพลังงานความร้อนในรูปของไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูง หม้อน้ำมีลักษณะแตกต่าง

กันไปตามการใช้งาน เช่น เครื่องกำเนิดไอน้ำท่อไฟเป็นหม้อน้ำขนาดเล็ก ๆ ใช้ผลิตไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิไม่สูงมาก เครื่องกำเนิดไอน้ำท่อไฟเป็นหม้อน้ำขนาดใหญ่ใช้ผลิตไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบดรัม(Drum)ซึ่งสามารถผลิตไอน้ำได้ที่ความดันสูงถึง 177 ความดันบรรยากาศ และแบบ Once – Through ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งสามารถผลิตไอน้ำได้ทั้งที่ความดันต่ำและสูงกว่า ความดันวิกฤติของน้ำ (Critical Pressure) คือ 218 ความดันบรรยากาศ



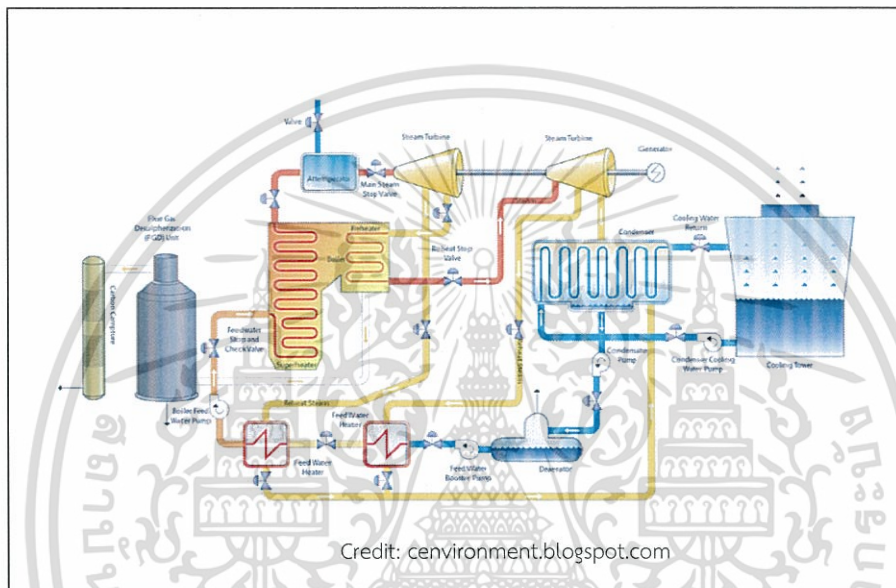
Credit: Bechtel Power Corporation awarded Hitachi America, Ltd

รูปที่ 1.1 เครื่องกำเนิดไอน้ำ

หลักการการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนสามารถอธิบายอย่างง่าย ๆ ได้คือน้ำคอนเดนเสทจะถูกปั๊มโดย คอนเดนเสทปั๊มผ่านดีแอมเรเตอร์เพื่อทำการกำจัดก๊าซแลกเปลี่ยนต่างๆที่ไม่ละลายน้ำจะได้ น้ำที่พร้อมจะน้ำเข้าไปต้มในเครื่องกำเนิดไอน้ำเรียกว่าน้ำป้อนโดยปั๊มน้ำป้อนจะทำการปั๊มน้ำเข้าไปที่เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดไอน้ำโดยผ่านฮีตเตอร์เพื่อทำการค่อยๆให้พลังงานความร้อนให้แก่ น้ำคอนเดนเสทก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำเมื่อเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำ น้ำก็จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งกลายเป็นไอน้ำยวดยิ่งและจะผ่านแอดเทมเพอร์เรเจอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิก่อนเข้าสู่กังหันไอน้ำและกังหันไอน้ำไปหมุนตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า ไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำก็จะถูกควบแน่นและถูกนำกลับไปให้ความร้อนต่อไปดังรูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างกระบวนการของเครื่องกำเนิดไอน้ำ



รูปที่ 1.2 กระบวนการของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

ในการผลิตไอน้ำนั้นจะต้องมีปัจจัยที่ต้องควบคุมมากมายเพื่อให้ได้ไอน้ำที่เหมาะสมกับการปั่นกังหันไอน้ำเช่น แรงดัน คุณภาพไอน้ำ อุณหภูมิ เป็นต้นโดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องของการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง ในการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิตไอน้ำทั้งในเรื่องของความปลอดภัยและในเรื่องของการประหยัดพลังงานหรือการใช้พลังงานให้น้อยที่สุดในการผลิตไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าให้ดีขึ้นได้อีกทั้งยังช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมได้อีกหนึ่งถ้าหากสามารถลดการใช้พลังงานในการผลิต

ในการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งนั้นมีความยากและท้าทายเป็นอย่างมากเพราะมีหลากหลายปัจจัยที่เข้ามาบรรจบระบบควบคุมไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของเชื้อเพลิงที่ใช้นั้นมีพลังงานที่ไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับขึ้นโหลดของโรงไฟฟ้า อีกทั้งกระบวนการควบคุมอุณหภูมินั้นเป็นกระบวนการที่ตอบสนองค่อนข้างช้า ในการทำงานที่จะควบคุมอุณหภูมินั้นจึงจะต้องใช้หลากหลายเทคนิคและวิธีการที่จะเข้ามาควบคุม ซึ่งจะต้องเข้าใจหลักของพลังงานความร้อนและการถ่ายเทพลังงาน เพื่อที่จะทราบได้ว่าจะต้องใช้น้ำที่ จะต้องไปผสมในไอน้ำเท่าใดเพื่อที่จะได้อุณหภูมิของไอน้ำที่ต้องการออกมาได้ซึ่งงานวิจัยนี้จะออกแบบตัวควบคุมโดยการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาคแคตร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานที่คำนวณด้วยโมเดลทางอุณหพลศาสตร์ผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วน ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงความซับซ้อนในกระบวนการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการควบคุมให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการผลิตไอน้ำยวดยิ่งของเครื่องกำเนิดไอน้ำในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนโดยการใช้ตัวควบคุมแบบคาคแคตร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมดุลพลังงานหลักการออกแบบโมเดลการควบคุม วิธีการคำนวณตัวสมดุลพลังงานโดยใช้หลักการทางอุณหพลศาสตร์ การเลือกใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดความแม่นยำและความน่าเชื่อถือในการควบคุมโดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการผลิตไอน้ำยวดยิ่งของเครื่องกำเนิดไอน้ำโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนรวมถึงอุปกรณ์เครื่องมือวัดและระบบควบคุมกระจายส่วน

1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุมควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งโดยการใช้ตัวควบคุมแบบคาคแคตร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมดุลพลังงาน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลตอบสนองของกระบวนการหลังจากนำระบบควบคุมที่ได้ออกแบบระบบควบคุมกระจายส่วนไปใช้งาน

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

เป็นระบบควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โดยใช้หลักการควบคุมแบบคาคแคตร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยสมการควบคุมที่คำนวณด้วยหลักการสมดุลพลังงานทางอุณหพลศาสตร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม ขดเขยการ

รบกวนจากตัวแปรทั้งภายในและภายนอกกระบวนการความไม่เป็นเชิงเส้น ความไม่แน่นอน และค่าคงที่ของเวลาที่สูงของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ทำการวิจัยโดยการศึกษา ออกแบบ สร้าง และทดสอบการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาคเดร่ร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วนภายใต้การดำเนินการที่ปลอดภัย และสอดคล้องกับกระบวนการเดินเครื่องผลิตไฟฟ้า

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและนำเสนอการควบคุมอุณหภูมิไอน้ำยวดยิ่งในเครื่องกำเนิดไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โดยใช้ตัวควบคุมคาคเดร่ร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมดุลพลังงาน พร้อมอุปกรณ์การวัดตัวแปรของกระบวนการซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ อุปกรณ์วัดอัตราการไหล อุปกรณ์วัดความดัน และระบบควบคุมกระจายส่วน เพื่อควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งของเครื่องกำเนิดไอน้ำให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด วิทยานิพนธ์ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัยและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบควบคุม ตัวควบคุมพีไอดี ทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ และทฤษฎีการคำนวณค่าพลังงานของไอน้ำที่สภาวะต่างๆ ที่ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

บทที่ 3 นำพื้นฐานความรู้จากบทที่ 2 เพื่อออกแบบตัวควบคุม สำหรับควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งในเครื่องกำเนิดไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า

บทที่ 4 ทำการทดลองควบคุมอุณหภูมิไอน้ำยวดยิ่งของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยเขียนบนระบบควบคุมแบบกระจายส่วน และศึกษาผลตอบสนองของระบบ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและวิจารณ์ในส่วนของปัญหาและแนวทางการแก้ไขและในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวกที่แสดงถึงผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และประวัติผู้เขียน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนและการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำ ซึ่งในที่นี้จะใช้การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำด้วยระบบควบคุมแบบคาสแคดร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมมูลพลังงานบนระบบควบคุมกระจายส่วน ตลอดจนพื้นฐานของระบบควบคุมตัวควบคุมพีไอดีรวมทั้งวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม รวมถึงพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์และการสมมูลพลังงานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการคำนวณโมเดลควบคุมกระบวนการ และท้ายสุดจะกล่าวถึงวิธีการคำนวณค่าพลังงานของไอน้ำด้วยอิงโดยใช้ The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97) ซึ่งจะกล่าวถึงคุณสมบัติของน้ำและไอน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติ และด้านอื่นๆ ของไอน้ำที่อุณหภูมิสูงน้ำและสารผสมน้ำที่มี ที่เกี่ยวข้องกับวงจรโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

2.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

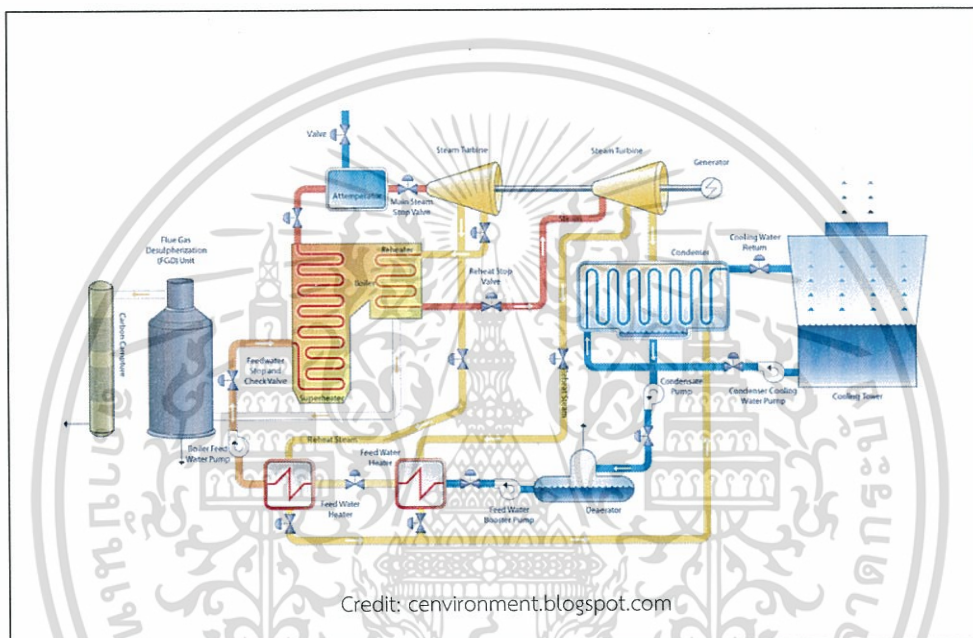
โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนคือโรงไฟฟ้าที่ใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านหิน น้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติ และนิวเคลียร์ มาต้มน้ำให้เป็นไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูงไปขับเคลื่อนกังหันให้หมุนเป็นพลังงานกล และต่อเพลาเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีแรงดันและความถี่ตามที่กำหนดไว้ ส่วนประกอบหลักของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้แก่ เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) เครื่องกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

2.1.1 หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

เครื่องกำเนิดไอน้ำจะทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงและนำความร้อนไปต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำจะถูกส่งไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำและต่อเพลาไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไอน้ำจะควบแน่นที่คอนเดนเซอร์เรียกว่าน้ำคอนเดนเสทจะถูกปั๊มโดยปั๊มน้ำคอนเดนเสทผ่านดีแอเรียเตอร์เพื่อ

ทำการกำจัดก๊าซแปลกปลอมต่างๆที่ไม่ละลายน้ำจะได้น้ำที่พร้อมจะน้ำเข้าไปต้มในเครื่องกำเนิดไอน้ำเรียกน้ำป้อนโดย ปั้มน้ำป้อนจะทำการปั้มน้ำเข้าไปที่เครื่องกำเนิดไอน้ำโดยผ่านฮีทเตอร์น้ำเพื่อทำการค่อยๆให้พลังงานความร้อนให้แก่ น้ำคอนเดนเสทก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำเป็นวัฏจักรไอน้ำดังรูปที่

2.1

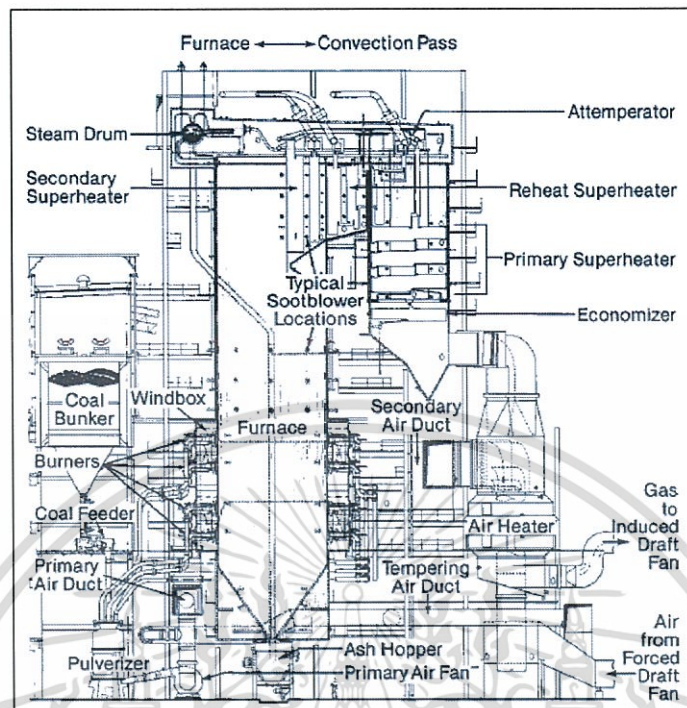


รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

2.2.2 เครื่องกำเนิดไอน้ำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำคืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆให้เป็นพลังงานความร้อนในรูปของไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูงหมื่อน้ำมีลักษณะแตกต่างกันไปตามการใช้งาน เช่น เครื่องกำเนิดไอน้ำท่อไฟเป็นหมื่อน้ำขนาดเล็กๆ ใช้ผลิตไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิไม่สูงมาก และเครื่องกำเนิดไอน้ำท่อน้ำเป็นหมื่อน้ำขนาดใหญ่ใช้ผลิตไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแสดงส่วนประกอบดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

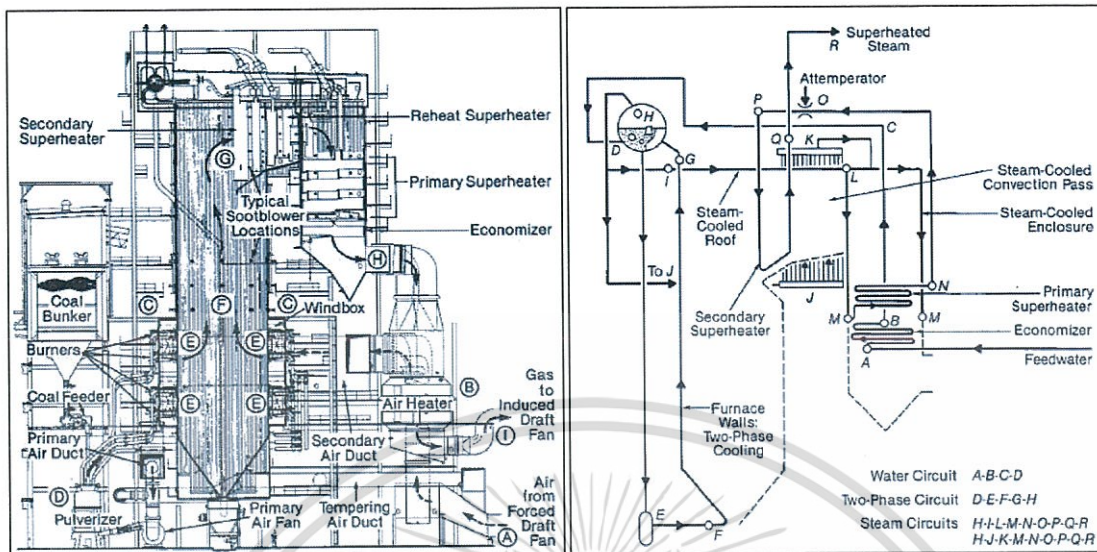


Credit: John B. Kitto and Steven C. Stultz (2005)

รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

การทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำจะแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ส่วนของระบบเผาไหม้และส่วนของระบบน้ำและไอน้ำ ระบบเผาไหม้จะเริ่มจากเชื้อเพลิงจะถูกเก็บที่ถังถ่านหินและน้ำเข้าเตาเผาโดยเครื่องป้อนถ่านหินผ่านเครื่องโม่ซึ่งทำหน้าที่บดอัดเชื้อเพลิงให้เป็นผงละเอียด และถูกพาเข้าเตาเผาด้วยลมซึ่งขับเคลื่อนด้วย พัดลมลำดับหนึ่งเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้ที่หัวเผาไม้ซึ่งผสมกับอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยพัดลมลำดับที่สอง ให้ความร้อนจากการเผาไหม้จะให้ความร้อนแก่น้ำเพื่อเปลี่ยนเป็นไอน้ำ และถูกดูดออกจากเตาเผาพัดลมดูดผ่านฮีตเตอร์อากาศ ที่ทำหน้าที่อุ่นอากาศลำดับสองด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนที่สองคือระบบน้ำและระบบไอน้ำ น้ำจากปั๊มน้ำป้อนจะถูกนำเข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนที่อีโคโนไมเซอร์เพิ่มความร้อนให้ได้ระดับหนึ่งจากนั้นจะวิ่งผ่านท่อผนังเตาและเข้าสู่เครื่องแยกไอน้ำทำหน้าที่แยกน้ำออกจากไอน้ำไอน้ำที่ได้จะเข้าสู่หน่วยซูเปอร์ฮีตเตอร์เพื่อให้ความร้อนจนไอน้ำเปลี่ยนเป็นไอน้ำยวดยิ่ง (Superheated Steam) และนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำต่อไปดังที่แสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

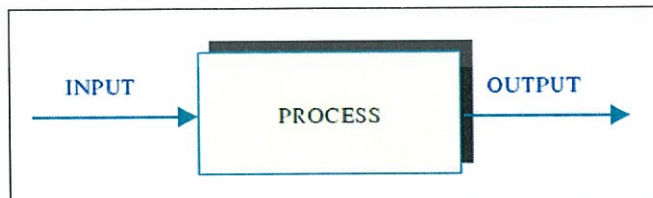


รูปที่ 2.3 กระบวนการของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

Credit: John B. Kitto and Steven C. Stultz (2005)

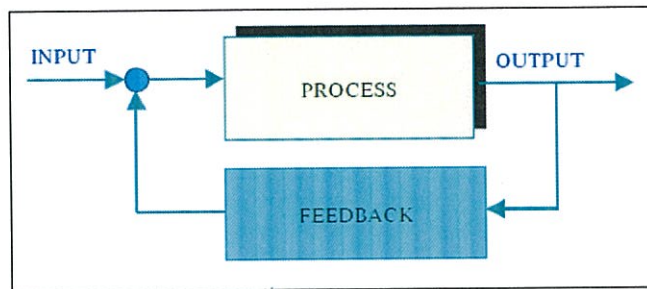
2.3 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมคือกระบวนการที่ใช้ในการควบคุมเอาต์พุตของกระบวนการที่ต้องการควบคุมมีโครงสร้างสองรูปแบบคือ ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop control system) เป็นระบบควบคุมที่ไม่มีนำเอาต์พุตการป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับอินพุตจึงง่ายต่อการสร้างและประหยัด แต่ค่าเอาต์พุตจะไม่มีผลต่อการควบคุม ขบวนการของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.4 และระบบควบคุมแบบปิด (Close loop control system) เป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ (Feedback) โดยนำเอาเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะถือเป็น ความผิดพลาด เพื่อเอาสัญญาณนี้ป้อนเข้าระบบแล้วตัวควบคุมจะนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมแบบเปิด

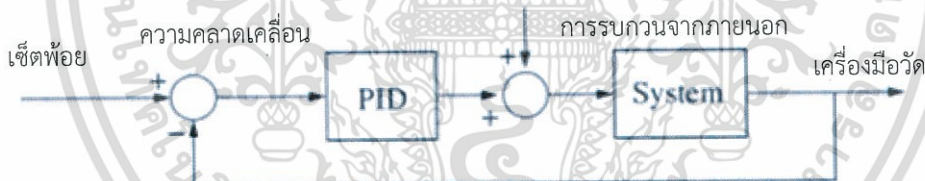
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมแบบปิด

2.3.1 ตัวควบคุมพีไอดี (PID control)

ในระบบควบคุมมีตัวควบคุมหลายชนิด ตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการเป็นแบบพีไอดีโดยต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สัญญาณออกจากตัวควบคุมพีไอดีสามารถบรรยายได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 ตัวควบคุมพีไอดี

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ (2.1) $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกจากค่ากำหนด ตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วยเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional หรือ P) แบบอินทิกรัล (Integral หรือ I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D) แต่ละแบบสามารถนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p) ค่าเวลาอินทิกรัล (T_i) และ ค่าเวลาอนุพันธ์ (T_d) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแบบมีดังนี้

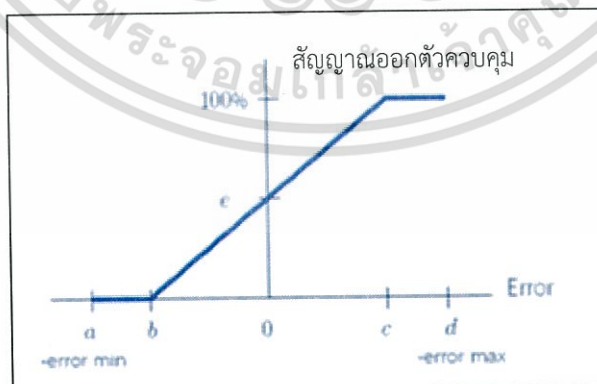
2.3.1.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional)

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม ($u(t)$) จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการ มีค่าเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.2)$$

โดยที่ K_p คือค่าอัตราขยายและ $e(t)$ คือ ความคลาดเคลื่อน = ค่ากำหนด - ค่าที่วัดตัวควบคุมบางระบบ สัญญาณเข้าและสัญญาณออกอาจมีหน่วยต่างกัน เช่นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน เพื่อหลีกเลี่ยงการแปลงหน่วย ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออกและสัญญาณเข้าของตัวควบคุมอาจแสดงเป็นแถบสัดส่วน (Proportional Band หรือ %PB) โดยที่แถบสัดส่วนคือพิสัยของสัญญาณเข้าที่ทำให้ตัวควบคุมปฏิบัติงานเต็มพิสัยการทำงาน หรือถ้ามองจากตัวควบคุม แถบสัดส่วนคือช่วงความคลาดเคลื่อนที่ทำให้สัญญาณออกของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดไปต่ำสุด โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิสัยสัญญาณเข้าตัวควบคุม ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและเปอร์เซ็นต์แถบสัดส่วนดังสมการที่ (2.3)

$$K_p = \frac{100}{\%PB} \quad (2.3)$$



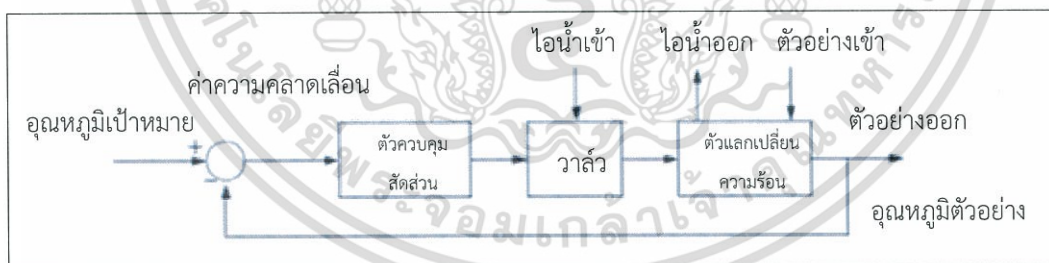
รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 ค่าเปอร์เซ็นต์แถบสัดส่วน (%PB) คือระยะ b ถึง c แม้ความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ ยังมีสัญญาณค่าหนึ่ง ออกจากตัวควบคุมที่ป้อนให้กับกระบวนการ ค่านี้ทำหน้าที่เป็น ไบแอส (bias) ทำให้ระบบทำงานที่จุดทำงานต่อไปได้ โดยทั่วไปสัญญาณค่านี้มักจะถูกตั้งให้เท่ากับ 50% ของสัญญาณขาออกสูงสุดของตัวควบคุมตั้งสมการที่ (2.4)

$$\text{สัญญาณออก} = \frac{\% \text{ ความคลาดเคลื่อน}}{\% \text{ แถบสัดส่วน}} + 50\% \quad (2.4)$$

นอกจากนี้ ตัวควบคุมมีงานที่เป็นเชิงเส้นช่วงหนึ่ง โดยทำหน้าที่เป็นตัวขยาย (amplifier) แต่ถ้าความคลาดเคลื่อนมีมากเกินไปเกินระดับหนึ่ง ตัวขยายจะอิมิตัวทำให้สัญญาณออกมีค่าคงที่การควบคุมแบบสัดส่วนนี้สามารถควบคุมระบบได้ดีพอสมควร เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบสนองรวดเร็วและยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ขนาดหนึ่ง อย่างไรก็ตาม หากในกระบวนการ เกิดมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อาจทำให้เกิดปัญหา เช่น มีค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว (steady-state error) หรือที่เรียกว่าออฟเซต (offset) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ไม่สามารถแก้ไขให้หมดได้ ตัวอย่างในกรณีนี้ก็ได้อะบบในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้ไอน้ำ

จากรูปที่ 2.8 ระบบเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้ไอน้ำ โดยมีตัวควบคุมแบบสัดส่วนทำหน้าที่ปรับวาล์วควบคุมปริมาณไอน้ำที่ผ่านไปให้ความร้อนกับสารที่ต้องการทำความร้อน ในสภาวะอยู่ตัว ถ้าประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำลง (เนื่องจากไอน้ำหรือสารที่ต้องการทำความร้อนทำให้เกิดสนิม หรือตะกรันบนผิวที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน หรือเนื่องจาก

สาเหตุอื่น) ผลที่ตามมาคืออุณหภูมิของสารที่ได้จะไม่ตรงกับค่าที่ตั้งไว้ ดังนั้นเพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวอีกครั้ง สัญญาณออกของตัวควบคุมจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อพิจารณาจากสมการของสัญญาณควบคุมข้างต้น สัญญาณออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นได้ ความผิดพลาดจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดความแตกต่างของระหว่างอุณหภูมิสารกับค่าที่ตั้งไว้ที่สภาวะสมดุลใหม่แนวทางการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นทำได้ 2 วิธีคือ วิธีแรก คือ เพิ่มอัตราขยาย (gain) ของตัวควบคุมเพื่อเพิ่มผลของความคลาดเคลื่อนที่มีต่อระบบ ถึงแม้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยลงแต่ก็จะทำให้สัญญาณออกจากตัวควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการขณะนั้นได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มผลของความคลาดเคลื่อนมากเกินไป ก็อาจทำให้ระบบแกว่งได้เนื่องจากระบบมีความไว วิธีที่สอง คือ ปรับค่าไบแอสของตัวควบคุมใหม่ด้วยมือ ซึ่งทำให้ตัวควบคุมเลื่อนจุดทำงาน ไปยังจุดที่ให้สัญญาณออกที่เหมาะสมกับกระบวนการในขณะนั้นได้ ปัญหาของวิธีหลังอยู่ตรงที่ต้องปรับค่าไบแอสของตัวควบคุมทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ

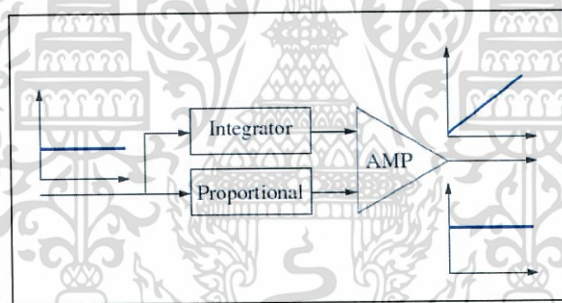
2.3.1.2 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral)

ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถอธิบายได้ในสมการที่ (2.5)

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.5)$$

เมื่อ K_p คืออัตราขยาย $e(t)$ คือความคลาดเคลื่อน และ T_i คือเวลาอินทิกรัล (วินาที) เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัล มีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส (นั่นคือ ทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัล) และจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์หรือผลตอบเข้าที่สมบูรณ์แล้ว เทอมไบแอสของระบบจะมีค่าน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวนการทำงานในลักษณะเช่นนี้คล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (manual-reset function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกตัวอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (reset function) จากการที่ตัวอินทิกรัลกำจัดความคลาดเคลื่อน (หรือออฟเซต) ได้ดี จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (capacity-like lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้น สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (time constant) น้อยปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก (เช่น ระบบควบคุมระดับ) ปัญหานี้จะมีผลมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถ

ยอมรับได้การควบคุมแบบอินทิกรัล มีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรงผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมหากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไปเวลาอินทิกรัล ($T_i = 1/K_i$) โดยที่ $K_i = \text{repeats/sec}$ เป็นตัวแสดงว่า อัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุม ค่า T_i ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นกว่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ (ซึ่งทำให้เทอม $\int_0^t e(t)dt$ หยุดทำงาน) เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (overshoot) สูงกว่าค่ากำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุม ควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ เพราะจะทำให้เกิดปัญหาอินทิกรัลวิลด์อัปถึงแม้ว่า T_i มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบเกิดส่วนพุ่งเกิน



รูปที่ 2.9 แผนภาพกรอบแสดงลักษณะตัวควบคุมแบบพีไอ

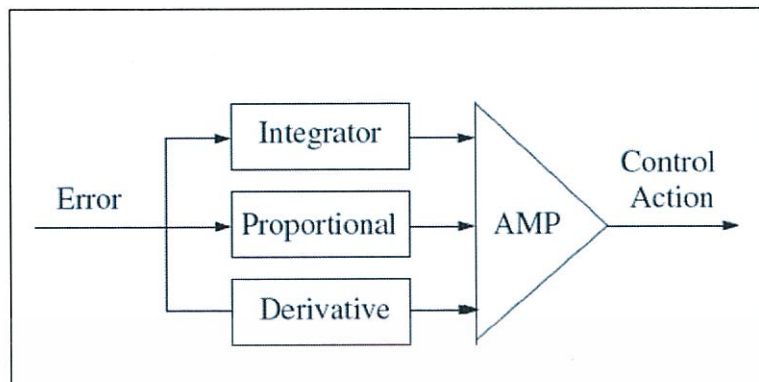
ในระบบควบคุม ค่าที่วัดได้และค่ากำหนดควรเป็นค่าเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวควรเป็นศูนย์ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว สัญญาณที่ออกจากอินทิเกรเตอร์ (เพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าคงที่) ส่งต่อไปกับวงจรถยาย ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สังเกตว่า ความคลาดเคลื่อนเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมทั้งสัดส่วนและอินทิกรัล โดยสัญญาณออกจะมารวมกันที่วงจรถยายและส่งสัญญาณไปควบคุมระบบ ตัวควบคุมจะทำให้ค่าที่วัดได้ เพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่ากำหนด นั่นคือทำให้ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม หาก T_i มีค่าน้อยลง ผลตอบอาจเกิดการแกว่งได้

2.3.1.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล ต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการแต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้ สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อน หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการทำงาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนมียังค่าเล็กน้อย สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อน แต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลดีคือ ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.6)

$$u(t) = K_p e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

โดยค่าเวลาอนุพันธ์ (T_d) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม T_d จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนด เพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์ และทำให้เกิดการกระแทก (bump) ของอุปกรณ์ในกระบวนการ สำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่าช้าทางเวลา (เวลาล่าช้า) มากๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น และช่วงเวลากว้างที่สั้นลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์ คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ ดังนั้น แม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุม จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมาก จะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ในวงจรอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล (PI) เท่านั้น



รูปที่ 2.10 แผนภาพกรอบแสดงลักษณะตัวควบคุมแบบพีไอดี

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันที และส่งผลต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำอนุพันธ์ของความคลาดเคลื่อน นั่นคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน แล้วไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิเกรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะทำให้การทำงานของระบบดีขึ้น การควบคุมเชิงอนุพันธ์ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว แต่จะลดช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) โดยลดการแกว่งลงจากรายละเอียดที่กล่าวมาจะพบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดียังคงมีจุดอ่อนบ้าง ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงมีการต่อวงจรเพิ่มเติมสำหรับแก้จุดอ่อน ได้แก่

- วงจรสำหรับป้องกันอินทิกรัลลิสต์อัพที่เกิดจากตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
- วงจรกรอง (filter) สำหรับลดผลเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่มีกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์
- ปรับโครงสร้างให้ตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์รับสัญญาณออกของระบบเท่านั้น เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าเกินกว่าที่รับได้ (derivative overrun)

นอกจากปัญหาที่เกิดจากการควบคุมทั้ง 3 แบบแล้ว ยังมีปัญหาที่เกิดจากฟังก์ชันการทำงาน คือ ตัวควบคุมส่วนมากจะมีโหมดการทำงาน 2 โหมด คือ การควบคุมด้วยมือ (manual) และการควบคุมอัตโนมัติ (automatic) ในโหมดการควบคุมด้วยมือ สัญญาณที่ส่งออกจากตัวควบคุมจะขึ้นกับการปรับโดยตรงของผู้ใช้ หากมีการเปลี่ยนโหมดการทำงานกลับมาที่โหมดการควบคุมอัตโนมัติ ตัวควบคุมทำหน้าที่ส่งสัญญาณออกจากตัวควบคุมอาจเกิดปัญหาการกระแทก (bump) ขึ้นได้ เนื่องจากการ

เปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุมอย่างเฉียบพลัน ดังนั้นในตัวควบคุมแบบพีไอดีส่วนมาก จึงต้องมีวงจรลดการกระแทก (Bumpless transfer) สำหรับแก้ปัญหานี้ไว้ด้วย

2.3.2 การปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

การปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (parameter tuning) เริ่มจากการหาลักษณะของวงควบคุมเดิม เทคนิคต่างๆ ในการวัดลักษณะของกระบวนการมีความสำคัญมาก เพราะจะนำไปสู่การตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการควบคุมที่นิยมจะพิจารณาใช้กันอยู่มาก คือแบบสัดส่วน แบบอินทิกรัลและแบบอนุพันธ์ ร่วมกันในตอนนี้ จะมุ่งเน้นวิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยอาศัยลักษณะสมบัติของกระบวนการและระบบควบคุมลักษณะสมบัติที่ว่ามีได้แก่

- ลักษณะของความจุของระบบ (capacitance) ซึ่งก่อให้เกิดการล่าช้าแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
- เดทไทม์ (distance/velocity lag)
- ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

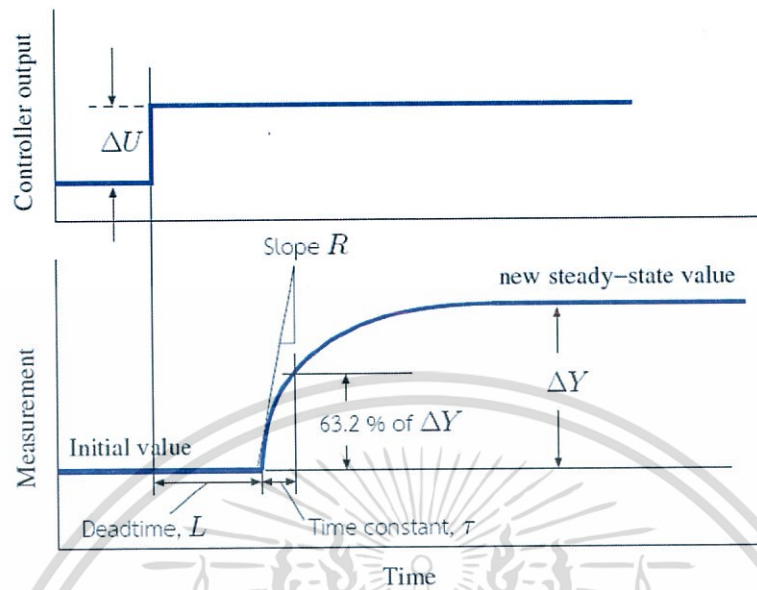
วิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ใช้ทั่วไปแบ่งเป็น 3 วิธี คือ

2.3.2.1 วิธีวงเปิด

วิธีนี้เริ่มมาจากความคิดที่ว่า ผลตอบจากสัญญาณขั้น (step response) ของกระบวนการส่วนใหญ่ มีลักษณะกราฟคล้ายกับในรูปที่ 2.11 ซึ่งเรียกว่ากราฟผลตอบสนองของกระบวนการ รูปกราฟลักษณะดังกล่าวสามารถประมาณได้จากผลตอบสัญญาณขั้นของระบบล่าช้าอันดับหนึ่ง (first-order lag) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังสมการที่ (2.7)

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Me^{-sL}}{(Ts+1)} \quad (2.7)$$

นั่นก็คือเป็นระบบอันดับหนึ่งที่มีเดทไทม์เท่ากับ L วินาที มีค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ T วินาที และผลตอบจากสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยจะลู่เข้าหาค่า M เมื่อ $T \rightarrow \infty$



รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการที่มีเดทไทม์และการล่าช้า

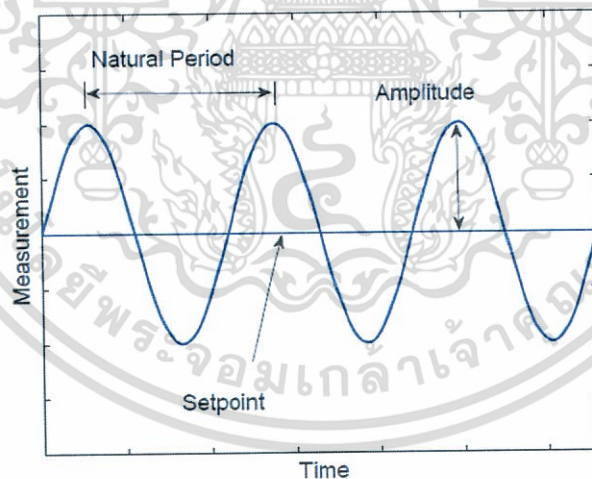
วิธีนี้เริ่มต้นด้วยการหาค่าคงตัวทางเวลาเดทไทม์และอัตราการตอบสนอง (response rate) โดยอาศัยผลตอบสนองวงเปิด (open-loop response) ให้ต่ออุปกรณ์บันทึกสัญญาณเข้ากับสัญญาณที่ต้องการวัด ขั้นตอนการทดสอบเป็นดังนี้

- ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น (step change) ด้วยขนาด U ที่สัญญาณออกของตัวควบคุม (ซึ่งเป็นสัญญาณเข้าของระบบ) ในขณะเดียวกันก็ให้เครื่องบันทึกทำการบันทึกค่าเพื่อหาค่าเดทไทม์ดังรูปที่ 2.8 ค่าเดทไทม์ (หน่วยเป็นวินาที) จะเป็นระยะเวลานับจากจุดที่เริ่มการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของสัญญาณเข้า ไปยังจุดที่ระบบเริ่มตอบสนองต่อสัญญาณเข้านั้น
- จากนั้นสัญญาณออกที่วัดได้จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ค่าใหม่ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นที่สัญญาณออกของตัวควบคุม เส้นโค้งแสดงดังรูปที่ 2.8 เป็นผลตอบสำหรับระบบที่เป็นความจุเชิงเดี่ยวอาจประมาณได้ว่าผลตอบที่มีลักษณะเป็นการล่าช้าอันดับหนึ่ง (first-order lag)

- ค่าคงตัวทางเวลา หาได้จากระยะเวลาที่สัญญาณออกเริ่มเปลี่ยนแปลง ไปจนถึงค่า 63.2% ของ ΔY สัดส่วน $1 - e^{-1}$ ของ ΔY) โดย ΔY คือการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออก เมื่อเทียบกับค่าเดิม
- ค่า M ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราขยายของระบบในภาวะอยู่ตัว หาจากได้ $M = \Delta Y / \Delta U$
- ค่าความชันของกราฟสัญญาณออก ณ inflection point จะมีค่าเท่ากับ M จะเรียกค่าความชันนี้ว่าอัตราผลตอบแทนของกระบวนการ = R

2.3.2.2 วิธีวงปิด

วิธีวงปิดนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะว่าการวัดค่าพารามิเตอร์เพียงค่าเดียวเท่านั้น แต่มีข้อเสียเปรียบอยู่คือ กระบวนการบางอย่างที่มีลักษณะออนไลน์ (online) ไม่สามารถจะทำให้เกิดการแกว่งได้ถึงแม้ว่าจะเป็นช่วงเวลาเพียงสั้นๆ โดยการทำให้วงควบคุมแกว่งที่ค่าแอมพลิจูดคงที่และคาบเวลาคงที่ ทำให้สามารถหาคาบเวลาธรรมชาติ (natural period) ได้ตัวอย่างของการวัดวิธีนี้แสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งมีลักษณะการแกว่งเป็นแบบไซน์ (sinusoid)

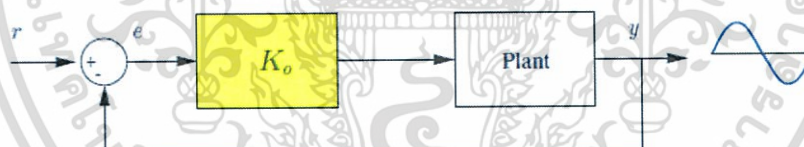


รูปที่ 2.12 การแกว่งด้วยค่าแอมพลิจูดคงที่ของสัญญาณออกสำหรับวิธีวงปิด

ดังนี้

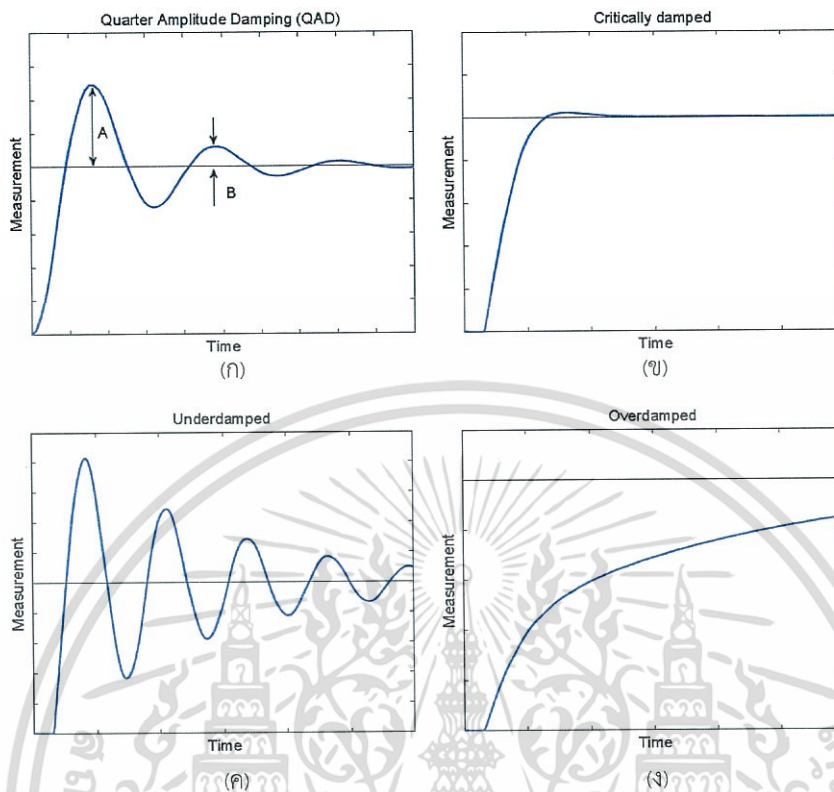
เพื่อให้เกิดการแกว่งที่ค่าแอมพลิจูดคงที่ในวงควบคุมของกระบวนการจะต้องดำเนินการตามขั้นตอน

- จัดระบบวงปิดดังรูปที่ 2.13
- ตรวจสอบให้แน่ใจว่า วงควบคุมมีเสถียรภาพ
- ปรับส่วนอินทิกรัล (I) และส่วนอนุพันธ์(D) ให้มีค่าต่ำสุด (นั่นคือเหลือแต่ตัวควบคุมแบบสัดส่วน)
- ให้การเปลี่ยนแปลงแบบขั้นที่ค่ากำหนด (r) ของค่ากำหนด (set value) และสังเกตสัญญาณออกที่วัดได้
- ถ้าหากสัญญาณออกค่อยๆ ลดลงสู่ค่าที่สถานะอยู่ตัวให้ลด %PB อีก (เพิ่มอัตราขยาย K)
- กลับไปทำขั้นที่ 3 และ 4 จนกระทั่งได้ผลตอบที่แกว่งด้วยแอมพลิจูดและคาบเวลาคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.14 บันทึกค่าอัตราขยาย ณ จุดนี้ให้เท่ากับ K_0 ตรวจสอบว่าตัวขับเคลื่อนสุดท้าย (final actuator) ไม่ได้แกว่งอยู่ในพิสัย เพราะการแกว่งเช่นนี้ทำให้ผลลัพธ์ผิดพลาด



รูปที่ 2.13 การหาค่าอัตราขยายที่ทำให้ระบบเริ่มแกว่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

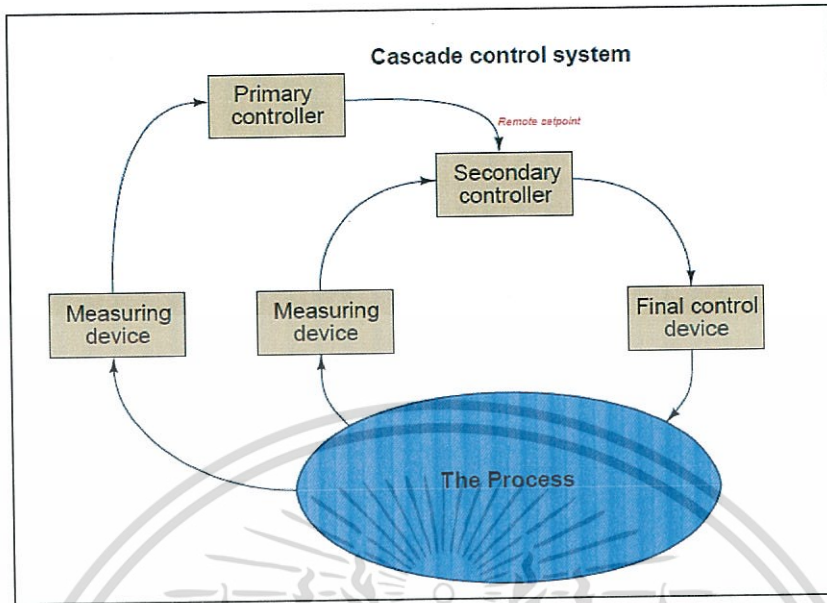


รูปที่ 2.14 ลักษณะผลตอบสนองขึ้นอยู่กับค่าการปรับจูนค่า %PB

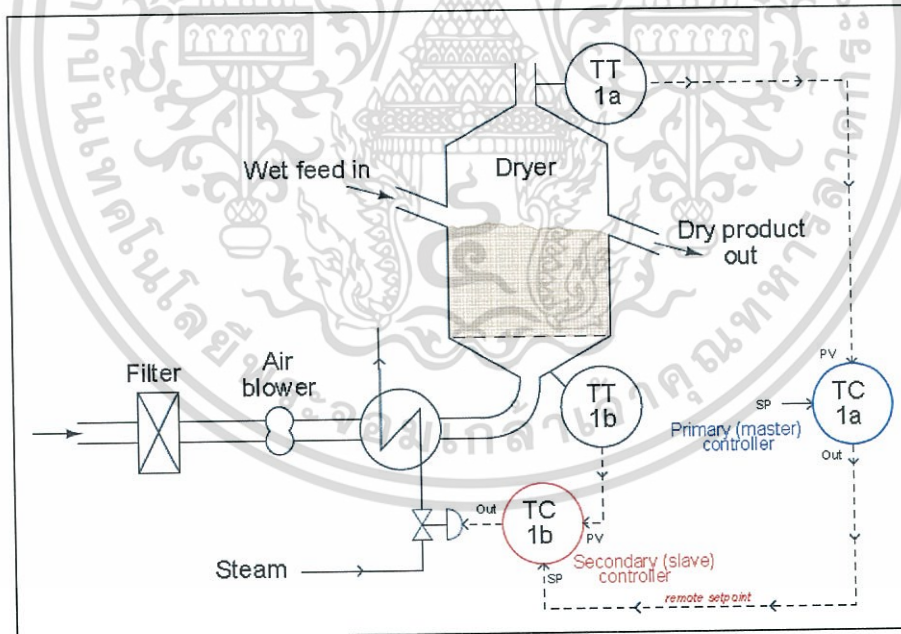
2.3.3 เทคนิคการควบคุม

2.3.3.1 การควบคุมแบบคาสแคด

การจัดระบบควบคุมในแบบคาสแคดก็คือ การกำหนดให้เอาที่พุดจากตัวควบคุมหนึ่งไปเป็นอินพุตหรือ เซ็ตพอยท์ให้กับตัวควบคุมอีกชุดหนึ่ง หรือจะมองในอีกมุมหนึ่งก็คือการแทรกระบบควบคุมป้อนกลับอันหนึ่งไว้ในระบบควบคุมป้อนกลับอีกอันหนึ่ง นั่นเองได้อะแกรมของการควบคุมแบบคาสแคดรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การควบคุมคาสเคด



รูปที่ 2.16 การควบคุมคาสเคดควบคุมอุณหภูมิ

จากตัวอย่างรูปที่ 2.16 การควบคุมอุณหภูมิเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากในระบบควบคุมเนื่องจากว่าการตอบสนองของ เครื่องมือวัดไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใด เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นจริงของ

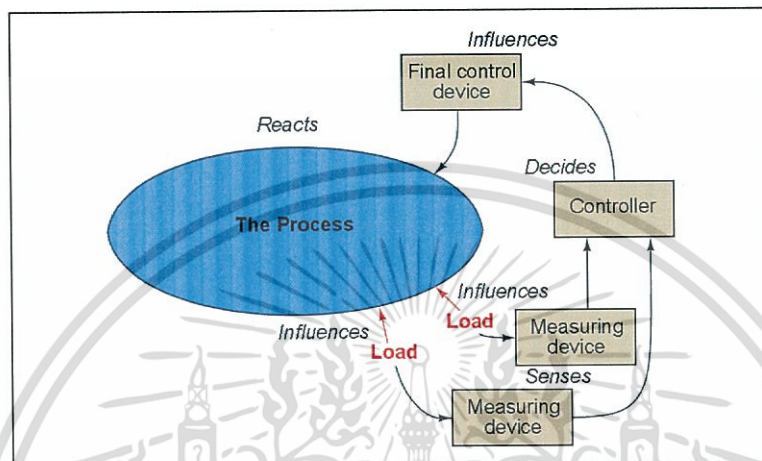
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบจาก 100 °C เป็น 200 °C ไปแล้วแต่ตัวเครื่องมือวัดหรือเครื่องมือวัดอุณหภูมิยังค่อย ๆ อ่านค่าได้ขึ้นไปจนกระทั่งเท่ากับค่าจริงนั้นต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน คือเกิดเวลาล่าหลังขึ้น หรือหากระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่อย ๆ ยิ่งมีปัญหาเพราะว่าเครื่องมือวัดต้องไล่ตามวัดค่าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและไม่สามารถไล่ทันด้วย ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยการนำระบบควบคุมเข้ามาช่วยจากไดอะแกรมจะสังเกตว่า กระบวนการที่ต้องการจะควบคุมถูกแบ่งส่วนออกโดยมีการนำเอาตัวแปรของกระบวนการที่ยังเปลี่ยนแปลงอยู่ที่เรียกชื่อว่าตัวแปรสื่อกลางหรือตัวแปรลำดับมาเป็นตัวแปรสำหรับการควบคุมของการควบคุมส่วนใน (Inner Control Loop) ตัวควบคุมในการควบคุมส่วนในมีชื่อเรียกว่าตัวควบคุมลำดับสองหรือหรือตัวควบคุมรองจะประมวลโดยใช้เซตพ้อยซึ่งเป็นเอาท์พุทของตัวควบคุมลำดับแรกหรือตัวควบคุมหลัก ตัวควบคุมลำดับแรกจะวัดค่าตัวแปรควบคุมที่ถือว่าเป็นผลจากระบบควบคุมแบบคาดเคลื่อนที่เรียกว่าตัวแปรหลักหรือตัวแปรสุดท้ายแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าเซตพ้อย การตัดตอนกระบวนการออกเป็นสองส่วน (กระบวนการหลักและกระบวนการรอง) จะทำให้กระบวนการล่าหลังในกระบวนการรวมถูกตัดตอนออกเป็นสองส่วนไปด้วยซึ่งจะเป็นผลให้การควบคุมทำได้ง่ายขึ้น เหมือนหนึ่งเป็นการลดขนาดของเวลาล่าหลังนั่นเอง โดยเวลาล่าหลังแต่ละตัวจะถูกประมวลผลไปพร้อม ๆ กัน ทำให้ เวลาล่าหลังมีผลกระทบต่อควบคุมลดลงไปด้วยการควบคุมแบบคาดเคลื่อนจึงเหมาะที่จะใช้การควบคุม กระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้า หรือกระบวนการที่มีค่าคงที่ของเวลามาก ๆ เช่น การควบคุมอุณหภูมิกระบวนการที่กล่าวถึงนี้เมื่อมีค่าความคาดเคลื่อนหรือค่าเบี่ยงเบนเกิดขึ้นแล้วก็มักจะ เป็นอยู่นานและแม้แต่สภาพ สิ่งรบกวนที่ผ่านเข้ามาบรรจบกับกระบวนการก็ต้องอาศัยระยะเวลาานพอสมควรจึงจะแสดงผลออกมาให้ระบบควบคุมทราบและจัดการแก้ไข ผลของการแก้ไขก็เช่นกัน จำเป็นต้องรอเวลาอยู่ระยะหนึ่งจึงจะเห็นผล กระบวนการที่มีลักษณะดังกล่าวมักจะเป็น กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนหรือการควบคุมอุณหภูมิของ กระบวนการที่มีมวล (Mass) หรือความจุความร้อน (Heat Capacity) สูง

2.3.3.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed forward control) จะต่างกับการควบคุมแบบป้อนกลับคือการควบคุมแบบป้อนกลับนั้นจะเป็นการควบคุมแบบเชิงรับ คือเมื่อมีการรบกวนใดๆที่มีผลกระทบต่อกระบวนการแล้วทำให้กระบวนการเปลี่ยนแปลงแล้วระบบควบคุมจึงรับรู้ความเปลี่ยนแปลงการรบกวนนั้น ส่วนการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจะเป็นการควบคุมแบบเชิงรุก คือจะเฝ้ามองการ

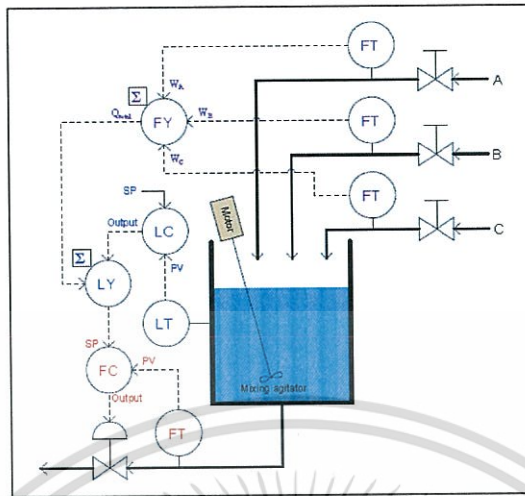
รบกวนใดๆที่มีผลกระทบต่อกระบวนการและจะชดเชยการรบกวนนั้นๆก่อนที่จะมีผลต่อความเปลี่ยนแปลงกระบวนการไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า นั้นโดยมาแล้วจะนิยมใช้งานร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับ ยกตัวอย่างการควบคุมระดับน้ำในรูปที่ 2.18 ในการควบคุมนี้จะเป็นการใช้ตัวควบคุมแบบคาคแคต ร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า จะใช้เครื่องวัดระดับน้ำ (LT) และตัวควบคุมระดับน้ำ (LC) เป็นตัวป้อนกลับ และใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (FT) และป้อนไปข้างหน้าโดยผ่านตัวรวม (LY) ก่อนที่จะไปเป็นค่าคาคแคตเซ็ทพอยของตัวควบคุมอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าร่วมกับการควบคุมแบบคาดเคลื่อน

2.4 อุณหพลศาสตร์

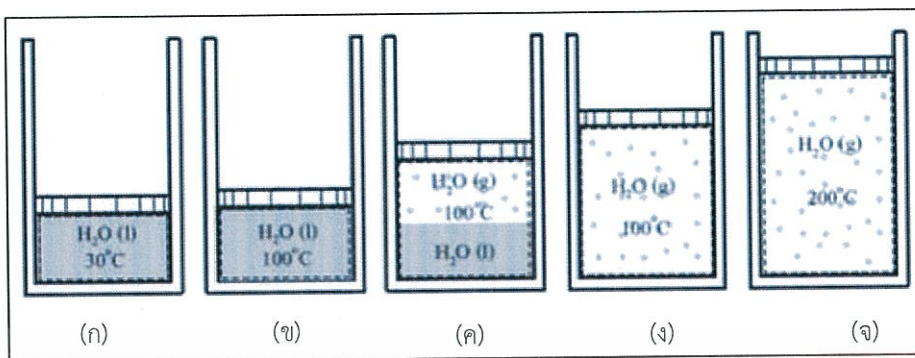
2.4.1 สารบริสุทธิ์

สารบริสุทธิ์หมายถึงสารที่มีเนื้อสารเดียวกัน (สูตรทางเคมีเหมือนกัน) องค์ประกอบทางเคมีของสารนั้นคงที่เสมอ ทั้งก่อนและหลังเปลี่ยนแปลงสถานะของสารถ้าสารบริสุทธิ์อยู่ในสถานะสมดุลมากกว่าหนึ่งสถานะ “องค์ประกอบทางเคมีของสารจะเหมือนกันทุกสถานะ” และ “ปริมาณของธาตุในสารจะอยู่ในอัตราเดียวกันทุกสถานะ” เช่น ของผสมระหว่างน้ำกับน้ำแข็งก็ถือว่าเป็นสารบริสุทธิ์เพราะมีองค์ประกอบทางเคมีเพียงอย่างเดียวคือ H_2O

2.4.2 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์

พิจารณาน้ำที่เป็นของเหลวบรรจุอยู่ในกระบอกสูบและลูกสูบดังที่แสดงในรูปที่ 2.19 สมมติว่าลูกสูบนี้น้ำหนักที่เบามากและลูกสูบสามารถที่จะเคลื่อนไหวยได้อย่างอิสระ ความดันภายนอกเท่ากับ ความดันบรรยากาศ (P_0) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 101.3kPa ดังนั้นเพื่อรักษาสมดุลระหว่างความดันของน้ำภายในกระบอกสูบกับความดันภายนอก ความดันของน้ำจึงต้องมีค่าเท่ากับ 101.3kPa และมีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลาหรืออีกนัยหนึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการไอโซบาริกที่ 101.3kPa ในทางตรงกันข้ามปริมาตรของน้ำที่อยู่ในกระบอกสูบสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากลูกสูบสามารถเคลื่อนไหวย่างอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

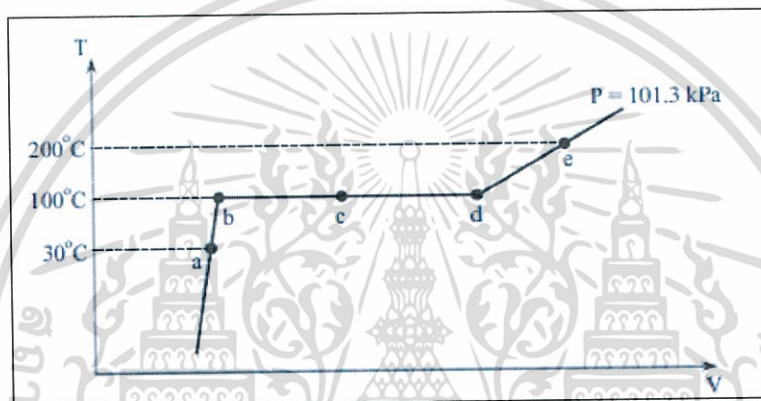


รูปที่ 2.19 น้ำภายในกระบอกสุบที่เปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นไอภายใต้กระบวนการไอโซบาริก

ในเบื้องต้นให้น้ำที่เป็นของเหลวในรูปที่ 2.19(ก) มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30°C จะสังเกตเห็นว่าน้ำที่เป็นของเหลวในลักษณะนี้ยังคงสถานะเป็นของเหลวถึงแม้ว่าจะได้รับความร้อนเพิ่มหรือคายความร้อนออกจะเรียกภาวะของของเหลวในลักษณะนี้ว่า “ของเหลวอัดตัว” หรือ “ของเหลวเย็นยิ่ง” (Compressed water หรือ Subcooled water) เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำที่อุณหภูมิ 30°C ไปเรื่อยๆ จะพบว่าอุณหภูมิของน้ำค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อน้ำมีอุณหภูมิที่ 100°C จะพบว่าถ้าให้ความร้อนแก่น้ำเพิ่มขึ้นไปมากกว่านี้อีกเพียงเล็กน้อยน้ำบางส่วนก็จะเริ่มเปลี่ยนกลายเป็นไอน้ำดังนั้นจะเรียกภาวะของเหลวที่เมื่อได้รับความร้อนอีกเพียงเล็กน้อยก็จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำว่า “ของเหลวอิ่มตัว” (Saturated water) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.19(ข) ต่อจากนั้นเมื่อน้ำได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจะพบว่าน้ำส่วนที่เป็นของเหลวก็จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำมากขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่อุณหภูมียังคงอยู่ที่ 100°C จนกระทั่งน้ำที่เป็นของเหลวหมดสุดท้ายเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำจนหมดไอน้ำที่ได้ก็ยังคงมีอุณหภูมิที่ 100°C แต่ถ้าให้ไอน้ำดังกล่าวคายความร้อนออกเพียงเล็กน้อยก็จะปรากฏของเหลวซึ่งเกิดจากการควบแน่นของไอน้ำขึ้นทันทีจะเรียกภาวะของแก๊สหรือไอน้ำว่า “ไออิ่มตัว” (Saturated steam) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.19(ง) จากนั้นไอน้ำอิ่มตัวในรูปที่ 2.19(ง) ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจะพบว่าไอน้ำจะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้นเกิน 100°C ไปเรื่อยๆ ไอน้ำดังกล่าวเมื่อคายความร้อนออกหรือได้รับความร้อนเพิ่มก็ยังคงเป็นสถานะเป็นไอเหมือนเดิมจะเรียกภาวะของแก๊สหรือไอในลักษณะนี้ว่า “ไอร้อนยวดยิ่ง” (Superheated steam) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.19(จ) หากย้อนกลับไปดูรูปที่รูปที่ 2.19(ค) จะพบว่าน้ำอยู่ระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวอิ่มตัวกลายเป็นไออิ่มตัวดังนั้นน้ำในรูปที่ 2.19(ค) นี้จึงอยู่ในสถานะที่เป็นของผสมระหว่างของเหลวอิ่มตัวในรูปที่ 2.19(ข) กับไออิ่มตัวในรูปที่ 2.19(ง) จะเรียกภาวะของของผสมในลักษณะนี้ว่า “ของผสมระหว่างของเหลวและไออิ่มตัว” (Saturated liquid-vapor mixture) หรือ “ของผสมสองสถานะ” (two-phase mixture) อนึ่งในขณะที่น้ำอยู่ในภาวะของเหลวอิ่มตัวของผสมสองสถานะหรือไออิ่มตัวนั้นจะนิยามคำว่า “คุณภาพสารสองสถานะ” (quality หรือ x) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมวลเฉพาะสถานะที่เป็นไอน้ำต่อมวลทั้งหมดดังสมการที่ (2.9)

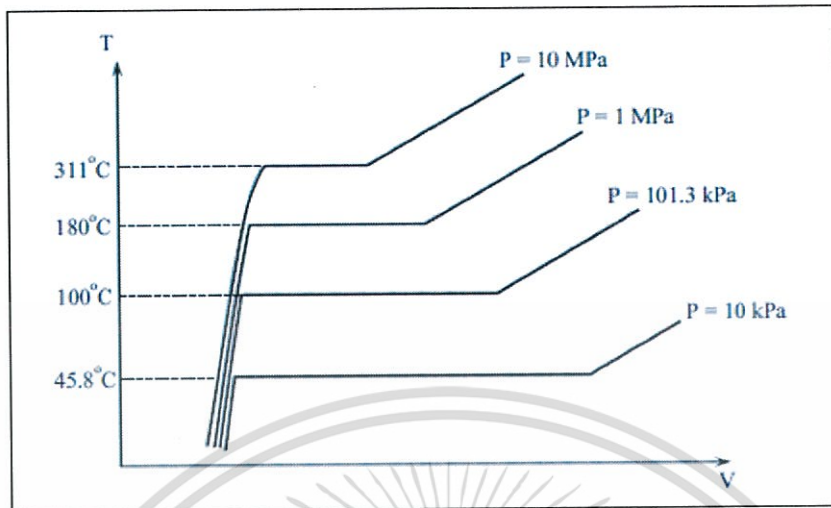
$$X = \frac{m_{\text{vap}}}{m_{\text{total}}} \quad (2.9)$$

โดยที่ m_{vap} และ m_{total} คือมวลเฉพาะสถานะไอและมวลทั้งหมดตามลำดับหนึ่งคุณภาพสารสองสถานะนั้นเป็นสมบัติอินเทนซีฟและคุณภาพสารสองสถานะจะไม่นิยามในภาวะของเหลวอัดตัวและไอร้อนยวดยิ่งหากนำภาวะที่เกิดขึ้นทั้งหมดในรูปที่ 2.19 ไปวาดเป็นแผนภาพโดยกำหนดให้แกนนอนเป็นปริมาณของน้ำในกระบอกสูบและแกนตั้งเป็นอุณหภูมิของน้ำแผนภาพดังกล่าวมีชื่อว่า แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตร (T-V diagram) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.20



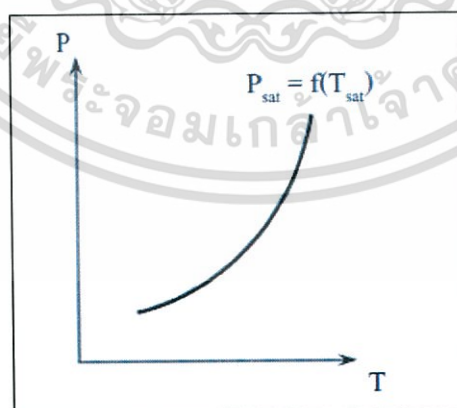
รูปที่ 2.20 แผนภาพอุณหภูมิปริมาตรแสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นไอ

จะเห็นว่าปริมาตรของน้ำจากจุด a ซึ่งเป็นของเหลวอัดตัวไปยังจุด b ซึ่งเป็นของเหลวอัดตัวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากของเหลวเป็นสถานะที่จัดอยู่ในประเภทสารอัดไม่ได้ (incompressible substance) นั่นคือปริมาตรจำเพาะหรือความหนาแน่นจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากยกเว้นในกรณีที่กระบวนการอัดที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันสูงมากๆ จากนั้นถ้าสังเกตปริมาตรของน้ำจากจุด b ซึ่งเป็นของเหลวอัดตัวไปยังจุด c ซึ่งเป็นของผสมสองสถานะไปจนถึงจุด d ซึ่งเป็นไอน้ำอัดตัว จะพบว่าปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากไอน้ำซึ่งมีสถานะเป็นแก๊สได้ปรากฏตัวขึ้นและมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่อุณหภูมียังคงมีค่าคงที่ที่ 100°C หลังจากนั้นปริมาตรของไอน้ำภายหลังจากจุด d ซึ่งเป็นไออัดตัวไปยังจุด e ซึ่งเป็นไอร้อนยวดยิ่งยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่อุณหภูมิขยับเพิ่มขึ้นจาก 100°C ไปเรื่อยๆ จนถึง 200°C จะเห็นว่ากระบวนการที่กล่าวถึงมาตั้งแต่ต้นนั้นเป็นกระบวนการไอโซบาริกที่ 101.3 kPa หากกระบวนการทั้งหมดได้กระทำซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนความดันจาก 101.3 kPa ไปเป็นค่าอื่นสิ่งที่เกิดขึ้นคือแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรแสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นไอ ที่ความดันคงที่ค่าต่างๆ

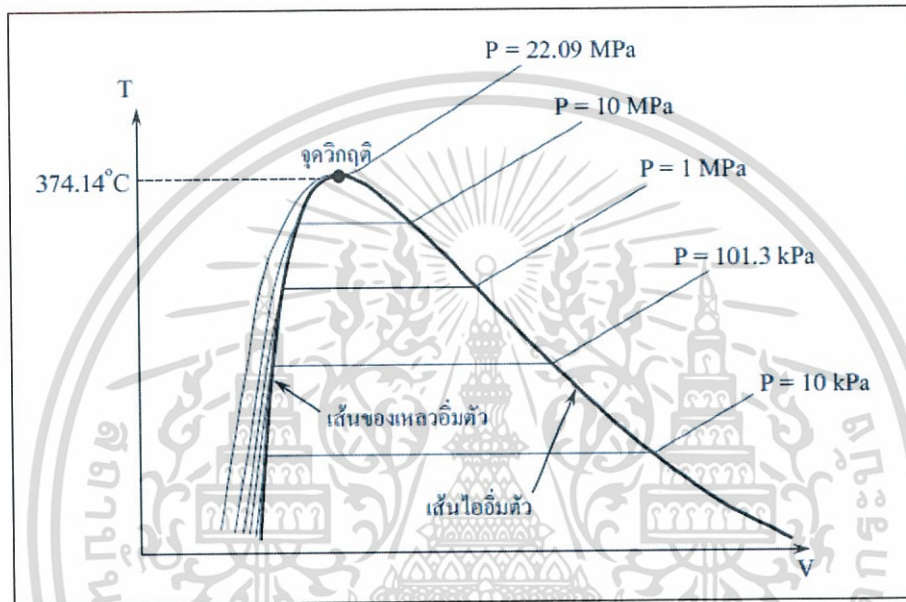
จุดที่น่าสังเกตคืออุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจะมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อความดันเปลี่ยนไป จะเรียกอุณหภูมิในขณะที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอว่าอุณหภูมิอิ่มตัว (saturation temperature หรือ T_{sat}) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ความดันค่าหนึ่งซึ่งจะเรียกว่าความดันอิ่มตัว (saturation pressure หรือ P_{sat}) จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าความดันอิ่มตัวและอุณหภูมิอิ่มตัวจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ในทางคณิตศาสตร์ อาจจะกล่าวว่าความดันอิ่มตัวเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอิ่มตัวดังที่แสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิ่มตัวและอุณหภูมิอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

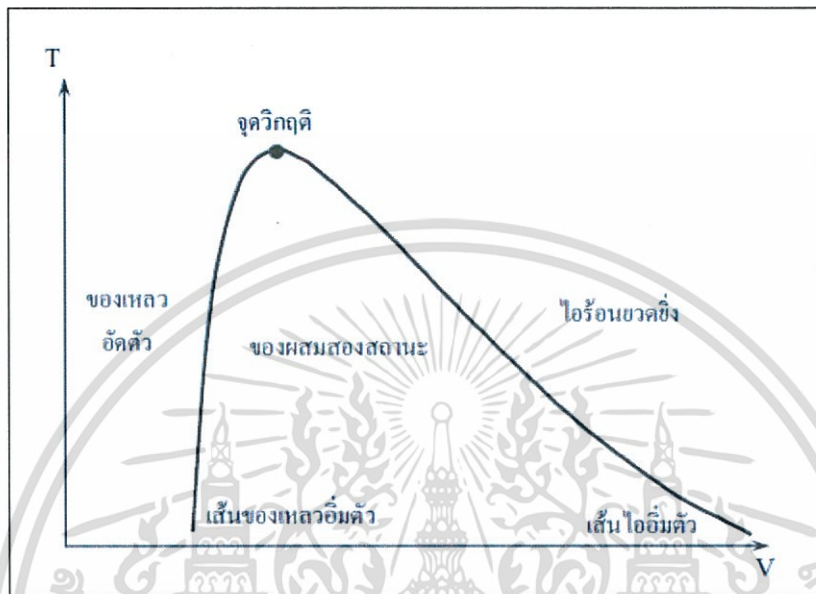
จากแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.22 หากนำภาวะของเหลวอิ่มตัวของน้ำที่ค่าความดันต่างๆ กันมา เชื่อมต่อกัน และนำภาวะไออิ่มตัวของน้ำที่ค่าความดันต่างๆ กันมาเชื่อมต่อกัน สิ่งที่น่าประจักษ์ขึ้นคือเส้นที่ เชื่อมต่อระหว่างภาวะของเหลวอิ่มตัวซึ่งจะมีชื่อว่าเส้นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid line) และเส้น ที่เชื่อมต่อระหว่างภาวะไออิ่มตัวซึ่งจะมีชื่อว่าเส้นไออิ่มตัว(saturated vapor line) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรแสดงเส้นของเหลวอิ่มตัว เส้นไออิ่มตัว และจุดวิกฤต

จุดที่เส้นของเหลวอิ่มตัวและเส้นไออิ่มตัวตัดกันจะเรียกว่าจุดวิกฤต (critical point) ซึ่งจะเป็นจุด ที่ภาวะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัวกลายเป็นภาวะเดียวกัน อุณหภูมิ ความดัน และปริมาตรจำเพาะที่จุด วิกฤตจะมีชื่อว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature หรือ T_c) ความดันวิกฤต (critical pressure หรือ P_c) และปริมาตรวิกฤต (critical volume หรือ V_c) ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสามสำหรับน้ำจะมีค่าเท่ากับ 374.14°C 22.09 MPa และ $0.003155\text{ m}^3/\text{kg}$ ตามลำดับ ในกรณีที่น้ำผ่านกระบวนการไอโซบาริกที่มีค่า ความดันเกินกว่าค่าความดันวิกฤตจะพบว่าของผสมสองสถานะในรูปที่ 2.19(ค) จะไม่ปรากฏขึ้นเนื่องจาก ความดันที่สูงมากดังกล่าวจะอัดสารให้อยู่ในสถานะเพียงสถานะเดียว สารดังกล่าวจะไม่อยู่ในสถานะที่เป็น ของเหลวหรือไอ แต่จะเรียก สถานะนั้นว่าของไหลเหนือวิกฤต (supercritical fluid) ในทางเทอร์โม ไดนามิกส์นิยมจะนำแผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรที่แสดงในรูปที่ 2.23 มาเขียนใหม่ โดยแสดงเฉพาะเส้น

ของเหลวอิ่มตัวและเส้นไออิ่มตัวซึ่งเมื่อนำมาต่อกันจะปรากฏเป็นเส้นโค้งประฆังคว่ำที่แบ่งพื้นที่ออกเป็น ส่วนต่างๆ ที่แสดงถึงภาวะต่างๆ ของสารดังที่แสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรแสดงเส้นโค้งระฆังคว่ำที่แบ่งพื้นที่ออกเป็นภาวะต่างๆ ของสาร

โดยทั่วไปแล้ว จะใช้ตัวห้อย f เพื่อแทนสมบัติที่ภาวะของเหลวอิ่มตัว และจะใช้ตัวห้อย g เพื่อแทนสมบัติที่ภาวะไออิ่มตัว นอกจากนี้สมบัติในส่วนที่เป็นของผสมสองสถานะนั้น จะเป็นการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักระหว่างของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว ตัวอย่างเช่นหากว่าต้องการจะหาปริมาณจำเพาะของของผสมสองสถานะซึ่งเกิดจากการผสมกันระหว่างของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว ในเบื้องต้นจะหาปริมาณของของผสมซึ่งเกิดจากผลรวมของปริมาณในส่วนสถานะที่เป็นของเหลวและสถานะที่เป็นแก๊สดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$V_{\text{total}} = V_{\text{lig}} + V_{\text{vap}} \quad (2.8)$$

$$V_{\text{total}} = m_{\text{lig}}v_f + m_{\text{vap}}v_g \quad (2.9)$$

ดังนั้นปริมาณจำเพาะของของผสมสองสถานะจึงเขียนได้ดังสมการที่ (2.10)

$$V_{\text{total}} = \frac{V_{\text{total}}}{m_{\text{total}}} = \frac{m_{\text{lig}}v_f}{m_{\text{total}}} + \frac{m_{\text{vap}}v_g}{m_{\text{total}}} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ นิยามที่จะละทิ้งตัวห้อย total ซึ่งแสดงถึงค่าเฉลี่ยของของผสมสองสถานะ และจากนิยามของคุณภาพสารสองสถานะในสมการที่ (2.8) จะเขียนได้ว่า

$$V = (1 - x)v_f + xv_g \quad (2.11)$$

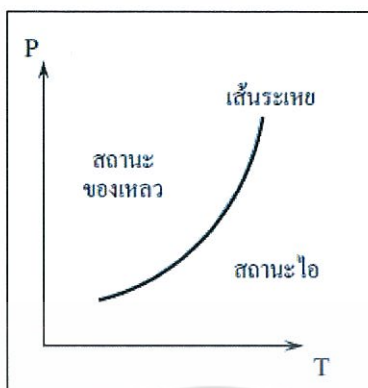
จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของปริมาตรจำเพาะของของผสมสองสถานะเป็นการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักระหว่างปริมาตรจำเพาะของของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัวโดยนำค่าคุณภาพสารสองสถานะมาเป็นสัดส่วนในการเฉลี่ยนั่นเอง สมการที่ (2.11) สามารถเขียนใหม่ในรูปของ V_{fg} ซึ่งนิยามโดยสมการที่ (2.12)

$$V_{fg} = v_f - v_g \quad (2.12)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.12) จะสามารถนำมาเขียนใหม่ได้อยู่ในสมการที่ (2.13)

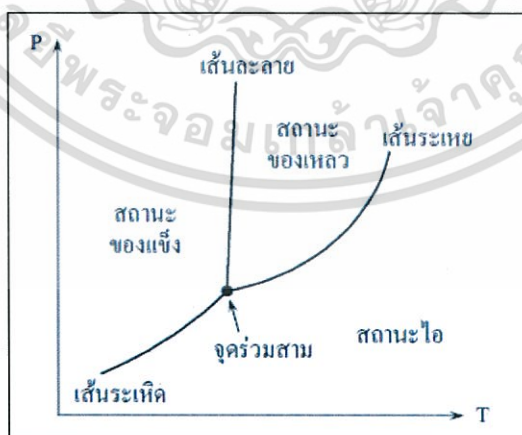
$$V = v_f - xV_{fg} \quad (2.13)$$

กลับมาพิจารณารูปที่ 2.21 อีกครั้ง จะพบว่าเกิดจากการกำหนดให้อุณหภูมิและความดันเป็นแกนนอนและแกนตั้งตามลำดับ ส่วนเส้นที่ปรากฏในแผนภาพเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิ่มตัวและความดันอิ่มตัว ดังนั้นหากสารใดก็ตามที่มีอุณหภูมิและความดันตกอยู่บนเส้นความสัมพันธ์ดังกล่าว ก็ จะทราบว่าสารดังกล่าวอยู่ในภาวะของเหลวอิ่มตัว ของผสมสองสถานะ หรือไออิ่มตัวอย่างใดอย่างหนึ่ง หรืออีกนัยหนึ่งสารนั้นกำลังจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ดังนั้นเส้นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิ่มตัวและความดันอิ่มตัวจะมีอีกชื่อหนึ่งว่าเส้นระเหย (vaporization line) ในกรณีที่สารที่มีอุณหภูมิและความดันตกอยู่ในบริเวณทางด้านซ้ายของเส้นระเหย ก็แสดงว่าสารนั้นอยู่ในภาวะของเหลวอัดตัว (หรือเรียกสั้นๆ ว่าอยู่ในสถานะของเหลว) ในทางตรงกันข้ามหากสารที่มีอุณหภูมิและความดันตกอยู่ในบริเวณทางด้านขวาของเส้นระเหย ก็แสดงว่าสารนั้นอยู่ในภาวะไอร้อนยวดยิ่ง (หรือเรียกสั้นๆ ว่าอยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ) ดังนั้นการวาดแผนภาพที่ใช้อุณหภูมิและความดันเป็นแกนนอนและแกนตั้งตามลำดับจึงเป็นแผนภาพที่แสดงสถานะต่างๆ ของสารหรือมีอีกชื่อหนึ่งว่าแผนภาพสถานะ (phase diagram) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.25 แผนภาพสถานะที่แสดงถึงเส้นระเหยและบริเวณที่เป็นสถานะของเหลวและไอ

แผนภาพสถานะสามารถที่จะยืดขยายต่อไปยังค่าความดันและอุณหภูมิอื่นๆ ที่กว้างขึ้นและครอบคลุมในส่วนที่สารจะปรากฏตัวอยู่ในสถานะของแข็ง ทั้งนี้ นอกเหนือจากเส้นระเหยแล้ว จะปรากฏเส้นที่แสดงการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลวหรือมีอีกชื่อหนึ่งว่าเส้นละลาย (fusion line) และเส้นที่แสดงการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอหรือมีอีกชื่อหนึ่งว่าเส้นระเหิด (sublimation line) ทั้งนี้เส้นละลาย เส้นระเหยและเส้นระเหิดจะมาบรรจบกันที่จุดเดียวเรียกว่าจุดรวมสาม (triple point) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.26 ดังนั้นที่อุณหภูมิและความดันเท่ากับจุดรวมสาม สารจะสามารถปรากฏได้ทั้งสถานะของแข็งของเหลวและไอพร้อมๆ กันในภาวะสมดุล อนึ่งจะสังเกตได้ว่าความดันที่จุดรวมสามจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าสารจะปรากฏอยู่ในภาวะของเหลวหรือไม่ ถ้าความดันของสารที่ปรากฏมีค่าน้อยกว่าความดันที่จุดรวมสาม สารดังกล่าวจะไม่มีทางปรากฏอยู่ในสถานะของเหลวได้เลยไม่ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปเช่นไร



รูปที่ 2.26 แผนภาพสถานะที่แสดงถึงเส้นละลาย เส้นระเหย เส้นระเหิด และจุดรวมสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 สมบัติอิสระของสารบริสุทธิ์

สำหรับสารบริสุทธิ์ที่เป็นสารอัดตัวได้เชิงเดียวนั้น อาจกล่าวได้ว่าจำนวนสมบัติที่ต้องการเพื่อกำหนดภาวะของสารบริสุทธิ์คือสองค่า สมบัติทั้งสองค่านั้นต้องเป็นสมบัติอินเทนซิฟและต้องเป็นอิสระต่อกัน ข้อความดังกล่าวมานั้นในบางครั้งจะถูกเรียกว่ากฎของภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ (two properties rule) ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่ภาวะถูกกำหนดเป็นที่เรียบบร้อย สมบัติอื่นๆ ที่เหลืออยู่ย่อมต้องเท่ากันตัวอย่างเช่น หากมีข้อมูลว่าน้ำมีอุณหภูมิ 30°C และความดัน 101.3 kPa อยากทราบว่าภาวะของน้ำดังกล่าวถูกกำหนดแล้วหรือไม่ จะพบว่าน้ำที่ภาวะดังกล่าวเป็นของเหลวอัดตัว จึงทำให้อุณหภูมิและความดันต่างก็เป็นสมบัติอินเทนซิฟและเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นภาวะของน้ำที่มีอุณหภูมิ 30°C และความดัน 101.3 kPa จึงได้ถูกกำหนดแล้ว หากพิจารณาตัวอย่างถัดไปเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกล่าวคือ ถ้าน้ำมีอุณหภูมิ 100°C และความดัน 101.3 kPa อยากทราบว่าภาวะของน้ำดังกล่าวถูกกำหนดแล้วหรือไม่ จะเห็นว่าข้อมูลที่ทราบมีความคล้ายคลึงกับตัวอย่างแรกนั่นคือทราบทั้งอุณหภูมิและความดัน แต่จะไม่สามารถระบุได้ว่าน้ำดังกล่าวเป็นของเหลวอิ่มตัว ของผสมสองสถานะ หรือไออิ่มตัว นั่นก็หมายความว่าภาวะของน้ำยังไม่ถูกกำหนด ทั้งนี้เนื่องจากที่ภาวะอิ่มตัวหรือภาวะที่สารกำลังเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิและความดันของสารจะเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัวและความดันอิ่มตัวตามลำดับและทั้งสองค่านี้ไม่เป็นอิสระต่อกันตามรูปที่ 2.22 ดังนั้นการระบุอุณหภูมิและความดันที่ภาวะอิ่มตัวจึงเทียบเท่ากับการระบุสมบัติเพียงค่าเดียว เป็นผลให้สถานะยังไม่ถูกกำหนดเพราะต้องการจำนวนสมบัติที่เป็นอิสระต่อกันจำนวนสองค่า ดังนั้นหากต้องการที่จะกำหนดภาวะของสารที่ภาวะอิ่มตัว จึงต้องระบุสมบัติเพิ่มอีกหนึ่งค่านอกเหนือจากอุณหภูมิและความดันเพื่อกำหนดภาวะดังกล่าว อนึ่งที่ภาวะอิ่มตัวนั้นในทางปฏิบัตินิยมที่จะระบุอุณหภูมิหรือความดันเพียงค่าเดียวค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น ตัวอย่างเช่นน้ำที่อุณหภูมิ 100°C (โดยไม่ต้องบอกกว่าความดัน 101.3 kPa) คุณภาพสารสองสถานะร้อยละ 100 จะทำให้ทราบได้ทันทีว่าน้ำดังกล่าวอยู่ในภาวะไอน้ำอิ่มตัว

2.4.4 ตารางสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดเกี่ยวกับภาวะต่างๆ ของสารบริสุทธิ์ที่ภาวะสมดุล เพื่อให้การหาสมบัติและภาวะต่างๆ ทำได้โดยสะดวก จึงมีการระบุสมบัติต่างๆ ของสารบริสุทธิ์ให้อยู่ในรูปแบบของตารางที่มีชื่อว่าตารางสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ (table of thermodynamic properties) ตารางสมบัติ

เทอร์โมไดนามิกส์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยตารางสองประเภทคือ ตารางสำหรับภาวะอิ่มตัว (saturated table) ซึ่งจะใช้สำหรับหาสมบัติของของเหลวอิ่มตัว ของผสมสองสถานะ และไออิ่มตัว และ ตารางสำหรับภาวะไอร้อนยวดยิ่ง (superheat vapor table) ซึ่งจะใช้สำหรับหาสมบัติของไอร้อนยวดยิ่ง ตัวอย่างที่จะนำมาแสดงต่อไปนี้เป็นตารางสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ ซึ่งประกอบด้วยตารางสำหรับ น้ำภาวะอิ่มตัวและตารางสำหรับน้ำภาวะไอร้อนยวดยิ่งดังที่แสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของตารางสำหรับน้ำภาวะอิ่มตัว (Borgnakke and Sonntag, 2009: 702)

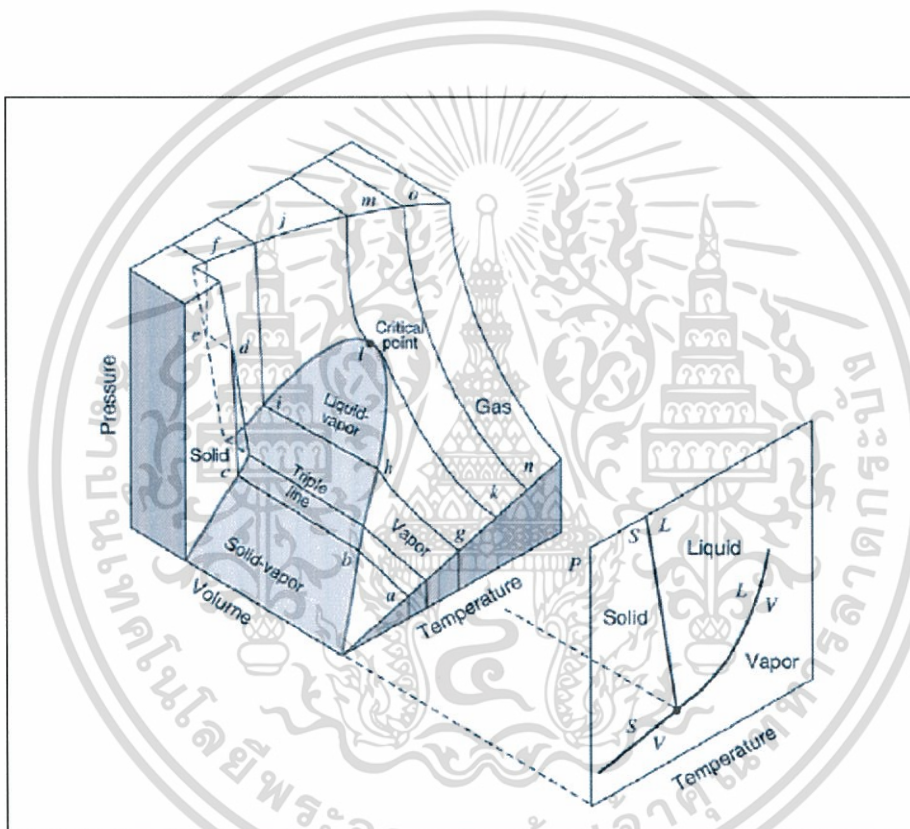
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (kPa)	ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)		พลังงานภายใน (kJ/kg)	
		ของเหลวอิ่มตัว	ไออิ่มตัว	ของเหลวอิ่มตัว	ไออิ่มตัว
80	47.39	0.001029	3.40715	333.84	2482.21
85	57.83	0.001032	2.82757	355.82	2488.40
90	70.14	0.001036	2.36056	376.82	2494.52
95	84.55	0.001040	1.98186	397.86	2500.56
100	101.3	0.001044	1.67290	418.91	2506.50
105	120.8	0.001047	1.41936	440.00	2512.34

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของตารางสำหรับน้ำภาวะไอร้อนยวดยิ่ง (Borgnakke and Sonntag, 2009: 710)

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)	พลังงานภายใน (kJ/kg)	เอนทัลปี (kJ/kg)	เอนโทรปี (kJ/kg)
Sat.	1.69400	2506.06	2675.46	7.3593
150	1.93636	2582.75	2776.38	7.6133
200	2.17226	2658.05	2875.27	7.8342
250	2.40604	2733.73	2974.33	8.0332
300	2.63876	2810.41	3074.28	8.2157
400	3.10263	2967.85	3278.11	8.5434

2.4.5 พื้นผิวเทอร์โมไดนามิกส์

เมื่อนำความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิมาวาดเป็นแผนภาพในสามมิติโดยให้ปริมาตรและอุณหภูมิเป็นแกนนอน ส่วนความดันเป็นแกนตั้ง สิ่งที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิซึ่งแสดงออกมาในรูปของพื้นผิวในสามมิติ แผนภาพดังกล่าวมีชื่อว่าพื้นผิวความดัน-ปริมาตร-อุณหภูมิ (pressure-volume-temperature surface) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 พื้นผิวความดัน-ปริมาตร-อุณหภูมิ (Borgnakke and Sonntag, 2009: 59)

2.4.6 พฤติกรรมระหว่างความดันปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊สที่มีความหนาแน่นปานกลางถึงต่ำ

สำหรับแก๊สที่มีความหนาแน่นต่ำ จะพบว่าระยะห่างระหว่างโมเลกุลของแก๊สจะมีค่ามาก จึงทำให้โมเลกุลของแก๊สแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน และทำให้ผลของพลังงานระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้ เมื่อเกิดสถานการณ์ดังกล่าวขึ้น จะถือว่าแก๊สนั้นมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ideal gas) ซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นไปตามสมการแก๊สอุดมคติ (ideal gas equation) หรือในบางครั้งจะถูกเรียกว่ากฎของแก๊ส (ideal gas law) ดังสมการที่ (2.16)

$$PV = nRT \text{ หรือ } Pv = RT \quad (2.14)$$

โดยที่ R คือค่าคงตัวสากลของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3145 kJ/kmol-K ค่า R นั้นไม่ขึ้นกับชนิดของสารนั้นคือจะสามารถใช้ได้กับแก๊สทุกชนิดที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติ หากต้องการจะเขียนสมการที่ (2.14) ใหม่ให้อยู่ในรูปที่ใช้มวลเป็นฐาน จะต้องเปลี่ยนจำนวนโมลให้เป็นมวลโดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.15)

$$n = \frac{m}{M} \quad (2.15)$$

โดยที่ M คือมวลโมเลกุล (molecular mass) ของสาร เมื่อคุณมวลโมเลกุลเข้าไปทั้งสองข้างของสมการที่ (2.14) จะสามารถเขียนสมการแก๊สอุดมคติในรูปที่ใช้มวลเป็นฐานได้ดังสมการที่ (2.16)

$$PV = m\bar{R}T \text{ หรือ } Pv = \bar{R}T \quad (2.16)$$

ในที่นี้ \bar{R} คือค่าคงตัวของแก๊ส (gas constant) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแก๊สแต่ละชนิด

2.4.7 แฟกเตอร์สภาพอัดได้

สมการแก๊สอุดมคติจะมีความแม่นยำได้นั้นจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าแก๊สจะต้องมีความหนาแน่นต่ำหรือมีปริมาตรจำเพาะที่สูง เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.16) จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อแก๊สมีอุณหภูมิสูงหรือความดันต่ำอย่างไรก็ตามผลที่ได้ดังกล่าวเป็นเพียงแค่นำแนวโน้มเชิงคุณภาพเท่านั้นแต่ยังไม่ทราบในเชิงปริมาณว่าแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูงถึงเท่าไรหรือความดันต่ำถึงเท่าไร จึงจะเพียงพอต่อการนำสมการแก๊สอุดมคติไปใช้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นแฟกเตอร์สภาพอัดได้ (compressibility factor หรือ Z) จึงเป็นตัวแปรที่ใช้แสดงว่าแก๊สมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติมากเพียงใด สมการของแฟกเตอร์สภาพอัดได้สามารถที่จะเขียนได้ดังสมการ

$$Z = \frac{Pv}{\bar{R}T} \quad (2.17)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าค่า Z มีค่าลู่เข้าสู่ 1 จะทำให้แก๊สมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติมากยิ่งขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากค่า Z มีค่าที่แตกต่างจาก 1 มากๆ ก็แสดงว่าแก๊สมีพฤติกรรมแตกต่างจากแก๊สอุดมคติซึ่งจะเรียกแก๊สในลักษณะนี้ว่าแก๊สจริง (real gas)

โดยทั่วไปแล้วค่าแฟกเตอร์สภาพอัดได้จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ชนิดของสาร อุณหภูมิและความดันของสาร ณ ขณะนั้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อได้มีการนำเอาความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์สภาพอัดได้กับอุณหภูมิและความดันของสารหลายๆชนิดมาวาดลงบนแผนภูมิก็จะพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาเขียนลงบนแผนภูมิอันเดียวได้โดยไม่ขึ้นกับชนิดของสารอีกต่อไป แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นจะต้องมีการปรับค่าอุณหภูมิและความดันที่อยู่ในแผนภูมิเสียใหม่โดยใช้อุณหภูมิและความดันสัมพัทธ์แทนที่จะใช้อุณหภูมิและความดันจริงของสารโดยตรง ค่าอุณหภูมิและความดันสัมพัทธ์ดังกล่าวนี้มีชื่อว่า อุณหภูมิรีดิวซ์ (reduced temperature หรือ T_r) และความดันรีดิวซ์ (reduced pressure หรือ P_r) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.18)

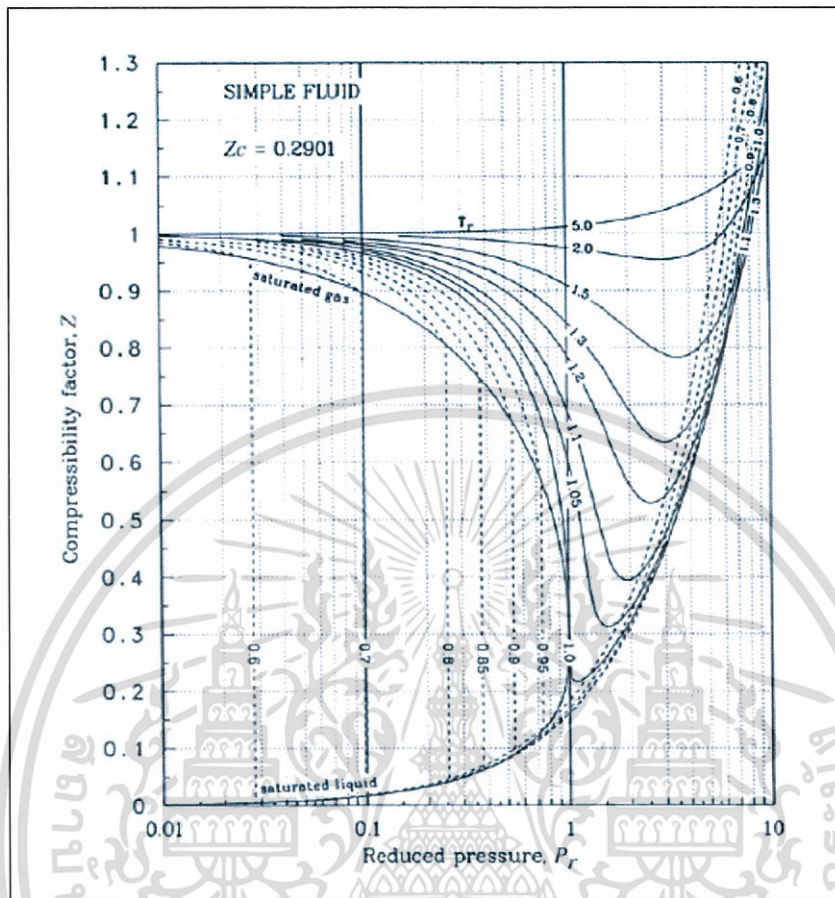
$$T_r = \frac{T}{T_c} \text{ และ } P_r = \frac{P}{P_c} \quad (2.18)$$

จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและความดันรีดิวซ์นั้นแท้จริงแล้วคือสัดส่วนที่แสดงว่าอุณหภูมิหรือความดันจริงของสารเป็นกี่เท่าของอุณหภูมิวิกฤตหรือความดันวิกฤตของสารนั้นๆ ตามลำดับ แผนภูมิที่ใช้หาค่าแฟกเตอร์สภาพอัดได้ที่สามารถใช้ได้โดยไม่ขึ้นต่อชนิดของสารนั้นมีชื่อว่าแผนภูมิแฟกเตอร์สภาพอัดได้ทั่วไป (compressibility-factor generalized chart) ดังที่แสดงอยู่ในรูป 2.26

จากแผนภูมิแฟกเตอร์สภาพอัดได้ทั่วไปจะสังเกตเห็นได้ว่ามีเส้นของเหลวและไออิมตัวปรากฏอยู่ในแผนภูมิ ดังนั้นจึงสามารถใช้แผนภูมิได้กับสารที่มีภาวะเป็นของเหลวอัดตัว ของเหลวอิมตัว ของผสมสองสถานะ ไออิมตัว รวมทั้งไอร่อนยวดยิ่งด้วยเช่นกัน นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าในส่วนของไอร่อนยวดยิ่งนั้นเมื่อ P_r มีค่าน้อยมากๆ ($P_r \ll 1$) ค่า Z จะมีค่าลู่เข้าสู่ 1 หรือแก๊สมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติ โดยที่เงื่อนไขเกิดขึ้นกับค่า T_r ทุกๆ ค่า จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อลองทดสอบดูว่าอากาศที่ปรากฏอยู่ที่ความดันบรรยากาศนั้นมีพฤติกรรมเช่นไร จะพบว่าหากนำความดันบรรยากาศเท่ากับ 101.3 kPa ไปหารด้วยความดันเคลื่อนจากการใช้แผนภูมิก็จะมากขึ้นด้วยเช่นกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่ใกล้กับเส้นไออิมตัวอันดับที่สองแผนภูมิดังกล่าวเกิดจากการนำข้อมูลของสารที่มีสูตรโมเลกุลอย่างง่ายหลายๆ ชนิดมารวมกันแล้วทำการลากเส้นแนวโน้มซึ่งเกิดจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลดังกล่าว ดังนั้นค่าที่ได้จากเส้นแนวโน้มนั้นยังคงมี

ความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากข้อมูลจริงอยู่เช่นกัน ดังนั้นหากต้องการได้ข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำมากที่สุดควรใช้ข้อมูลจากตารางสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์หรือแผนภูมิที่ใช้เฉพาะสำหรับสารที่ต้องการจะศึกษา วิฤตของอากาศ (อนึ่งอากาศเป็นของผสม ดังนั้นความดันวิฤตของอากาศจึงต้องหาจากทฤษฎีของผสม ซึ่งจะไม่นำมากล่าวในที่นี้) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.95 MPa จะพบว่าค่า P_r มีค่าเพียง 0.026 ดังนั้นอากาศที่ผ่านกระบวนการโดยทั่วไปที่มีความดันใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศตัวอย่างเช่นการปรับอากาศภายในอาคารการระบายความร้อนด้วยอากาศโดยหม้อน้ำ การใช้อากาศร้อนในอุตสาหกรรมต่างๆ จึงมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติและสามารถนำสมการแก๊สอุดมคติไปใช้ได้โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำมากโดยไม่ต้องคำนึงถึงว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงใด

อนึ่งสิ่งที่ต้องระวังในการใช้แผนภูมิแฟกเตอร์สภาพอัดได้ทั่วไปดังรูปที่ 2.28 คือ อันดับแรกแผนภูมิดังกล่าวจะใช้ได้ดีกับสารที่มีสูตรโมเลกุลไม่ซับซ้อนมาก หากว่าสารที่ใช้มีโมเลกุลที่ซับซ้อนมากขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนจากการใช้แผนภูมิจึงจะมากขึ้นด้วยเช่นกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่ใกล้กับเส้นไออิมิตัว อันดับที่สองแผนภูมิดังกล่าวเกิดจากการนำข้อมูลของสารที่มีสูตรโมเลกุลอย่างง่ายหลายๆ ชนิดมารวมกันแล้วทำการลากเส้นแนวโน้มซึ่งเกิดจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลดังกล่าว ดังนั้นค่าที่ได้จากเส้นแนวโน้มนั้นยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากข้อมูลจริงอยู่เช่นกัน ดังนั้นหากต้องการได้ข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำมากที่สุดควรใช้ข้อมูลจากตารางสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์หรือแผนภูมิที่ใช้เฉพาะสำหรับสารที่ต้องการจะศึกษา



รูปที่ 2.28 แผนภูมิแฟกเตอร์สภาพอัดได้ทั่วไป (Borgnakke and Sonntag, 2009: 755)

2.4.8 สมการภาวะ

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะ และอุณหภูมิจะมีชื่อโดยทั่วไปว่าสมการภาวะ (equation of state) สมการแก๊สอุดมคติก็เป็นตัวอย่างหนึ่งของสมการภาวะซึ่งอยู่ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดนั่นคือความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะ และอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ปรากฏอยู่ในสมการเพียงค่าเดียว นั่นคือค่าคงตัวของแก๊ส ถึงกระนั้นสมการแก๊สอุดมคดียังมีข้อจำกัดภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาสมการภาวะที่ครอบคลุมในส่วนอื่นๆ ผลที่ได้คือสมการจะมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น จำนวนค่าคงตัวที่ปรากฏในสมการก็จะเพิ่มขึ้น สมการภาวะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับซ้อนกว่าสมการแก๊สอุดมคติขึ้นหนึ่งก็คือสมการประกอบไปด้วยค่าคงตัวทั้งหมดสองค่า สมการดังกล่าวมีชื่อเรียกว่าสมการแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals equation) ดังสมการที่ (2.19)

$$Pv = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \quad (2.19)$$

จะเห็นได้ว่าค่าคงตัวสองค่าที่กล่าวคือค่า a และ b ที่ปรากฏอยู่ในสมการนั่นเอง สมการภาวะที่น่าสนใจอีกสมการหนึ่งได้แก่สมการลี-เคสเลอร์ (Lee-Kesler equation) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าคงตัวทั้งหมด 12 ค่าเป็นผลให้สมการดังกล่าวจึงมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นในเวลาที่จะนำไปใช้งานจึงมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการคำนวณหรือนำสมการดังกล่าวไปวาดเป็นแผนภูมิ ผลที่ได้ก็คือแผนภูมิแฟกเตอร์สภาพอัดได้ทั่วไป ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.29นั่นเอง นอกจากนี้ตารางสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.4.4 ก็เป็นตัวอย่างหนึ่งของสมการภาวะเช่นกัน เพียงแต่สมการภาวะที่ใช้สำหรับสร้างตารางสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์นั้นมีความซับซ้อนอย่างมากเนื่องจากมีค่าคงตัวถึงประมาณ 40 ค่าหรือมากกว่า ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน จึงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณค่าต่างๆ และนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะ และอุณหภูมิในรูปของตารางแทนการนำเสนอด้วยสมการ

2.4.9 งานและความร้อน

2.4.9.1 นิยามของงาน

ค่านิยามของงาน (work หรือ W) คือแรง F ที่กระทำที่วัตถุให้เคลื่อนที่เป็นระยะทาง x ในทิศทางเดียวกับแรง หรือสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.20)

$$\delta W = F dx \quad \text{หรือ} \quad W = \int_1^2 F dx \quad (2.20)$$

หน่วยของงานตามหน่วยเอสไอคือจูล (Joule หรือ J) ตามนิยามของงานจะได้ว่า $1 J = 1 N \cdot m$ ในขณะที่งานจำเพาะ (specific work หรือ w) คืองานต่อหนึ่งหน่วยมวล ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็นสมการที่ (2.21)

$$w = \frac{W}{m} \quad (2.21)$$

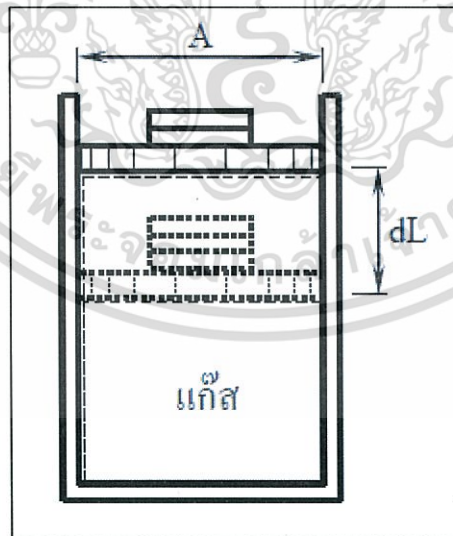
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่หน่วยของงานจำเพาะคือ J/kg ซึ่งเทียบเท่ากับ $(\text{m/s})^2$ ในการทำงานนั้นบางครั้งอาจจะต้องคำนึงระยะเวลาในระหว่างการทำงานด้วย ดังนั้นจึงมีการนิยาม คำว่ากำลัง (Power หรือ \dot{W}) ซึ่งก็คืออัตราการทำงานต่อหน่วยเวลาและจะเขียนเป็นสมการได้เป็นสมการที่ (2.22)

$$\dot{w} = \frac{\delta W}{\delta t} \text{ หรือ } W = \int_1^2 \dot{w} \delta t \quad (2.22)$$

2.4.9.2 งานที่กระทำจากขอบเขตเคลื่อนที่ของสารอัดตัวได้เชิงเดี่ยว

ในกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้นงานที่เกิดขึ้นมักจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบภายในกระบอกสูบที่มีสารสถานะเป็นแก๊สอยู่ภายใน ตัวอย่างเช่นลูกสูบภายในเครื่องยนต์ลูกสูบภายในเครื่องอัด เป็นต้น ดังนั้นงานในลักษณะดังที่กล่าวมานั้นจะมีชื่อว่างานขอบเขตเคลื่อนที่ (moving boundary work) ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะงานขอบเขตเคลื่อนที่ของสารอัดตัวได้เชิงเดี่ยวภายใต้กระบวนการกึ่งสมดุลเท่านั้น เมื่อพิจารณาแก๊สที่บรรจุอยู่ในกระบอกสูบที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A และเมื่อค่อยๆ นำน้ำหนักรอกทีละก้อน จะเห็นได้ว่าลูกสูบเคลื่อนที่เป็นระยะทาง dL ดังที่แสดงในรูปที่ 2.29

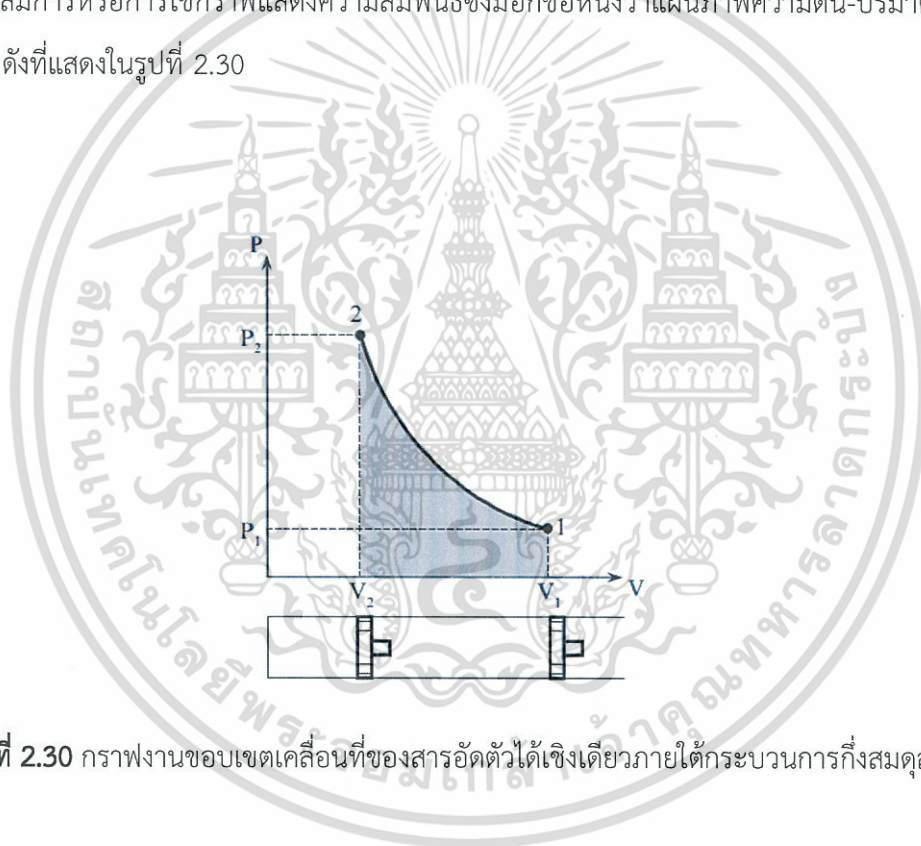


รูปที่ 2.29 งานขอบเขตเคลื่อนที่ของสารอัดตัวได้เชิงเดี่ยวภายใต้กระบวนการกึ่งสมดุล

ถ้าความดันของแก๊สมีค่าเท่ากับ P ดังนั้นหากกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการกึ่งสมดุล แรงที่กระทำต่อลูกสูบโดยแก๊สจะมีค่าเท่ากับ PA และเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.20) จะได้ว่า $\delta W = PA \, dL$ และเนื่องจาก $A \, dL$ มีค่าเท่ากับ dV ดังนั้น

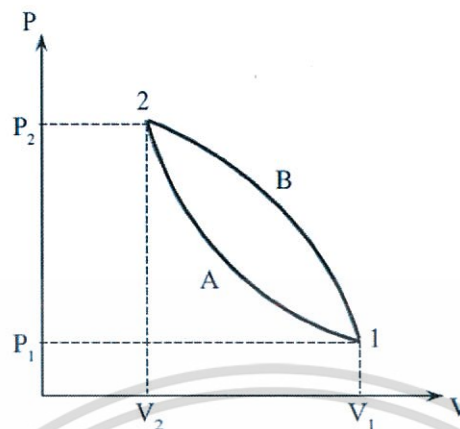
$$\delta W = P \, dV \quad (2.23)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.23) จะสามารถนำมาใช้ได้ก็ต่อเมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่าง P และ V แล้ว จากนั้นหาค่าอินทิเกรต (integration) เพื่อให้ได้ค่างาน ความสัมพันธ์ระหว่าง P และ V นั้นอาจจะแสดงโดยใช้สมการหรือการใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ซึ่งมีอีกชื่อหนึ่งว่าแผนภาพความดัน-ปริมาตร (P-V diagram) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 กราฟงานขอบเขตเคลื่อนที่ของสารอัดตัวได้เชิงเดียวภายใต้กระบวนการกึ่งสมดุล

จะเห็นได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความดันและปริมาตรที่แสดงเป็นพื้นที่แรเงาในรูปที่ 2.31 นั่นก็คือการหาค่าปริพันธ์ของทางฝั่งขวาของสมการที่ (2.20) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็คืองานจากภาวะที่ 1 ไปยังภาวะที่ 2 จะสังเกตได้ว่าหากวิถีจากภาวะที่ 1 ไปยังภาวะที่ 2 เปลี่ยนไปจากวิถี A ไปเป็นวิถี B ดังที่แสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 งานจากกระบวนการที่มีภาวะตั้งต้นและภาวะสุดท้ายเดียวกันแต่วิถีที่ต่างกัน

ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้ $1W2$ มีค่าแตกต่างกันเนื่องจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความดันและปริมาตรของวิถี A และวิถี B แตกต่างกันถึงแม้ว่าภาวะเริ่มต้นและภาวะสุดท้ายจะเป็นภาวะเดียวกันก็ตาม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่างานไม่ได้เป็นฟังก์ชันเพียงแต่เฉพาะภาวะเริ่มต้นและภาวะสุดท้ายเพียงอย่างเดียว แต่งานเป็นฟังก์ชันของวิถีด้วย ด้วยเหตุนี้ในทางคณิตศาสตร์จึงกล่าวได้ว่างานจึงเป็นฟังก์ชันวิถี (path function) และเป็นอนุพันธ์ไม่แม่นยำ (inexact differential) ตัวแปรใดๆ ที่เป็นอนุพันธ์ไม่แม่นยำนั้นเมื่ออยู่ในรูปของอนุพันธ์ จะใช้สัญลักษณ์ δ ใส่ไว้ข้างหน้าตัวแปรดังกล่าว ดังนั้นหากจะเขียนอนุพันธ์ของงานจะต้องเขียนว่า δW ดังที่แสดงในสมการที่ (2.24) และ (2.25) ถ้าหากทราบความสัมพันธ์ระหว่าง P และ V หรืออีกนัยหนึ่งก็คือทราบวิถีของกระบวนการ จะทำให้สามารถหาค่า $1W2$ ได้ กระบวนการโพลีโทรปิก (polytropicกระบวนการ) เป็นกระบวนการหนึ่งที่เราพบเห็นโดยทั่วไปซึ่งจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง P และ V ให้อยู่ในรูปดังสมการที่ (2.24)

$$PV^n = \text{ค่าคงตัว} \quad (2.24)$$

โดยที่ n คือดัชนีชี้กำลังของกระบวนการโพลีโทรปิก โดยที่ค่า n สามารถเป็นค่าใดๆ ก็ได้ สำหรับกระบวนการอัดตัวและขยายตัวของแก๊สโดยทั่วไปนั้นค่า n จะมีค่าเป็นบวก นั้นหมายความว่าความดันและปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือถ้าปริมาตรลดลงความดันจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ถ้าปริมาตรเพิ่มขึ้นความดันจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นและสามัญสำนึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปนอกจากนี้กระบวนการโพลีโทรปิกยังมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการลู่เข้าเชิงกำกับ (asymptotical approach) กล่าวคือหากต้องการให้ $V \rightarrow 0$, $P \rightarrow \infty$ และในขณะเดียวกัน $P \rightarrow 0$, $V \rightarrow \infty$ เมื่อนำสมการที่ (2.26) ไปแทนในสมการที่ (2.24) แล้วทำการหาค่าปริพันธ์จะได้ว่าสมการที่ (2.25)

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dv = \int_1^2 \frac{C}{v^n} dv = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} \text{ โดยที่ } n \neq 1 \quad (2.25)$$

สมการที่ (2.27) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ $n \neq 1$ ส่วนในกรณีที่ $n = 1$ นั้นจะได้ดังสมการที่ (2.26)

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dv = \int_1^2 \frac{C}{v} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \text{ โดยที่ } n = 1 \quad (2.26)$$

2.4.9.3 นิยามของความร้อน

ความร้อน (heat หรือ Q) เป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่ส่งผ่านขอบเขตระบบอันเป็นผลมาจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมรอบ โดยที่ความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ จากนิยามดังกล่าวจะเห็นได้ว่าระบบจะไม่ถือครองความร้อนภายในตัวระบบเองแต่จะถือครองพลังงานที่เรียกว่าพลังงานภายในแทน ส่วนความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการถ่ายเทข้ามผ่านขอบเขตระบบเท่านั้น ดังนั้นความร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นชั่วขณะ ตัวอย่างเช่นหากระบบคือก้อนเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อมรอบ ความร้อนก็จะถ่ายเทออกจากก้อนเหล็กสู่สิ่งแวดล้อม หากทิ้งก้อนเหล็กไว้เป็นระยะเวลาอันนานจนกระทั่งอุณหภูมิของเหล็กมีค่าลดลงจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อมเมื่อถึงจุดนี้การถ่ายเทความร้อนก็จะเป็นศูนย์เพราะผลต่างของอุณหภูมิมิค่าเป็นศูนย์เช่นกัน โดยหลักแล้วความร้อนที่เข้าสู่ระบบจะมีเครื่องหมายเป็นบวก ในทางกลับกันความร้อนที่ออกจากระบบจะมีเครื่องหมายเป็นลบ กระบวนการที่มีการถ่ายเทความร้อนเป็นศูนย์จะมีชื่อเรียกว่ากระบวนการแอดิแบติก (adiabatic กระบวนการ) หน่วยของความร้อนตามหน่วยเอสไอคือจูล (Joule หรือ J) เช่นเดียวกับงาน นอกจากนี้ยังมีหน่วยของความร้อนที่ยังคงมีการใช้อยู่ในบางประเทศหรือในสาขาโภชนาการได้แก่ แคลอรี (calorie หรือ cal) โดยที่ $1 \text{ cal} = 4.18681 \text{ J}$ ในขณะที่ยุทธศาสตร์การถ่ายเทความร้อนจำเพาะ (specific heat transfer หรือ q) คือการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวล ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ (2.27)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = \frac{Q}{m} \quad (2.27)$$

โดยที่หน่วยของการถ่ายเทความร้อนจำเพาะจะเป็นหน่วยเดียวกับงานจำเพาะคือ J/kg

อัตราการถ่ายเทความร้อน (heat transfer rate หรือ \dot{Q}) ซึ่งก็คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยเวลาและจะเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.28)

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{\delta t} \text{ หรือ } Q = \int_1^2 \dot{Q} \delta t \quad (2.28)$$

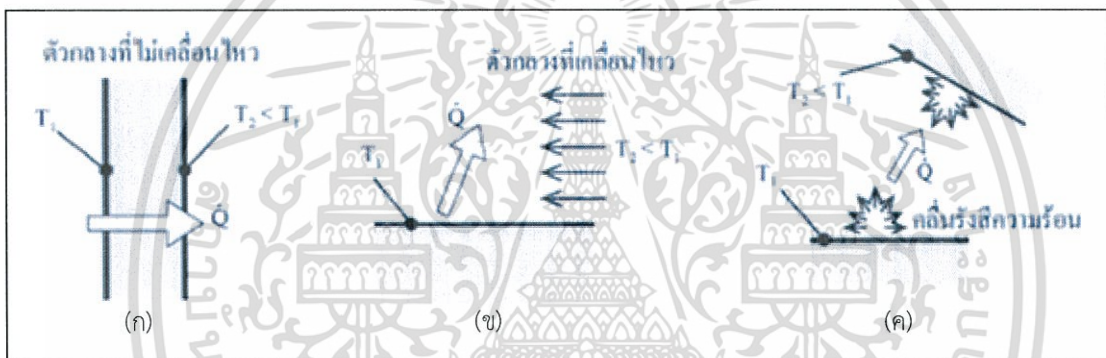
2.4.9.4 การถ่ายเทความร้อน

ในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์นั้นจะสนใจการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนภาวะของสารเพื่อให้สอดคล้องกับกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ทั้งนี้ทั้งนั้นจะไม่ได้เข้าไปศึกษาว่ากลไกการเกิดความร้อนที่เกิดจากผลต่างของอุณหภูมินั้นเป็นอย่างไร ซึ่งการศึกษาในส่วนดังกล่าวนี้จะอยู่ในวิชาการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) วิธีการถ่ายเทความร้อนในเบื้องต้นซึ่งประกอบไปด้วยสามวิธีดังต่อไปนี้

การนำความร้อน (conduction) เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของโมเลกุลของสารหรือตัวกลาง (medium) ต่อไปยังโมเลกุลข้างๆ พลังงานในระดับโมเลกุลนั้นส่วนหนึ่งประกอบจากการเคลื่อนไหวในรูปแบบต่างๆ เช่นการเคลื่อนที่การหมุน การสั่นสะเทือน เป็นต้น ดังนั้นโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าหรือที่มีอุณหภูมิสูงกว่าก็จะส่งต่อไปยังโมเลกุลที่มีระดับพลังงานต่ำกว่าหรือที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าต่อไปเรื่อยๆ โดยที่หากพิจารณาในระดับมหภาคแล้วตัวกลางจะไม่มี การเคลื่อนไหว ดังนั้นลักษณะของการส่งผ่านพลังงานจึงมีลักษณะที่เรียกว่าเป็นการแพร่ (diffusion) ของพลังงานผ่านตัวกลางที่ไม่เคลื่อนไหวดังที่แสดงในรูปที่ 2.32(ก)

การพาความร้อน (convection) เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อตัวกลางเกิดการเคลื่อนไหวในระดับมหภาคขึ้น ดังนั้นตัวกลางของการพาความร้อนจึงเป็นจำพวกของไหล เมื่อของไหลเคลื่อนไหวไปตามการเคลื่อนที่ในระดับมหภาคของตัวกลาง ของไหลดังกล่าวก็จะทำให้เกิดการขนส่งพลังงานหรือการพาความร้อนเกิดขึ้น หากตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเคลื่อนไหวหรือไหลผ่านพื้นผิวมีอุณหภูมิที่สูงกว่าก็จะเกิดการพาความร้อนออกไปจากพื้นผิวดังที่แสดงในรูปที่ 2.32(ข)

การแผ่รังสีความร้อน (radiation) เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของคลื่นรังสีความร้อนออกมาจากวัตถุไปรอบๆ โดยที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางมาเกี่ยวข้องโดยทั่วไปแล้ววัตถุทุกชนิดถ้ามีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสมบูรณ์ก็就会有การปล่อยคลื่นดังกล่าวอยู่ตลอดเวลา วัตถุที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่าก็จะสามารถปล่อยพลังงานในรูปคลื่นรังสีความร้อนดังกล่าวได้มากกว่า ดังนั้นหากมีวัตถุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิต่างกัน วัตถุทั้งสองก็จะแผ่รังสีความร้อนเข้าหากันแต่ท้ายที่สุดการถ่ายเทความร้อนรวมก็จะมีทิศทางจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังที่แสดงในรูปที่ 2.32(ค)

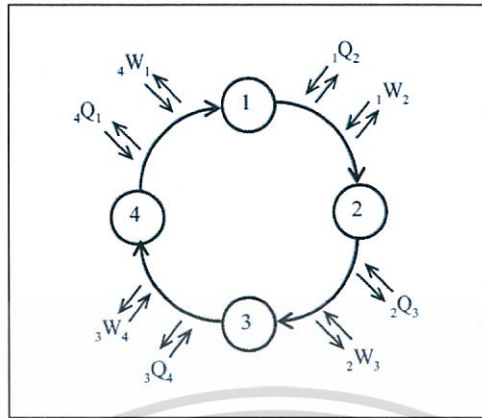


รูปที่ 2.32 วิธีการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ

2.4.10 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

2.4.10.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับมวลควบคุมภายใต้วัฏจักร

ในวัฏจักรประกอบไปด้วยสี่กระบวนการโดยที่ภาวะเริ่มต้นของระบบอยู่ที่ภาวะที่ 1 จากนั้นก็เปลี่ยนไปยังภาวะที่ 2, 3, 4 และกลับไปยังภาวะที่ 1 อีกครั้ง โดยที่ในแต่ละกระบวนการในการเปลี่ยนภาวะของระบบ จะมีงานและความร้อนถ่ายเทเข้าหรือออกจากระบบก็ได้ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.33 มวลควบคุมภายใต้วัฏจักรที่มีงานและความร้อนถ่ายเทผ่านขอบเขตระบบ

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับมวลควบคุมภายใต้วัฏจักรนั้นจะสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (2.29)

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (2.29)$$

ทั้งนี้ความหมายของเครื่องหมายปริพันธ์วงปิด (หรือ \oint) ก็คือผลรวมของตัวแปรที่ปรากฏอยู่ภายใต้เครื่องหมายปริพันธ์ทั้งหมดตลอดทั้งวัฏจักร ดังนั้นหากนำสมการที่ (2.31) ไปใช้กับวัฏจักรที่แสดงในรูปที่ 2.33 ผลที่ได้ดังสมการที่ (2.30)

$$\int_1^2 Q + \int_2^3 Q + \int_3^4 Q + \int_4^1 Q = \int_1^2 W + \int_2^3 W + \int_3^4 W + \int_4^1 W$$

$${}_1Q_2 + {}_2Q_3 + {}_3Q_4 + {}_4Q_1 = {}_1W_2 + {}_2W_3 + {}_3W_4 + {}_4W_1$$

$$\sum_{\text{cycle}} Q = \sum_{\text{cycle}} W \quad (2.30)$$

ดังนั้นจากผลที่ได้หากจะอธิบายกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับมวลควบคุมภายใต้วัฏจักรอย่างง่าย ๆ ก็คือผลรวมของความร้อนทั้งหมดตลอดวัฏจักรจะเท่ากับผลรวมของงานทั้งหมดตลอดวัฏจักรนั่นเอง

2.5 The International Association for the Properties of Water and Steam

The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) เป็นสมาคมที่ไม่แสวงหาผลกำไรระหว่างประเทศขององค์กรระดับชาติที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำและไอน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติกายภาพทางความร้อนและด้านอื่น ๆ ของไอน้ำที่อุณหภูมิสูง, น้ำและสารผสมน้ำที่มี ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้าพลังความร้อนและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ

2.5.1 คุณสมบัติลักษณะของ IAPWS-IF97

ในส่วนนี้จะให้ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างของการกำหนดอุตสาหกรรม IAPWS-IF97 รวมทั้งช่วงของความถูกต้องและทำให้รายจ่ายทั่วไปเกี่ยวกับคุณภาพของ IAPWS-IF97 เกี่ยวกับความถูกต้องและความสอดคล้องตามขอบเขตต่างๆ นอกจากนี้รายงานคุณสมบัติของน้ำและไอน้ำที่ได้นั้นไม่ได้เพียงแค่อ้างอิงกับการคำนวณโดยใช้ สมการพื้นฐานที่คำนวณจากค่าความดันและอุณหภูมิของไอน้ำเท่านั้นแต่จะต้องใช้ สมการแบ็ควาร์ดประกอบการคำนวณคุณสมบัติของน้ำและไอน้ำเข้าไปด้วย

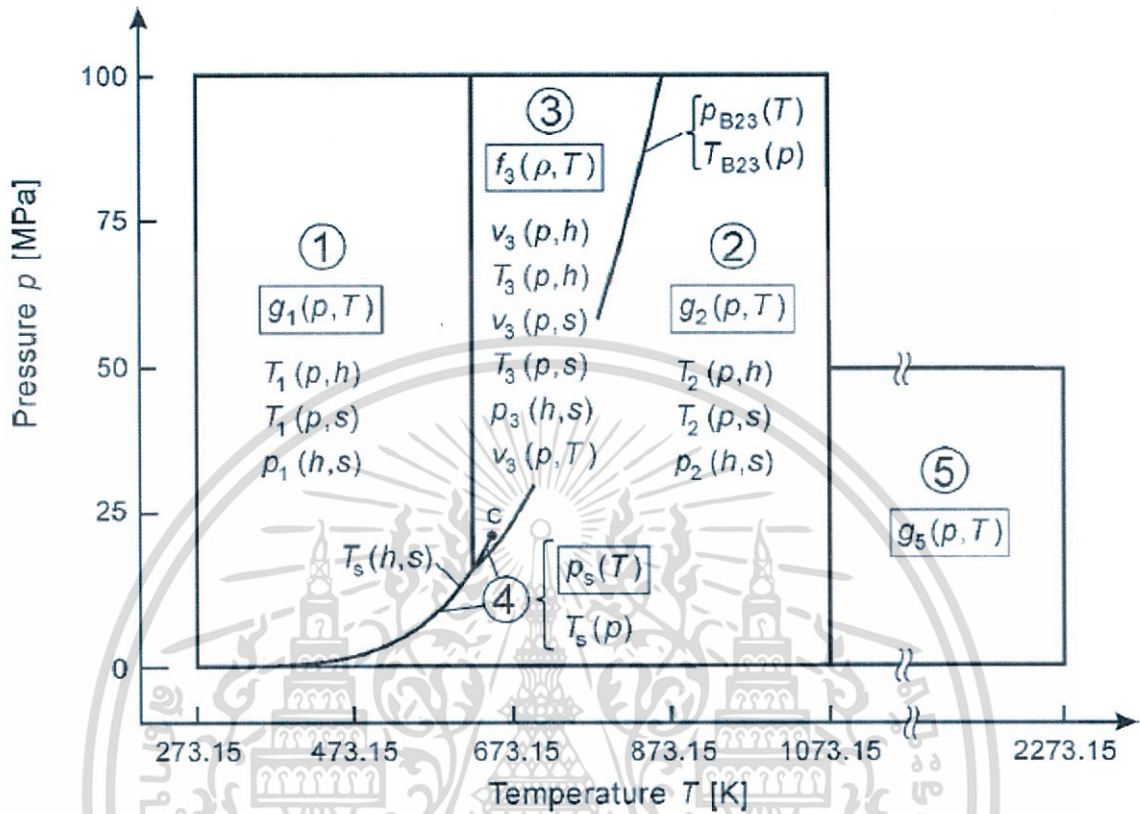
2.5.2 โครงสร้างของ IAPWS-IF97

IAPWS - 1997 ประกอบด้วยชุดของสมการสำหรับย่านของน้ำและไอน้ำภูมิภาคที่แตกต่างกันซึ่งครอบคลุมช่วงในช่วงต่อไปนี้

$$\begin{array}{ll} 273.15 \text{ K} \leq T \leq 1073.15 \text{ K} & 0 < p \leq 100 \text{ MPa} \\ 1073.15 \text{ K} < T \leq 2273.15 \text{ K} & 0 < p \leq 50 \text{ MPa} \end{array}$$

รูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นถึงห้าภูมิภาคส่วนของน้ำและไอน้ำซึ่งแบ่งช่วงของความถูกต้องของ IAPWS-IF97; สำหรับความหมายที่แท้จริงของ 5 ภูมิภาคส่วนนี้จะกล่าวในหัวข้อถัดไป ส่วนที่ 1 และ 2 จะครอบคลุมด้วยสมการพื้นฐานคือ ค่าพลังงานจำเพาะของจิบ (p, T) ในส่วนที่ 3 จะใช้สมการพื้นฐานคือ ค่าพลังงานจำเพาะของเอนทัลปี $f(p, T)$ และในส่วนที่ 4 ซึ่งเป็นของในสภาวะสองเฟส (ตรงกับเส้นโค้งความอิมิตัวใน p-T diagram) โดยสมการค่าแรงดันอิมิตัว $P_s(T)$ ในส่วนที่ 5 ซึ่งเป็นย่านที่มีอุณหภูมิสูง จะใช้พื้นฐานของสมการ $g(p, T)$ สมการเหล่านี้ห้าสมการแสดงในกล่องสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.34 ซึ่งจะเรียกสมการเหล่านี้ว่าสมการพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 ภูมิภาคส่วนต่างๆของน้ำและไอน้ำและสมการต่างๆของ IAPWS-IF97

2.5.3 สมการพื้นฐานของ IAPWS-IF97

รายละเอียดการใช้สมการพื้นฐานของ IAPWS-IF97แสดงในรูป 2.34 โดยกำหนดสมการเป็น 5 ภูมิภาคส่วนของโดยขอบเขตในรูปนี้สามารถนำมาใช้ในการคำนวณได้โดยตรงยกเว้นในช่วงเส้นแบ่งระหว่างภูมิภาคส่วนที่ 2 และภูมิภาคส่วนที่ 3 สมการใช้ในพื้นที่นี้จะเรียกว่า สมการย่าน B23

2.5.3.1 สมการช่วยสำหรับย่านของแรงดันและอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงของเส้นแบ่งระหว่างภูมิภาคส่วนที่ 2 และ 3 (สมการย่าน B23)

ในช่วงนี้จะให้หลักการของสมการกำลังสองของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันจะได้ว่าดังสมการที่ (2.31)

$$\frac{P_{B23}(T)}{p^*} = \pi(\theta) = n_1 + n_2\theta + n_3\theta^2 \quad (2.31)$$

ในทางกลับกันสมการที่ (2.31) จะสามารถเขียนในรูปของอุณหภูมิได้ดังนี้

$$\frac{T_{B23}(P)}{T^*} = \theta(\pi) = n_4 + [(\pi - n_5)/n_3]^{0.5} \quad (2.32)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 1 \text{ MPa}$ และ $T^* = 1 \text{ K}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_1 ถึง n_5 แสดงในตารางที่ 2.3 สมการที่ (2.31) และ (2.32) นี้จะสามารถครอบคลุมในย่านจาก อุณหภูมิ 623.15 K ที่ความดัน 16.5292 MPa ไปจนถึง อุณหภูมิ 863.15 K ที่ความดัน 100 MPa

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ $P_{B23}(T)$ และ $T_{B23}(P)$

i	n_i	i	n_i
1	$0.348\ 051\ 856\ 289\ 69 \times 10^3$	4	$0.572\ 544\ 598\ 627\ 46 \times 10^3$
2	$-0.116\ 718\ 598\ 799\ 75 \times 10^1$	5	$0.139\ 188\ 397\ 788\ 70 \times 10^2$
3	$0.101\ 929\ 700\ 393\ 26 \times 10^2$		

2.5.3.2 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 1

สมการพื้นฐานของพื้นที่นั้นที่มีสมการพื้นฐานคือสมการค่าพลังงานจำเพาะของจิบป์ (g) คือ $\gamma = \frac{g}{RT}$ จะได้ดังสมการที่ (2.33)

$$\frac{g_1(p,T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} (\tau - 1.222)^{J_i} \quad (2.33)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 16.53 \text{ MPa}$ และ $T^* = 1386 \text{ K}$; $R = 0.461\ 526 \text{ KJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_i และตัวยกกำลัง I_i และ J_i แสดงในตารางที่ 2.4

สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกทุกอย่างนั้นจะได้จากสมการนี้ทั้งหมดโดยการใช้ ความสัมพันธ์ต่างๆมากระทำกับสมการนี้โดยจะแสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6

ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการพื้นฐาน $g_1(p,T)$ ของสมการที่ (2.33)

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	0	-2	0.146 329 712 131 67	18	2	3	$-0.441 418 453 308 46 \times 10^{-5}$
2	0	-1	-0.845 481 871 691 14	19	2	17	$-0.726 949 962 975 94 \times 10^{-15}$
3	0	0	$-0.375 636 036 720 40 \times 10^1$	20	3	-4	$-0.316 796 448 450 54 \times 10^{-4}$
4	0	1	$0.338 551 691 683 85 \times 10^1$	21	3	0	$-0.282 707 979 853 12 \times 10^{-5}$
5	0	2	-0.957 919 633 878 72	22	3	6	$-0.852 051 281 201 03 \times 10^{-9}$
6	0	3	0.157 720 385 132 28	23	4	-5	$-0.224 252 819 080 00 \times 10^{-5}$
7	0	4	$-0.166 164 171 995 01 \times 10^{-1}$	24	4	-2	$-0.651 712 228 956 01 \times 10^{-6}$
8	0	5	$0.812 146 299 835 68 \times 10^{-3}$	25	4	10	$-0.143 417 299 379 24 \times 10^{-12}$
9	1	-9	$0.283 190 801 238 04 \times 10^{-3}$	26	5	-8	$-0.405 169 968 601 17 \times 10^{-6}$
10	1	-7	$-0.607 063 015 658 74 \times 10^{-3}$	27	8	-11	$-0.127 343 017 416 41 \times 10^{-8}$
11	1	-1	$-0.189 900 682 184 19 \times 10^{-1}$	28	8	-6	$-0.174 248 712 306 34 \times 10^{-9}$
12	1	0	$-0.325 297 487 705 05 \times 10^{-1}$	29	21	-29	$-0.687 621 312 955 31 \times 10^{-18}$
13	1	1	$-0.218 417 171 754 14 \times 10^{-1}$	30	23	-31	$0.144 783 078 285 21 \times 10^{-19}$
14	1	3	$-0.528 383 579 699 30 \times 10^{-4}$	31	29	-38	$0.263 357 816 627 95 \times 10^{-22}$
15	2	-3	$-0.471 843 210 732 67 \times 10^{-3}$	32	30	-39	$-0.119 476 226 400 71 \times 10^{-22}$
16	2	0	$-0.300 017 807 930 26 \times 10^{-3}$	33	31	-40	$0.182 280 945 814 04 \times 10^{-23}$
17	2	1	$0.476 613 939 069 87 \times 10^{-4}$	34	32	-41	$-0.935 370 872 924 58 \times 10^{-25}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสมการค่าพลังงานของจิบปี γ

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก	สมการความสัมพันธ์
Specific volume $v = \left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_T$	$v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} = \pi\gamma_\pi$
Specific enthalpy $h = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p$	$\frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau\gamma_\tau$
Specific internal energy $u = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p - p\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T$	$\frac{u(\pi, \tau)}{RT} = \tau\gamma_\tau - \gamma$
Specific entropy $s = -\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p$	$\frac{s(\pi, \tau)}{R} = \tau\gamma_\tau - \gamma$
Specific isobaric heat capacity $C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$	$\frac{C_p(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2\gamma_{\tau\tau}$
Specific isochoric heat capacity $C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$	$\frac{C_v(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2\gamma_{\tau\tau} + \frac{(\gamma_\pi - \tau\gamma_{\tau\tau})^2}{\gamma_{\pi\pi}}$
Speed of sound $w = v\left(-\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s\right)^{0.5}$	$\frac{w^2(\pi, \tau)}{RT} = \frac{\gamma_\pi^2}{\frac{(\gamma_\pi - \tau\gamma_{\tau\tau})^2}{\gamma_{\pi\pi}} - \gamma_{\pi\pi}}$
Isobaric cubic expansion coefficient $\alpha_v = v^{-1}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$	$\alpha_v(\pi, \tau)T = 1 - \frac{\pi\gamma_{\pi\tau}}{\gamma_\pi}$
Isothermal compressibility $K_T = -v^{-1}\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$	$K_T(\pi, \tau)p = -\frac{\pi\gamma_{\pi\tau}}{\gamma_\pi}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 สมการค่าพลังงานของจิบป์ γ อนุพันธ์ของสมการเมื่อใช้สมการที่ (2.33)

$\gamma = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} (\tau - 1.222)^{J_i}$	$\gamma_\tau = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} J_i (\tau - 1.222)^{J_i - 1}$
$\gamma_\pi = \sum_{i=1}^{34} -n_i I_i (7.1 - \pi)^{I_i - 1} (\tau - 1.222)^{J_i}$	$\gamma_{\tau\tau} = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} J_i (J_i - 1) (\tau - 1.222)^{J_i - 2}$
$\gamma_{\pi\pi} = \sum_{i=1}^{34} n_i I_i (I_i - 1) (7.1 - \pi)^{I_i - 2} (\tau - 1.222)^{J_i}$	$\gamma_{\pi\tau} = \sum_{i=1}^{34} -n_i I_i (7.1 - \pi)^{I_i - 1} J_i (\tau - 1.222)^{J_i - 1}$
$\gamma_\pi = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \pi}\right)_\tau, \gamma_{\pi\pi} = \left(\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \pi^2}\right)_\tau, \gamma_\tau = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi, \gamma_{\tau\tau} = \left(\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \tau^2}\right)_\pi, \gamma_{\pi\tau} = \left(\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \pi \partial \tau}\right)$	

ย่านที่สามารถใช้สมการที่ (2.35) นั้นจะต้องอยู่ภายใต้ภูมิภาคส่วนที่ 1 ของ IAPWS-IF97 กำหนดย่านของอุณหภูมิและแรงดันคือ

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 623.15 \text{ K} \text{ และ } P_s(T) \leq p \leq 100 \text{ MPa}$$

2.5.3.3 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 2

สมการพื้นฐานในภูมิภาคนี้นั้นจะใช้หลักการมาจากค่าพลังงานจำเพาะของจิบป์ (g) คือ $\gamma = g/(RT)$ และแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของก๊าซในอุดมคติ γ^o และ ส่วนที่เหลือคือ γ^r ดังนี้

$$\frac{g_2(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (2.34)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $R = 0.461526 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ เมื่อ γ^o และ γ^r นั้นคำนวณมาจากสมการที่ (2.35) และ (2.36)

สมการในส่วนของก๊าซในอุดมคติ γ^o ของสมการพื้นฐานในภูมิภาคส่วนที่ 2 $g_2(p, T)$ แสดงในสมการที่ (2.35)

$$\gamma^o(\pi, \tau) = \ln \pi + \sum_{i=1}^9 n_i^o \tau^{I_i^o} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 1 \text{ MPa}$ และ $T^* = 540 \text{ K}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_1^0 และ n_2^0 นั้นจะปรับเปลี่ยนตามค่าพลังงานจำเพาะภายในและค่าเอนโทรปีจำเพาะซึ่งจะคำนวณมาจากสมการที่ (2.36) ร่วมกับสมการที่ (2.37) ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของส่วนที่เป็นก๊าซอุดมคติ γ^0 ของสมการที่ (2.35)

i	J_i^0	n_i^0	i	J_i^0	n_i^0
1	0	$-0.969\ 276\ 865\ 002\ 17 \times 10^1$	6	-2	$0.142\ 408\ 191\ 714\ 44 \times 10^1$
2	1	$0.100\ 866\ 559\ 680\ 18 \times 10^2$	7	-1	$-0.438\ 395\ 113\ 194\ 50 \times 10^1$
3	-5	$-0.560\ 879\ 112\ 830\ 20 \times 10^{-2}$	8	2	$-0.284\ 086\ 324\ 607\ 72$
4	-4	$0.714\ 527\ 380\ 814\ 55 \times 10^{-1}$	9	3	$0.212\ 684\ 637\ 533\ 07 \times 10^{-1}$
5	-3	$-0.407\ 104\ 982\ 239\ 28$			

สมการในส่วนของก๊าซในอุดมคติ γ^r ของสมการ สมการพื้นฐานในภูมิภาคส่วนที่ 2 $g_2(p, T)$

$$\gamma^r(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i} \quad (2.36)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 1 \text{ MPa}$ และ $T^* = 540 \text{ K}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_i และตัวยกกำลัง I_i และ J_i ของสมการที่ (2.36) นั้นแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการในส่วนที่เหลือ γ^r สมการที่ (2.36)

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	1	0	$-0.177\ 317\ 424\ 732\ 13 \times 10^{-2}$	23	7	0	$-0.590\ 595\ 643\ 242\ 70 \times 10^{-17}$
2	1	1	$-0.178\ 348\ 622\ 923\ 58 \times 10^{-1}$	24	7	11	$-0.126\ 218\ 088\ 991\ 01 \times 10^{-5}$
3	1	2	$-0.459\ 960\ 136\ 963\ 65 \times 10^{-1}$	25	7	25	$-0.389\ 468\ 424\ 357\ 39 \times 10^{-1}$
4	1	3	$-0.575\ 812\ 590\ 834\ 32 \times 10^{-1}$	26	8	8	$0.112\ 562\ 113\ 604\ 59 \times 10^{-10}$
5	1	6	$-0.503\ 252\ 787\ 279\ 30 \times 10^{-1}$	27	8	36	$-0.823\ 113\ 408\ 979\ 98 \times 10^1$
6	2	1	$-0.330\ 326\ 416\ 702\ 03 \times 10^{-4}$	28	9	13	$0.198\ 097\ 128\ 020\ 88 \times 10^{-7}$
7	2	2	$-0.189\ 489\ 875\ 163\ 15 \times 10^{-3}$	29	10	4	$0.104\ 069\ 652\ 101\ 74 \times 10^{-18}$
8	2	4	$-0.393\ 927\ 772\ 433\ 55 \times 10^{-2}$	30	10	10	$-0.102\ 347\ 470\ 959\ 29 \times 10^{-12}$
9	2	7	$-0.437\ 972\ 956\ 505\ 73 \times 10^{-1}$	31	10	14	$-0.100\ 181\ 793\ 795\ 11 \times 10^{-8}$
10	2	36	$-0.266\ 745\ 479\ 140\ 87 \times 10^{-4}$	32	16	29	$-0.808\ 829\ 086\ 469\ 85 \times 10^{-10}$
11	3	0	$0.204\ 817\ 376\ 923\ 09 \times 10^{-7}$	33	16	50	$0.106\ 930\ 318\ 794\ 09$
12	3	1	$0.438\ 706\ 672\ 844\ 35 \times 10^{-6}$	34	18	57	$-0.336\ 622\ 505\ 741\ 71$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13	3	3	$-0.322\ 776\ 772\ 385\ 70 \times 10^{-4}$	35	20	20	$0.891\ 858\ 453\ 554\ 21 \times 10^{-24}$
14	3	6	$-0.150\ 339\ 245\ 421\ 48 \times 10^{-2}$	36	20	35	$0.306\ 293\ 168\ 762\ 32 \times 10^{-12}$
15	3	35	$-0.406\ 682\ 535\ 626\ 49 \times 10^{-1}$	37	20	48	$-0.420\ 024\ 676\ 982\ 08 \times 10^{-5}$
16	4	1	$-0.788\ 473\ 095\ 593\ 67 \times 10^{-9}$	38	21	21	$-0.590\ 560\ 296\ 856\ 39 \times 10^{-25}$
17	4	2	$0.127\ 907\ 178\ 522\ 85 \times 10^{-7}$	39	22	53	$0.378\ 269\ 476\ 134\ 57 \times 10^{-5}$
18	4	3	$0.482\ 253\ 727\ 185\ 07 \times 10^{-6}$	40	23	39	$-0.127\ 686\ 089\ 346\ 81 \times 10^{-14}$
19	5	7	$0.229\ 220\ 763\ 376\ 61 \times 10^{-5}$	41	24	26	$0.730\ 876\ 105\ 950\ 61 \times 10^{-28}$
20	6	3	$-0.167\ 147\ 664\ 510\ 61 \times 10^{-10}$	42	24	40	$0.554\ 147\ 153\ 507\ 78 \times 10^{-16}$
21	6	16	$-0.211\ 714\ 723\ 213\ 55 \times 10^{-2}$	43	24	58	$-0.943\ 697\ 072\ 412\ 10 \times 10^{-6}$
22	6	35	$-0.238\ 957\ 419\ 341\ 04 \times 10^2$				

ย่านที่สามารถใช้สมการที่ (2.34) นั้นจะต้องอยู่ภายใต้ภูมิภาคส่วนที่ 2 ของ IAPWS-IF97

กำหนดย่านของอุณหภูมิและแรงดันคือ

$$273.15\text{ K} \leq T \leq 623.15\text{ K} \text{ และ } 0 \leq p \leq P_s(T)$$

$$623.15\text{ K} \leq T \leq 863.15\text{ K} \text{ และ } 0 \leq p \leq P_{B23}(T)$$

$$863.15\text{ K} \leq T \leq 1073.15\text{ K} \text{ และ } P_s(T) \leq p \leq 100\text{ MPa}$$

ซึ่ง $P_s(T)$ จะคำนวณจาก สมการที่ (2.35) และ $P_{B23}(T)$ คำนวณจากสมการที่ (2.36)

สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกทุกอย่างนั้นจะได้จากสมการนี้ทั้งหมดโดยการใช้ ความสัมพันธ์ต่างๆมากระทำกับสมการนี้โดยจะแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสมการ ค่าพลังงานของจีบี γ สำหรับสมการที่ (2.35) และ (2.36)

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก	สมการความสัมพันธ์
Specific volume $v = \left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_T$	$v(\pi, \tau) \frac{P}{RT} = \pi(\gamma_\pi^o + \gamma_\pi^r)$
Specific enthalpy $h = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p$	$\frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r)$
Specific internal energy $u = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p - p\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T$	$\frac{u(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r) - \pi(\gamma_\pi^o + \gamma_\pi^r)$
Specific entropy	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$s = -(\partial g / \partial T)_p$	$\frac{s(\pi, \tau)}{R} = \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r) - (\gamma^o + \gamma^r)$
Specific isobaric heat capacity $C_p = (\partial h / \partial T)_p$	$\frac{C_p(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r)$
Specific isochoric heat capacity $C_v = (\partial u / \partial T)_v$	$\frac{C_v(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r) + \frac{(1 + \pi\gamma_\pi^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r)^2}{1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r}$
Speed of sound $w = v(-\partial p / \partial v)_s^{0.5}$	$\frac{w^2(\pi, \tau)}{RT} = \frac{1 + 2\pi\gamma_\pi^r + \pi^2\gamma_\pi^r{}^2}{(1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r) + \frac{(1 + \pi\gamma_\pi^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r)^2}{\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r)}}$
Isobaric cubic expansion coefficient $\alpha_v = v^{-1}(\partial v / \partial T)_p$	$\alpha_v(\pi, \tau)T = \frac{1 + \pi\gamma_\pi^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r}{1 + \pi\gamma_\pi^r}$
Isothermal compressibility $K_T = -v^{-1}(\partial v / \partial p)_T$	$K_T(\pi, \tau)p = \frac{1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r}{1 + \pi\gamma_\pi^r}$

ตารางที่ 2.10 อนุพันธ์ของสมการ γ^o (ส่วนของก๊าซอุดมคติ)

$\gamma^o = \ln \pi + \sum_{i=1}^9 n_i^o \tau^i$	$\gamma_\tau^o = \sum_{i=1}^9 n_i^o J_i^o \tau^{i-1}$
$\gamma_\pi^o = \pi^{-1}$	$\gamma_{\pi\pi}^o = \sum_{i=1}^9 n_i^o J_i^o (J_i^o - 1) \tau^{i-2}$
$\gamma_{\pi\tau}^o = -\pi^{-2}$	$\gamma_{\tau\tau}^o = 0$
$\gamma_\pi^o = \left(\frac{\partial \gamma^o}{\partial \pi}\right)_\tau, \gamma_{\pi\pi}^o = \left(\frac{\partial^2 \gamma^o}{\partial \pi^2}\right)_\tau, \gamma_\tau^o = \left(\frac{\partial \gamma^o}{\partial \tau}\right)_\pi, \gamma_{\tau\tau}^o = \left(\frac{\partial^2 \gamma^o}{\partial \tau^2}\right)_\pi, \gamma_{\pi\tau}^o = \left(\frac{\partial^2 \gamma^o}{\partial \pi \partial \tau}\right)$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 อนุพันธ์ของสมการ γ^r (ส่วนที่เหลือ)

$\gamma^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i}$	$\gamma_{\tau}^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} J_i (\tau - 0.5)^{J_i - 1}$
$\gamma_{\pi}^r = \sum_{i=1}^{43} n_i I_i \pi^{I_i - 1} (\tau - 0.5)^{J_i}$	$\gamma_{\pi\pi}^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} J_i (J_i - 1) (\tau - 0.5)^{J_i - 2}$
$\gamma_{\pi\tau}^r = \sum_{i=1}^{43} n_i I_i \pi^{I_i - 1} (\tau - 0.5)^{J_i}$	$\gamma_{\tau\tau}^r = \sum_{i=1}^{43} n_i I_i \pi^{I_i - 1} J_i (\tau - 0.5)^{J_i - 1}$
$\gamma_{\pi}^r = \left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \pi}\right)_{\tau}, \gamma_{\pi\pi}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi^2}\right)_{\tau}, \gamma_{\tau}^r = \left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau}\right)_{\pi}, \gamma_{\tau\tau}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \tau^2}\right)_{\pi}, \gamma_{\pi\tau}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi \partial \tau}\right)$	

2.5.3.4 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 3

สมการพื้นฐานที่ใช้ในช่วงนี้จะใช้หลักการมาจากสมการค่าพลังงานจำเพาะของแอมัลโกลท์ f คือ $\phi = f/RT$ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.37)

$$\frac{f_3(p,T)}{RT} = \phi(\delta, \tau) = n_1 \ln \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i} \tau^{J_i} \quad (2.37)$$

ซึ่ง $\delta = \rho/\rho^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $\rho^* = \rho_c = 322 \text{ kgm}^{-3}$, $T^* = T_c = 647.096 \text{ K}$ และค่า $R = 0.461526 \text{ KJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_i และตัวยกกำลัง I_i และ J_i ของสมการที่ (2.37) นั้นแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการพื้นฐาน $f_3(p, T)$ ในสมการที่ (2.37)

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	-	-	$0.10658070028513 \times 10^1$	21	3	4	$-0.20189915023570 \times 10^1$
2	0	0	$-0.15732845290239 \times 10^2$	22	3	16	$-0.82147637173963 \times 10^{-2}$
3	0	1	$0.20944396974307 \times 10^2$	23	3	26	-0.47596035734923
4	0	2	$-0.76867707878716 \times 10^1$	24	4	0	$0.43984074473500 \times 10^{-1}$
5	0	7	$0.26185947787954 \times 10^1$	25	4	2	-0.44476435428739
6	0	10	$-0.28080781148620 \times 10^1$	26	4	4	0.90572070719733
7	0	12	$0.12053369696517 \times 10^1$	27	4	26	0.70522450087967
8	0	23	$-0.84566812812502 \times 10^{-2}$	28	5	1	0.10770512626332

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9	1	2	$-0.126\ 543\ 154\ 777\ 14 \times 10^1$	29	5	3	$-0.329\ 136\ 232\ 589\ 54$
10	1	6	$-0.115\ 244\ 078\ 066\ 81 \times 10^1$	30	5	26	$-0.508\ 710\ 620\ 411\ 58$
11	1	15	$0.885\ 210\ 439\ 843\ 18$	31	6	0	$-0.221\ 754\ 008\ 730\ 96 \times 10^{-1}$
12	1	17	$-0.642\ 077\ 651\ 816\ 07$	32	6	2	$0.942\ 607\ 516\ 650\ 92 \times 10^{-1}$
13	2	2	$0.384\ 934\ 601\ 866\ 71$	33	6	26	$0.164\ 362\ 784\ 479\ 61$
14	2	6	$-0.852\ 147\ 088\ 242\ 06$	34	7	2	$-0.135\ 033\ 722\ 413\ 48 \times 10^{-1}$
15	2	7	$0.489\ 722\ 815\ 418\ 77 \times 10^1$	35	8	26	$-0.148\ 343\ 453\ 524\ 72 \times 10^{-1}$
16	2	22	$-0.305\ 026\ 172\ 569\ 65 \times 10^1$	36	9	2	$0.579\ 229\ 536\ 280\ 84 \times 10^{-3}$
17	2	26	$0.394\ 205\ 368\ 791\ 54 \times 10^{-1}$	37	9	26	$0.323\ 089\ 047\ 037\ 11 \times 10^{-2}$
18	2	0	$0.125\ 584\ 084\ 243\ 08$	38	10	0	$0.809\ 648\ 029\ 962\ 15 \times 10^{-4}$
19	3	0	$-0.279\ 993\ 296\ 987\ 10$	39	10	1	$-0.165\ 576\ 797\ 950\ 37 \times 10^{-3}$
20	3	2	$0.138\ 997\ 995\ 694\ 60 \times 10^1$	40	11	26	$-0.449\ 238\ 990\ 618\ 15 \times 10^{-4}$

สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกทุกอย่างนั้นจะได้จากสมการที่ (2.37) นี้ทั้งหมดโดยการให้ความสัมพันธ์ต่างๆมากระทำกับสมการนี้โดยจะแสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสมการ ค่าพลังงานของเฮมโฮลท์ ϕ

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก	สมการความสัมพันธ์
Pressure $p = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T$	$\frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} = \delta \phi_\delta$
Specific enthalpy $h = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_p + \rho \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_T$	$\frac{h(\delta, \tau)}{RT} = \tau \phi_\tau + \delta \phi_\delta$
Specific internal energy $u = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_p$	$\frac{u(\delta, \tau)}{RT} = \tau \phi_\tau$
Specific entropy $s = - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_p$	$\frac{s(\delta, \tau)}{R} = \tau \phi_\tau - \phi$
Specific isobaric heat capacity $C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$	$\frac{C_p(\delta, \tau)}{R} = -\tau^2 \phi_{\tau\tau} + \frac{(\delta \phi_\delta - \delta \tau \phi_{\delta\tau})^2}{2\delta \phi_\delta + \delta^2 \phi_{\delta\delta}}$
Specific isochoric heat capacity $C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$	$\frac{C_v(\delta, \tau)}{R} = -\tau^2 \phi_{\tau\tau}$
Speed of sound	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$w = ((\partial p / \partial \rho)_s)^{0.5}$	$\frac{w^2(\delta, \tau)}{RT} = 2\delta\phi_\delta + \delta^2\phi_{\delta\delta} - \frac{(\delta\phi_\delta - \delta\tau\phi_{\delta\tau})^2}{\tau^2\phi_{\tau\tau}}$
Isobaric cubic expansion coefficient $\alpha_v = v^{-1}(\partial v / \partial T)_p$	$\alpha_v(\delta, \tau)T = \frac{\phi_\tau - \tau\phi_{\delta\tau}}{2\phi_\delta + \delta\phi_{\delta\delta}}$
Isothermal compressibility $K_T = -v^{-1}(\partial v / \partial p)_T$	$K_T(\delta, \tau)pRT = \frac{1}{2\phi_\delta + \delta^2\phi_{\delta\delta}}$

ตารางที่ 2.14 อนุพันธ์ของสมการค่าพลังงานของเฮมโฮลท์ที่ใช้ในสมการที่ (2.37)

$\phi = n_1 \ln \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i} \tau^{J_i}$	$\phi_\tau = \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i} J_i \tau^{J_i-1}$
$\phi_\delta = n_1 \delta^{-1} + \sum_{i=2}^{40} n_i I_i \delta^{I_i-1} \tau^{J_i}$	$\phi_{\tau\tau} = \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i} J_i (J_i - 1) \tau^{J_i-2}$
$\phi_{\delta\delta} = -n_1 \delta^{-2} + \sum_{i=2}^{40} n_i I_i (I_i - 1) \delta^{I_i-2} \tau^{J_i}$	$\phi_{\delta\tau} = \sum_{i=2}^{40} n_i I_i \delta^{I_i-1} J_i \tau^{J_i-1}$
$\phi_\delta = \left(\frac{\partial \phi}{\partial \delta}\right)_\tau, \phi_{\delta\delta} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta^2}\right)_\tau, \phi_\tau = \left(\frac{\partial \phi}{\partial \tau}\right)_\delta, \phi_{\tau\tau} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau^2}\right)_\delta, \phi_{\delta\tau} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta \partial \tau}\right)$	

ย่านที่สามารถใช้สมการที่ (2.37) นั้นจะต้องอยู่ภายใต้ภูมิภาคส่วนที่ 3 ของ IAPWS-IF97 กำหนดย่านของอุณหภูมิและแรงดันคือ

$$623.15 \text{ K} \leq T \leq 863.15 \text{ K} \text{ และ } P_{B23}(T) \leq p \leq 100 \text{ MPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.5 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 4

ในภูมิภาคส่วนนี้จะใช้สมการสำหรับของสองเฟสคือสมการอิมพลีกท์ควาตลิก ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งกับค่าแรงดันอิมตัว p_s และค่าอุณหภูมิอิมตัว T_s ดังสมการที่ (2.40)

$$\beta^2 \vartheta^2 + n_1 \beta^2 \vartheta + n_2 \beta^2 + n_3 \beta \vartheta^2 + n_4 \beta \vartheta + n_5 \beta + n_6 \beta^2 + n_7 \vartheta + n_8 = 0 \quad (2.38)$$

ซึ่ง
$$\beta = (P_s/p^*)^{0.25} \quad (2.39)$$

$$\vartheta = \frac{T_s}{T^*} + \frac{n_9}{(T_s/T^*) - n_{10}} \quad (2.40)$$

และ $p^* = 1 \text{ MPa}$, $T^* = 1 \text{ K}$ สำหรับ ค่าสัมประสิทธิ์ n_1 ถึง n_{10} แสดงในตารางที่ 2.20

สมการแรงดันอิมตัว

ในการที่จะใช้สมการที่ (2.21) นั้นจะต้องใช้ p_s จากสมการแรงดันอิมตัวดังสมการที่ (2.41)

$$\frac{P_s}{P^*} = \left[\frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{0.5}} \right]^4 \quad (2.41)$$

ซึ่ง $p^* = 1 \text{ MPa}$ และ
$$A = \vartheta^2 + n_1 \vartheta + n_2$$

$$B = n_3 \vartheta^2 + n_4 \vartheta + n_5$$

$$C = n_6 \vartheta^2 + n_7 \vartheta + n_8$$

ย่านของอุณหภูมิที่ใช้สมการที่ (2.43) นี้คือ $273.15 \text{ K} \leq T \leq 647.096 \text{ K}$

สมการอุณหภูมิอิมตัว

ในการที่จะใช้สมการที่ (2.32) นั้นจะต้องใช้ p_s จากสมการอุณหภูมิอิมตัวดังสมการที่ (2.42)

$$\frac{T_s}{T^*} = \frac{n_{10} + D - [(n_{10} + D)^2 - 4(n_9 + n_{10}D)]^{0.5}}{2} \quad (2.42)$$

ซึ่ง $T^* = 1 \text{ K}$
$$D = \frac{2G}{-F - (F^2 - 4EG)^{0.5}}$$

และ
$$E = \beta^2 + n_3 \beta + n_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = n_1\beta^2 + n_4\beta + n_7$$

$$G = n_2\beta^2 + n_5\beta + n_8$$

ย่านของอุณหภูมิที่ใช้สมการที่ (2.44) นี้คือ $611.212\ 677\ \text{Pa} \leq p \leq 22.064\ \text{MPa}$ ซึ่งค่า $611.212677\ \text{Pa}$ นี้คือค่าอุณหภูมิของน้ำอิมตัวที่ $273.15\ \text{K}$

ตารางที่ 2.15 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพื้นฐานในภูมิภาคส่วนที่ 4 ของสมการที่ (2.38) ถึง (2.40)

l	n_l	i	n_i
1	$0.116\ 705\ 214\ 527\ 67 \times 10^4$	6	$0.149\ 151\ 086\ 135\ 30 \times 10^2$
2	$-0.724\ 213\ 167\ 032\ 06 \times 10^6$	7	$-0.482\ 326\ 573\ 615\ 91 \times 10^4$
3	$-0.170\ 738\ 469\ 400\ 92 \times 10^2$	8	$0.405\ 113\ 405\ 420\ 57 \times 10^6$
4	$0.120\ 208\ 247\ 024\ 70 \times 10^5$	9	$-0.238\ 555\ 575\ 678\ 49$
5	$-0.323\ 255\ 503\ 223\ 33 \times 10^7$	10	$0.650\ 175\ 348\ 447\ 98 \times 10^3$

2.5.3.6 สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 5

ภูมิภาคส่วนที่ 5 นี้คือสมการค่าพลังงานจำเพาะของจิบป์ (g) ส่วนที่มีอุณหภูมิสูง ตั้งแต่ $1073.15\ \text{K}$ ถึง $2273.15\ \text{K}$ ซึ่งจะใช้สมการพื้นฐานซึ่งจะกำหนดค่าแรงดันไว้ไม่เกิน $50\ \text{MPa}$ คือ $\gamma = g/(RT)$ และแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของก๊าซในอุดมคติ γ^0 และ ส่วนที่เหลือคือ γ^r ดังนี้

$$\frac{g_5(p,T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^0(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (2.43)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $R = 0.461\ 526\ \text{KJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ เมื่อ γ^0 และ γ^r นั้นคำนวณมาจากสมการที่ (2.44) และ (2.45)

สมการในส่วนของก๊าซในอุดมคติ γ^0 ของสมการพื้นฐานในภูมิภาคส่วนที่ 5 $g_5(p, T)$

$$\gamma^0(\pi, \tau) = \ln \pi + \sum_{i=1}^6 n_i^0 \tau^{l_i} \quad (2.44)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 1\ \text{MPa}$ และ $T^* = 1000\ \text{K}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_1^0 และ n_2^0 นั้นจะปรับเปลี่ยนตามค่าพลังงานจำเพาะภายในและค่าเอนโทรปีจำเพาะซึ่งจะคำนวณมาจากสมการที่ (2.44) ร่วมกับสมการที่ (2.45) ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของส่วนที่เป็นก๊าซอุดมคติ γ^o ของสมการที่ (2.44)

i	J_i^o	n_i^o	i	J_i^o	n_i^o
1	0	$-0.131\ 799\ 836\ 742\ 01 \times 10^2$	4	-2	0.369 015 349 803 33
2	1	$0.685\ 408\ 416\ 344\ 34 \times 10^1$	5	-1	$-0.311\ 613\ 182\ 139\ 25 \times 10^1$
3	-3	$-0.248\ 051\ 489\ 334\ 66 \times 10^{-1}$	6	2	-0.329 616 265 389 17

สมการในส่วนของก๊าซในอุดมคติ γ^r ของสมการพื้นฐานในภูมิภาคส่วนที่ 5 $g_5(p, T)$

$$\gamma^r(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^6 n_i \pi^{I_i} \tau^{J_i} \quad (2.45)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 1\text{ MPa}$ และ $T^* = 1000\text{ K}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_i และตัวยกกำลัง I_i และ J_i ของสมการที่ (2.45) นั้นแสดงในตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการในส่วนที่เหลือ γ^r สมการที่ (2.45)

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	1	1	$0.157\ 364\ 048\ 552\ 59 \times 10^{-2}$	4	2	3	$0.224\ 400\ 374\ 094\ 85 \times 10^{-5}$
2	1	2	$0.901\ 537\ 616\ 739\ 44 \times 10^{-3}$	5	2	9	$-0.411\ 632\ 754\ 534\ 71 \times 10^{-5}$
3	1	3	$-0.502\ 700\ 776\ 776\ 48 \times 10^{-2}$	6	3	7	$0.379\ 194\ 548\ 229\ 55 \times 10^{-7}$

สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกทุกอย่างนั้นจะได้จากสมการนี้ทั้งหมดโดยการใช้ ความสัมพันธ์ต่างๆมากระทำกับสมการนี้โดยจะแสดงในตารางที่ 2.21

ตารางที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสมการ ค่าพลังงานของจิบปี γ สำหรับสมการที่ (2.45)

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก	สมการความสัมพันธ์
Specific volume $v = \left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_T$	$v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} = \pi(\gamma_\pi^o + \gamma_\pi^r)$
Specific enthalpy $h = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p$	$\frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r)$
Specific internal energy $u = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p - p\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T$	$\frac{u(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r) - \pi(\gamma_\pi^o + \gamma_\pi^r)$
Specific entropy $s = -\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p$	$\frac{s(\pi, \tau)}{R} = \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r) - (\gamma^o + \gamma^r)$
Specific isobaric heat capacity $C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$	$\frac{C_p(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r)$
Specific isochoric heat capacity $C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$	$\frac{C_v(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r) + \frac{(1 + \pi\gamma_\pi^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r)^2}{1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r}$
Speed of sound $w = v\left(-\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s\right)^{0.5}$	$\frac{w^2(\pi, \tau)}{RT} = \frac{1 + 2\pi\gamma_\pi^r + \pi^2\gamma_\pi^{r2}}{(1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r) + \frac{(1 + \pi\gamma_\pi^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r)^2}{\tau^2(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r)}}$
Isobaric cubic expansion coefficient $\alpha_v = v^{-1}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$	$\alpha_v(\pi, \tau)T = \frac{1 + \pi\gamma_\pi^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r}{1 + \pi\gamma_\pi^r}$
Isothermal compressibility $K_T = -v^{-1}\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$	$K_T(\pi, \tau)p = \frac{1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r}{1 + \pi\gamma_\pi^r}$

ตารางที่ 2.19 อนุพันธ์ของสมการ γ^o (ส่วนของก๊าซอุดมคติ)

$\gamma^o = \ln \pi + \sum_{i=1}^9 n_i \tau^i$	$\gamma_\tau^o = \sum_{i=1}^9 n_i J_i^o \tau^{i-1}$
$\gamma_\pi^o = \pi^{-1}$	$\gamma_{\pi\pi}^o = \sum_{i=1}^9 n_i J_i^o (J_i^o - 1) \tau^{i-2}$
$\gamma_\pi^o = \left(\frac{\partial \gamma^o}{\partial \pi}\right)_\tau, \gamma_{\pi\pi}^o = \left(\frac{\partial^2 \gamma^o}{\partial \pi^2}\right)_\tau, \gamma_\tau^o = \left(\frac{\partial \gamma^o}{\partial \tau}\right)_\pi, \gamma_{\tau\tau}^o = \left(\frac{\partial^2 \gamma^o}{\partial \tau^2}\right)_\pi, \gamma_{\pi\tau}^o = \left(\frac{\partial^2 \gamma^o}{\partial \pi \partial \tau}\right)$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.20 อนุพันธ์ของสมการ γ^r (ส่วนที่เหลือ)

$\gamma^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^i (\tau - 0.5)^i$	$\gamma^r_\tau = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^i J_i (\tau - 0.5)^{i-1}$
$\gamma^r_\pi = \sum_{i=1}^{43} n_i I_i \pi^{i-1} (\tau - 0.5)^i$	$\gamma^r_{\pi\pi} = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^i J_i (J_i - 1) (\tau - 0.5)^{i-2}$
$\gamma^r_{\pi\tau} = \sum_{i=1}^{43} n_i I_i \pi^{i-1} (\tau - 0.5)^i$	$\gamma^r_{\tau\tau} = \sum_{i=1}^{43} n_i I_i \pi^{i-1} J_i (\tau - 0.5)^{i-1}$
$\gamma^r_\pi = \left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \pi}\right)_\tau, \gamma^r_{\pi\pi} = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi^2}\right)_\tau, \gamma^r_\tau = \left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau}\right)_\pi, \gamma^r_{\tau\tau} = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \tau^2}\right)_\pi, \gamma^r_{\pi\tau} = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi \partial \tau}\right)$	

ย่านที่สามารถใช้สมการของภูมิภาคส่วนที่ 5 นี้คือ $1073.15 \text{ K} \leq T \leq 2273.15 \text{ K}$ และ $0 \leq p \leq 50 \text{ MPa}$

2.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน เครื่องกำเนิดไอน้ำ และความรู้เบื้องต้นในทฤษฎีระบบควบคุมพีไอดี วิธีการการปรับจูนพารามิเตอร์แบบต่างๆ เทคนิคการควบคุมทั้งแบบคาสแคดและแบบป้อนไปข้างหน้า กล่าวถึงทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ งานและความร้อน และกฎการสมดุลพลังงาน อีกทั้งยังอธิบายที่มาของการคำนวณคุณลักษณะต่างๆของไอน้ำที่สภาวะภูมิภาคส่วนใน IAPWS-IF97 เพื่อใช้เป็นความรู้ในการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาสแคดร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วนซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

บทที่ 3

ระบบควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง

3.1 คำนำ

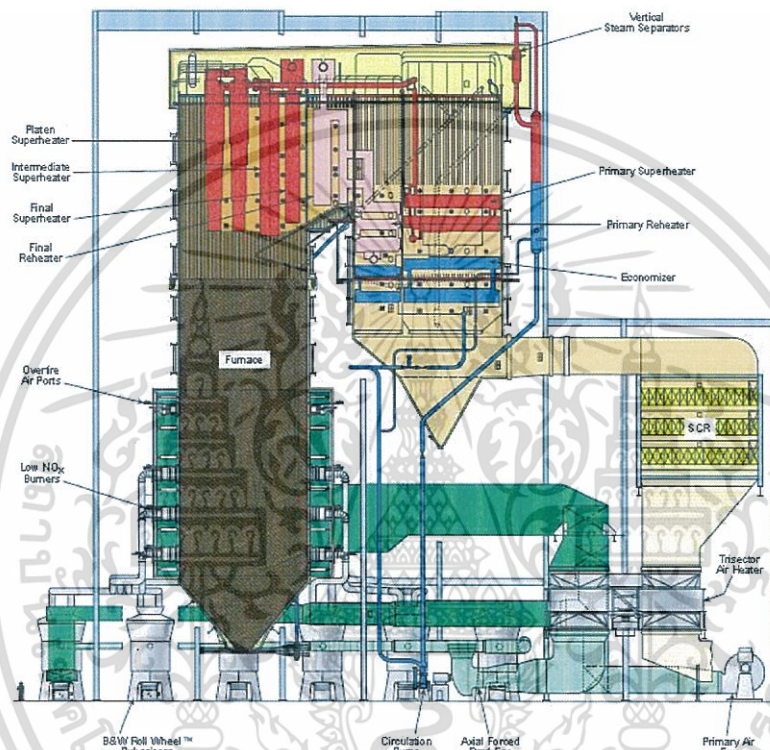
ในบทนี้เป็นการนำความรู้พื้นฐานจากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งแบบคาคแคร์ร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมมูลพลังงานบนระบบควบคุมกระจายส่วนในเครื่องกำเนิดไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า โดยจะกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆในระบบควบคุมได้แก่ เครื่องกำเนิดไอน้ำ วาล์ว เครื่องมือวัดต่าง และตัวควบคุมซึ่งจะประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกตัวควบคุมพีไอดีคาคแคร์ ซึ่งมีตัวควบคุมพีไอดีชั้นในเป็นตัวควบคุมอัตราการใช้และตัวควบคุมพีไอดีชั้นนอกเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและส่วนที่สองเป็นตัวสมมูลพลังงานที่คำนวณด้วยโมเดลทางอุณหพลศาสตร์ และนำเสนอการออกแบบบล็อกไดอะแกรมควบคุมเพื่อนำไปเขียนลงในระบบควบคุมกระจายส่วนต่อไป

3.2 ส่วนประกอบของระบบควบคุม

3.2.1 เครื่องกำเนิดไอน้ำ

เป็นเครื่องกำเนิดไอน้ำที่มีขนาดของเตาเผา 19,682 ตัน, แรงดันไอน้ำสูงสุด 263.0 บาร์ ดังรูปที่ 3.1 แสดงภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำและส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำกระบวนการของเครื่องกำเนิดไอน้ำสามารถอธิบายได้อย่างง่ายๆว่า น้ำ น้ำป้อนจะเข้ามาที่เครื่องกำเนิดไอน้ำทาง อิโคโนไมเซอร์และเข้าสู่ส่วนของ อีวาเปอเรเตอร์ทางท่อดาวน์คัมเมอร์และได้รับความร้อนจากเตาเผาจนเป็นไอน้ำอิ่มตัวและเข้าไปสู่ถังแยกไอน้ำเพื่อทำการแยกน้ำออกจากไอน้ำ ส่วนที่เป็นน้ำจะควบแน่นลงไปที่ถังบรรจุน้ำและปั๊มจะทำการดูดน้ำนั้นกลับไปสู่อิโคโนไมเซอร์อีกครั้งหนึ่งเพื่อทำการอุ่นน้ำต่อไป ส่วนที่เป็นไอน้ำที่ออกจากถังบรรจุน้ำ นั้นจะเดินทางไปที่ ซุปเปอร์ฮีเตอร์ ซึ่งเป็นแบบหลายตอนโดยจะแยกเป็นส่วนของซุปเปอร์ฮีเตอร์ระยะแรก เข้าสู่ซุปเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลาง และเข้าสู่ซุปเปอร์ฮีเตอร์ระยะสุดท้าย และออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้าสู่กังหันไอน้ำไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำในขั้นแรกนั้นจะถูกนำกลับมาให้พลังงานความร้อนที่เครื่องกำเนิดไอน้ำอีกครั้งซึ่งจะเข้ามาที่ รีฮีเตอร์ ซึ่งมีสองส่วนคือรีฮี

เตอร์ระยะแรกและวิธีที่เตอร์ระยะสุดท้ายและออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำอีกครั้งและเข้าสู่กังหันไอน้ำในชั้นที่สองและลงไปที่คอนเดนเซอร์เข้าสู่กระบวนการคอนเดนเสทและกระบวนการน้ำป้อนเพื่อทำน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำมาเป็นน้ำที่จะมาจ่ายเข้ากับเครื่องกำเนิดไอน้ำหรือน้ำป้อนเพื่อให้เป็นวัฏจักรความร้อนกังหันไอน้ำต่อไป



รูปที่ 3.1 ภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำและส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีค่าสมรรถนะจาก ข้อมูลจากการออกแบบซึ่งแสดงในตารางที่ 3.1 โดยจะแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการเดินเครื่องเครื่องกำเนิดไอน้ำเช่น ความดัน ณ จุดต่างๆ, แรงดันตกคร่อมเครื่องกำเนิดไอน้ำ, อุณหภูมิของน้ำและไอน้ำ ณ จุดต่างๆ, อัตราการไหลของไอน้ำ, อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และค่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำในการเดินเครื่องเครื่องกำเนิดไอน้ำ ณ โหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

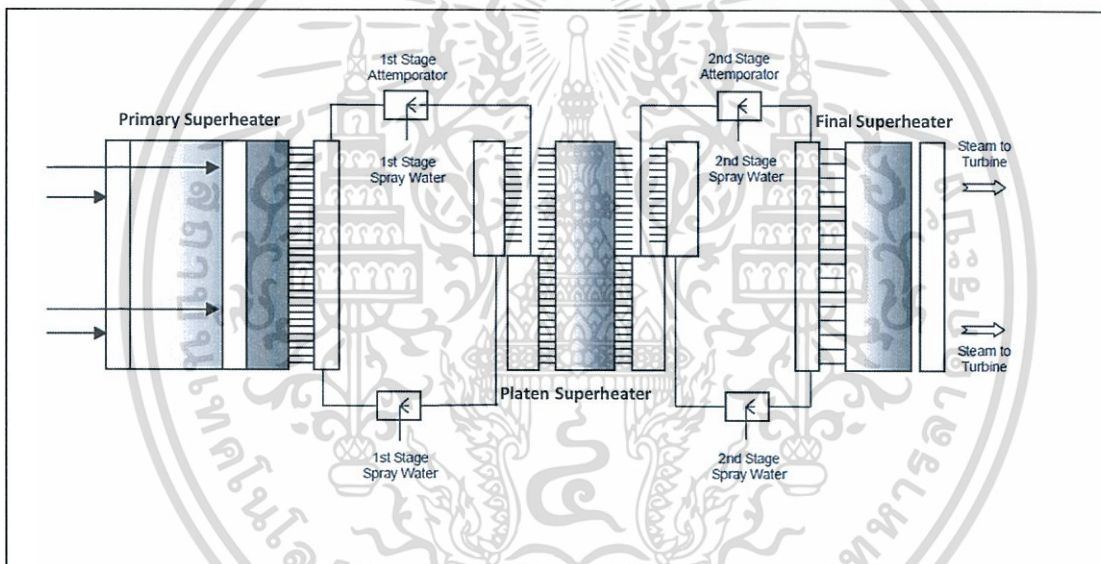
ตารางที่ 3.1 สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่โหลดต่างๆ

Operating condition		Unit	VWO	100%	80%	50%	30%
Steam pressure	Superheater Outlet	Barg	250.2	249.7	219.2	137.4	88.3
	Reheater Inlet	Barg	51.5	50.1	39.4	24.5	15.3
	Reheater outlet	Barg	50.1	48.7	39.4	23.3	20.5
	Pressure drop	Barg	24.4	22.9	13.8	5.1	2.2
Steam temperature	Economizer outlet	°C	326.1	323.3	303	271	238
	Primary superheater I/L	°C	441.7	441.3	433	402	335
	Primary superheater O/L	°C	463.7	462.7	452	423	349
	Platen Superheater I/L	°C	451.9	450.9	435	405	349
	Platen Superheater O/L	°C	533.6	533.6	533.6	533.6	442
	Final Superheater I/L	°C	515.5	515.5	515.5	508	442
	Final Superheater O/L	°C	568.6	568.6	568.6	568.6	543
	Reheater I/L	°C	336.5	333.8	325.7	334.3	317.8
	Reheater O/L	°C	568.6	568.6	568.6	568.6	518
Steam flow	Final Superheater O/L	kg/s	596.7	579.4	448.6	274.4	177.9
	Reheater O/L	kg/s	485.5	472.6	373.1	234.9	154.9
Reheater data	Entering temperature	°C	336.5	333.8	325.7	334.3	317.8
	Entering pressure	barg	51.5	50.1	39.4	24.5	15.3
Feed water temperature		°C	289.2	287.2	271.2	243.8	220.2
Fuel Fired		kg/s	72.8	71.1	57.3	37.6	24.5
Total Combustion Air		kg/s	365.4	363.3	347.5	338.7	315.3
Air to Mills		kg/s	132.4	130.8	105.0	73.6	48.5
Total Gas Flow at furnace Outlet		kg/s	744.4	727.0	586.3	422.8	294.6
Boiler efficiency		%	93.99	94.04	94.49	94.71	94.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 แอทเท็มเพอเรเตอร์

แอทเท็มเพอเรเตอร์ (Attemperator) คือหน่วยที่อยู่ระหว่าง ซุปเปอร์ฮีเตอร์ระยะแรก และ ซุปเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลางกับ ซุปเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลางและ ซุปเปอร์ฮีเตอร์ระยะสุดท้ายนั้นจะมีหน่วยที่ควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำไม่ให้สูงเกินไปคือแอทเท็มเพอเรเตอร์เพื่อให้ได้ไอน้ำที่มีความร้อนพอเหมาะเพื่อเข้าสู่กังหันไอน้ำโดยหลักการของแอทเท็มเพอเรเตอร์นั้นจะทำหน้าที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปิดคือของไหลที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นผสมกันในที่นี้คือน้ำสเปรย์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งและกระบวนการของแอทเท็มเพอเรเตอร์

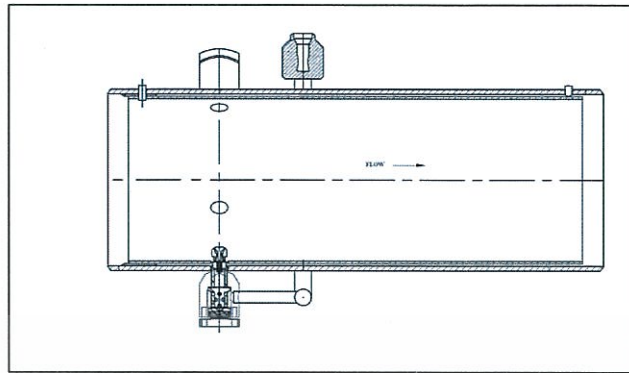


รูปที่ 3.2 ตำแหน่งและกระบวนการของแอทเท็มเพอเรเตอร์

แอทเท็มเพอเรเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้แอทเท็มเพอเรเตอร์แบบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

รูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



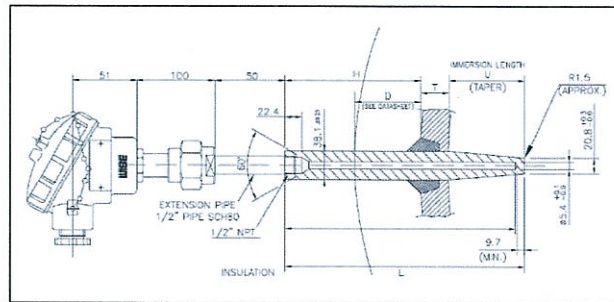
รูปที่ 3.3 แอทเท็มเพอเรเจอร์แบบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

3.2.3 เครื่องมือวัด

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือวัดหลักๆ สามชนิดด้วยกันคือเครื่องมือวัดอุณหภูมิ, เครื่องมือวัดความดัน และเครื่องมือวัดอัตราการไหล โดยเครื่องมือวัดความดันจะวัดความดันของไอน้ำยวดยิ่งและความดันของน้ำสเปรย์ของแอทเท็มเพอเรเจอร์และเครื่องมือวัดอุณหภูมินั้นจะวัดอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งทั้งอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งที่ออกจากส่วนของซูเปอร์ฮีเตอร์ระยะแรก, อุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งหลังจากแอทเท็มเพอเรเจอร์, อุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งที่ออกจากส่วนของซูเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลาง และวัดอุณหภูมิของน้ำสเปรย์ที่จะนำมาควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งส่วนเครื่องมือวัดอัตราการไหลนั้นจะวัดอัตราการไหลของน้ำสเปรย์และวัดอัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่ง

3.2.3.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

เครื่องมือวัดอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งนั้นจะใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ใช้วัสดุทำจาก 316SS ซึ่งเป็นแบบสองหัววัดคือมีหัววัดสำรองในตัว มีความแม่นยำที่ 0.4% ของสเปก (ย่านการวัดใช้งาน 0-700 °C) ดังรูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือวัดอุณหภูมิ



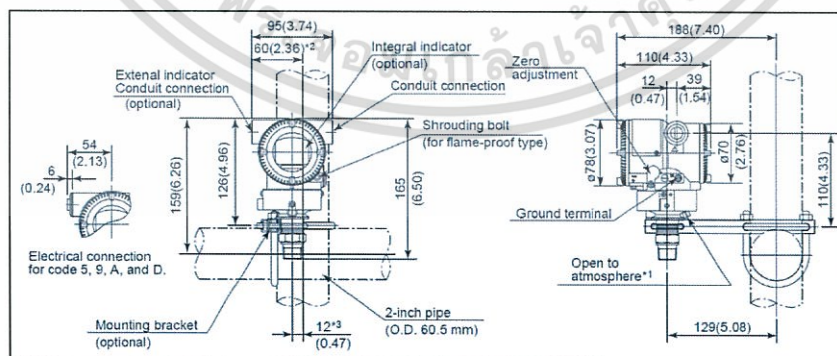
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติจำเพาะเทอร์โมคัปเปิล

Thermocouple	DOUBLE ELEMENT
Span	0-700 °C
Accuracy	0.4% of span
Type	K
Sheath material	316SS
Sheath out diameter	4.8mm
Conduit connection	3/4" NPT

3.2.3.2 เครื่องมือวัดความดัน

เครื่องมือวัดความดันของไอน้ำวดยิ่งและน้ำสเปรย์นั้นจะใช้เป็นเครื่องมือวัดความดันแบบคาปาซิทีฟที่จะแสดงในรูปที่ 3.5 และคุณสมบัติจำเพาะจะแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

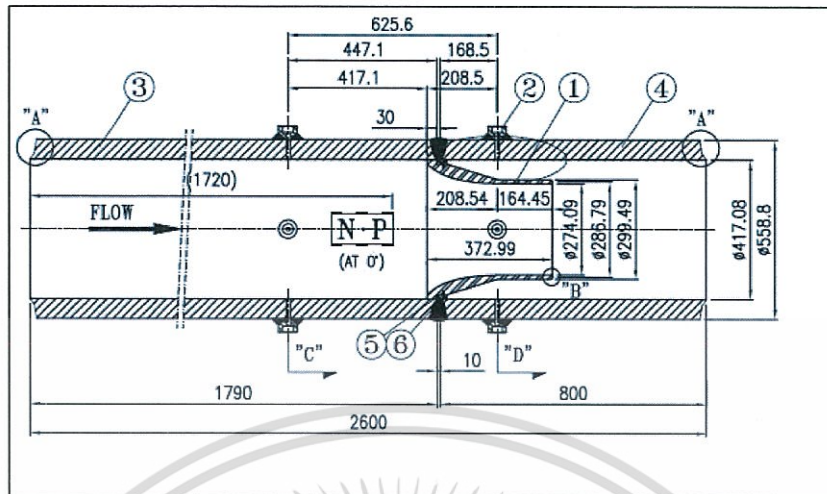
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติจำเพาะของเครื่องมือวัดความดัน

Transmitter	Gauge pressure transmitter
Range	-1~500 Barg
Span	10~500 Barg
Accuracy	0.25%
Lightning protector	Applicable Standards: IEC 61000-4-4, IEC 61000-4-5
Certificates	Test Pressure: 50 MPa
Output	4 to 20 mA DC Output with HART protocol
Supply voltage	10.5 to 30 Vdc
Integral indicator	Digital indicator with the range setting switch
Process temperature	574.2 deg.C
Maximum working pressure	500 Barg
Mounting	304 SST 2-inch pipe mounting
Wetted parts material	316SS
Housing	Cast aluminum alloy

3.2.3.3 เครื่องมือวัดอัตราการไหล

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่ง

สำหรับเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่งนั้นจะใช้เป็นชนิดนอสเซลล์ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติจำเพาะดังตารางที่ 3.4 และแสดงแบบของเครื่องมือวัดอัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่งดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องมือวัดอัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่ง

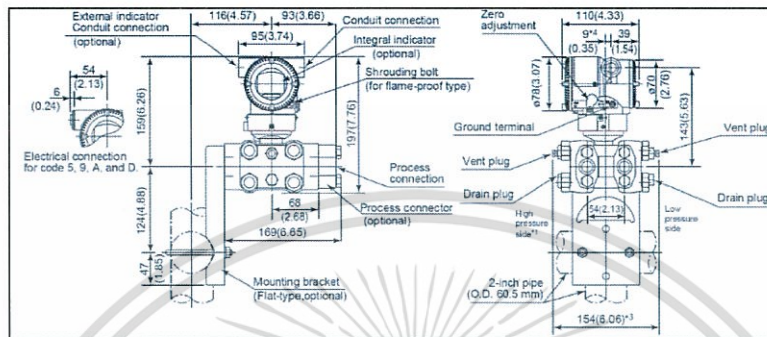
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติจำเพาะของเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่ง

Flow Element	Nozzle
Type	Long radius Weld-in, High Ratio, Holding ring
Standard	ASME MFC-3M - 1989
Material	316SS
Flange	Radius
Tap Size	3/4" 9000# SW
Scale Range	700 (kg/s)
Beta = d/D	0.657166
นอสเซิล Throat Diameter	274.091 mm
Line I.D.	417.08 mm
Allowable Permanent Press Loss	3408.4 mmH ₂ O
Flow Direction	Horizontal
Pipe Line Size & Sch	DN 550 & W.T : 70.86
Pipe Line Material	SA106 Gr. C

ส่วนของทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลใช้ทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลแบบความดันแตกต่างกัน โดยจะต่อเครื่องมือวัดอัตราการไหลเพื่อแปลง แรงดันตกคร่อมของนอสเซิล (ΔP) เพื่อแปลงสัญญาณออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 4-20 mA และส่งต่อไปที่ตัวควบคุมเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการ รูปที่ 3.7 แสดงแบบของทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่งและ ตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติจำเพาะของทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่ง



รูปที่ 3.7 ทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่ง

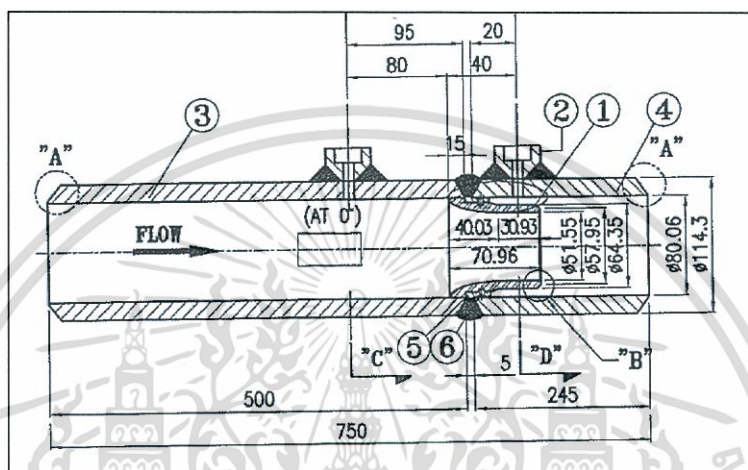
ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติจำเพาะของทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลไอน้ำยวดยิ่ง

Transmitter	Differential Pressure Transmitter
Range	1 to 100 kPa
Span	5 to 500 kPa
Accuracy	±0.25% OF CALIBRATION
Degrees of protection	IP67, NEMA 4X, and JIS C0920 immersion proof
Certificates	FM, CENELEC ATEX, CSA, IECEx
Output	4 to 20 mA DC or FOUNDATION™ fieldbus
Supply voltage	10.5 to 30 Vdc
Ambient temperature	40 to 85 deg C
Process temperature	-40 to 120 deg C
Maximum working pressure	32 MPa
Mounting	2-inch pipe mounting
Wetted parts material	316 SST
Housing	Cast aluminum alloy or ASTM CF-8M stainless steel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำสเปรย์

สำหรับเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำสเปรย์นั้นจะใช้เป็นชนิดนอสเซิลซึ่งจะแสดงคุณสมบัติจำเพาะดังตารางที่ 3.6 และแสดงแบบเครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำสเปรย์ดังรูปที่ 3.8



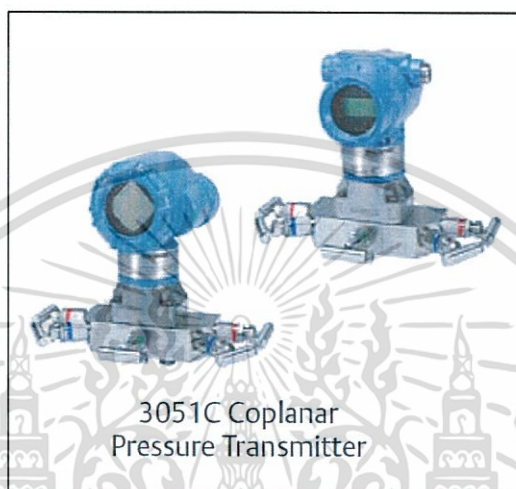
รูปที่ 3.8 เครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำสเปรย์

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติจำเพาะของเครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำสเปรย์

Flow Element	Nozle
Manufacturer	SAM IL INDUSTRY
Model	SAM IL & SFN
Type	Long Radius, High Ratio
Standard	ASME MFC-3M
Material	SA106 GrC
Tap Size	3/4" 9000# SW
Scale Range	20.000 kg/sec
Beta = d/D	0.643893
Element Bore	51.5506 mm
Line I.D.	80.0608 mm
Allowable Pressure Loss	2349.7566 mm-H ₂ O
Flow Direction	Horizontal
Pipe Line Size & Sch	4 in. XXS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลจะใช้ทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลแบบความดันแตกต่างโมเดลโดยจะต่อกับเครื่องมือวัดอัตราการไหลเพื่อแปลง แรงดันตกคร่อมของนอสเซิล (ΔP) เพื่อแปลงสัญญาณออกมาเป็น 4-20 mA และส่งต่อไปที่ตัวควบคุมเพื่อใช้ในการควบคุมรูปที่ 3.9 แสดงทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลและ ตารางที่ 3.7 แสดงคุณสมบัติจำเพาะของทรานสมิตเตอร์อัตราการไหล



รูปที่ 3.9 ทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลน้ำสเปร์ย์

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติจำเพาะของทรานสมิตเตอร์อัตราการไหลน้ำสเปร์ย์

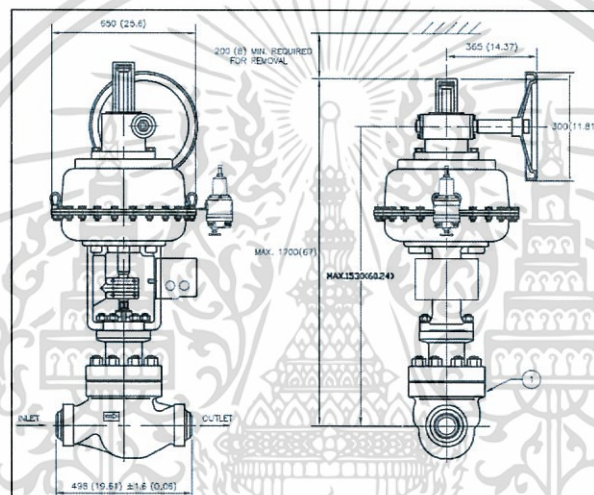
Transmitter	Coplanar Differential Pressure Transmitter
Range	-2.49 to 2.49 bar
Span	0 to 55.16 bar
Accuracy	$\pm 0.04\%$ of full scale
Degrees of protection	IEEE C62.41
Certificates	FM, NRTL, OSHA, CSA, ANSI/ISA
Output	4 - 20 mA HART
Supply voltage	10.5-42.4 Vdc
Ambient temperature	-40 to 85 °C
Process temperature	-40 to 121 °C
Maximum working pressure	2.49 bar
Mounting	2-inch pipe mounting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wetted parts material	316 SST
Housing	316 SST

3.2.4 วาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำสเปรย์

เป็นวาล์วควบคุมแบบนิวเมติกไดอะแฟรมโกลบวาล์ว, ขนาดตัววาล์วพอดี 80 mm, ANSI Class rating 2500, ดังแสดงในตารางที่ 3.8 และแบบวาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำสเปรย์แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำสเปรย์

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติจำเพาะของวาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำสเปรย์

CONTROL VALVE DATA SHEET		Model CCI 840H			
SERVICE CONDITIONS		Max	Normal	Min1	Min2
Flow Rate	T/hr	69372	32868	14832	3200
Inlet Pressure	Barg	274.65	276.27	151.5	276.27
Outlet Pressure	Barg	268.2	264.9	143.1	264.9
Diff. Pressure	Bar	6.45	11.37	8.4	11.37
Inlet Temperature	deg C	289.2	289.2	243.8	289.2
Required Cv		36.24	12.88	6.53	1.25
LINE		POSITIONER			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

Inlet Pipe	4" (DN100) sch. XXS	Positioner	Electro-Pneumatic
Outlet Pipe	4" (DN100) sch. XXS	Model	ABB / TZID-C
Pipe Material	SA106-C	Input Signal	4 ~ 20 mA
VALVE BODY / BONNET		ACTUATOR	
Type	Globe Valve	Actuator	Pneumatic Diaphragm
Size	3" (DN80)	Model	CCI / MSD - II
Rating(s)	ASME 2500#	Supply	4 - 4.5 Barg
Material	SA216 WCC		

3.2.5 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมที่ใช้จะเป็นระบบควบคุมแบบกระจายส่วน (Distributed Control System : Experion CEE-based Controllers) ประกอบด้วยโมดูลอินพุตและเอาต์พุตรุ่นอนุกรมซี (Series-C Input/Output Module) และตัวควบคุม (Controller), เซิร์ฟเวอร์ (Experion sever), สถานีควบคุม (Experion station) และระบบสื่อสารต่างๆ (communication)

3.2.5.1 ตัวควบคุม

ตัวควบคุมมีหน่วยความจำใช้งาน 16 MB (user memory), จุดเชื่อมต่ออินพุตและเอาต์พุตจำนวน 2 จุด (I/O link interface) แบบรีดันแดนท์ (redundant) ใช้ร่วมกับได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตแบบ PMIO I/O หรือโมดูลอินพุตและเอาต์พุตรุ่นอนุกรมซี มีการเชื่อมต่อสื่อสารกับเน็ตเวิร์คแม่โดยระบบอินเทอร์เน็ต และมีการรีดันแดนซ์การสื่อสารด้วยเอฟทีอีซึ่งแสดงรายละเอียดตัวควบคุมดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 รายละเอียดตัวควบคุม

Performance	Capacity
Block Performance	2400 Process Units (PUs) per second with full cycle average CPU loading (CPUCYCLEAVG) of no more than 60%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

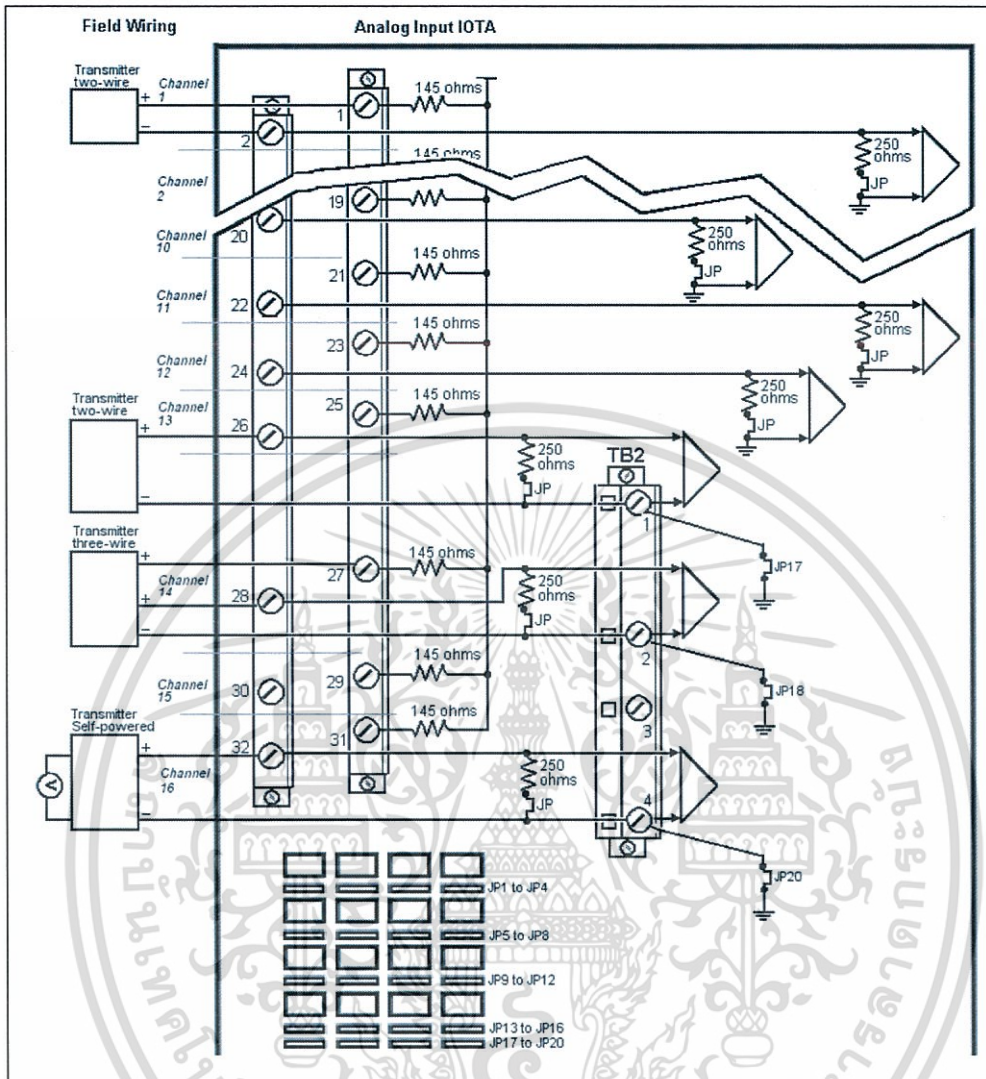
ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

Performance	Capacity
Memory	16 MB user memory
Tagged Objects	4095 Total CMs, SCMs, UCMs, RCMs,IOMs, and other named objects.
Alarms and Events	10 events per second.
Total I/O	Budget 64 I/O units. Total for I/O types 30 Peer Connection Units.
Number of I/O Links	2
Data Access Performance	2000 points per second.
Data Access Connections	12 Up to two servers and 10 console Stations.
Peer to Peer Connections	30 Peer Connection Units.

3.2.5.2 อินพุตและเอาต์พุตโมดูล

เป็นโมดูลที่รับสัญญาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากกระบวนการเช่น อุณหภูมิ, อัตราการไหลของน้ำและอัตราการไหลไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งจะมีทั้งโมดูลอนาล็อกอินพุต/เอาต์พุตทั้งแบบมีฮาร์ทและไม่มี โมดูลดิจิทัลอินพุต/เอาต์พุตในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้โมดูลอนาล็อกที่มีฮาร์ท มีความเร็ว (50 ms) สามารถใช้ได้ทั้งแบบต่อสองสายธรรมดาและแบบต่อกับทรานสมิตเตอร์ที่มีไฟในตัวซึ่งแสดงวงจรดังรูปที่ 3.11

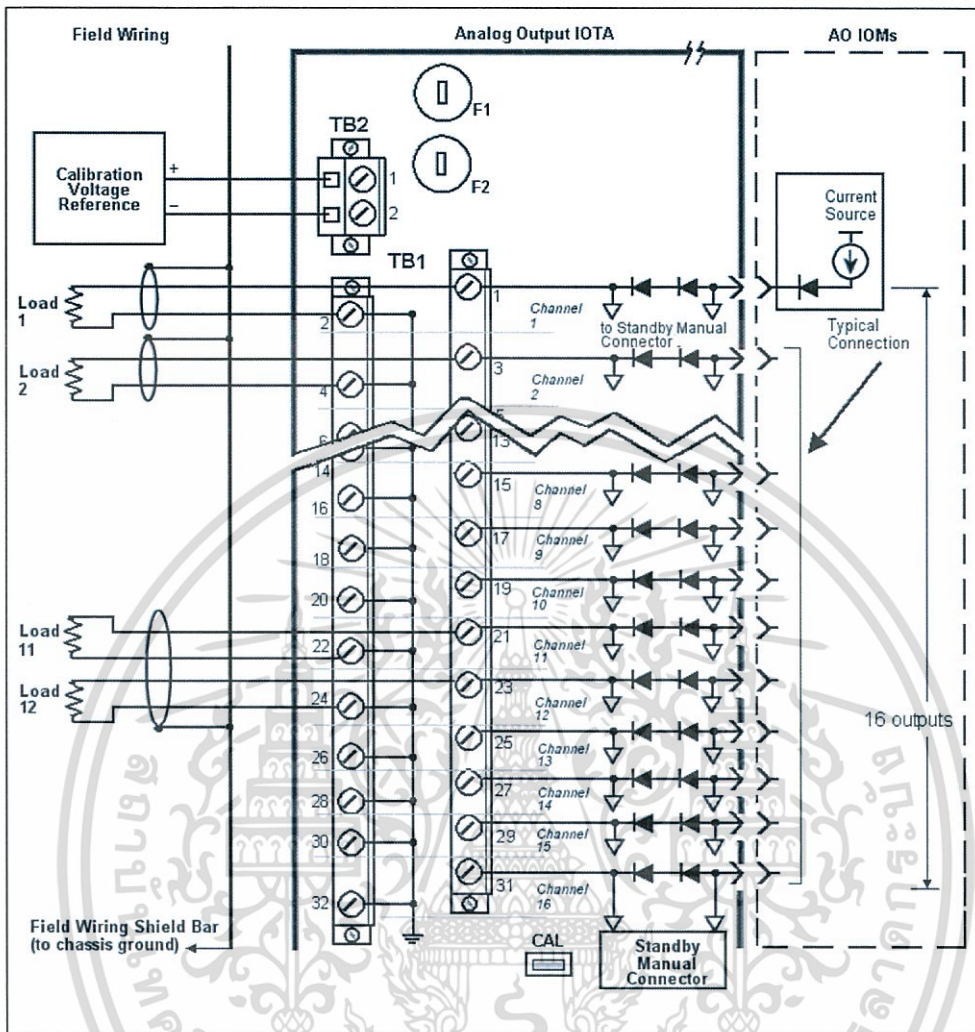
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรของโมดูลอนาล็อกอินพุต

โมดูลอนาล็อกที่มีไม่มีฮาร์ทซึ่งสามารถส่งสัญญาณตั้งแต่ 0 mA, 2.9 mA ถึง 21.1 mA และสูงสุดไม่เกิน 22.5 mA แรงดัน 30 Vdc ซึ่งมีการป้องกันการลัดวงจรและระบบป้องกันเซิร์จสูงสุดที่ 500 mAdc ซึ่งแสดงวงจรดังรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรของโมดูลอนาล็อกที่ไม่มีฮาร์ด

3.2.5.3 เซิร์ฟเวอร์และสถานีควบคุม

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการรับข้อมูล, จัดเก็บข้อมูล, ประมวลผลข้อมูล, สร้างกราฟสำหรับควบคุมกระบวนการ, สร้างฟังก์ชันลอจิกควบคุมกระบวนการต่างๆอีกทั้งยังเป็นศูนย์กลางในการเก็บกราฟแนวโน้ม, ประวัติการทำงาน, การแจ้งเตือนและอีเวนท์การทำงานต่างๆในกระบวนการเป็นต้น คุณสมบัติเฉพาะของเครื่องเซิร์ฟเวอร์แสดงในตาราง 3.10

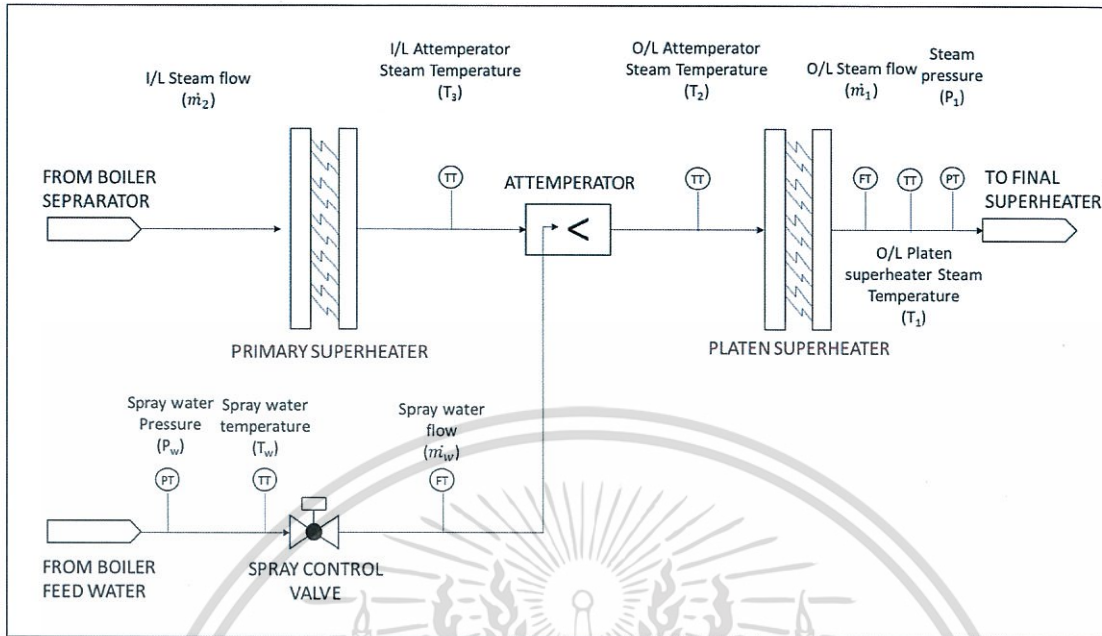
ตารางที่ 3.10 คุณสมบัติจำเพาะของเครื่องเซิร์ฟเวอร์และสถานีควบคุม

Model No.	MZ-PCSV22 (DELL T610)
Processor	Intel Xeon X5560, 2.8Ghz,8M Cache,Turbo,HT,1333MHz Max Memory 6.4GT/s QPI
Chipset	Intel 5520
Hard Drive	5x146GB 2.5inch SAS,15K RPM hot-swappable (4HDD on RAID+1Hotspare)
RAM	4 GB
Networking	Two Embedded Broadcom Gigabit NIC
Video	Matrox G200 with 8Mb of Cache
I/O expansion	5 PCIe generation, Two full-height, full-length x8 link (slot2 &3) Three full-height, half-length x4 link (slot1,4,5)
DVD Drive	SATA DVD RW Drive
Mouse/Keyboard	USB Standard Mouse and Keyboard
Operation System	Windows 2003 Server Standard Service Pack2
Power Supply	Two hot-plug high efficient 570W PSU
Monitor	22" LCD Display
KVM switch	ATEN-CS1752(2 port)

3.3 โครงสร้างและกระบวนการ

3.3.1 กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง

ในระบบควบคุมของงานวิจัยนี้ควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งโดยไอน้ำที่มาจากเครื่องแยกไอน้ำจะมาที่ ชูเปเปอร์ฮีเตอร์ระยะแรกและจะผ่านแอทเท็มเพอเรเจอร์และไปที่ชูเปเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลางโดยแอทเท็มเพอเรเจอร์จะใช้การสเปรย์น้ำในการลดอุณหภูมิของไอน้ำที่ควบคุมอัตราการไหลโดยวาล์วควบคุมน้ำสเปรย์หลังจากผ่านชูเปเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลางแล้วไอน้ำยวดยิ่งทั้งหมดก็จะไปยังชูเปเปอร์ฮีเตอร์ระยะสุดท้ายต่อไปดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง

ติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ, ความดัน และอัตราการไหลตามจุดต่างๆ โดยเครื่องมือวัดอุณหภูมิจะติดตั้งก่อนและหลังแอทเท็มเพอเรเตอร์ (T_3, T_2), หลังซูเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลาง (T_1) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ จะต้องการควบคุมและติดตั้งก่อนวาล์วสเปรย์น้ำ (T_w) รวมทั้งหมดที่สุด เครื่องมือวัดความดันจะติดตั้ง หลังจากเครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งอนุมาณว่าเครื่องกำเนิดไอน้ำนั้นมีการสูญเสียแรงดันน้อยมากความดันของไอน้ำยวดยิ่งจึงเท่ากันทุกจุด (P_1) และติดตั้งอีกจุดหนึ่งที่ก่อนวาล์วสเปรย์น้ำส่วนเครื่องมือวัดอัตราการไหล นั้นติดตั้งเหมือนกับเครื่องมือวัดความดัน (P_w) คือก่อน วาล์วสเปรย์น้ำ (m_w) และ หลังจากออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ (m_1) ดังรูปที่ 3.13

3.3.2 ออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง

ในระบบควบคุมจะควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งโดยไอน้ำที่มาจากซูเปอร์ฮีเตอร์ ระยะแรกผ่านแอทเท็มเพอเรเตอร์ผ่านไปยังซูเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลางโดยมีแอทเท็มเพอเรเตอร์จะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำสเปรย์เพื่อลดอุณหภูมิไอน้ำ ที่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำสเปรย์ด้วย วาล์วควบคุมการไหล ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นจะออกแบบการควบคุมนี้เป็นการควบคุมแบบคาค

3.3.2.2 ตัวควบคุมอุณหภูมิ

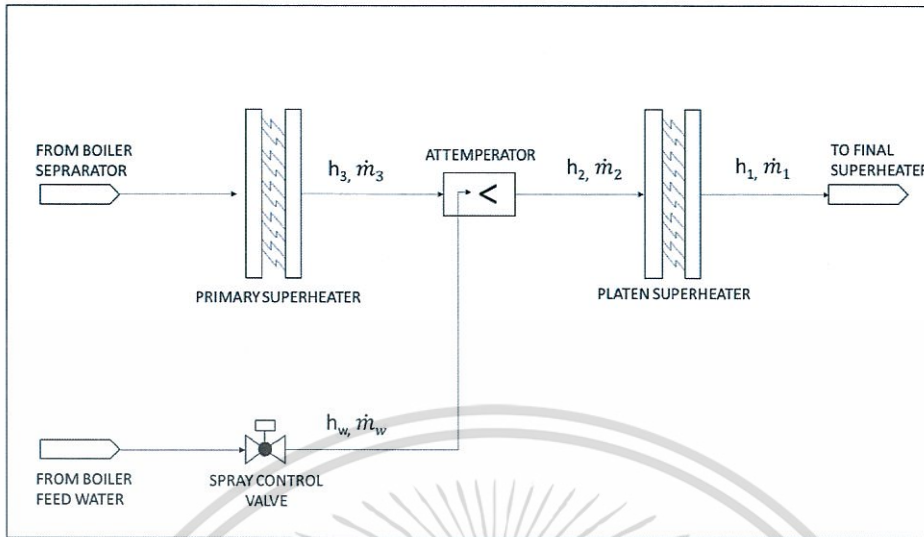
ตัวควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมหลักโดยจะวัดอุณหภูมิหลังจากซูปเปอร์ฮีเตอร์ระยะกลางโดยค่าเซตพ้อยของตัวควบคุมอุณหภูมินี้จะรับค่าที่ได้จากการคำนวณมาจากตารางโหลดของเครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งค่าที่ได้จะได้ออกมาจากการออกแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำแต่ละชนิด

3.3.2.3 ตัวสมดุลพลังงาน

เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลหลักของระบบ โดยจะคำนวณค่าพลังงานของไอน้ำยวดยิ่งก่อนเข้าแอกเท็มเพอเรเจอร์และพลังงานของไอน้ำยวดยิ่งหลังจากออกแอกเท็มเพอเรเจอร์มีค่าพลังงานแตกต่างกันอยู่เท่าใด รวมทั้งคำนวณว่าค่าพลังงานของน้ำที่ไซสเปร์ยนั้นว่ามีค่าเท่าใดแล้วดูว่าจะต้องเอาพลังงานนั้นออกหรือใส่พลังงานเข้าไปอีกเท่าใดจึงจะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อทราบพลังงานที่ต้องทำการชดเชยแล้วก็คำนวณกลับมาเป็นค่าอัตราการไหลและเข้าไปเป็นค่าเซตพ้อยของตัวควบคุมอัตราการไหลเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำสเปร์ยต่อไป

3.3.2.3.1 การสมดุลพลังงานของน้ำสเปร์ยและไอน้ำยวดยิ่ง

กำหนดให้อัตราการไหลของไอน้ำก่อนที่จะสเปร์ยคือ m_2 อัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่งหลังจากสเปร์ยนั้นคือ m_1 และอัตราการไหลของน้ำสเปร์ยคือ m_w ค่าเอนทัลปีจำเพาะของน้ำสเปร์ยคือ h_w และค่าเอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่งก่อนที่จะสเปร์ยคือ h_3 ค่าเอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่งหลังการสเปร์ยคือ h_2 และค่าเอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่งที่ต้องการควบคุมคือ h_1



รูปที่ 3.15 กระบวนการของไอน้ำยัดยั้ง

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปสมการอัตรา

$$\frac{dU}{dt} + \frac{d(KE)}{dt} + \frac{d(PE)}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (3.1)$$

นั่นก็คือ

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{E}_{massflow,i} - \dot{E}_{massflow,e} \quad (3.2)$$

เนื่องจากระบบนี้เป็นมิชเซอร์จึงสามารถตัดพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ออกไปได้และระบบนี้ไม่มีงานและความร้อนเกิดขึ้น

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) \quad (3.3)$$

สามารถเขียนในรูปย่อคือ

$$\dot{m}_i h_{total,i} = \dot{m}_e h_{total,e} \quad (3.4)$$

นำค่าเอนทัลปีระบบของมาแทนค่าจะได้

$$\dot{m}_2 h_3 + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_1 h_2 \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเป็นมิกเซอร์อัตราการไหลเข้าเท่ากับอัตราการไหลออกจะได้ว่า

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_w = \dot{m}_1 \quad (3.6)$$

แทนค่า \dot{m}_2 ลงในสมการที่ (3.6)

$$0 = (\dot{m}_1 - \dot{m}_w)h_3 + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_1 h_2 \quad (3.7)$$

$$\dot{m}_1(h_3 - h_2) = (h_3 - h_w)\dot{m}_w \quad (3.8)$$

$$\dot{m}_w = \frac{(h_3 - h_2)\dot{m}_1}{(h_3 - h_w)} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) จะได้สมการเพื่อที่จะคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำสเปรย์ที่จะควบคุม (\dot{m}_w) จากความสัมพันธ์การสมดุลพลังงานของแอทเท็มเพอเรเจอร์

ในขณะที่เดินเครื่องปกติอัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่งในซูเปอร์ฮีตเตอร์ (\dot{m}_1) ได้ถูกควบคุมตามโหลดของเครื่องกำเนิดไอน้ำค่าเอนทัลปีของไอน้ำก่อนแอทเท็มเพอเรเจอร์ (h_3) = $f(P, T_3)$ ค่าเอนทัลปีของไอน้ำหลังแอทเท็มเพอเรเจอร์ (h_2) = $f(P, T_2)$ และ (h_w) = $f(P_w, T_w)$ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ IAPWS-IF97 ในข้อ 3.3.2.3.2

3.3.2.3.2 การคำนวณหาค่าเอนทัลปีของน้ำและไอน้ำ

ในการคำนวณหาค่าเอนทัลปีของน้ำและไอน้ำนั้นจะใช้สูตรการคำนวณที่ได้จาก IAPWS-IF97 ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยเอนทัลปีคือฟังก์ชันของค่าความดันและอุณหภูมิของน้ำและไอน้ำ

การหาเอนทัลปีของน้ำสเปรย์

น้ำสเปรย์นั้นถือว่าเป็นของไหลอิมิตัวซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 °C ถึง 300 °C และมีความดันอยู่ในช่วง 0 Mpa ถึง 30 Mpa จึงใช้สมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 1 ในการคำนวณหาค่าเอนทัลปีดังสมการที่ (3.10)

$$\frac{g_1(P,T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} (\tau - 1.222)^{J_i} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 16.53 \text{ MPa}$ และ $T^* = 1386 \text{ K}$; $R = 0.461 \ 526 \ \text{KJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
ค่าสัมประสิทธิ์ n_i และตัวยกกำลัง I_i และ J_i แสดงในตารางที่ 2.4 ในบทที่ 2

ค่าเอนทัลปีจำเพาะของน้ำสเปร์ยคือ

$$h = g - T \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p \text{ เท่ากับ } \frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau \gamma_\tau \quad (3.11)$$

ซึ่ง

$$\gamma_\tau = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} J_i (\tau - 1.222)^{J_i - 1} \quad (3.12)$$

และนำสมการนี้ไปใส่ในระบบควบคุมเพื่อคำนวณหาค่าเอนทัลปีของน้ำสเปร์ย

การหาเอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่ง

ไอน้ำยวดยิ่งนั้นมีอุณหภูมิและความดันที่มีค่าสูงซึ่งอุณหภูมินั้นอยู่ในช่วง $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ถึง $600 \text{ }^\circ\text{C}$ และมีความดันอยู่ในช่วง 0 Mpa ถึง 30 Mpa ซึ่งเข้าข่ายของสมการพื้นฐานสำหรับพื้นที่ภูมิภาคส่วนที่ 2 ในการคำนวณหาค่าเอนทัลปีคือ

$$\frac{g_2(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^0(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, r) \quad (3.13)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $R = 0.461 \ 526 \ \text{KJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ เมื่อ $\gamma^0(\pi, \tau)$ และ $\gamma^r(\pi, r)$ นั้นคำนวณมาจากสมการที่ (3.14) และ (3.15)

- การหา $\gamma^0(\pi, \tau)$

$$\gamma^0(\pi, \tau) = \ln \pi + \sum_{i=1}^9 n_i^0 \tau^{I_i^0} \quad (3.14)$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 1 \text{ MPa}$ และ $T^* = 540 \text{ K}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_1^0 และ n_2^0 นั้นจะแสดงในตารางที่ 2.7 ในบทที่ 2

- การหา $\gamma^r(\pi, r)$

$$\gamma^r(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{43} n_i^r \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 1$ MPa และ $T^* = 540$ K ค่าสัมประสิทธิ์ n_i และตัวยกกำลัง I_i และ J_i แสดงในตารางที่ 2.8 ในบทที่ 2

ค่าเอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำยวดยิ่งคือ

$$h = g - T \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p \text{ เท่ากับ } \frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau (\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r) \quad (3.16)$$

ซึ่ง

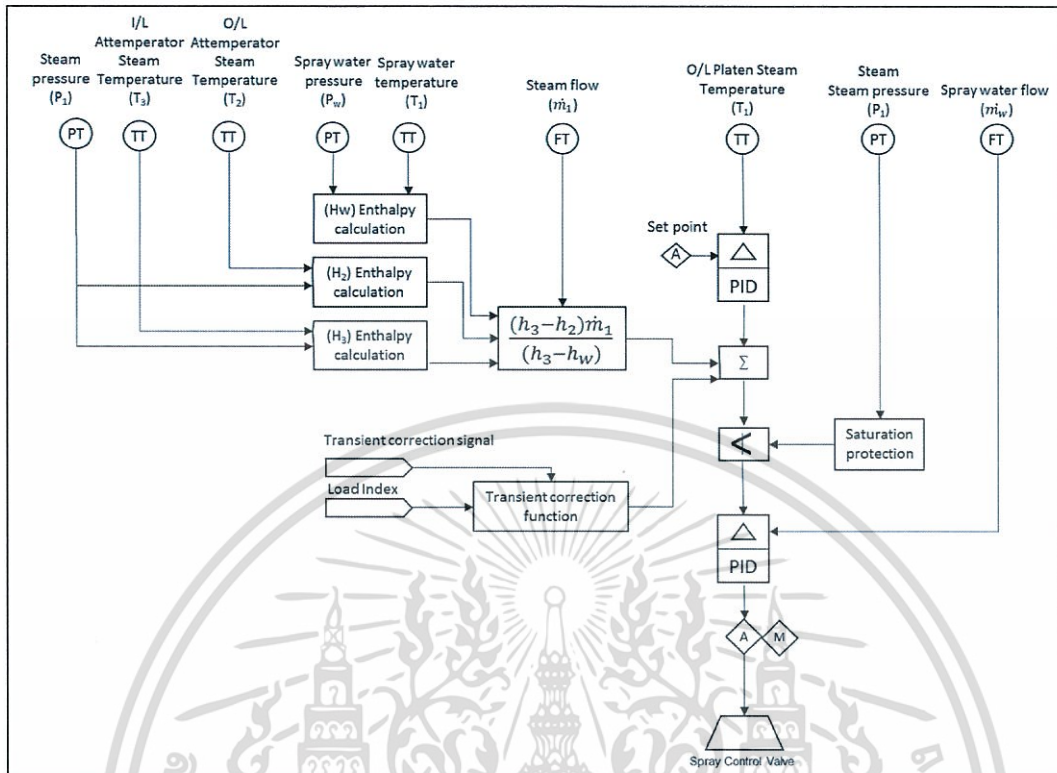
$$\gamma_\tau^o = \sum_{i=1}^9 n_i^o J_i^o \tau^{I_i^o - 1} \quad (3.17)$$

$$\gamma_\tau^r = \sum_{i=1}^{43} n_i^r \pi^{I_i^r} (\tau - 0.5)^{J_i^r - 1} \quad (3.18)$$

และนำสมการนี้ไปใส่ในระบบควบคุมเพื่อคำนวณหาค่าเอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่ง

3.3.3 โมเดลควบคุมสำหรับตัวควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง

นำสมการที่คำนวณการสมดุลพลังงานและตัวควบคุมทั้งตัวควบคุมอุณหภูมิและตัวควบคุมอัตราการไหลที่ได้ออกแบบมานี้มาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมควบคุมเพื่อที่จะใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง โดยในที่นี้จะเขียนในรูปแบบของไดอะแกรมซามา (SAMA Diagram) ตามมาตรฐานของ ISA (International Society of Automation) ซึ่งจากสมการที่ (3.8) รวมทั้งรูปที่ 3.14 สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมควบคุมได้ดังรูปที่ 3.17

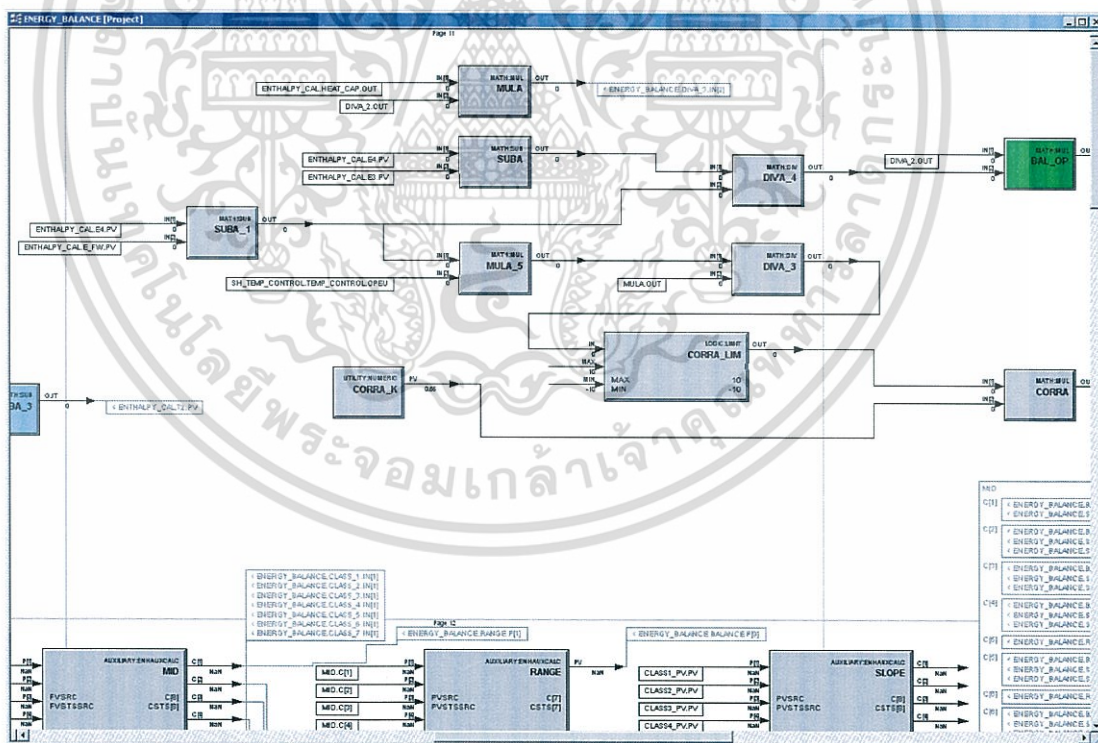
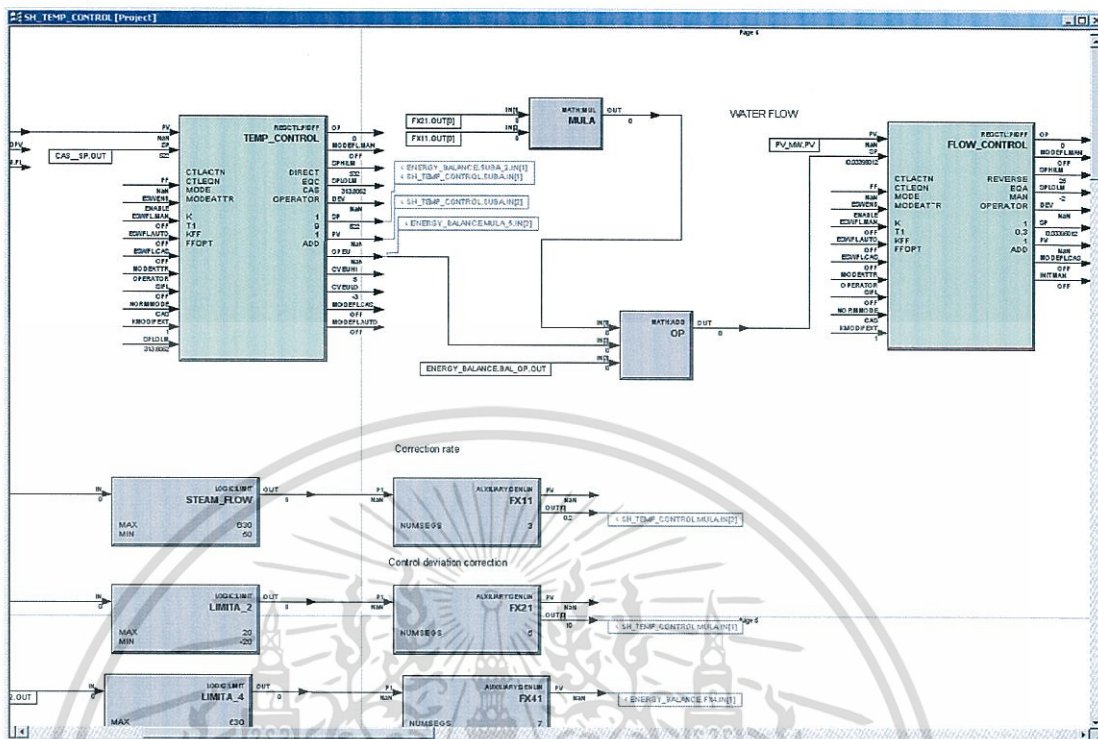


รูปที่ 3.16 โมเดลควบคุมของระบบควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง

3.3.4 การนำโมเดลควบคุมไปเขียนลงในระบบควบคุมกระจายส่วน

นำโมเดลควบคุมที่ออกแบบนี้มาเขียนเป็นฟังก์ชันบล็อกไดอะแกรมควบคุมในโปรแกรมคอนโทรลลิวต์เตอร์ของ Honeywell Experion PKS เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง โปรแกรมคอนโทรลลิวต์เตอร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมคอนฟิกเรชั่นสตูดิโอของ EPKS Release R.310 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการคอนฟิกระบบต่างๆของระบบควบคุมกระจายส่วน

เมื่อเขียนลอจิกทั้งหมดเข้าไปในระบบควบคุมกระจายส่วนด้วยโปรแกรมคอนโทรลลิวต์เตอร์แล้ว ฟังก์ชันบล็อกไดอะแกรมจะแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ฟังก์ชันบล็อกไดอะแกรมบนระบบควบคุมกระจายส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุม

การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ที่จะใช้ควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งนั้นจะใช้ไทรอัลแอนด์เออร์รี่ในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการนั้นได้แก่ค่า K หรือค่า Gain ของตัวควบคุม, ค่า Ti หรือค่าเวลาอินทิกรัล ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 พารามิเตอร์ในตัวควบคุมพีไอดีของตัวควบคุมคาคัดแคด

วิธี	Kp	Ti	Td
ตัวควบคุมอุณหภูมิ	1	9	0
ตัวควบคุมอัตราการไหล	1	0.3	1

3.4 สรุป

ระบบควบคุมไอน้ำยวดยิ่งนั้นมีส่วนประกอบหลักคือเครื่องกำเนิดไอน้ำ อุปกรณ์เครื่องมือวัดวาล์วควบคุมอัตราการไหล ระบบควบคุมกระจายส่วน และการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาคัดแคดที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวควบคุมหลักและตัวควบคุมอัตราการไหลเป็นตัวควบคุมรองร่วมกับการป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมดุพลังงานนำเสนอวิธีการออกแบบตัวสมดุพลังงานคำนวณค่าเอนทัลปีเพื่อใช้ในตัวสมดุพลังงานโดยใช้สมการจาก IAPWS-IF97 และนำไปเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมควบคุมเพื่อนำไปใช้งานบนระบบควบคุมกระจายส่วน โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการทดลองนำระบบควบคุมไปใช้งานนั้นจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 คำนำ

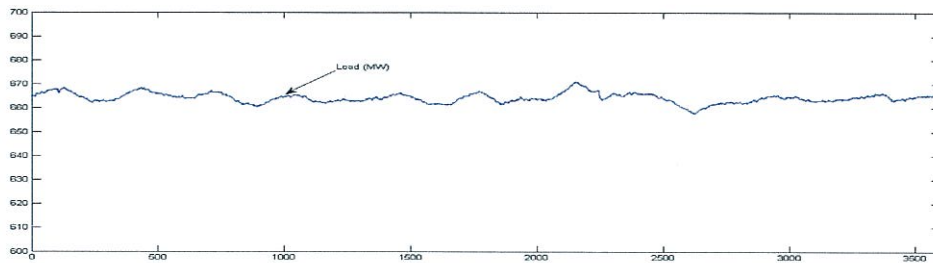
ในบทนี้จะเป็นการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งในหม้อไอน้ำโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดีคาคัดแคว่ร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยโมเดลตัวสมดุพลังงานที่มีการคำนวณด้วยวิธีการทางอุณหพลศาสตร์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงความซับซ้อนในกระบวนการการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการควบคุม การทดลองนี้จะทดลองในช่วงหม้อไอน้ำมีโหลดคงที่ 100% และช่วงหม้อไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลงโหลด และวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม

4.2 วิธีการทดลอง

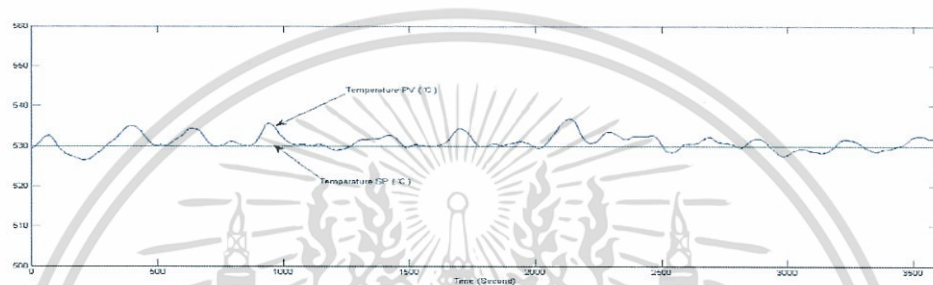
นำระบบควบคุมอุณหภูมิหม้อไอน้ำแบบพีไอดีคาคัดแคว่ร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยโมเดลตัวสมดุพลังงานที่มีการคำนวณด้วยวิธีการทางอุณหพลศาสตร์ที่ได้ออกแบบมาไปทดสอบการควบคุมในสถานการณ์ต่างๆทั้งการควบคุมในช่วงที่หม้อไอน้ำมีโหลดคงที่ 100 % และช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดของหม้อไอน้ำแบบทันทีทันใดและศึกษาผลการตอบสนองของระบบควบคุมในสถานการณ์ต่างๆ

4.3 ผลตอบสนองของระบบ

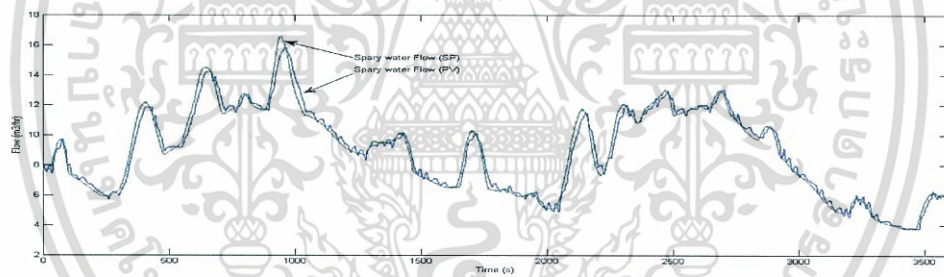
หลังจากนำระบบควบคุมอุณหภูมิหม้อไอน้ำแบบพีไอดีคาคัดแคว่ร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยโมเดลตัวสมดุพลังงานที่มีการคำนวณด้วยวิธีการทางอุณหพลศาสตร์ที่ได้ออกแบบมาไปทดสอบการควบคุมในสถานการณ์ต่างๆทั้งการควบคุมในช่วงที่หม้อไอน้ำมีโหลดคงที่ 100 % และช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดของหม้อไอน้ำแบบทันทีทันใดและศึกษาผลการตอบสนองของระบบควบคุมได้ผลดังนี้



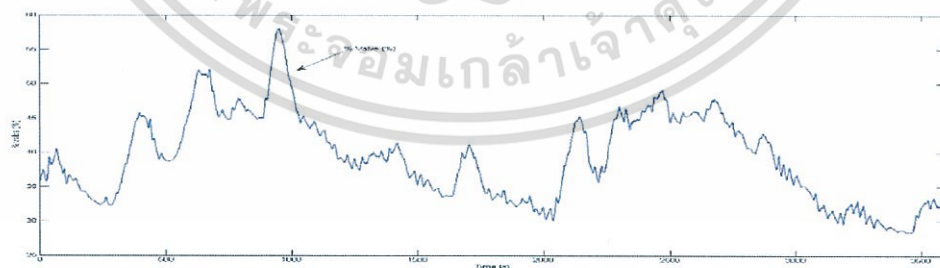
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของไหลดหม้อไอน้ำ (ข) แสดงค่าอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง (ค) แสดงอัตราการไหลของน้ำสเปรย์ (ง) แสดงตำแหน่งการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุมอัตราการไหล

4.3.1 ผลทดสอบการควบคุมขณะที่หม้อไอน้ำมีไหลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

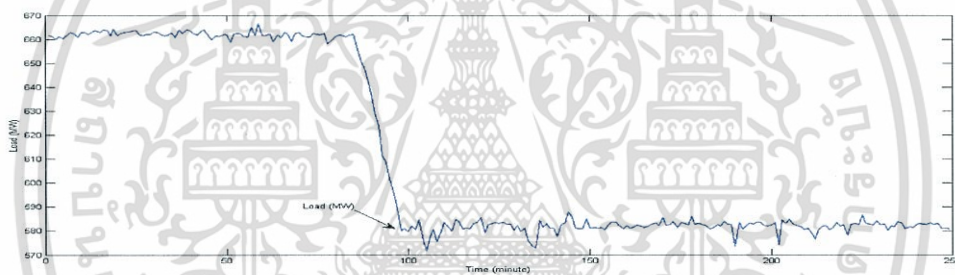
การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิหม้อไอน้ำในช่วงไหลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจะทดสอบในช่วงที่มีไหล $100\% \pm 1\%$ ค่าเซตพ้อยของตัวควบคุมอุณหภูมิคงที่ $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงในการควบคุมในช่วงที่หม้อไอน้ำมีไหลคงที่นั่นคือค่าไหลของหม้อไอน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ไม่คงที่ ทำให้ปริมาณความร้อนภายในหม้อไอน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตัวควบคุมอุณหภูมิจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งให้ได้ตามค่าเซตพ้อยที่ต้องการ ผลการทดสอบจะแสดงในรูปที่ 4.1 จากรูปที่ 4.1(ก) จะเห็นได้ว่าไหลของหม้อไอน้ำนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นอยู่กับปริมาณไหลของกังหันไอน้ำ ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงต้องปรับปริมาณเชื้อเพลิงตลอดเวลาและจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นมีค่าไม่คงที่ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งนั้นมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดแต่ทว่าระบบควบคุมไอน้ำยวดยิ่งนั้นได้ควบคุมอุณหภูมิต่อเนื่องทำให้ค่าอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งนั้นเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปที่ 4.1(ข) ระบบควบคุมอัตราการไหลนั้นทำงานได้เป็นอย่างดีแสดงได้จากค่าเซตพ้อยอัตราการไหลของน้ำสเปรย์และค่าอัตราการไหลของน้ำสเปรย์จากกระบวนการนั้นมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยมากไม่เกิน $\pm 1.5\text{ m}^3/\text{hr}$ แสดงในรูปที่ 4.1(ค) วาล์วควบคุมอัตราการไหลทำงานได้เป็นอย่างดีไม่มีการติดขัดของก้านวาล์วซึ่งดูได้จากรูปที่ 4.1(ง) วาล์วทำงานได้อย่างต่อเนื่องอยู่ในช่วงตำแหน่งเปิด-ปิด ระหว่าง 30 % ถึง 60 % แสดงว่า ระบบควบคุมไอน้ำยวดยิ่งที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดีคาดแคดร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยโมเดลตัวสมดุลพลังงานที่มีการคำนวณด้วยวิธีการทางอุณหพลศาสตร์นั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิช่วงหม้อไอน้ำไหลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยได้เป็นอย่างดี

4.3.2 ผลทดสอบการควบคุมขณะที่หม้อไอน้ำมีไหลเปลี่ยนแปลงฉับพลัน

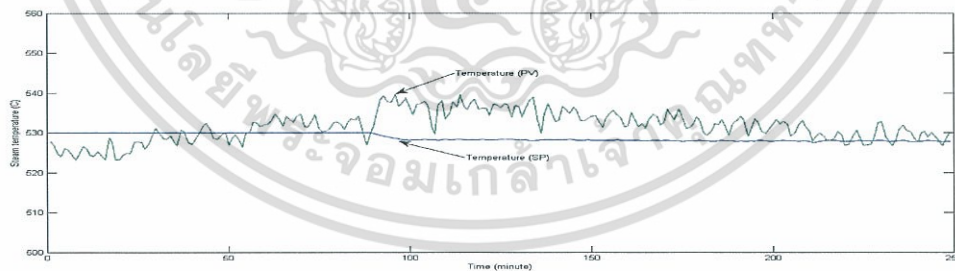
การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิหม้อไอน้ำในช่วงไหลเปลี่ยนแปลงฉับพลันจะทดสอบในช่วงที่มีไหล 100% - 85% และทดสอบในช่วง ไหล 85% - 100%

การทดสอบในช่วงโหลดลดลงจาก 100% - 85%ทำให้ค่าเซตพ้อยของตัวควบคุมอุณหภูมิค่อยๆ ลดลงจาก 530 °C ประมาณ 2-3 °C ขึ้นอยู่กับปริมาณของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป ขณะที่โหลดปรับตัวลดลงอย่างฉับพลันโดยปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำยังไม่ลดลงทำให้มีความร้อนสะสมภายในหม้อไอน้ำสูงมากส่งผลให้อุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งสูงขึ้นทันทีจาก 530 °C เป็น 540 °C ระบบควบคุมอุณหภูมิสั่งวาล์วควบคุมอัตรา

การไหลเปิดตัวทันทีจาก 0 - 75% เพื่อเปิดน้ำสเปรย์เพิ่มขึ้นจาก 2 - 16 m³/hour ทำให้ อุณหภูมิลดลงจาก 540 °C เป็น 530 °C จากระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงค่อยๆปรับลดปริมาณเชื้อเพลิงป้อนเข้าหม้อไอน้ำลง อุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งค่อยๆปรับลงมาสู่เซตพ้อยดังที่แสดงในรูปที่ 4.2

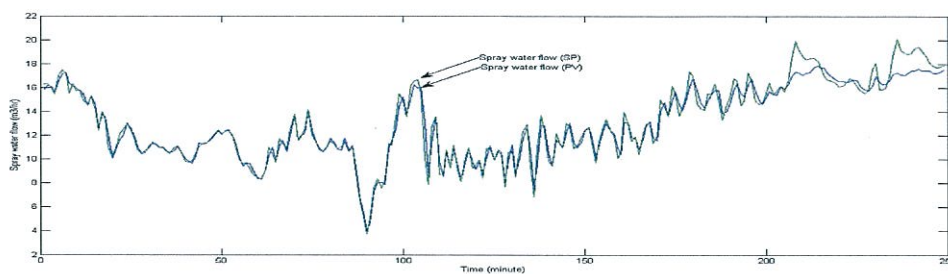


(ก)

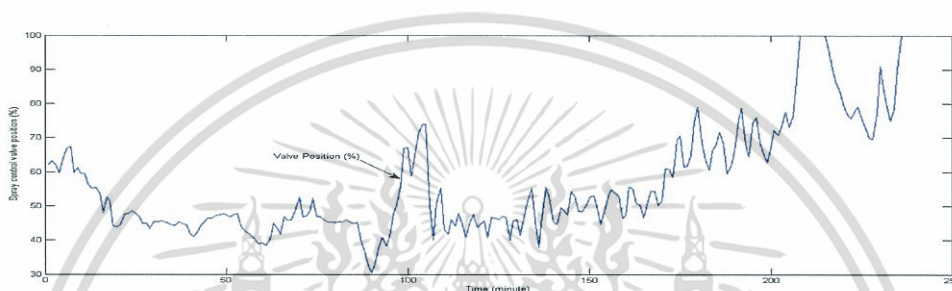


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



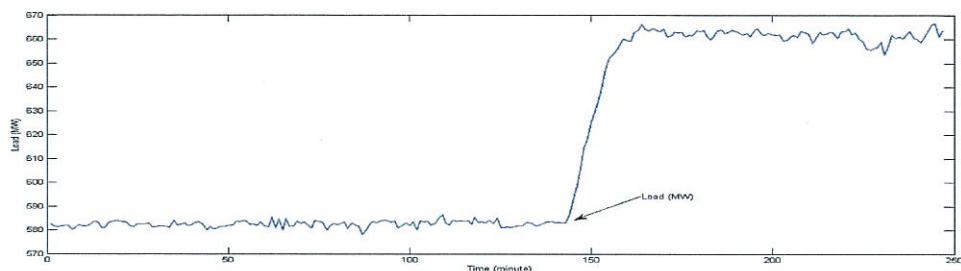
(ง)

รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงฉับพลันจาก 100% - 85%

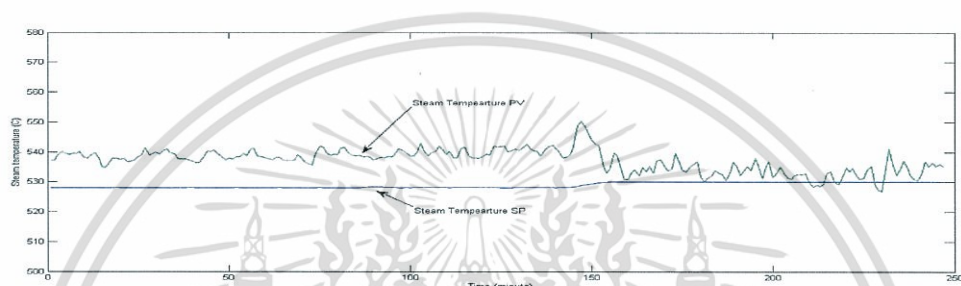
(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของโหลดหม้อไอน้ำ (ข) แสดงค่าอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง (ค) แสดงอัตราการไหลของน้ำสเปรย์ (ง) แสดงตำแหน่งการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุมอัตราการไหล

การทดสอบในช่วงโหลดเพิ่มขึ้นจาก 85%-100% ค่าเซตพ้อยของตัวควบคุมอุณหภูมิค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากประมาณ 527 °C ขึ้นอยู่กับปริมาณของโหลดที่เปลี่ยนแปลงอยู่ขณะนั้นปรับเพิ่มขึ้นเป็น 530 °C โดยในขณะเวลานั้นพลังงานความร้อนภายในหม้อไอน้ำมีมากมายเนื่องจากความไม่แน่นอนของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจนทำให้การควบคุมอุณหภูมิถึงขั้นลิมิตสูงสุดเห็นได้จากค่าเซตพ้อยวาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำสเปรย์นั้นสูงกว่าค่าอัตราการไหลน้ำสเปรย์จากกระบวนการแต่ที่ตำแหน่งวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำสเปรย์นั้นเปิด 100 % ต่อเนื่องแต่อุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งยังไม่ลดลง ในช่วงที่ปรับโหลดขึ้นหม้อไอน้ำถูกเรียกพลังงานความร้อนไปใช้งานเนื่องจากความต้องการของโหลดที่มากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งลดลงเข้ามาหาค่าเซตพ้อยและลดลงมาจนวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำสเปรย์นั้นค่อยๆ ปิดลงเรื่อยๆ เพื่อควบคุมอุณหภูมิไม่ต่ำจนเกินไป จนมาถึงย่านควบคุมดังรูปที่ 4.3

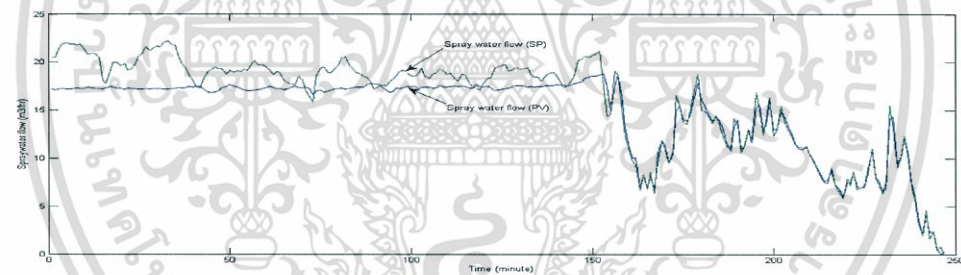
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



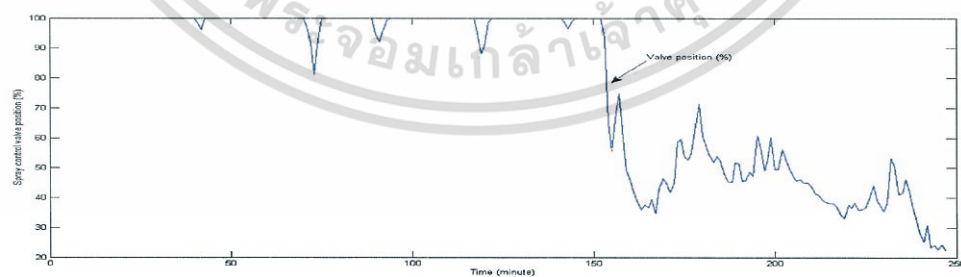
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงฉับพลันจาก 85% - 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของโหลดหม้อไอน้ำ (ข) แสดงค่าอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง (ค) แสดงอัตราการไหลของน้ำสเปรย์ (ง) แสดงตำแหน่งการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุมอัตราการไหล

4.4 สรุปผลการทดลอง

1. การทดสอบในช่วงโหลดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยพบว่าค่าอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งของระบบควบคุมนั้นมีการแกว่งไม่มากมีค่าไม่เกิน ± 5 °C โดยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเกิดจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามการควบคุมของน้ำสเปรย์นั้นแสดงให้เห็นผลตอบสนองที่รวดเร็วและแสดงให้เห็นกับการควบคุมการรบกวนจากภายนอกได้ดี

2. การทดสอบในช่วงโหลดเปลี่ยนแปลงฉับพลันจาก 100% - 85% ทำให้เซตพ้อยของอุณหภูมินั้นปรับลดลงแต่ค่าปริมาณความร้อนสะสมอยู่ในหม้อไอน้ำส่งผลให้อุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งสูงขึ้น แต่ทว่าระบบควบคุมนั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่เซตพ้อยได้ดีถึงแม้จะมีการรบกวนจากโหลดเข้ามารบกวน

3. การทดสอบในช่วงโหลดเปลี่ยนแปลงฉับพลันจาก 85% - 100% ทำให้เซตพ้อยของอุณหภูมินั้นปรับเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าค่าความไม่แน่นอนของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นทำให้มีปริมาณความร้อนสะสมอยู่ในหม้อไอน้ำจนทำให้ถึงจุดลิมิตของระบบ แต่เมื่อการปรับโหลดเพิ่มขึ้นทำให้มีการดึงพลังงานไปใช้งาน อุณหภูมิจึงลดลงและเข้าสู่ย่านการควบคุม แสดงให้เห็นสมรรถนะของตัวควบคุมที่ใช้งานจนถึงขีดสุด และกลับมาควบคุมอุณหภูมิจนเข้าสู่ย่านการควบคุมได้เป็นปกติ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งของหม้อไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีคาดเคลื่อนร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยโมเดลตัวสมดุพลังงานที่มีการคำนวณด้วยวิธีการทางอุณหพลศาสตร์นำระบบควบคุมไปใช้งานในสถานการณ์ที่โหลดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงฉับพลัน 100% - 85% และ โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงฉับพลัน 85% - 100% และศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุม ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบในช่วงโหลดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยพบว่าค่าอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งของระบบควบคุมนั้นมีการแกว่งไม่มากมีค่าไม่เกิน ± 5 °C โดยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเกิดจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามการควบคุมของน้ำสเปรย์นั้นแสดงให้เห็นผลตอบสนองที่รวดเร็วและแสดงให้เห็นกับการควบคุมการรบกวนจากภายนอกได้ดี

2. การทดสอบในช่วงโหลดเปลี่ยนแปลงฉับพลันจาก 100% - 85% ทำให้เชื้อเพลิงของอุณหภูมินั้นปรับลดลงแต่หาปริมาณความร้อนสะสมอยู่ภายในหม้อไอน้ำส่งผลให้อุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งสูงขึ้น แต่หาว่าระบบควบคุมนั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่เชื้อเพลิงได้ดีถึงแม้จะมีการรบกวนของโหลดเข้ามารบกวน

3. การทดสอบในช่วงโหลดเปลี่ยนแปลงฉับพลันจาก 85% - 100% ทำให้เชื้อเพลิงของอุณหภูมินั้นปรับเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าค่าความไม่แน่นอนของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นทำให้มีปริมาณความร้อนสะสมอยู่ภายในหม้อไอน้ำจนทำให้ถึงจุดลิมิตของระบบ แต่เมื่อการปรับโหลดเพิ่มขึ้นทำให้มีการดึงพลังงานไปใช้งาน อุณหภูมิจึงลดลงและเข้าสู่ย่านการควบคุม แสดงให้เห็นสมรรถนะของตัวควบคุมที่ใช้งานจนถึงขีดสุด และกลับมากควบคุมอุณหภูมิจนเข้าสู่ย่านการควบคุมได้เป็นปกติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการสร้างสมการเพื่อที่จะหาค่าเอนทาลปี (IAPWS-IF97) ควรสร้างสมการและทดสอบให้แน่ชัดเสียก่อนเพราะอาจมีความผิดพลาดเนื่องจากความซับซ้อนของสมการ

2. ความไม่แน่นอนของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นมีผลต่อกระบวนการควบคุมเป็นอย่างมาก หากเป็นไปได้เชื้อเพลิงที่ใช้งานควรจะต้องเป็นเชื้อเพลิงที่มีพลังงานค่อนข้างคงที่

3. การควบคุมอุณหภูมินั้นจะมีค่าคงที่ทางเวลาที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมตัวแปรอื่น เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานความร้อนจะต้องใช้เวลาในการแลกเปลี่ยนพลังงานผู้วิจัยควรพิจารณาเรื่องนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Control Systems Engineering, 3rd Ed. Norman S. Nise, 2000.
- [2] Automatic Control Systems, 7th Ed, Benjamin C. Kuo, Prentice-Hall, 1995.
- [3] Modern Control Engineering, 2nd Ed. Kattuhiko Ogata, Prentice-Hall, 1990.
- [4] Automated Process Control Systems: Concept and Hardware, 2nd Ed. Ronal P. Hunter.
- [5] D.E. Seborg, T.F. Edgar and D.A. Mellichamp, Process Dynamics and Control, John Wiley, New York, 1989.
- [6] เทอร์โมไดนามิกส์ 1 ,ผศ. ดร. จิตติน แดงเที่ยง คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยปี 2554
- [7] Geng Liang, Wen Li, Zhijun Li, "Control of superheated steam temperature in large-capacity generation units based on active disturbance rejection method and distributed control system," *Control Engineering Practice*, vol.21, pp. 268–285, 2013
- [8] Jianhua Zhang, Fenfang Zhang, Mifeng Ren, Guolian Hou, Fang Fang, "Cascade control of superheated steam temperature with neuro-PID controller," *ISA Transactions*, vol.51, pp. 778–785, 2012
- [9] A. Sanchez-Lopez, G. Arroyo-Figueroa, A. Villavicencio-Ramirez, "Advanced control algorithms for steam temperature regulation of thermal power plants," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 26, pp. 779–785, 2004
- [10] O-Shin KWON, Jin-Sung KIM, Sung-Man PARK, "MIMO Controller with Compensator via Gain tuning method for Steam Temperature Control of Thermal Power Plant," *Korea University Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul*, pp. 136-713
- [11] R. N. Silva, P. O. Shirley, J. M. Lemos, A. C. Goncalves, "Adaptive regulation of superheated steam temperature: a case study in an industrial boiler," *Control Engineering Practice*, vol. 8, pp. 1405-1415, 2000
- [12] Wolfgang Wagner, Hans-Joachim Kretzschmar, *Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97*, International Steam Tables, Second edition
- [13] Henrik granberg, *Modeling and Control of Post Combustion Capabilities to Improve Steam Production in a Utility Plant*. Control of a Process with Large Time Constants and Significant Time Delay Master's thesis 2013:EX002 ISSN 1652-8557
- [14] John B. Kitto and Steven C. Stultz., *Steam its generation and use. 41st edition* The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A. 2005
- [15] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย "การทดลองระบบควบคุมป้อนกลับห้องปฏิบัติการพื้นฐานระบบควบคุม" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 3 กันยายน 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[16] Tony R. Kuphaldt “Lessons In Industrial Instrumentation” Version 1.24 –April 8, 2012



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. กานต์ภพ สายอ่อน และ สักกรียา ชิตวงศ์ “การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาดเคลื่อนร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วน”การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 13 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 8-9 ธันวาคม 2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน
การประชุมวิชาการระดับชาติ



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่

13

The 13th KU-KPS Conference

ระหว่างวันที่ 8 - 9 ธันวาคม 2559

ณ อาคารศูนย์เรียนรวม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาสเคดร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานผ่านระบบควบคุมแบบกระจายส่วน

Control of superheated steam temperature in steam generation system using cascade combined with feed forward controller by balancing enthalpy via distributed control system

กานต์ภพ สายอ่อน¹ และ สักกรียา ชิตวงศ์¹

Kanpop Saion¹ and Sakreya Chitwong¹

บทคัดย่อ

การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นมีความสำคัญอย่างมากในระบบกำเนิดไอน้ำทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความปลอดภัย รวมถึงการยืดอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำ ตัวควบคุมอุณหภูมิพีไอดีคาสเคดแบบเดิมนั้นเป็นที่รู้กันดีว่ามีประสิทธิภาพที่จะชดเชยการรบกวน อย่างไรก็ตามการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งของหม้อไอน้ำแบบที่ใช้พลังงานความร้อนนั้นมีความซับซ้อนอย่างมากเนื่องจากมีความไม่เป็นเชิงเส้น การรบกวนจากการขึ้นลงของโหลดและมีค่าคงที่ของเวลาสูง ตัวควบคุมแบบคาสเคดร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยหลักการสมดุลพลังงานที่คำนวณด้วยโมเดลทางอุณหพลศาสตร์ ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงความซับซ้อนในกระบวนการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการควบคุม การทดลองนี้ทดลองในช่วงโหลดคงที่และช่วงโหลดเปลี่ยนแปลง พบว่าการนำตัวสมดุลพลังงานมาใช้ทำให้ระบบควบคุมนั้นมีเสถียรภาพที่ดีทั้งในช่วงที่โหลดคงที่ในขณะที่โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองที่รวดเร็วในการควบคุมต่อการรบกวนของโหลดได้เป็นอย่างดี

Abstract

Control of superheated steam temperature in steam generation system is essential for the efficiency, safety and incremental age of the boiler. Conventional cascade PID temperature control in the superheater system is known to be efficient to compensate disturbance. However, the complexity of thermal power plant due to nonlinearity, load disturbance and time delay of steam of superheater system are bigger than other control systems. The cascade loop with feed forward superheated steam temperature control with energy balance compensator using thermodynamic model has been used for the compensation the complexity structure of superheater. In order to improve performance of superheated steam temperature control. The experiment was implemented at both steady state and

¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

¹ Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Ladkrabang, Bangkok 10520

varied state of load. The cascade control combined with feed forward of energy balance of superheated steam temperature provided more stability at both steady state and varied state of load which shown fast response to compensate load disturbance

Keyword: cascade with feed forward, superheated steam temperature control, enthalpy balance

E-mail: kanpop.s@hotmail.com, sakreya.ch@kmitl.ac.th

NOMENCLATURE

C	specific heat (kJ/kg K)
h	specific enthalpy (kJ/kg)
m	mass (kg)
\dot{m}	mass flow (kg/s)
P	pressure (MPa)
Q	heat transferred (MJ)
T	temperature ($^{\circ}\text{C}$)
γ	Dimensionless Gibbs free energy, $\gamma = g / (RT)$
Δ	Difference in any quantity
δ	Reduced density, $\delta = \rho / \rho^*$
i	Serial number; Exponent
j	Serial number; Exponent
k	Boltzmann's constant
n	Coefficient
R	Specific gas constant
π	Reduced pressure, $\pi = p / p^*$
σ	Reduced entropy, $\sigma = s / s^*$
τ	Inverse reduced temperature, $\tau = T^* / T$
ϕ	Dimensionless Helmholtz free energy, $\phi = f / (RT)$

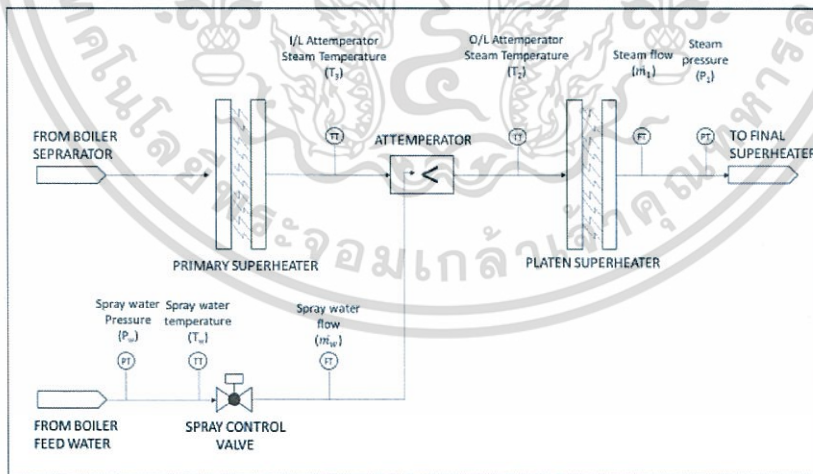
คำนำ

การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้มีเสถียรภาพ (Stability) นั้นมีความสำคัญอย่างมากในระบบกำเนิดไอน้ำทั้งในด้านของประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำ เนื่องจากหากอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงเกินไป จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบหม้อไอน้ำ (Boiler) และกังหันไอน้ำ (Steam turbine) หากอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งลดลงจากช่วงที่กำหนดจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง รวมทั้งการสิ้นเปลืองพลังงานและการเพิ่มขึ้นของมลภาวะที่ปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม และถ้าหากอุณหภูมิที่ต่ำมากจนเกินไปจะทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำยิ่งยวดกลายเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะสร้างความเสียหาย

ให้กับอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ของกังหันไอน้ำ [1] การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยิ่งยวดจึงเป็นอีกหนึ่งความท้าทายที่จะควบคุมโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ในทศวรรษที่ผ่านมา มีหลากหลายงานวิจัยที่คิดค้นวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยิ่งยวด เนื่องจากระบบหม้อไอน้ำมีความซับซ้อนสูง มีปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องหลายปัจจัยเช่น มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ความไม่แน่นอนและการรบกวนของการขึ้นลงของโหลด [2,3] อีกทั้งกระบวนการควบคุมอุณหภูมินั้นเป็นกระบวนการที่ตอบสนองช้าเพราะมีค่าคงที่ของเวลาที่สูง [7] จำเป็นที่จะต้องมีระบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยิ่งยวดได้ดีเพื่อให้ไปสู่ความต้องการต่างๆ ที่กล่าวมา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยิ่งยวดในระบบกำเนิดไอน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาคเดร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้า ด้วยหลักการสมมูลพลังงานที่คำนวณด้วยโมเดลทางอุณหพลศาสตร์ เนื่องจากตัวควบคุมแบบคาคเดร่นั้นมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่มีการรบกวนสูง[4] และจะเพิ่มความสามารถของตัวควบคุมด้วยการป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมมูลพลังงาน และศึกษาผลตอบสนองของกระบวนการและพฤติกรรมของตัวควบคุมขณะที่โหลดคงที่และช่วงโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง

กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยิ่งยวด

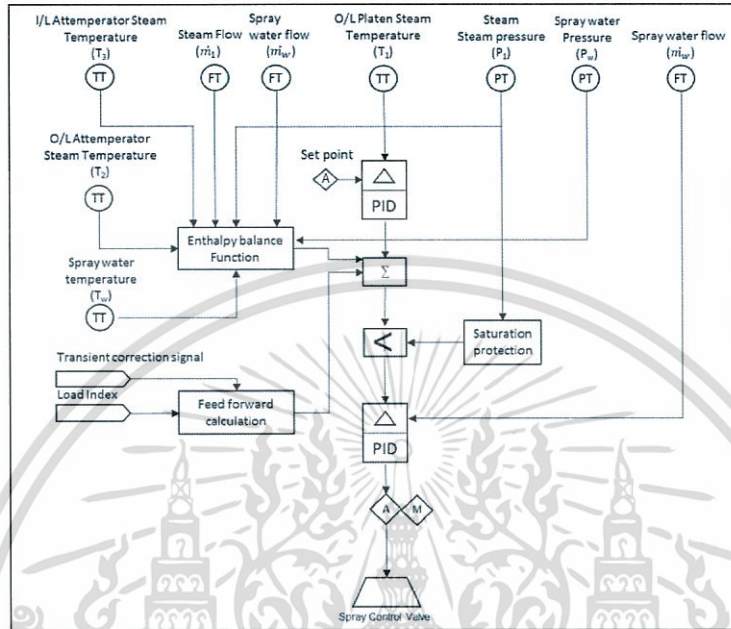
ในระบบควบคุมของงานวิจัยนี้จะควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยิ่งยวดโดยไอน้ำจาก Primary superheater ผ่าน Attemperator ไปที่ Platen superheater โดย Attemperator จะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยการสเปรย์น้ำเพื่อลดอุณหภูมิไอน้ำร้อนยิ่งยวด ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่สเปรย์ด้วยวาล์วควบคุม ดังกระบวนการแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยิ่งยวด

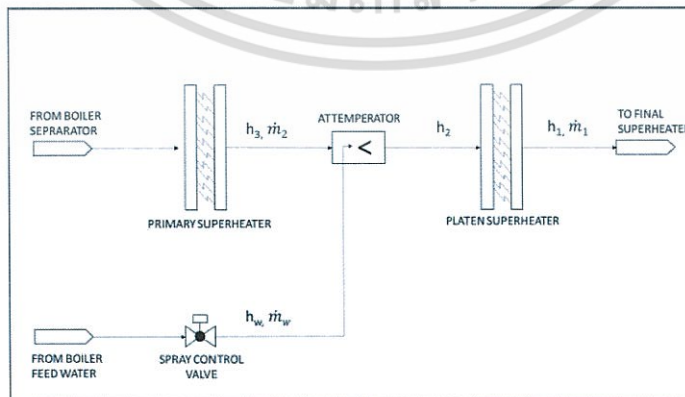
ระบบควบคุมจะออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาคเดร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมมูลพลังงาน โดยกำหนดให้ ตัวควบคุมอุณหภูมิ ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิไอน้ำยิ่งยวดเป็นตัวควบคุมหลักและตัวควบคุมอัตราการไหลของน้ำสเปรย์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมรอง ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

สเปรย์ที่จะเข้าไปลดอุณหภูมิที่ Attenuator โดยจะรับค่าการควบคุมจากตัวควบคุมหลักตัวควบคุมขาดแคลน จะถูกป้อนไปข้างหน้าด้วยโมเดลสมดุลพลังงาน ซึ่งจะใช้การคำนวณโดยหลักการทางอุณหพลศาสตร์เข้าไปในระบบควบคุมเพื่อสร้างเป็นโมเดลควบคุม



รูปที่ 2 การออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง

ในระบบควบคุมขาดแคลนจะประกอบด้วย ลูปด้านในจะเป็นตัวควบคุมวาล์ว ลูปด้านนอกจะเป็นเซตพ้อยของลูปด้านในพร้อมกับการป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมดุลพลังงาน ลูปด้านในจะทำหน้าที่จัดการกับการรบกวนที่รวดเร็วที่เกิดขึ้นในระบบ (จากวาล์วและการผสมกันของน้ำและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง) จากการเพิ่มขึ้นของการรบกวนที่ช้าๆ (จากหลักของอุณหพลศาสตร์ที่ Superheater) การป้อนไปข้างหน้าจะทำให้จัดการกับการรบกวนที่จะเกิดขึ้นได้ดี ส่วนลูปด้านนอกนั้นจะทำหน้าที่ชดเชยค่าผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการในโมเดลการสมดุลพลังงาน [5] ตัวควบคุมแบบขาดแคลนร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมดุลพลังงานจะแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 3 พารามิเตอร์การควบคุม

การออกแบบโมเดลควบคุม

การออกแบบโมเดลสมดุลพลังงาน

กำหนดให้อัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่งก่อนที่จะสเปรย์น้ำคือ \dot{m}_2 อัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่งหลังจากสเปรย์น้ำคือ \dot{m}_1 และอัตราการไหลของน้ำที่สเปรย์คือ \dot{m}_w เอนทัลปีจำเพาะของน้ำที่สเปรย์คือ h_w เอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่งก่อนการสเปรย์น้ำคือ h_3 เอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่งหลังการสเปรย์น้ำคือ h_2 และค่าเอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่งสุดท้ายคือ h_1 ดังรูปที่ 3

จากการสมดุลมวลของ Attenuator

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_w = \dot{m}_1 \quad 1$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานของ Attenuator

$$\dot{m}_2 h_3 + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_1 h_2 \quad 2$$

แทนค่าสมการที่ 1 ลงในสมการที่ 2

$$0 = (\dot{m}_1 - \dot{m}_w) h_3 + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_1 h_2 \quad 3$$

$$\dot{m}_1 (h_3 - h_2) = (h_3 - h_w) \dot{m}_w \quad 4$$

$$\dot{m}_w = \frac{(h_3 - h_2) \dot{m}_1}{(h_3 - h_w)} \quad 5$$

จากสมการที่ 5 จะได้สมการเพื่อที่จะคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำสเปรย์ที่จะควบคุม (\dot{m}_w) จากความสัมพันธ์การสมดุลพลังงานของ Attenuator

ในขณะที่เดินเครื่องปกติอัตราการไหลของไอน้ำยวดยิ่งใน superheater (\dot{m}_1) ได้ถูกควบคุมตามโหลดของหม้อไอน้ำ ค่าเอนทัลปีของไอน้ำก่อน Attenuator (h_3) = $f(P, T_3)$ ค่าเอนทัลปีของไอน้ำหลัง Attenuator (h_2) = $f(P, T_2)$ และ (h_w) = $f(P_w, T_w)$ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ IAPWS-IF97[6]

การหาค่าเอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่งและน้ำสเปรย์

ในการคำนวณหาเอนทัลปี ของน้ำและไอน้ำนั้นใช้สูตรการคำนวณจาก IAPWS-IF97[6] ซึ่งจะแบ่งย่านการหาออกเป็นสองย่านคือย่านของ Basic equation region 1 และ Basic equation region 2 ซึ่งก็คือน้ำสเปรย์และไอน้ำยวดยิ่งตามลำดับ



การหาเอเลททัลปีของน้ำสเปร์ย์

สมการหาเอเลททัลปีของ IAPWS-IF97 Basic equation region 1

$$h = g - T \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p \text{ is } \frac{h(\tau, \pi)}{RT} = \tau \gamma_\tau \quad 6$$

และ

$$\gamma_\tau = \sum_{i=1}^{24} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} J_i (\tau - 1.222)^{J_i - 1} \quad 7$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 16.53 \text{ MPa}$ และ $T^* = 1386 \text{ K}$; $R = 0.461526 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_i และตัวยกกำลัง I_i และ J_i แสดงในตารางของ IAPWS-IF97 ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1
สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการที่ 7

I	I _i	J _i	n _i	I	I _i	J _i	n _i
1	0	-2	0.146 329 712 131 67	18	2	-3	-0.441 418 453 308 46 × 10 ⁻⁵
2	0	-1	-0.845 481 871 691 14	19	2	17	-0.726 949 982 975 94 × 10 ⁻¹⁵
3	0	0	-0.375 636 036 720 40 × 10 ¹	20	3	-4	-0.316 796 448 450 54 × 10 ⁻⁴
4	0	1	0.338 551 691 683 85 × 10 ¹	21	3	0	-0.282 707 979 853 12 × 10 ⁻⁵
5	0	2	-0.957 919 633 878 72	22	3	6	-0.852 051 281 201 03 × 10 ⁻⁹
6	0	3	0.157 720 385 132 28	23	4	-5	-0.224 252 819 080 00 × 10 ⁻⁵
7	0	4	-0.166 164 171 995 01 × 10 ⁻¹	24	4	-2	-0.651 712 228 956 01 × 10 ⁻⁶
8	0	5	0.812 146 299 835 68 × 10 ⁻³	25	4	10	-0.143 417 299 379 24 × 10 ⁻¹²
9	1	-9	0.283 190 801 238 04 × 10 ⁻³	26	5	-8	-0.405 169 968 601 17 × 10 ⁻⁶
10	1	-7	-0.607 063 015 658 74 × 10 ⁻³	27	8	-11	-0.127 343 017 416 41 × 10 ⁻⁸
11	1	-1	-0.189 900 682 184 19 × 10 ⁻¹	28	8	-6	-0.174 248 712 306 34 × 10 ⁻⁹
12	1	0	-0.325 297 487 705 05 × 10 ⁻¹	29	21	-29	-0.687 621 312 955 31 × 10 ⁻¹⁸
13	1	1	-0.218 417 171 754 14 × 10 ⁻¹	30	23	-31	0.144 783 078 285 21 × 10 ⁻¹⁹
14	1	3	-0.528 383 579 699 30 × 10 ⁻⁴	31	29	-38	0.263 357 816 627 95 × 10 ⁻²²
15	2	-3	-0.471 843 210 732 67 × 10 ⁻³	32	30	-39	-0.119 476 226 400 71 × 10 ⁻²²
16	2	0	-0.300 017 807 930 26 × 10 ⁻³	33	31	-40	0.182 280 945 814 04 × 10 ⁻²³
17	2	1	0.476 613 939 069 87 × 10 ⁻⁴	34	32	-41	-0.935 370 872 924 58 × 10 ⁻²⁵

การหาเอนทัลปีของไอน้ำยวดยิ่ง

สมการหาเอนทัลปีของ IAPWS-IF97 Basic equation region 2

$$h = g - T \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p \text{ is } \frac{h(\tau, \omega)}{RT} = \tau (\gamma_c^o + \gamma_c^r) \quad 8$$

$$\gamma_c^o = \sum_{i=1}^3 n_i J_i^o \tau^{i-1} \quad 9$$

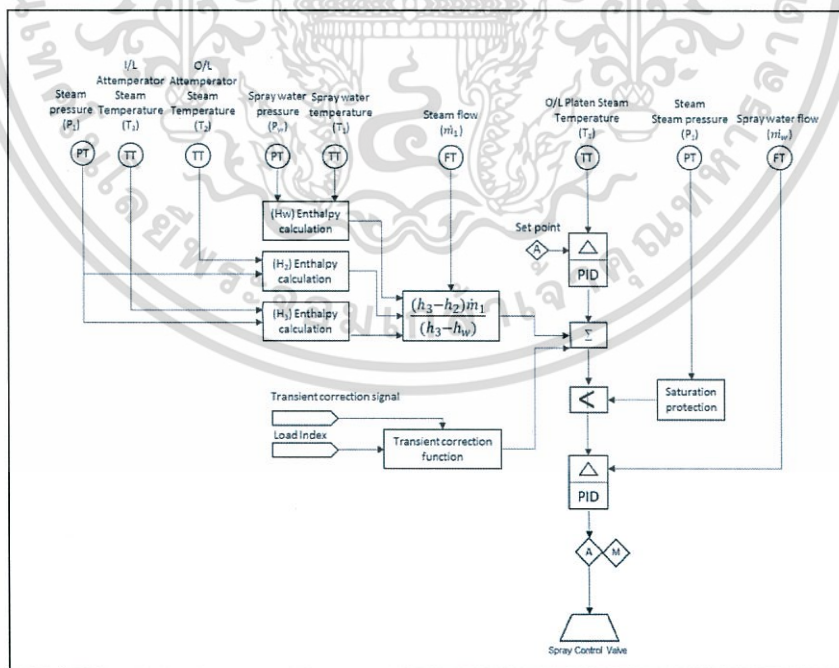
และ

$$\gamma_c^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^i J_i^r (\tau - 0.5)^{i-1} \quad 10$$

ซึ่ง $\pi = p/p^*$ และ $\tau = T^*/T$ ซึ่ง $p^* = 1 \text{ MPa}$ และ $T^* = 540 \text{ K}$; $R = 0.461526 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ค่าสัมประสิทธิ์ n_i และตัวยกกำลัง I_i และ J_i แสดงในตารางของ IAPWS-IF97 ในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

วิธีการทดลอง

การใช้ตัวควบคุมแบบคาสแคดร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมมูลพลังงานที่ใช้ควบคุมที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์และมาเขียนเป็นโมเดลควบคุมเพื่อที่จะใช้ในการควบคุมดังรูปที่ 4 และนำโมเดลนี้ไปเขียน Function Block Diagram ลงในระบบควบคุมกระจายส่วน Distributed Control System (DCS) ดังรูปที่ 5 เพื่อใช้ในการควบคุมหม้อไอน้ำและใช้ควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งทั้งในสถานการณ์โหลดคงที่และโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4 แสดงโมเดลของระบบควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่ง

ตารางที่ 2

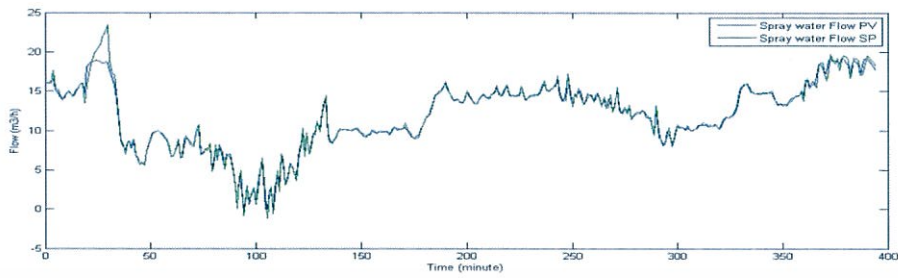
สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการที่ 9

i	J_i^*	n_i^*	i	J_i^*	n_i^*
1	0	$-0.969\ 276\ 865\ 002\ 17 \times 10^1$	6	-2	$0.142\ 408\ 191\ 714\ 44 \times 10^1$
2	1	$0.100\ 866\ 559\ 680\ 18 \times 10^2$	7	-1	$-0.438\ 395\ 113\ 194\ 50 \times 10^1$
3	-5	$-0.560\ 879\ 112\ 830\ 20 \times 10^2$	8	2	$-0.284\ 086\ 324\ 607\ 72$
4	-4	$0.714\ 527\ 380\ 814\ 55 \times 10^{-1}$	9	3	$0.212\ 684\ 637\ 533\ 07 \times 10^{-1}$
5	-3	$-0.407\ 104\ 982\ 239\ 28$			

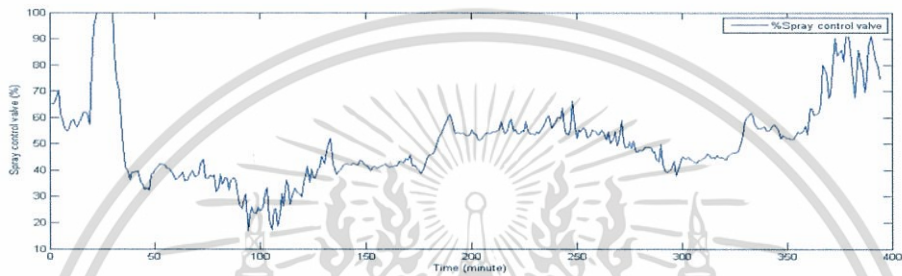
ตารางที่ 3

สัมประสิทธิ์และตัวยกกำลังของสมการที่ 10

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	1	0	$-0.177\ 317\ 424\ 732\ 13 \times 10^{-2}$	23	7	0	$-0.590\ 595\ 643\ 242\ 70 \times 10^{-17}$
2	1	1	$-0.178\ 348\ 622\ 923\ 58 \times 10^{-1}$	24	7	11	$-0.126\ 218\ 088\ 991\ 01 \times 10^{-5}$
3	1	2	$-0.459\ 960\ 136\ 963\ 65 \times 10^{-1}$	25	7	25	$-0.389\ 468\ 424\ 357\ 39 \times 10^{-1}$
4	1	3	$-0.575\ 812\ 590\ 834\ 32 \times 10^{-1}$	26	8	8	$0.112\ 562\ 113\ 604\ 59 \times 10^{-10}$
5	1	6	$-0.503\ 252\ 787\ 279\ 30 \times 10^{-1}$	27	8	36	$-0.823\ 113\ 408\ 979\ 98 \times 10^1$
6	2	1	$-0.330\ 326\ 416\ 702\ 03 \times 10^{-1}$	28	9	13	$0.198\ 097\ 128\ 020\ 88 \times 10^{-7}$
7	2	2	$-0.189\ 489\ 875\ 163\ 15 \times 10^{-3}$	29	10	4	$0.104\ 069\ 652\ 101\ 74 \times 10^{-18}$
8	2	4	$-0.393\ 927\ 772\ 433\ 55 \times 10^{-2}$	30	10	10	$-0.102\ 347\ 470\ 959\ 29 \times 10^{-12}$
9	2	7	$-0.437\ 972\ 956\ 505\ 73 \times 10^{-1}$	31	10	14	$-0.100\ 181\ 793\ 795\ 11 \times 10^{-9}$
10	2	36	$-0.266\ 745\ 479\ 140\ 87 \times 10^{-4}$	32	16	29	$-0.808\ 829\ 086\ 469\ 85 \times 10^{-10}$
11	3	0	$0.204\ 817\ 376\ 923\ 09 \times 10^{-7}$	33	16	50	$0.106\ 930\ 318\ 794\ 09$
12	3	1	$0.438\ 706\ 672\ 844\ 35 \times 10^{-5}$	34	18	57	$-0.336\ 622\ 505\ 741\ 71$
13	3	3	$-0.322\ 776\ 772\ 385\ 70 \times 10^{-4}$	35	20	20	$0.891\ 858\ 453\ 554\ 21 \times 10^{-24}$
14	3	6	$-0.150\ 339\ 245\ 421\ 48 \times 10^{-3}$	36	20	35	$0.306\ 293\ 168\ 762\ 32 \times 10^{-12}$
15	3	35	$-0.406\ 682\ 535\ 626\ 49 \times 10^{-1}$	37	20	48	$-0.420\ 024\ 676\ 982\ 08 \times 10^{-5}$
16	4	1	$-0.788\ 473\ 095\ 593\ 67 \times 10^{-9}$	38	21	21	$-0.590\ 560\ 296\ 856\ 39 \times 10^{-25}$
17	4	2	$0.127\ 907\ 178\ 522\ 85 \times 10^{-7}$	39	22	53	$0.378\ 269\ 476\ 134\ 57 \times 10^{-5}$
18	4	3	$0.482\ 253\ 727\ 185\ 07 \times 10^{-6}$	40	23	39	$-0.127\ 686\ 089\ 346\ 81 \times 10^{-14}$
19	5	7	$0.229\ 220\ 763\ 376\ 61 \times 10^{-5}$	41	24	26	$0.730\ 876\ 105\ 950\ 61 \times 10^{-28}$
20	6	3	$-0.167\ 147\ 664\ 510\ 61 \times 10^{-10}$	42	24	40	$0.554\ 147\ 153\ 507\ 78 \times 10^{-16}$
21	6	16	$-0.211\ 714\ 723\ 213\ 55 \times 10^{-2}$	43	24	58	$-0.943\ 697\ 072\ 412\ 10 \times 10^{-6}$
22	6	35	$-0.238\ 957\ 419\ 341\ 04 \times 10^2$				



(ค)



(ง)

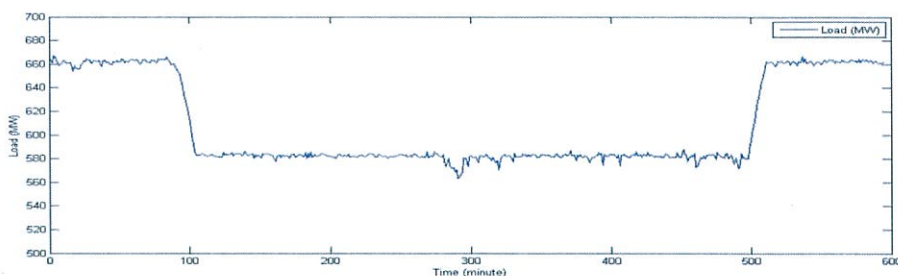
รูปที่ 6 กราฟแสดงการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งในสถานการณ์โหลดคงที่ (ก) โหลดหม้อไอน้ำ, (ข)

อุณหภูมิไอน้ำ (ค) อัตราการไหลน้ำสเปรย์และ (ง) ตำแหน่งของวาล์วควบคุม

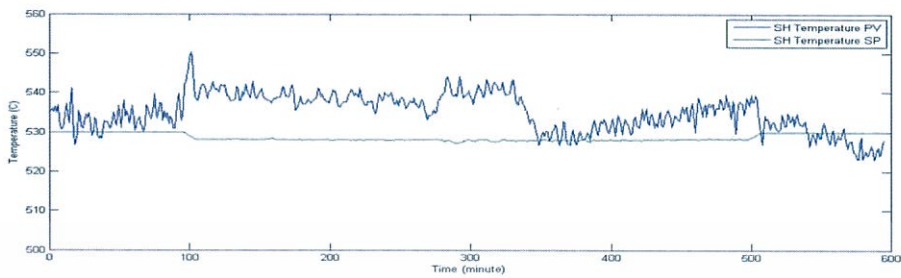
จากรูปที่ 6 เป็นการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในขณะช่วงโหลดคงที่ ค่าเซตพ้อยของการควบคุมอุณหภูมินี้ตั้งไว้ที่ 530°C โดยพบว่าค่าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งของระบบควบคุมนั้นมีการแกว่งไม่มากคือมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 535.06°C และค่าต่ำสุดของย่านอยู่ที่ 526.18°C การแกว่งในช่วงโหลดคงที่นั้นไม่เกิน $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่ค่าพลังงานและปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามการควบคุมของน้ำสเปรย์นั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในย่านควบคุมแสดงให้เห็นผลตอบสนองที่รวดเร็วและการขาดเซกการรบกวนจากภายนอกได้

การทดสอบในช่วงโหลดเปลี่ยนแปลงขึ้นและลง

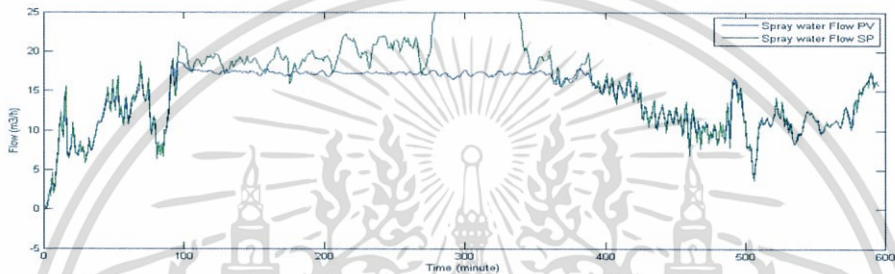
การทดสอบระบบควบคุมไอน้ำยวดยิ่งในช่วงที่เปลี่ยนแปลงโหลดนั้นเราจะทดสอบในช่วงที่โหลดเปลี่ยนแปลงจาก 100% และลดโหลดลงมาที่ 85% จากนั้นก็เพิ่มโหลดไปที่ 100% ดังเดิมและดูการเปลี่ยนแปลงและผลตอบสนองของระบบควบคุมดังรูปที่ 7



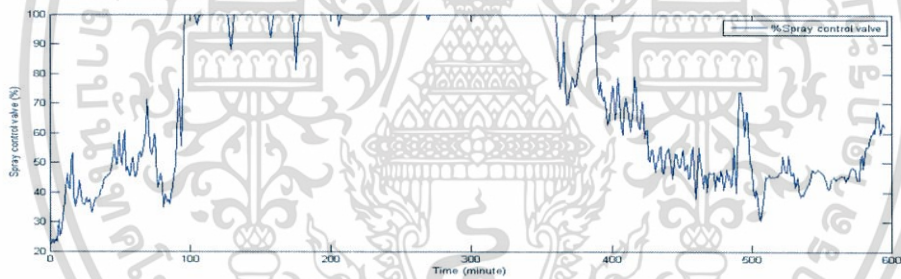
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 7 กราฟแสดงการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งในสถานการณ์โหลดเปลี่ยนแปลงขึ้นและลง (ก) โหลดหม้อไอน้ำ, (ข) อุณหภูมิไอน้ำ (ค) อัตราการไหลน้ำเปรย์ และ (ง) ตำแหน่งของวาล์วควบคุม

จากรูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงการตอบสนองของระบบควบคุมไอน้ำยวดยิ่งขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงโดยโหลดเปลี่ยนแปลงจาก 100% ลงมาเหลือ 85% และกลับไปเป็น 100% ดับพลัน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ค่าเซตพอยต์เปลี่ยนแปลงจาก 530 °C เป็น 528 °C ส่งผลให้ค่าเซตพอยต์ของน้ำเปรย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลกระทบของ Load disturbance แต่ทว่าปริมาณของความร้อนภายในหม้อไอน้ำนั้นมาก รวมถึงระบบการปรับลดเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำทำได้ช้า ทำให้อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นสูงขึ้นจนเกินกำลังของระบบ ค่าอัตราการไหลของน้ำเปรย์นั้นพุ่งสูงขึ้นจนกระทั่ง Spray control valve นั้นเปิด 100% ยังไม่สามารถลดอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งได้ จนกระทั่งเมื่อสเปรย์ไประยะหนึ่งจนอุณหภูมิของไอน้ำลดลงเข้าสู่ย่านการควบคุม จะเห็นได้ว่าวาล์วควบคุมนั้นกลับเข้ามาทำงานตามค่าเซตพอยต์และสามารถเข้าสู่การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งได้อีกครั้ง.

สรุปผลและเสนอแนะ

การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำยวดยิ่งโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาดเคลื่อนร่วมกับตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวสมดุพลังงานนั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างดีในช่วงโหลดคงที่จากผลการทดลอง ค่าอุณหภูมิต่ำสุดและค่าอุณหภูมิสูงสุดนั้นแตกต่างกันไม่มากเพียงแค่ว่าประมาณ ไม่เกิน $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าสูงสุดอยู่ที่ 535.06°C และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 526.18°C และเมื่อระบบควบคุมนำไปใช้กับช่วงของการเปลี่ยนแปลงโหลดดับพลันระบบควบคุมแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองที่รวดเร็วในการควบคุมต่อการรบกวนของโหลดได้เป็นอย่างดี แม้จะมีค่าการรบกวนจากภายนอกสูงก็ตาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Geng Liang, Wen Li, Zhijun Li, "Control of superheated steam temperature in large-capacity generation units based on active disturbance rejection method and distributed control system," *Control Engineering Practice*, vol. 21, pp. 268–285, 2013
- [2] Jianhua Zhang, Fenfang Zhang, Mifeng Ren, Guolian Hou, Fang Fang, "Cascade control of superheated steam temperature with neuro-PID controller," *ISA Transactions*, vol. 51, pp. 778–785, 2012
- [3] A. Sanchez-Lopez, G. Arroyo-Figueroa, A. Villavicencio-Ramirez, "Advanced control algorithms for steam temperature regulation of thermal power plants," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 26, pp. 779–785, 2004
- [4] O-Shin KWON, Jin-Sung KIM, Sung-Man PARK, "MIMO Controller with Compensator via Gain tuning method for Steam Temperature Control of Thermal Power Plant," *Korea University Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul*, pp. 136-713
- [5] R. N. Silva, P. O. Shirley, J. M. Lemos, A. C. Goncalves, "Adaptive regulation of super-heated steam temperature: a case study in an industrial boiler," *Control Engineering Practice*, vol. 8, pp. 1405-1415, 2000
- [6] WolfgangWagner, Hans-Joachim Kretzschmar, *Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97*, International Steam Tables, Second edition
- [7] Henrik granberg, *Modeling and Control of Post Combustion Capabilities to Improve Steam Production in a Utility Plant*. Control of a Process with Large Time Constants and Significant Time Delay Master's thesis 2013:EX002 ISSN 1652-8557

ภาคผนวก ข

นิยามตัวแปรต่างๆ

C	Specific heat
h	Specific enthalpy
s	Specific entropy
u	Specific internal energy
v	Specific volume
w	Speed of sound
m	Mass
\dot{m}	Mass flow
P	Pressure
Q	Heat transferred
T	Temperature
ρ	Density
R	Specific gas constant
Ψ	Dimensionless Gibbs free energy, $\Psi = g / (RT)$
Δ	Difference in any quantity
δ	Reduced density, $\delta = \rho / \rho^*$
l	Exponent
J	Exponent
i	Serial number; Exponent
j	Serial number; Exponent
k	Boltzmann's constant
n	Coefficient
R	Specific gas constant
π	Reduced pressure, $\pi = p / p^*$
σ	Reduced entropy, $\sigma = s / s^*$
τ	Inverse reduced temperature, $\tau = T^* / T$
ϕ	Dimensionless Helmholtz free energy, $\phi = f / (RT)$
α_v	Isobaric cubic expansion coefficient
K_T	Isothermal compressibility

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายกานต์ภพ สายอ่อน
วัน-เดือน-ปีเกิด	วันที่ 25 มีนาคม 2531
ที่อยู่	105 หมู่ 8 ตำบล กุมภวาปี อำเภอ กุมภวาปี จังหวัด อุดรธานี 41110
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2552 และในปีการศึกษา 2555 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้